

Verbundprojekt REPTIL Schlussbericht

Entwicklung eines Reparaturverfahrens für Triebwerksschaufeln aus Titanaluminiden mit generativem Laserauftragschweißen
Teilvorhaben Access e.V.



access

powered by technology



Verbundprojekt REPTIL Schlussbericht

Entwicklung eines Reparaturverfahrens für Triebwerksschaufeln aus Titanaluminiden mit generativem Laserauftragschweißen

Teilvorhaben Access e.V.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 20T1311B
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2014 bis 31.12.2016
Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 31.12.2016

Projektleiter: Dipl.-Ing. Michael Mathes Telefon: 0241 8098021

Leipzig 30.06.2017
Ort, Datum

[Handwritten Signature]
Unterschrift des Projektleiters

Inhalt

I. Kurzdarstellung des Projekts.....	4
I.1 Aufgabenstellung.....	4
I.2 Voraussetzungen.....	4
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
I.4 Stand der Wissenschaft und Technik	6
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
II. Ausführliche Darstellung der Projektergebnisse.....	7
II.1 Technische Ergebnisse	8
AP 1: Anforderungsprofil (ACCESS)	
AP 2: Gießtechnologie und Probenherstellung (ACCESS)	
AP 3: Pulverherstellung (TLS/ACCESS)	
AP 4: Verfahrensentwicklung Laserauftragschweißen und Simulation (ILT/ACCESS)	
AP 5: Wärmebehandlung und mechanische Eigenschaften (ACCESS)	
AP 10: Test Demonstratoranlage (Laservorm, ILT, ACCESS)	
II.2 Nutzen und Verwertbarkeit	34
II.3 Fortschritt anderer Stellen	42
II.4 Veröffentlichungen.....	43
II.5 Verwendete Fachliteratur	43

I. Kurzdarstellung des Projekts

I.1 Aufgabenstellung

Titan-Aluminid-Werkstoffe (TiAl) haben sich nach Jahrzehnten der werkstoff- und fertigungstechnischen Forschung [Appel 2011] für den Einsatz in Flugzeugtriebwerken qualifiziert. Sie werden als Turbinenschaufeln in den letzten Stufen der Niederdruckturbine eingesetzt und ersetzen dort die deutlich schwereren Ni-Basis-Superlegierungen. Vorreiter dieser Entwicklung war General Electric, die in ihren Gen-xTM Triebwerken erstmals TiAl-Schaufeln aus der Legierung GE4822 (Ti-48Al-2Cr-2Nb, At.%) einsetzen [Bewlay 2013] und damit die Antriebseffizienz verbessern, einen um 20% reduzierten Kraftstoffverbrauch erreichen und eine um 80% reduzierte NO_x-Emission im Vergleich zu früheren Triebwerken. Bis 2013 wurden für die GENxTM 1B (Boeing 787) und die GENxTM 2B (Boeing 747-8) Applikationen mehr als 40.000 TiAl Niederdruck-Turbinenschaufeln gefertigt. Andere Triebwerkshersteller, wie Snecam-Safran, MTU und Rolly-Royce nehmen ebenfalls TiAl-Schaufeln in ihre neuen Triebwerke auf, so soll z.B. allein durch Snecma die Jahresproduktion von TiAl-schaufeln ab 2019 auf 200.0000 Stück steigen. Dabei werden unterschiedliche Legierungen und Herstellungsverfahren zum Einsatz kommen, u.a. maschinelle Bearbeitung von Rohlingen, Schmieden von Rohlingen und auch additive Verfahren, hier EBM (Electron Beam Melting), u.a..

Adäquate Reparaturtechnologie für TiAl-Schaufeln, wie sie für Schaufeln aus Ni-Basis Superlegierungen alltägliche Praxis ist, befinden sich derzeit in der Entwicklung: Reparaturschweißen [Arenas 2003], Diffusionsschweißen [Cam 2006, Hermann 2009] und Diffusionslötungen [Pyczak2013] sowie Laserauftragschweißen (LA) [Kelbassa 2008] können hierfür als potentielle Kandidaten betrachtet werden. Tatsächlich ist die Entwicklung einer solchen Technologie für TiAl eine wichtige, aber auch anspruchsvolle Aufgabe, weil hohe 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) zu erfüllen sind. Als Reparaturtechnologie erscheint das Laserauftragschweißen (LA) wegen des geringen und gezielten Wärmeeintrags und der hohen Flexibilität der Pulverzuführung und Bahn-Steuerung für komplexe Komponenten besonders vielversprechend. Laserbasierte Reparaturverfahren, z.B für Nickel-Basis Superlegierungen und Titanlegierungen [Nowotny 2007, Sexton 2002, Richter 2004, Peters 2010], gehören bereits zum Stand der Technik und sind im MRO-Geschäft (Maintenance Repair and Overhaul) fest verankert.

Das Verbund-Projekts REPTIL zielte darauf hin, die LA-Technologie für verschiedenen TiAl-Legierungen in grundlegenden Aspekten zu untersuchen und für die Reparatur gießtechnisch gefertigter Turbinenschaufeln zu entwickeln. Dabei wurde die Geometrie der zu reparierenden Probekörper schrittweise komplexer gestalten, angefangen von einfachen Stäben und Plattenkörpern über Dummy-Schaufeln bis hin zu einer realen Turbinenschaufel. Von Beginn an war die im Projekt zu entwickelnde Reparaturtechnologie sowohl für die Reparatur neuer Gussschaufeln, als auch von ‚used‘ Schaufeln aus dem MRO Zyklus vorgesehen. Im Giessbetrieb dient das Verfahren der Steigerung der Ausbringung und schont damit Ressourcen durch die Verringerung von Ausschuss. Im MRO Zyklus wird die Lebensdauer der Turbinenschaufeln verlängert und damit ebenfalls zur Ressourcenschonung beigetragen.

Im seinem Teilprojekt befasste sich Access mit der Herstellung der Probekörper für die Verbundpartner durch zentrifugalen Feinguss, sowie mit werkstofftechnischen Aspekten der Gefüge Optimierung und –Charakterisierung. Außerdem wurde durch Experimente und thermomechanische Simulationen der kritischen Frage nach dem Verzug bzw. dem Entstehen von Spannungen nachgegangen. Die technischen Ergebnisse aus den durchgeführten Arbeiten werden in Abschnitt 2.1 dargestellt. Der Nutzen und die Verwertungsperspektiven werden in Abschnitt 2.2 erläutert.

I.2 Voraussetzungen

Access beschäftigt sich bereits seit Mitte der 90er Jahre mit Entwicklung von Gießverfahren für Titan-Aluminide sowohl in öffentlich geförderten EU-, BMBF- und DFG-Projekten als auch in bilateralen Kooperationen mit namhaften Triebwerksherstellern. Das eigene TechCenter wurde durch Förderung des Landes NRW und der Industrie zu einer systemfähigen Plattform für Schmelz- und Gießtechnik ausgebaut, auch und insbesondere für TiAl. Das TechCenter und andere Abteilungen von Access e.V. haben im Laufe der Jahre ein fundiertes Wissen und technologisches Knowhow aufgebaut, die alle Aspekte der TiAl-Herstellung umfassen. Die Expertise umfasst Legierungs- und Werkstofftechnik, Gießtechnik, Wärmebehandlung und spanende Bearbeitung, Qualitätssicherung und

Werkstoffanalytik. Access ist hierfür exzellent ausgestattet und betreibt Gießaggregate, Wärmebehandlungsöfen, eine mechanische Werkstatt, einen Computertomographen, lichtoptische 3D-scanner, diverse REMs mit EDX, EBSD, FIB sowie eigene Simulationsabteilungen für die Prozess- und Werkstoffmodellierung auf unterschiedlichen Skalen. Damit sind die Voraussetzungen für die im Teilprojekt verfolgten Ziele und Arbeitspunkte in jeder Hinsicht gegeben.

I.3 Planung und Ablauf des Teilvorhabens

Die Planungen sahen bei Access drei Arbeitspakete (AP1,2,5) und umfangreiche Beteiligung an drei weiteren APs (AP3,4,6) vor:

AP 1: Anforderungsprofil (ACCESS)

AP 2: Gießtechnologie und Fehleranalyse (ACCESS)

AP 3: Pulverherstellung (TLS, ACCESS)

AP 4: Verfahrensentwicklung Laserauftragschweißen (ILT, ACCESS)

AP 5: Wärmebehandlung und mechanische Bearbeitung (ACCESS, Unterauftragnehmer)

AP 10: Test Demonstratoranlage (Laservorm, ILT, ACCESS)

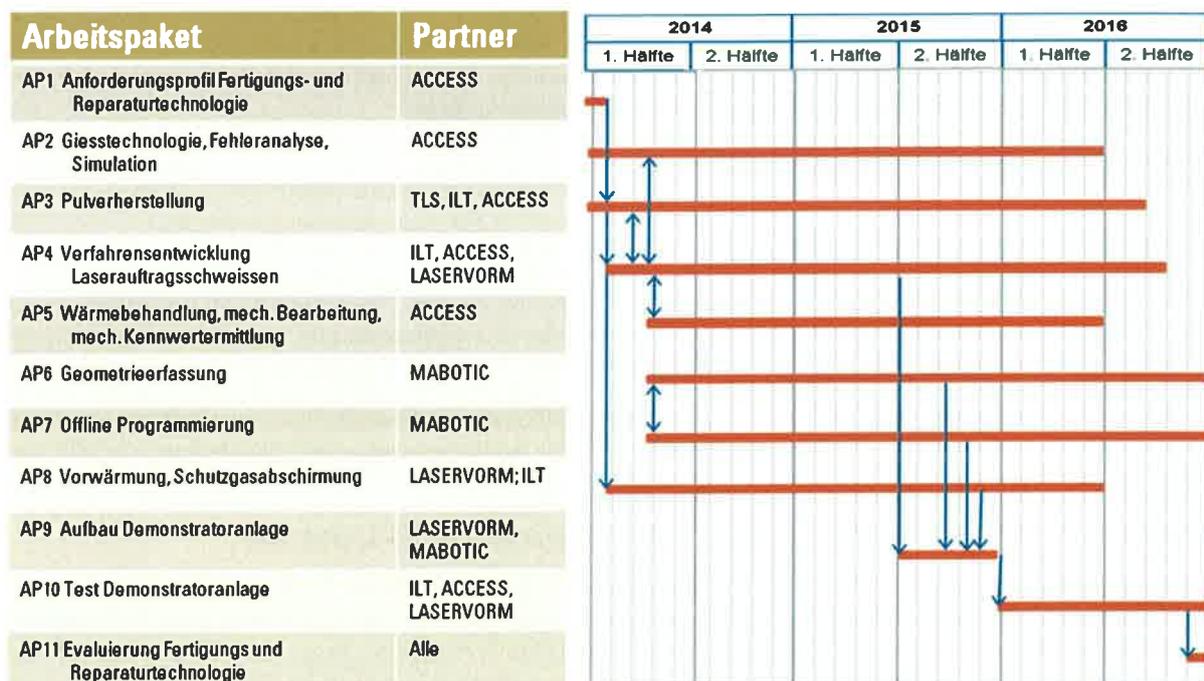


Abb. 1: Arbeitspakete und Zeitplanung

Bei ACCESS als Schaufelhersteller liegt mit **AP1** die Aufgabe vor, die strategische Herangehensweise an die komplexen und vielfältigen Fragestellungen des Vorhabens klar zu fassen und ein Anforderungsprofil als Leitfaden für das Projekt zu formulieren. Dieser Schritt der Fokussierung und Engführung ist erforderlich, weil die zu entwickelnde Reparaturtechnologie auf die zu reparierenden Defekte zugeschnitten sein sollte. Die Art der Defekte, ihre Ursprung und morphologischen Merkmale werden in AP1 von ACCESS zu einem möglichst frühen Zeitpunkt definiert und darauf beruhende Anforderungen an die Reparaturtechnologie im Projektkonsortium entwickelt.

In **AP2** obliegt ACCESS die giesstechnologische Seite im gesamten Projekt. Dazu gehört die Fertigung aller im Projekt benötigten Titanaluminid Proben (Stäbe, Platten, Dummieschaufeln und Originalschaufeln) im Schutzgas Feingussverfahren inklusive der dazugehörigen mechanischen Bearbeitung und Qualitätssicherung/Fehleranalyse. Dazu gehört auch die Herstellung und Lieferung der Rohlinge für die Pulververdüsung an Projektpartner TLS. Notwendige Unteraufträge (HIP, Sauerstoffanalysen) in diesem AP werden von ACCESS geplant und vergeben. Die Fehleranalyse in AP2 umfasst sowohl die Fertigung der Projektproben, als auch die Begleitung der Proben im

Projekt mit industrieller Computertomographie (Poren, Lunker, Seigerungen, Risse) und Rasterelektronenmikroskopie (Gefügefehler, Zusammensetzung, Mikropore/Risse).

Die in **AP3** vom Projektpartner TLS hergestellten Metallpulver der im Projekt verwendeten Legierungen werden begleitend von ACCESS Rasterelektronenmikroskopisch und im Unterauftrag hinsichtlich des Sauerstoffgehaltes untersucht.

AP4 ist für ACCESS ein weiteres großes AP dieses Projektes mit der Begleitung der Verfahrensentwicklung. ACCESS führt hier entlang der Verfahrensentwicklung immer wieder REM, 3D Scans, CT und andere Untersuchungen an den verschiedenen Proben durch. Besonderen Raum nehmen dabei die vergleichenden optischen 3D Scans zum geometrischen Verzug über verschiedene Projektphasen ein. Diese Messungen werden begleitet von umfangreichen Entwicklungen und Anwendungen thermomechanischer Simulationsrechnungen.

Die Gefüge der auftragsgeschweißten Schichten unterscheiden sich erheblich von denen gegossener oder geschmiedeter Bauteile. In **AP5** entwickelt ACCESS eine Wärmebehandlungsstrategie für die Laserreparierten Proben des Projektes. Ein von ACCESS speziell abgestimmter Bridgman Prozess mit im Projekt gefertigten Guss/LA Proben wird dafür verwendet. Umfangreiche REM und EBSD Untersuchungen begleiten dieses AP um den Erfolg der erreichten Gefüge Umbildungen zu beurteilen. Einbezogen wird auch die in der Prozesskette notwendige HIP Behandlung.

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 wurden termingerecht erreicht.

I.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik zu zwei Themenbereichen dargestellt, die für dieses Teilvorhaben relevant sind, während zum Hauptthema der Schweißtechnik und speziell zum Laserauftragsschweißen auf die Arbeit der Projektpartner verwiesen wird.

Die beiden Themenbereiche sind (i) die Schmelz- und Gießtechnologie für die endkonturnahe Fertigung von Komponenten aus TiAl-Legierungen für Flugzeugtriebwerke und (ii) legierungs- und werkstofftechnische Aspekte der Erstarrung und Wärmebehandlung von TiAl-Legierungen.

(i) Schmelz- und Gießtechnologie für die Fertigung von Komponenten aus TiAl-Legierungen

Die Marktprognose für TiAl-Schaufeln ist wie oben beschrieben beachtlich und für die Serienfertigung der Schaufeln kommen gießtechnische Verfahren durchaus in Frage. Access gehört zu den potentiellen Schaufelherstellern und hat mit der Entwicklung des Schleudergießens in keramische Formschalen beachtliche Erfolge verzeichnet. Die Schmelz- und Gießtechnologie im so genannten Leicomelt-Verfahren [Agu2010,Agu2011] eignet sich hervorragend für die Serienfertigung und wurde im Laufe der letzten Jahre mit anderen up- und downstream Prozessen vernetzt, um als Teil einer kohärenten technologischen Prozesskette gute Marktchancen zu haben und die Wertschöpfung in Deutschland zu verankern. Im Leicomelt-Verfahren ist es möglich, auch dünnwandige Schaufelgeometrien darzustellen, weil die Formfüllung durch die Wirkung zentrifugaler Kräfte unterstützt wird. Allerdings steigt mit abnehmender Wanddicke des Schaufelblatts die Defekthäufigkeit, insbesondere Kaltläufe treten vermehrt auf [Jan2011, Jan2013]. Es handelt sich dabei um nicht vollständig gefüllte Bereiche, vornehmlich an den Kanten des Schaufelblattes, die entstehen, weil die Schmelze erstarrt, bevor die Form vollständig gefüllt ist. Bild 3 illustriert dies am Beispiel einer Dummy-Geometrie.

Beim heutigen Stand der Gießtechnik ist es notwendig, Schaufeln mit extrem dünnen Blattstärken systematisch aufzudicken, um Kaltläufe sicher zu vermeiden. Entsprechend sind im Nachgang zum Gießen aufwendige mechanische Bearbeitungen erforderlich. Das Aufmaß so gering wie möglich zu halten, gehört zu den Optimierungsarbeiten, die anstehen, sobald ein neues Schaufeldesign vom Endmaß auf Gießmaß gebracht wird. Die Optimierung erfolgt in der Regel durch Gießexperimente und Simulationen. Nichtsdestotrotz stellen Kaltläufe die am häufigsten vorkommenden Gießdefekte dar, verursachen übermäßig viel Ausschuss und erhöhen dadurch die Kosten. Es

erscheint sinnvoll und möglich, kleine bis mittelgroße Kaltläufe durch Laserauftragschweißen zu reparieren, um auf diese Weise die Materialausbringung zu erhöhen und Ressourcen zu schonen. Tatsächlich ist das fachgerechte Reparieren von defekten Gussteilen aller Art eine bewährte Methode und integraler Bestandteil der Fertigungstechnologie in den meisten Gießereien. Für Stahl, Gusseisen, Superlegierungen, Aluminium und Magnesiumlegierungen gibt es dazu jeweils reichhaltige Fachliteratur. Für TiAl-Werkstoffe und TiAl-Gussteile sind Reparaturtechnologien kaum erforscht, wenn auch die eine oder andere Patentschrift diesbezügliche Ansprüche erhebt [Kel1998].

(ii) Werkstofftechnische Aspekte der Erstarrung und Wärmebehandlung von TiAl-Legierungen

Bei der Entwicklung der Reparaturtechnologie durch LA-Schweißen spielen werkstofftechnische Aspekte der Erstarrung und Wärmebehandlung eine ungemein wichtige Rolle, weil TiAl und TiAl-Legierungen eine vergleichsweise geringe bis sehr geringe Duktilität aufweisen und damit zu Spannungsrissen neigen. Die Übergangstemperatur von sprödem zu duktilem Verhalten liegt je nach Legierungszusammensetzung bei rund 700° bis 750°C [App2011]. Außerdem sind die mechanischen Eigenschaften sensitiv von der Gefügestruktur abhängig und vor allem auch von der Textur [Inu1992]. Besonders kritisch sind bereits leicht erhöhte Sauerstoffgehalte zu betrachten, da diese die Duktilität weiter senken.

Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den gängigsten TiAl-Legierungen, die sich aus heutiger Sicht für Niederdruck-Turbinenschaufeln eignen. Aufgrund von Budgetkürzungen in der Antragsphase konnte für dieses Vorhaben die TNB-V3 Legierung nicht mehr berücksichtigt werden.

Legierung	Ti	Al	Nb	Mo	Cr	Mn	C	B
GE4822	Bal.	48,0	2,0	-	2,0	-	-	-
4522XD	Bal.	45,0	2,0	-	-	2,0	-	0,8
TNB-V3	Bal.	45,0	8,0	-	-	-	0,2	0,2
TNM-V3B	Bal.	44,5	6,0	1,0	-	-	-	0,2

Tabelle 1: Nominelle chemische Zusammensetzung gängiger TiAl-Legierungen, Angaben in Atom-%

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Einzelvorhaben ist eingebunden in ein Verbundvorhaben das insgesamt fünf Partner bestreiten (siehe auch Gesamtvorhabensbeschreibung). Abb.4 zeigt den Strukturplan des Verbundvorhabens mit den Aufgabenbereichen von Access und denen der anderen Partner.

Neben diesen fünf direkten Projektpartnern (ACCESS, ILT, TLS, Laservorm, Mabotic) wird ACCESS einige Arbeiten im Unterauftrag vergeben. Dazu gehört das Drahterodieren als Teil der mechanischen Bearbeitung. Sauerstoffanalysen werden beim Elektrowerk Eschweiler gemacht und die anfallenden HIP- sowie ein Teil der Wärmebehandlungen bei Bodycote.

II. Ausführliche Darstellung der Projektergebnisse

II.1 Technische Ergebnisse

Die folgende Darstellung der Ergebnisse gliedert sich nach den bereits oben erwähnten, im Projekt festgelegten Arbeitspaketen mit ACCESS Beteiligung:

- AP 1: Anforderungsprofil (ACCESS)
- AP 2: Gießtechnologie und Probenherstellung (ACCESS)
- AP 3: Pulverherstellung (TLS, ACCESS)
- AP 4: Verfahrensentwicklung Laserauftragschweißen und Simulation (ILT, ACCESS)
- AP 5: Wärmebehandlung und mechanische Eigenschaften (ACCESS, Unterauftragnehmer)
- AP 10: Test Demonstrator anlage (Laservorm, ILT, ACCESS)

II.1 AP 1 Anforderungsprofil (ACCESS)

In AP1 wurde von Access ausgehend von den eigenen Erfahrungen mit gießtechnisch hergestellten Niederdruck-Turbinenschaufeln aus Titanaluminid-Legierungen eine „roadmap“ für das Projekt entwickelt. Neben den Defekttypen, die an Schaufeln im Gusszustand und an gelaufenen Schaufeln nach Einsatz im Flugzeugtriebwerk auftreten können, definierte Access die Vorgaben bezüglich der geometrischen Toleranzen, der mechanischen Eigenschaften, der zulässigen Sauerstoffgehalte usw.

Außerdem wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern allgemeine und verbindliche Festlegungen getroffen bezüglich der Koordinatensysteme, Datenformate, Prüf-Verfahren, Messmethoden, Referenzproben u.a.

AP 1 gliedert sich in folgende Unterarbeitspunkte:

UAP 1.1	Darstellung der Defekttypen
UAP 1.2	Vorgaben und technische Bewertungskriterien für die Reparaturtechnologie (Maß- und Formtoleranz, Eigenschaften usw.)
UAP 1.3	Material, Gefüge und mechanische Eigenschaften
UAP 1.4	Festlegung der Koordinatensysteme, Datenformate, Prüf-Verfahren, Messmethoden
UAP 1.5	Festlegung der Koordinatensysteme, Datenformate, Prüf-Verfahren, Messmethoden

II.1 UAP1.1 Darstellung der Defekttypen

Innerhalb des Projektes wurde unterscheiden zwischen den primären Defekten, die bereits während des Gießprozesses entstehen und den sekundären Defekten, die erst durch den Reparaturprozess selbst hervorgerufen werden. Defekte an ‚gelaufenen‘ Schaufeln bleiben aufgrund der bisher mangelnden Verfügbarkeit und des begrenzten Projektumfangs hier zunächst außen vor.

II.1 UAP1.1.1 Primäre (im Gießprozess erzeugte) Defekte

Primären Defekte, die beim Formfüllen und Erstarren der Turbinenschaufeln während des Zentrifugalgießens in keramische Formschalen entstehen können, sind folgend tabellarisch zusammengefasst:

Primärer Defekt	Typische Ausdehnung	Morphologie	Oberfläche
Innere (geschlossene) Defekte Gasporen, Mikrolunker	0-10 μm	Rund (Gasporen) Länglich (Mikrolunker)	glattwandig
Offene Defekte Gasporen, Porosität, Warmrisse	0-500 μm	Rund (Gasporen) Netzartig oder V-förmig	Teils oxidiert und rau
Kaltläufe	1-50 mm	Konkave Einbuchtungen Freiformflächen	Glattwandig
Verzug	Nach Toleranz ~ Zehntel mm	Verformungen (Verdrehung, Durchbiegung)	-

Tabelle 1: Übersicht der primären Defekte

(i) innere Defekte

Die inneren Defekte werden in der Regel durch einen auf den Guss folgenden HIP (hot isostatic pressing) Prozess geschlossen und sind daher für den hier behandelten Prozess nur bedingt relevant. Unter Umständen kann es aber sinnvoll sein einen einzelnen unter der Oberfläche liegenden Defekt, zum Beispiel eine zu große Gaspore, zu öffnen und mittels LMD vor dem HIPen zu reparieren. Die anderen Defekte führen beim Überschreiten der entsprechenden Toleranzvorgaben zum Ausschuss.

(ii) Verzug

Für die Reparatur von Verzug, also großflächiger geometrischer Abweichungen bietet LMD keinen sinnvollen Ansatz, obwohl die so verursachten Abweichungen z.B. bei der Bahnsteuerung einer lokalen Reparatur mit berücksichtigt werden müssen.

(iii) oberflächenoffene Porosität

Bleiben noch die lokal begrenzten Defekte Oberflächenoffene Poren und die Kaltläufe. Beide Typen lassen sich theoretisch gut mittels LMD reparieren. Die Oberflächen offenen Poren treten oft an schwer zugänglichen Stellen, oder in Clustern auf (Abb.6,7) und erfordern daher erheblichen Aufwand bei der Ortserfassung, der eventuellen mechanischen Vorbereitung und der Planung der Bahnsteuerung. Zusätzliche Probleme bereiten unter Umständen Einschlüsse und Ablagerungen von Fremdmaterial in diesen Porositäten (Abb.7). Darüber hinaus sollte dieser Defekttypus sich durch geeignete Gießtechnische Maßnahmen eher vermeiden lassen. Im Rahmen des Projektes wurden erste Eindrücke zu Reparaturversuchen an diesen Defekten gewonnen, der Fokus liegt aber auf den Kaltläufen.

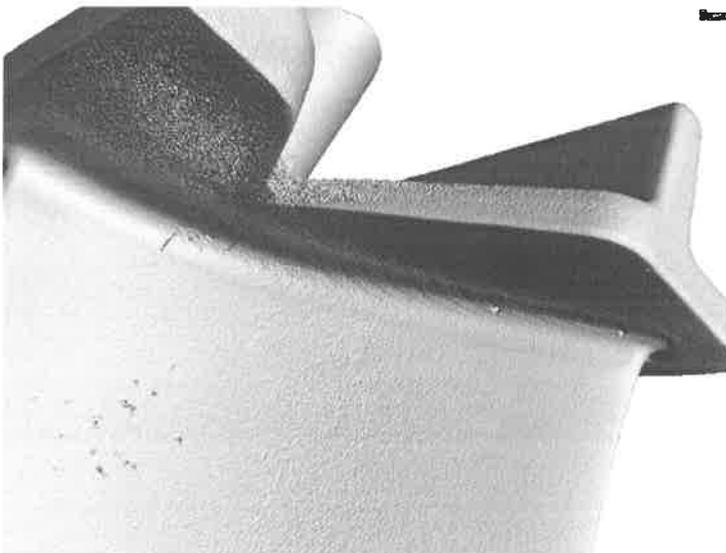
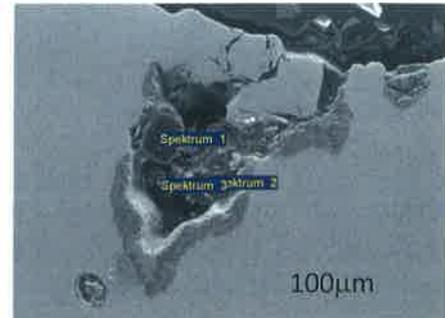


Abb.2: oberflächen offene Porosität an einer TiAl Turbinenschaufel im Guss Zustand (links)

Abb.3: oberflächen offene Pore mit typischen Ablagerungen (unten)



(iii) Kaltläufe

Beim heutigen Stand der Gießtechnik ist es notwendig, Schaufeln mit extrem dünnen Blattstärken systematisch aufzudicken, um Kaltläufe sicher zu vermeiden. Entsprechend sind im Nachgang zum Gießen aufwendige mechanische Bearbeitungen erforderlich. Das Aufmaß so gering wie möglich zu halten, gehört zu den Optimierungsarbeiten, die anstehen, sobald ein neues Schaufeldesign vom Endmaß auf Gießmaß, also aufgedickt, gebracht wird. Die Optimierung erfolgt in der Regel durch Gießexperimente und Simulationen. Nichtsdestotrotz stellen Kaltläufe die am häufigsten vorkommenden Gießdefekte dar, verursachen übermäßig viel Ausschuss und erhöhen dadurch die Kosten. Es erscheint sinnvoll und möglich, kleine bis mittelgroße dieser Kaltläufe (Abb.4) durch Laserauftragschweißen zu reparieren, um auf diese Weise die Materialausbringung zu erhöhen und Ressourcen zu schonen. Es handelt sich bei Kaltläufen in der Regel um singuläre Defekte mit leichter Erkennbarkeit, auch durch automatisierte Methoden. Hinzu kommt, dass Kaltläufe i.a. immer in den gut zugänglichen Kopf- und Fussfernen Blattbereichen auftreten und unter Umständen keine weiteren mechanischen Vorarbeiten erfordern. Die Ausprägung der Kaltläufe ist allerdings extrem Unterschiedlich. In diesem Projekt wurde daher vereinbart zunächst an definierten (künstlichen) Kaltläufen zu arbeiten die in einem Winkel von 45° eintauchen, um mit aktuellen LMD Düsen zunächst ohne 5-Achs Steuerung arbeiten zu können.



Abb.4: kleiner realer Kaltlauf an einer TiAl Dummyschaufel mit Angusssystem

II.1 UAP1.1.2 Sekundäre (durch den Schweissprozess) entstandene Defekte

Auch durch den Schweißprozess selbst können Defekte verschiedener Art verursacht werden, z.B. Risse und Porosität, nicht korrigierbare Gefügeveränderungen (Großräumige Inhomogenitäten) und Verzug (Geometrie) oder lokale Maß Abweichungen.

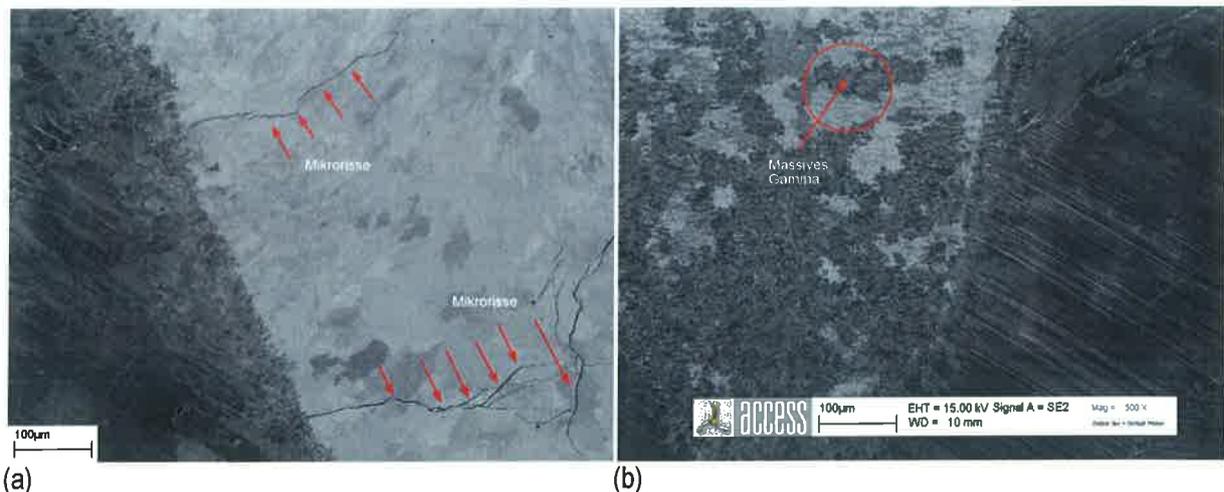


Abb. 5: Mikrorisse und Einsprengungen von massivem Gamma im Schweißgut der Legierung GE4822 nach Elektronenstrahlschweißen ohne Vorwärmung (Proben vom ISF der RWTH Aachen, DFG-Projekt)

Mögliche Defekte, die es durch geeignete Vor- und Nachwärmung beim LA-Schweißen zu vermeiden gilt, sind Mikrorisse (**Abb.5 a**) und Einsprengungen von massivem Gamma im Gefüge des erstarrten Schweißguts (**Abb.5 b**). Anfällig für die Bildung von massivem Gamma, das bei hohen Kühlraten (> 10 K/s) ähnlich wie Martensit durch eine diffusionslose Transformation aus $\alpha(\text{Ti})$ entsteht, ist insbesondere die Al-reiche Legierung GE4822. Die Al-armen Legierungen 4522XD und TNM könnten bei zu hohen Kühlraten Reste von nicht transformiertem $\alpha(\text{Ti})$ im Gefüge behalten. Die Prozessführung beim LA-Schweißen am ILT ist bereits auf Vor- und Nachwärmung ausgelegt und deswegen wurde mit oben genannten Defekten nicht gerechnet. Access hat für die WB Stäbe (siehe auch II.1 AP2.1) geeignete Heizkassetten vorbereitet, um den Wärmeübergang zwischen Heizer und Proben zu verbessern.

II.1 UAP1.2 Vorgaben und technische Bewertungskriterien für die Reparaturtechnologie (Maß- und Formtoleranz, Eigenschaften usw.)

Die hier erarbeiteten Bewertungskriterien beziehen sich auf eine typische TiAl-Turbinenschaufel, sind aber im Vergleich zu den Vorgaben der Triebwerkshersteller stark verkürzt und zum Teil entschärft.

(i) Risse

Nicht erlaubt

(ii) Geometrie

Die Abweichung relativ zur Zielgeometrie oder zum Referenzmodell darf nicht mehr als 0,5 mm betragen. Dies gilt sowohl für Auswirkungen durch Verzug als auch für lokal generiertes Aufmaß. Aus Zeit- und Kostengründen wird angestrebt, eine zusätzliche mechanische Bearbeitung weitestgehend zu vermeiden. Diese ist ohnehin nur dann zielführend, wenn sie lokal begrenzt bleibt. Negative Toleranzabweichungen (Untermaß) dürfen grundsätzlich an keiner Stelle des Bauteils generiert werden, da sie durch eine mechanische Nacharbeit nicht korrigiert werden können!

(iii) Chemische Zusammensetzung

Verunreinigungen: O < 800 wt-ppm, C+N+H < 350 wt-ppm

Die Bandbreite der zulässigen Abweichung von der nominellen Legierungszusammensetzung beträgt $\pm 1\%$ für Al und $\pm 10\%$ für alle anderen Legierungselemente bezogen auf den jeweils nominellen Elementgehalt.

(iiii) Vor- und Nachwärmung

Der Schweißvorgang sollte so gesteuert werden, dass möglichst geringe Temperaturgradienten entstehen. Dies ist ggf. durch Strahlpendelung o.a. möglich. Numerische Simulationen sollen diesen Aspekt der Prozessoptimierung maßgeblich unterstützen. Eine Vorwärmung im Bereich von 800° ist anzustreben um der Rissentstehung vorzubeugen.

II.1 UAP1.3 Definition der Probekörper

Um die Projektziele darzustellen, werden verschiedene Probekörper mit steigender Komplexität verwendet. Zunächst sind es einfache stab- und plattenförmige Proben, im letzten Projektabschnitt dann schaufelähnliche Dummy-Proben und reale Turbinenschaufeln. Die beschriebenen Materialien und Probekörper dienen der Erarbeitung der Grundlagen und schließlich dem Nachweis der erfolgreichen Reparaturtechnologie (Demonstrator). Eine Übersicht der im Projekt verwendeten Probekörper und der daran durchgeführten Arbeiten findet sich in **Tabelle 2**. In diesem AP wurden alle Probekörper genau definiert.

Für die in Tabelle 2 aufgeführten Probentypen wurde genau definiert wie viele, aus welchem Material, mit welcher Geometrie gefertigt und für welche Versuche diese verwendet werden sollten.

Das Material wurde spezifiziert (näheres dazu unter II.1 UAP1.4):

- GE4822: Ti-48Al-2Nb-2Cr (Duplex Gefüge)
- 4522XD: Ti-45Al-2Nb-2Mn-0.8B (lamellares Gefüge, korngefeint)
- TNM Ti-44Al-4Nb-1Mo-0.1B (lamellares Gefüge, korngefeint)

Die Vorgehensweise für 3D Scans, Struktur- und Mikrostrukturuntersuchungen, für HIP und Wärmebehandlungen wurde hier festgelegt.

Zusätzlich zu den in Tabelle2 aufgeführten Proben wurden in AP1.2.1 die von ACCESS zu liefernden Elektrodenrohlinge für die Pulververdüsung definiert.

Der Übergang von den Platten zu den komplexeren Schaufel Geometrien erfordert auch andere Vorgaben für die Vorheizstrategie, die integrierte Geometrieerfassung und eine komplexere Bahn- und Prozesssteuerung. Entscheidend war hier, dass die zu entwickelnde Vorheizstrategie, sei es durch Laserpendeln oder induktiv, unter Berücksichtigung der bis dann gewonnenen Erkenntnisse einen ausreichend flachen lokalen Gradienten, bei gleichzeitig ausreichend hoher Vorheizung und O2 Abschirmung erfüllt. Definiert wurde auch, wer was und zu welchem Zeitpunkt an die anderen Partner liefert.

Stäbe	Platten					Dummy	Schaufel
10x180	P1 (2,5mm) P2 (4mm)					40x200	229x48
Umschmelz Auftrag	Test	Umschmelz Auftrag	Nut	KK	Innere Defekte	KK (innere Defekte)	KK (innere Defekte)
WB		Verzug				Form	Form
Gefüge		Gefüge				Gefüge	Gefüge
Zug			Zug				
2014/2015	2014/2015/2016					2015/2016	2016

Tabelle2: Übersicht der Probentypen mit daran durchgeführten Arbeiten über die Projektlaufzeit

II.1 UAP1.4 Material, Gefüge und mechanische Eigenschaften

In diesem AP erfolgte die Beschreibung der drei hier verwendeten technisch relevanten TiAl-Legierungen, die aus heutiger Sicht für Triebwerkskomponenten in Frage kommen und von unterschiedlichen Triebwerksherstellern jeweils bevorzugt werden. Die Ausprägung von Material, Gefüge und mechanische Eigenschaften wurden im Detail so beschrieben, dass jederzeit ein Abgleich mit dem im Projektverlauf auftretenden Ergebnissen möglich war. Dabei wird auch auf Kornfeinungsaspekte und auf die Zusammenhänge zwischen Gefüge und Wärmebehandlung eingegangen. Für die Wärmebehandlung/HIP Behandlung werden geeignete Parameter zur Erlangung der gewünschten Gefügestruktur vorgeschlagen.

Für Sauerstoff und interstitielle werden Grenzwerte und für die Legierungszusammensetzung Toleranzen definiert.

Verunreinigungen: O < 800 wt-ppm, C+N+H < 350 wt-ppm

Anmerkung 1: Die Bandbreite der zulässigen Abweichung von der nominellen Legierungs-zusammensetzung beträgt $\pm 1\%$ für Al und $\pm 10\%$ für alle anderen Legierungselemente des jeweils nominellen Elementgehalts.

Anmerkung 2: Die chemische Analyse der Probenmaterialien erfolgt im Labor des EWW-Weisweiler mit Hilfe von Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) sowie LECO-Heißextraktion für die Elemente C, O, N, H, P, S.

Anmerkung 3: Für EDX Messungen verwendet Access eigene Standards, die bei Bedarf an die Projektpartner ausgeliehen werden können.

Für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften wird abweichend von DIN 50125 aber in Anlehnung an die Flachzugproben Typ E eine Kontur mit weit auslaufenden Radien und mit einer kurzen Messlänge vorgeschlagen, innerhalb derer die LA Schweißung liegen soll. Die LA-Schweißung erfolgt an rechteckigen Platten, in die einseitig ein mit LA zu füllender Kanal gefräst wurde und die nach dem Reparaturschweißen wärmebehandelt werden. Weiterhin werden Vergleichsproben ohne LA-Schweißen mit identischer Bearbeitung und Wärmebehandlung gefertigt, (mehr unter AP5 Wärmebehandlung) ebenso Vergleichsproben mit kaltlaufähnlichen Defekten nach LA-Reparatur.

Die Probenfertigung ist aufwendig und Zugversuche dieser Art erfolgen deswegen nur für eine der drei Legierungen.

II.1 UAP1.5 Festlegung der Koordinatensysteme, Datenformate, Prüf-Verfahren, Messmethoden

Hier sind die Anforderungen zu finden, die nicht direkt einzelnen Proben oder Projektphasen zuzuordnen sind, die aber für einen reibungslosen Ablauf oder perspektivisch wichtig sind. Dazu gehören die Vorgaben und technischen Bewertungskriterien für die Reparaturtechnologie (Maß- und Formtoleranzen wurden in 4.2 behandelt), Messstrategien und Messmittel (Teilweise in 3 behandelt), Entwurf möglicher Modelldefekte und definiert eingebrachter Fehlstellen, Koordinatensysteme, Dokumentation, Datenaustausch und die Rolle der Simulation.

(i) Koordinaten

Bei den Projektpartnern werden immer wieder Koordinaten im 3D Raum für die verschiedensten Prozesse verwendet. Sei es bei der Lokalisierung von Defekten in Röntgenbildern, bei den Vergleichsmessungen von Verzug oder Dimension, bei der Bahnsteuerung oder der Positionierung der Probekörper in einem Arbeitsraum. Einerseits soll die Anzahl der im Projekt verwendeten Koordinatensysteme möglichst klein gehalten werden, andererseits müssen die verwendeten Systeme für alle beteiligten gut dokumentiert und verfügbar sein. Zumindest für die Probekörper soll hier ein durchgängiges System vorgeschlagen werden um Fehler zu vermeiden. Für Turbinenschaufeln ist eine Bemaßung über Rotationsachse (z), Blattmitte (x) und Laufrichtung (y) üblich. Die Verwendung einer Rotationsachse ist hier nicht sinnvoll. Die vorgeschlagenen Koordinatensysteme für die verschiedenen Probekörper sind in Abb. 6 dargestellt. Abweichungen sollten in den Protokollblättern (s.u.) dokumentiert werden.

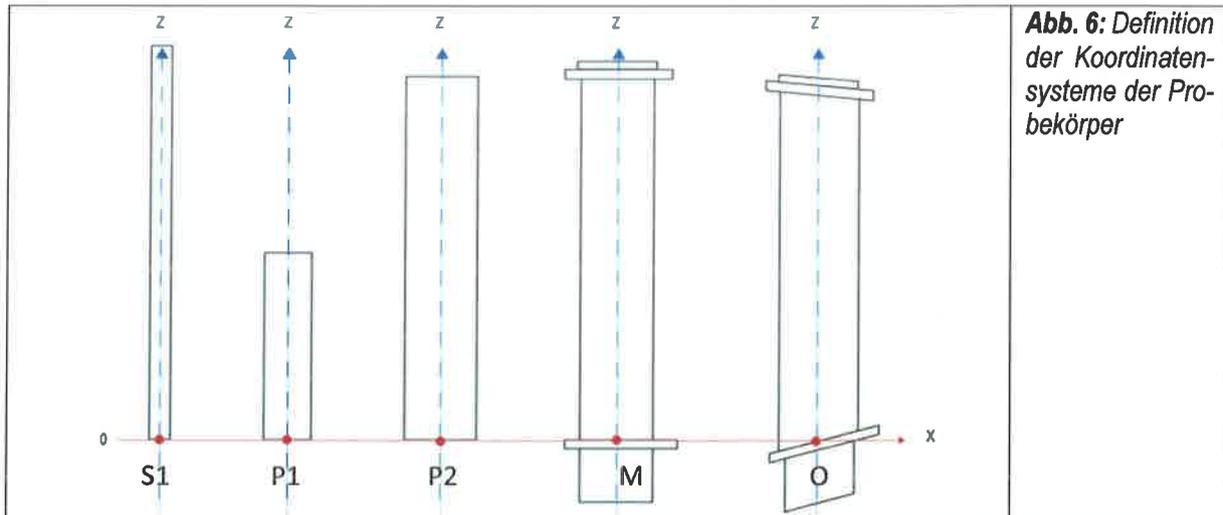


Abb. 6: Definition der Koordinatensysteme der Probenkörper

Wenn nicht anders vermerkt stellt das Probenende mit der Beschriftung auch die Seite mit dem Koordinatenursprung dar.

II.1 AP 2 Gießtechnologie und Probenherstellung (ACCESS)

Im Projekt wurden insgesamt mehr als 200 Proben von ACCESS hergestellt und an die Projektpartner geliefert und mit Analytik und Simulation begleitet.

Alle im Projekt verwendeten Probekörper und Vormaterialien wurden nach den Spezifikationen aus AP 1 von Access aus Titanaluminid-Legierungen im Feingussverfahren hergestellt. Die Schmelz- und Gießtechnologie ist dieselbe, die von Access für die Herstellung von Niederdruck-Turbinenschaufeln für Flugzeugtriebwerke entwickelt und optimiert wurde. Dabei werden zunächst Wachsmodelle der jeweiligen Probengeometrie in eine Aluminiummatrize gespritzt und an einem Gieß- und Speisersystem zu einem Gießbaum oder Cluster montiert. Dieser Wachscylinder wird dann mit keramischen Formschichten überzogen und getrocknet. Anschließend wird das Wachs ausgeschmolzen und die keramische Form wird gebrannt. Das Gießen selbst erfolgt im Schleudergießverfahren in einer vollständig gekapselten und unter Vakuum stehenden Anlage, der so genannten Leicomelt-Anlage (Abb.8). Das Leicomelt-Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass die TiAl-Legierung unter Vakuum in einem Kaltwand-Induktionstiegel geschmolzen wird. Die auf Gießtemperatur überhitzte Schmelze wird in die rotierende keramische Formschale gegossen, die mittig auf dem Zentrifugentisch steht und mit einer vorgegebenen Drehzahl um die zentrale Tischachse rotiert. Nach vollständiger Formfüllung und Erstarrung wird der nun in der Formschale feste Guss abgekühlt, und aus der Gießanlage entnommen. Nach dem Entfernen des keramischen Formstoffs werden die einzelnen Gussteile vom Lauf und Speisersystem mittels Wasserstrahlschneiden abgetrennt, wärmebehandelt bzw. ggf. heißisostatisch gepresst und auf Endmaß bearbeitet.



Abb.7: zwei im Projekt verwendete Wachscleistervarianten zur Herstellung der im Projekt verwendeten Plattenproben und eine für das Freistrahlen vorbereitete Formschale nach dem Abguss (rechts)

Nach ersten erfolgreichen Tests und Gefügeanalysen wurden aus den vier oben genannten Legierungen die GE und die TNM Legierung für weiterführende Arbeiten ausgewählt und weitere Platten, Dummy-Schaufeln und reale Turbinenschaufeln wurden aus diesen beiden Legierungen gegossen. Ziel dieser Gießkampagnen ist es dann, Fehlstellen (insbesondere Kaltläufe an den Kanten) gezielt und reproduzierbar durch mechanische Bearbeitung zu erzeugen, um sie durch Laserauftragschweißen am ILT und bei Laservorm zu reparieren.



Abb.8: Leicomelt Vakuum Schleudergießanlage mit KIT (Kaltwandinduktionstigel)

ACCP1	Allg. Planung und Vorbereitung	ACCESS
ACCP2	Planung und 3D Konstruktion der Gießcluster für die Probekörper	ACCESS
ACCP3	Herstellung der Cluster für Probenplatten (Wachs/Keramik)	ACCESS
ACCP4	Herstellung der Cluster für Probestäbe (Wachs/Keramik)	ACCESS
ACCP5	Herstellung der Cluster für Demonstratorschaufeln (Wachs/Keramik)	ACCESS
ACCP6	Gießen der Cluster mit den drei Legierungen	ACCESS
ACCP7	Entformen, Freistrahlen, Trennen	ACCESS
ACCP7	HIP und Wärmebehandlung	Bodycote
ACCP8	Mechanische Endbearbeitung der Probekörper	ACCESS
ACCP9	Ätzbeschriftung	ACCESS
ACCP10	QS (Röntgen, CT, 3D Scan, Mikrostruktur) und Auslieferung	ACCESS

Tabelle 3: Arbeitsabfolge die an allen bei ACCESS hergestellten Teilen und Proben erfolgt

Um die Projektziele darzustellen, werden verschiedene Probekörper mit steigender Komplexität verwendet. Zunächst sind es einfache stab- oder plattenförmige Proben, im letzten Projektabschnitt dann schaufelähnliche Dummy-Proben und reale Turbinenschaufeln. Die beschriebenen Materialien und Probekörper dienen der Erarbeitung der Grundlagen und schließlich dem Nachweis der erfolgreichen Reparaturtechnologie (Demonstrator). Eine Übersicht aller im Projekt verwendeten Probekörper findet sich in Tabelle 2. Im Folgenden werden die in diesem AP2 durchgeführten Arbeiten beschrieben.

AP 2 gliedert sich in folgende Unterarbeitspunkte:

UAP 2.1	Gießen der Probekörper (Stäbe und Platten), der Dummy-Schaufeln und Niederdruck-Turbinenschaufeln inkl. Trennen und Bearbeitung der Proben nach Vorgabe
UAP 2.2	Charakterisierung der Probekörper und Dokumentation der Defekte, Maß- und Formabweichungen (CT, 3D-Geometrie, Röntgen)
UAP 2.3	Gefüge Analyse der Proben im Gusszustand mit Hilfe von LIM1, REM, EDX, EBSD

II.1 AP2.1 Gießen der Probekörper, Dummy- Schaufeln und Niederdruck-Turbinenschaufeln inkl. Trennen und Bearbeitung der Proben nach Vorgabe

Stäbe

Begonnen wurde mit der Herstellung der im Projekt eingeplanten Stäbe (Abb.9) für die Versuche zur Wärmebehandlung. Die Stäbe wurden auf Maß gedreht, beschriftet (10x155mm), mit der in AP1 definierten Nut für die Schweißnaht versehen und ans ILT für die ersten Versuche geliefert.



Abb.9: Stabrohlinge nach Freistrahlen und Abtrennen vom Gießcluster und 3 fertig bearbeitete Stäbe (rechts)

Access hat außerdem geeignete Heizkassetten vorbereitet, um den Wärmeübergang zwischen Heizer und Proben auf der Vorheizplatte der LA Anlage zu verbessern (Abb.10).



Abb. 10: Passgenaue Kassetten für die zu schweißenden Proben (hier zylindrische Proben für Umschmelzversuche) werden auf den Heiztisch gelegt und führen zu einem verbesserten Wärmeübergang, gleichzeitig stützen sie die Proben. Alle Proben wurden hitzefest Ätzbeschriftet.

Platten

Im ersten und zweiten Projektjahr (2014) fokussieren sich die Arbeiten auf plattenförmige Probekörper in zwei Dicken (2,5 und 4mm) in verschiedenen Abmessungen. Nach dem Abtrennen vom Gießcluster haben alle Rohlinge ein Maß von 40 x 190mm. Daraus werden aus dem dünneren Material kleine P1 Versuchsplatten (2,5 x 24 x 92mm) und aus den 4mm Rohlingen die P2 Platten (4x40x95mm) gefertigt (Abb.13), anhand derer das Laserauftragschweißen (LA) ertüchtigt und für diverse Legierungen getestet werden soll. Für Vorversuche wurden weitere Platten in unterschiedlichen Massen an die Partner geliefert. Bei den für die Platten verwendeten Legierungen handelt es sich um die gängigsten TiAl-Legierungen, die zurzeit von Turbinenherstellern gefragt sind:

GE4822: Ti-48Al-2Nb-2Cr (Duplex Gefüge)

4522XD: Ti-45Al-2Nb-2Mn-0.8B (lamellares Gefüge, korngefeint)

TNM-V3B: Ti-44.5Al-6Nb-1Mo-0.2B (lamellares Gefüge mit b0-Anteilen, korngefeint)

An einem Teil diesen Platten, die nach dem Gießen defektfrei vorliegen sollten, werden definierte Fehlstellen eingebracht und durch Laserauftragschweißen repariert. Sie dienen dann der Entnahme von Proben für die Gefügeanalyse, für die Optimierung der Wärmebehandlung (siehe AP5) und schließlich auch für die Herstellung von Flachzugproben (siehe Bild 5). Die Endbearbeitung der Zugproben und die Zugversuche erfolgten bei Access und im Rahmen einer Aufstockung bei Exova (siehe AP5).

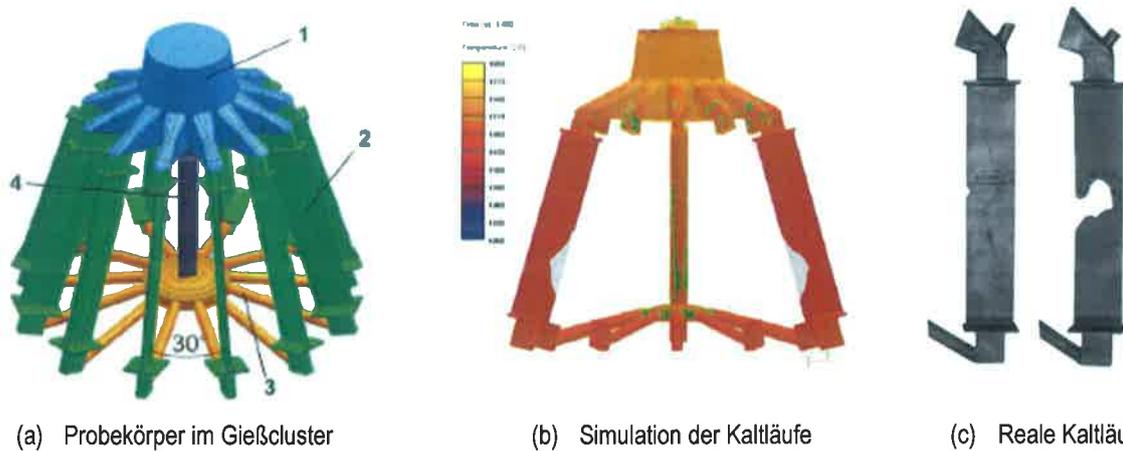


Abb.12: Typischer Aufbau des Gießclusters für das Schleudergießen von Turbinenschaufeln und schaufelähnlichen Probekörpern im Leicomelt-Verfahren (a), Simulation von Kaltläufen (b) und reale Kaltläufe (c), deren Größe und Position an den Kanten von den Prozessparametern abhängen.



Abb.13: auslieferfertige GE Platten P2 T mit je zwei künstlichen Kaltläufen

Dummyschaufeln

Die sogenannten MockUp- oder Dummy Schaufeln (Abb. 15) bilden von der Komplexität her den Übergang von den Platten zur Originalturbinenschaufel. Es gibt jetzt Deckband und Fuß. Eine Seite des ‚Blattbereiches‘ ist weiterhin plan, die andere aber profiliert (Abb. 10). Es gibt noch keine Verdrehung. Leading Edge und Trailing Edge werden durch simple Radien gebildet. Der Auslauf entspricht in etwa der Dicke der im Vorlauf verwendeten dünnen P1 Platten.

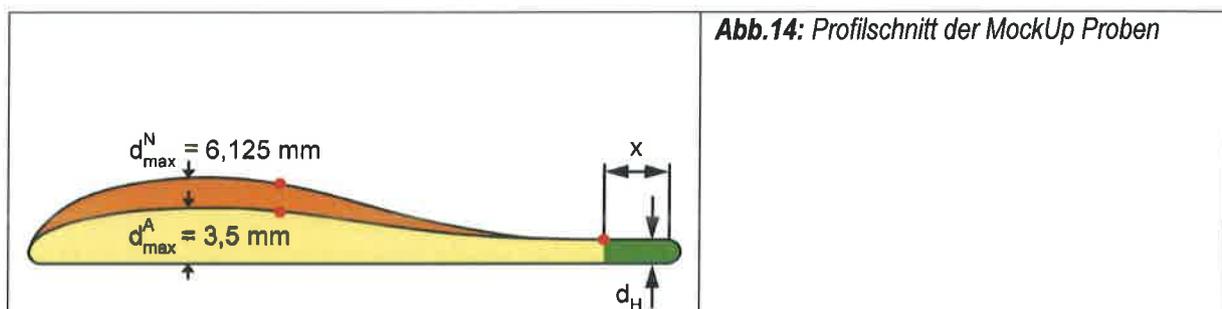


Abb.14: Profilschnitt der MockUp Proben

Die künstlichen Kaltläufe an den MockUp Schaufeln, an denen der LA Vorgang untersucht wurde, basierten auf den bis dahin vorliegenden Ergebnissen. Zwei Kaltlaufgeometrien mit unterschiedlichen Kreisradien und Einfrästiefen wurden definiert. Einfrästiefe und Radius wurden so abgestimmt, das sich ein Eintrittswinkel von 45° ergibt um Kollisionen mit der LA Düse zu vermeiden.

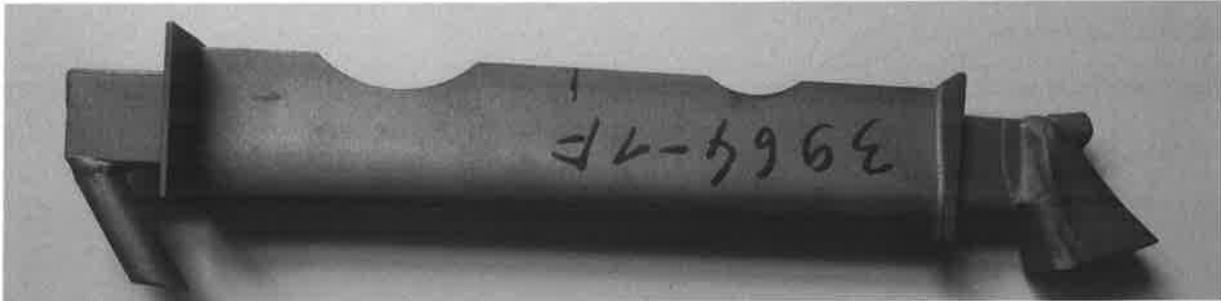


Abb.15: Dummyschaufel mit zwei künstlichen Kaltläufen

Die 12 MockUp Proben haben mindestens je zwei dieser Kaltläufe. Sofern in passenden Größen verfügbar, auch reale unbearbeitete Kaltläufe. Sinnvoll scheint zurzeit nur die Reparatur von kleineren definierten Defekten.

Alle MockUp Schaufeln wurden 3D gescannt und geröntgt.

Realgeometrie Niederdruckturbinenschaufel

Am Ende des Projektes stand die erste Anwendung der bisher erarbeiteten Ergebnisse auf 12 Originalschaufeln (Abb. 16). Dabei wird eine im TATT Projekt entwickelte Geometrie zugrunde gelegt.

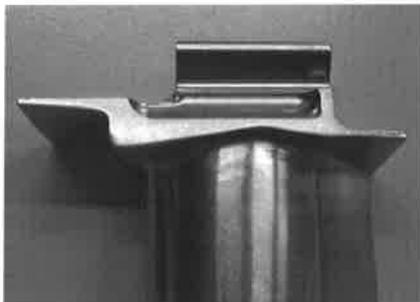


Abb. 16: Detail einer fertig bearbeiteten TiAl Schaufel

Diese weisen ein beidseitig stark profiliertes und verdrehtes Blatt mit Freiformflächen auf. Die „trailing edge“ ist sehr dünn auslaufend. Das Bild dient nur der Illustration einer fertigen Schaufel während im Projekt nur an sand-gestrahlt Schaufeln im Gusszustand gearbeitet wird. Die Kaltläufe und Defekte an den Original-Schaukeln, an denen der LA Vorgang untersucht werden soll, wurden analog zur MockUp Schaufel basierend auf den bis dahin vorliegenden Ergebnissen genau definiert.



Abb. 17: real Schaufeln für die Auslieferung

Die 12 Original-Schaukeln werden mindestens je einen Kaltlauf haben. Sofern in passenden Größen verfügbar, handelt es sich auch um reale, unbearbeitete Kaltläufe. Möglich ist auch die Kombination von künstlich generiertem und realem Kaltlauf. Die Oberfläche ist jeweils gesandstrahlt. Alle Schaufeln wurden 3D gescannt und geröntgt.

II.1 AP 2.2 Strukturanalyse der Probekörper vor LA (CT, 3D-Geometrie, Röntgen)

Die Probengeometrie ist eines der wichtigsten Kriterien entlang der gesamten durch das Projekt abgedeckten Prozesskette. Poren, Lunker oder Risse sind in den Probekörpern nur in kontrollierter und dokumentierter Form zulässig. Teilweise sind gerade diese Fehlstellen hier für die Untersuchung von Reparaturansätzen erwünscht und müssen zerstörungsfrei vermessen und dokumentiert werden. Access hat die Arbeiten zur Probenherstellung durch umfassende Qualitätskontrollen begleitet, durch die Analyse der Maßhaltigkeit, Verformungen der Proben und Porositäten und Risse.

Alle Probekörper wurden bei Access vor und nach den LA Versuchen geröntgt. Von ausgewählten Probekörpern wurden vor und nach den Schweißversuchen 3D-Scans und computertomographische Aufnahmen gemacht. Die Proben wurden auf Poren untersucht, Merkmale wie Nuten und Kaltläufe gegen die CAD Daten verglichen.



Abb.18: Steinbichler 3D Scanner, Nikon Computertomograph (ausser), Computertomograph (innen) (v.l.n.r.)

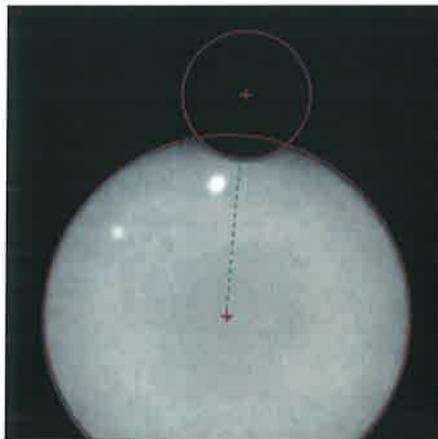
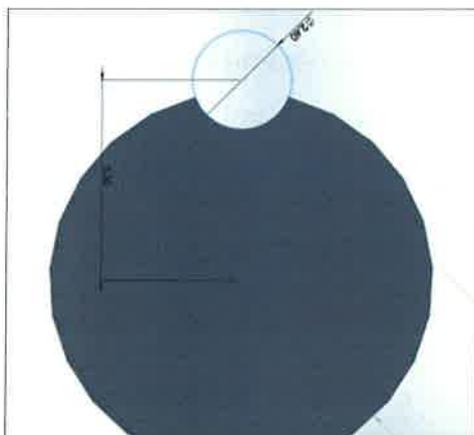


Abb.19: Vergleich der CAD Masse eines Stabes mit einem CT Schnittbild (vor HIP)

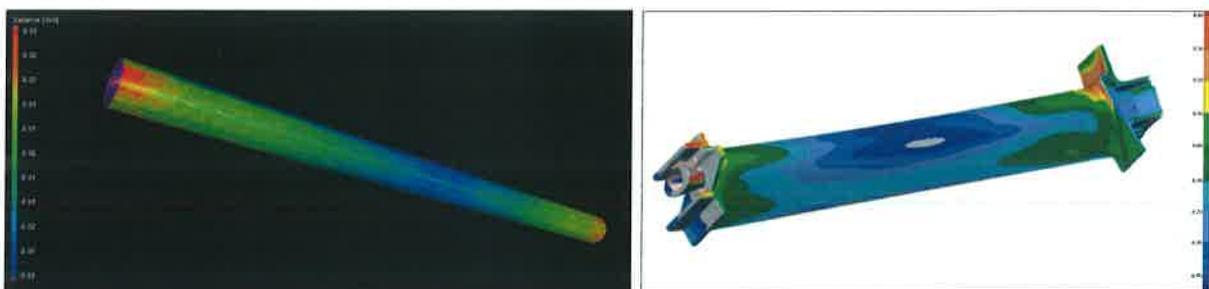


Abb.20: Überprüfung der Formabweichung eines Stabes und einer Schaufel gegen die CAD Daten

II.1 AP 2.3 Mikrostrukturanalyse der Proben vor LA (LIMI, REM, EDX, EBSD)

Neben den CT-Untersuchungen werden an metallographischen Schliffen der Gussproben Gefügestrukturen und Defekte analysiert und quantifiziert. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen decken die wichtigsten Untersuchungen zur Überprüfung der Legierungszusammensetzung an den verschiedenen Proben ab. Der Abbrand von Legierungselementen, Seigerungen und Gasaufnahme (Sauerstoff) stehen hier im Fokus. EBSD Analysen im

REM liefern zusätzliche Information über Kornverteilungen und Orientierung. Sauerstoffanalysen werden im Unterauftrag vergeben.

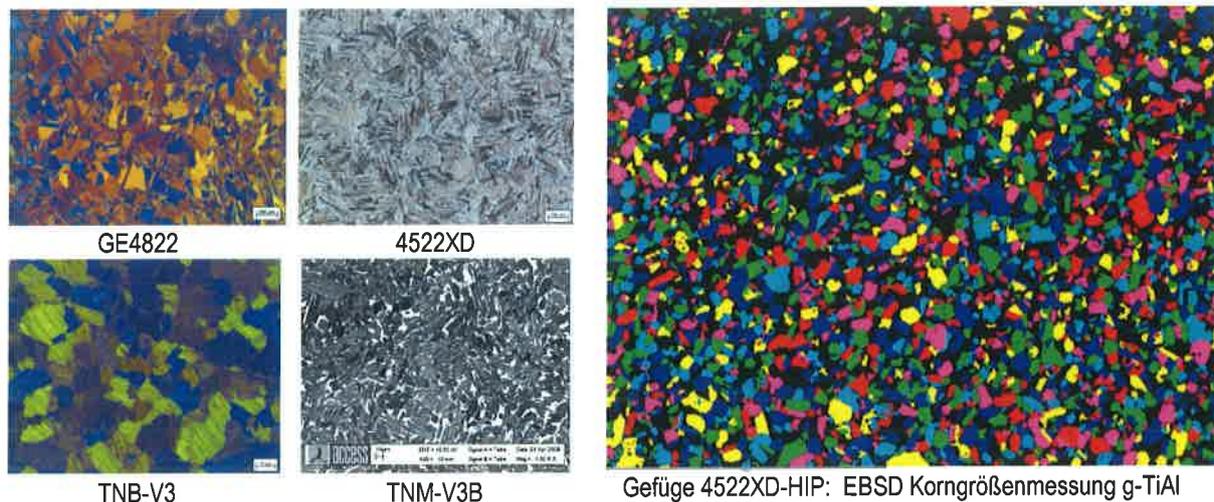


Abb.21: Charakteristische Gefüge technischer TiAl-Legierungen in Gussproben nach HIP-Behandlung und typische Werte der Streckgrenze $R_{p0.2}$ im Zugversuch als Funktion der Temperatur.

Abb.21 zeigt die typischen Gefüge dieser Legierungen wie sie nach Gießen und HIP-Behandlung vorliegen, sowie die damit im Zugversuch erreichten Werte der Streckgrenze $R_{p0.2}$. Die Gefüge sind durchweg gleichmäßig, feinkörnig und nahezu texturfrei. Vergleichbare Gefüge Merkmale und ähnliche Eigenschaften sollen später durch die Wärmebehandlung im LA-Schweißgut und in der Wärmeeinflusszone generiert werden.

II.1 AP 3 Pulverherstellung (TLS, ACCESS)

AP 3 gliedert sich in folgende Unterarbeitspunkte:

AP 2.1	Gießen, mechanische Bearbeitung QS und Bereitstellung von TiAl Elektroden aus den ausgewählten Legierungen für die Pulververdüstung bei TLS
AP 2.2	Mikrostrukturanalyse der Proben mit Hilfe von LIMl, REM, EDX, EBSD und Messungen des Sauerstoffgehaltes

II.1 AP 3.1 Gießen, mechanische Bearbeitung QS und Bereitstellung von TiAl Elektroden aus den ausgewählten Legierungen für die Pulververdüstung bei TLS

Das Ziel des Arbeitspaketes bei TLS ist, ein Prozessfenster für die Gasverdüstung zu ermitteln, in dem Abbrand von Legierungselementen (insbesondere Al und Mn) vermieden und die Sauerstoffkontamination (= Versprödung) minimiert werden.

Von ACCESS werden Stäbe mit einem Durchmesser von 50 mm für die Herstellung der im Projekt verwendeten TiAl Pulvermengen an TLS geliefert (Abb.22). Die Rohlinge sind blankgedreht und die Zusammensetzung nachgewiesen in Analysen [EWW(XD, TNM), GFE Zertifikat(GE)]. Jede Legierung wird mit unterschiedlichen Parametern verdüst und an die Partner versandt. Die Fließfähigkeit der Pulver wird mit FLODEX Tester nach ASTM B213 gemessen. Die Kornfraktion war bereits beim Kick-Off Meeting von den Partnern auf 20-90 μm spezifiziert worden. Jeder der beiden Partner erhält mindestens 5 kg (XD, TNM) und 10kg GE als fließfähig eingestuftes Material. ACCESS erhält von jedem Material Proben für die verschiedenen Untersuchungen. ACCESS lieferte Billets mit insgesamt mehr als 60kg an TLS.



Abb.22: von ACCESS für die Pulververdüsung gegossener Billet Rohling (teilm bearbeitet mit Testscheiben) (links), fertig bearbeitete Billets für den Einsatz in der Verdüsungsanlage (rechts)

II.1 AP 3.2 Mikrostrukturanalyse der Proben mit Hilfe von LIM, REM, EDX, EBSD und Messungen des Sauerstoffgehaltes

Die Morphologie der Partikel (sphärisch ohne Satelliten) und die Kornfraktion (20-90 μm) sind optimal für das Laserauftragschweißen anzupassen und die nutzbare Ausbeute pro Pulvercharge soll erhöht werden (> 30 %), um den Anteil von Fertigungsschrott zu verringern. Dazu müssen der Fein- und Grobanteil der Partikel verringert werden. Zur Anpassung des Verdüsungsprozesses wird der Einfluss von Parametern wie Stabdurchmesser, Aufheizrate, Schmelzüberhitzung, Gasdruck und Reinheit der Inertgas-Atmosphäre im AP von TLS untersucht. Die hergestellten Partikel werden hinsichtlich ihrer Kornfraktion, Morphologie und chemischen Zusammensetzung untersucht (Abb.23) und die Ergebnisse mit den Verdüsungsparametern korreliert. Iterativ werden dann die Verdüsungsparameter angepasst, um die oben genannten Ziele zu erreichen.

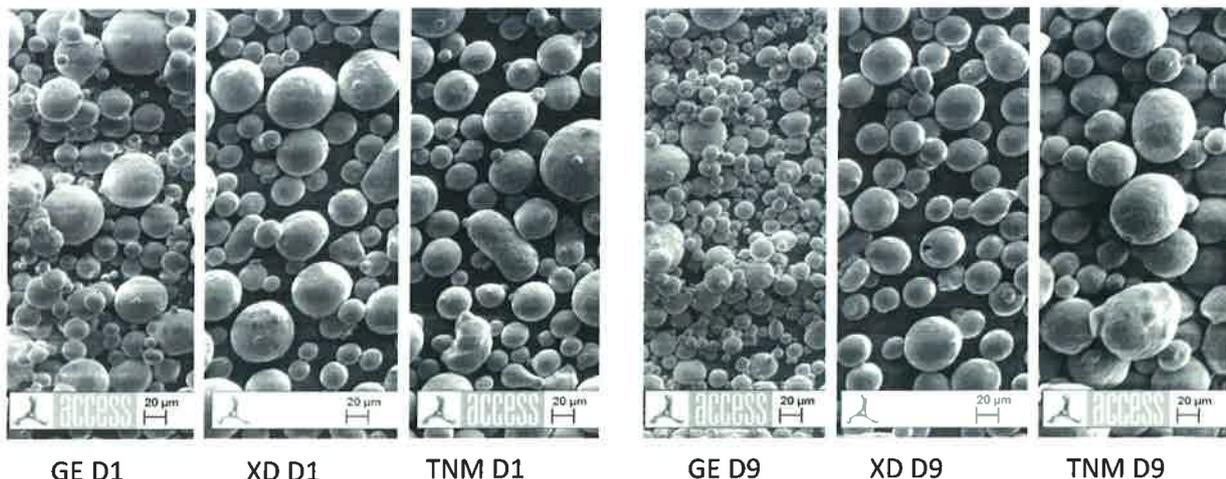
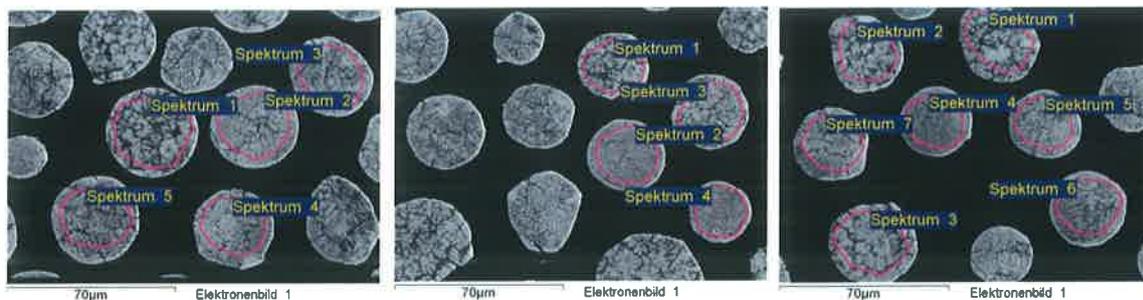


Abb.23: REM Bilder der von TLS aus den ACCESS Billets gasverdüsteten Pulver aus den verschiedenen Legierungen und aus verschiedenen Verdüsungsparametern

Das von TLS gelieferte Pulver muss die in Abschnitt 1.2 beschriebenen Grenzwerte zur chemischen Zusammensetzung für die jeweilige Legierung einhalten und muss den Anforderungen für die problemlose Verwendung in den Schweißanlagen der beiden Projektpartner ILT und Laservorm erfüllen.



EDX Messungen (Quantifizierung unter Nutzung eines eigenen Standards für GE4822), in At.%

Element	Mittelwert	Std. dev.	Min.	Median	Max.
Al	47,0	0,16	46,7	47,0	47,2
Ti	49,1	0,17	48,8	49,0	49,3
Cr	2,0	0,03	2,0	2,0	2,1
Nb	1,9	0,03	1,9	1,9	2,0

Abb.24: Chemische Homogenität des Pulvers am Beispiel GE 4822, die Messung der Zusammensetzung erfolgt nur in den markierten Bereichen um Randfehler auszuschließen.

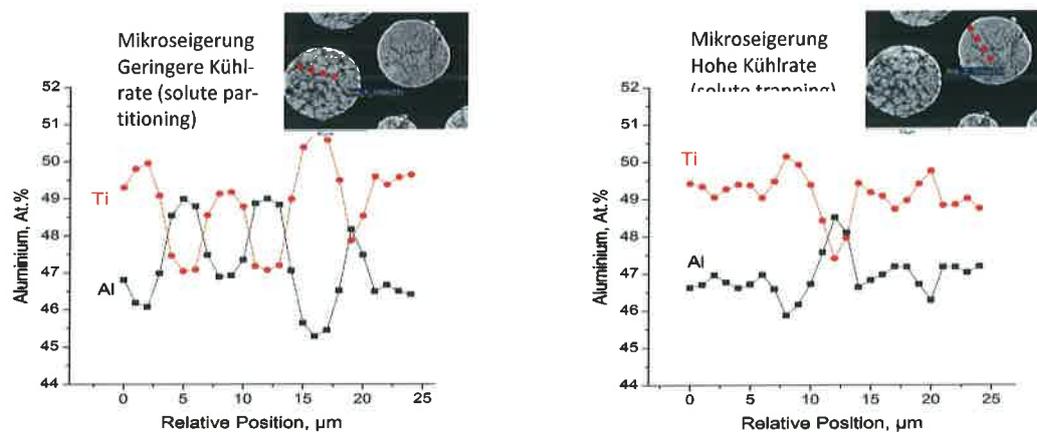


Abb.25: von ACCESS für die Pulververdüsung gegossener Billet Rohling (teilbearbeitet mit Testscheiben) (links), fertig bearbeitete Billets für den Einsatz in der Verdüngungsanlage (rechts)

II.1 AP 4 Verfahrensentwicklung Laserauftragschweißen und Simulation (ILT/ACCESS)

Die Verfahrensentwicklung selbst liegt in diesem AP beim ILT und bei Laservorm. Das Probenmaterial aus den LA Prozessen der Partner wurde bei Access hinsichtlich der Mikro- und Makrostruktur eingehend untersucht. Die Ergebnisse wurden in Projektmeetings oder internen Berichten und Präsentationen den Partnern vorgestellt und verarbeitet.

Die experimentellen Arbeiten werden, neben den Untersuchungen zu Mikro- und Makrostruktur (analog zu II.1 AP 2.2), begleitet von der Entwicklung einer thermomechanischen Simulationsmethode zur Vorhersage der Verformungen durch den Repairprozess und durch Simulationsrechnungen bei ACCESS zur Erstarrung und zu Eigenspannungen. Mit Simulationsrechnungen sollen die Auswirkungen der gewählten Verfahrensparameter, wie Vorwärmtemperaturen, Bahngeschwindigkeiten, Laserleistung und Materialeinbringung bereits im Vorfeld und während der Versuche besser eingeschätzt werden.

AP 4 gliedert sich in folgende Unterarbeitspunkte:

AP 4.1	Mikro- und Makrostruktur der Probekörper - Charakterisierung der Probekörper Maß- und Formabweichungen (CT, 3D-Geometrie, Röntgen, REM/EDX, Limi...)
AP 4.2	Integrative Prozess-Simulation: Entwicklung von Verzug und Eigenspannungen beim Gießen und Schweißen

II.1 AP 4.1 Mikro- und Makrostruktur der Probekörper

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen decken die wichtigsten Untersuchungen zur Überprüfung der Legierungszusammensetzung in der Auftrag Schweißung und der Wärmeeinflusszone (WEZ) ab. Der Abbrand von Legierungselementen, Seigerungen und Gasaufnahme (Sauerstoff) stehen hier im Fokus. EBSD Analysen im REM liefern zusätzliche Information über Kornverteilungen und Orientierung. Sauerstoffanalysen werden im Unterauftrag vergeben.

Ausgewählte Proben werden nach den Schweißversuchen an Access gegeben für eine eingehende Gefüge Analyse mittels LIMi, REM, EDX und EBSD um Fragen der chemischen Homogenität, der Gefüge Feinheit, der Erstarrungstextur im Schweißgut und der Phasenumwandlungen in der Wärmeeinflusszone zu klären. Vorrangig ist das Überprüfen der Aluminium und Sauerstoffgrenzwerte und die Untersuchung auf Mikrorisse.

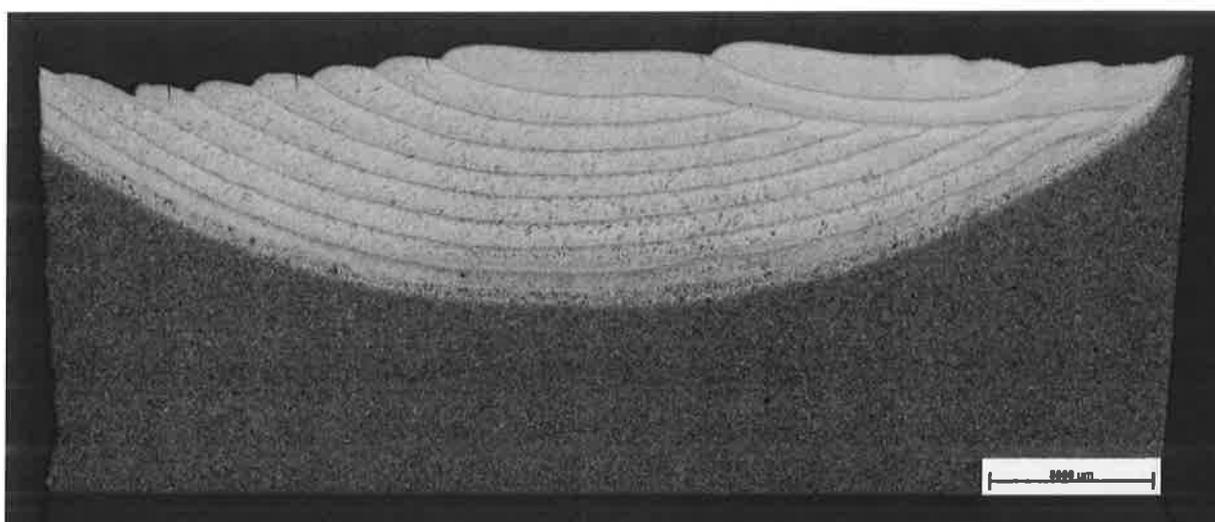


Abb.26: Schliff und Ätzung (HF) eines Multispur LA geschweißten künstlichen Kaltlaufes, am Beispiel TNM

Beispielhaft sei hier auf Untersuchungen zu einer Multispur geschweißten Probe mit künstlichem Kaltlauf eingegangen (Abb.26:). Von einer der mit 2mm Spurbreite geschweißten Proben wurde ein Längsschliff angefertigt und metallographisch präpariert. Abb.26 zeigt eine lichtmikroskopische Mosaix Aufnahme dieser Probe, automatisiert zusammengesetzt aus 12x26 Einzelbildern mit hoher Auflösung. Das Bild lässt den Spuraufbau sehr gut erkennen. Abb.28 zeigt REM Detailbilder aus den verschiedenen Spuren in zwei unterschiedlichen Vergrößerungen. Im unteren mittleren Bereich des Schweiß Aufbaus, am Übergang zum Gussgefüge wurden sechs Reihen von EDX Linien (Abstand der Messpunkte 20µm) in die unterschiedlichen Lagen gelegt (Abb.27). Überprüft werden sollte die Annahme, dass aufgrund der hohen Temperaturen in Laserbasierten additiv Prozessen ein verstärktes Abdampfen von Aluminium auftreten kann. Im AP zur Wärmebehandlung (näheres in AP5) muss das stark texturierte, primäre Erstarrungsgefüge während der Abkühlung oder der nachgeschalteten Wärmebehandlung in ein feinkörniges, texturfrees (-armes) Gefüge überführt werden. Die dabei ablaufenden Phasenumwandlungen und Veränderungen der Textur hängen von korneinendenden Legierungselementen ab, insbesondere von Bor [Hec2008], sowie von den anderen Legierungsbestandteilen. Es ist deswegen äußerst wichtig, dass die chemische Zusammensetzung im Schweißgut der des Grundwerkstoffs genau entspricht, dass also keine Verluste z.B. durch Abdampfen von Aluminium entstehen.

Die Mittelwerte der Linienmessungen sind der eingeklinkten Tabelle zu entnehmen und zeigen für Al-Verluste keine signifikante Bestätigung. Bemerkenswert ist aber, dass die Streuung der Al-Konzentration in der Linie der As-Cast Messwerte größer ist als die Unterschiede in und zwischen den LA Lagen (Abb.29)

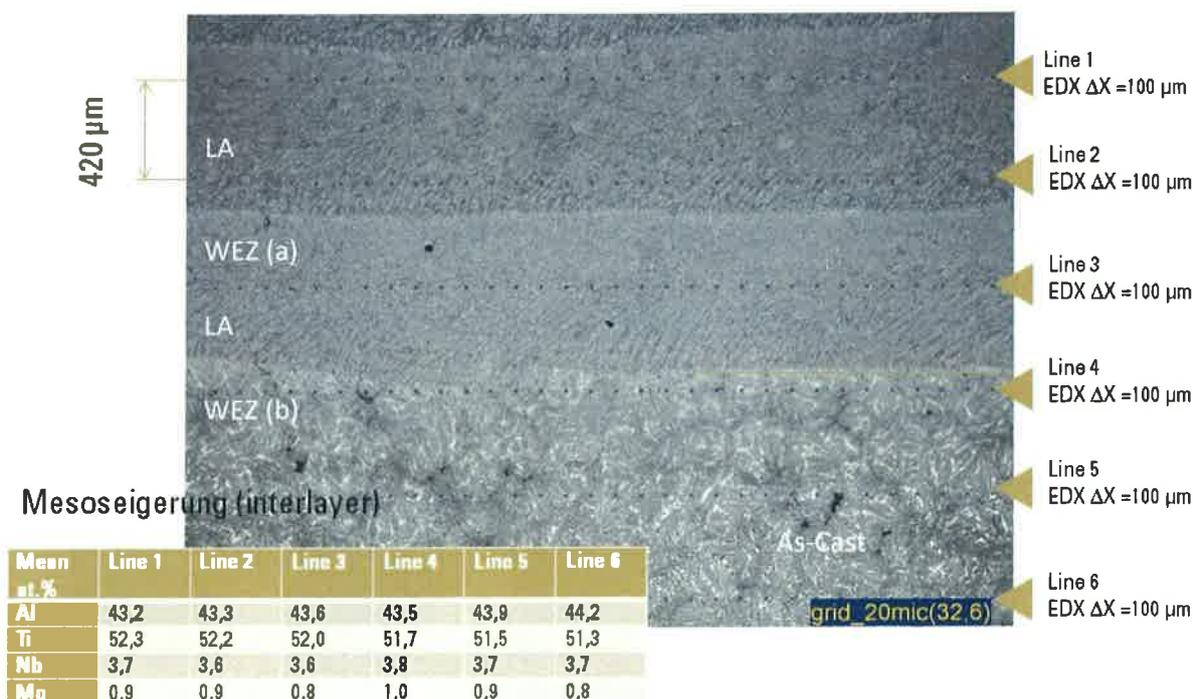


Abb.27: EDX Messlinien zur Messung der Mesoseigerung an der Multinahtprobe aus vorheriger Abbildung (hier werden nur die ersten zwei Lagen am Übergang zum Gussgefüge betrachtet)

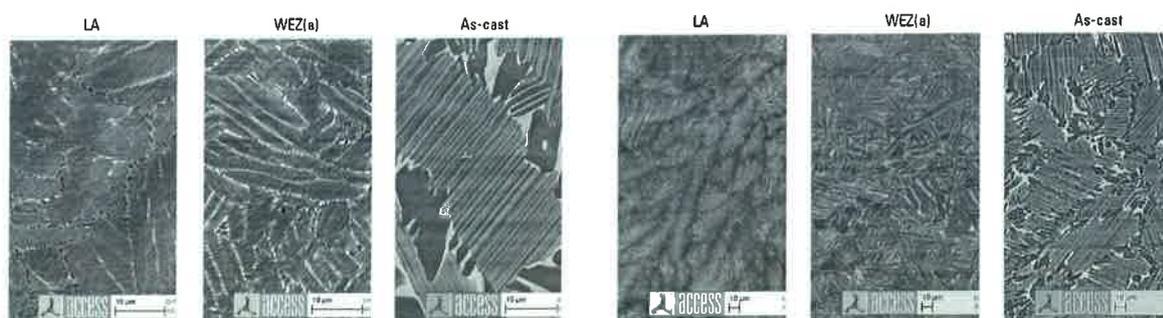


Abb.28: Unterschiede im Mikrogefüge der Multispur Probe aus Abb.26 (LA Gefüge, Wärmeeinflusszone und Gussgefüge), links 5000fach, rechts 1000fach

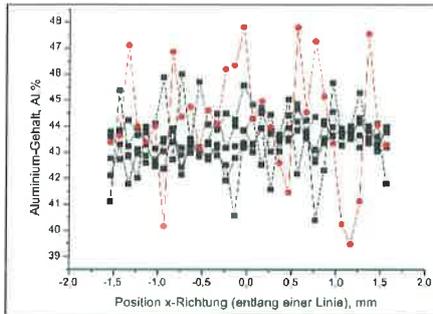


Abb.29: Diagramm der Messwertstreuung aus den Linien EDX Messungen der LA Multispurprobe (Abb.26). Rot: As-Cast, Schwarz: LA Linien

Von ausgewählten Probekörpern wurden vor und nach den Schweißversuchen 3D-Scans und computertomographische Aufnahmen gemacht. Alle geschweißten Proben (Stäbe, Platten, Dummyschaufeln) wurden 3D gescannt und mit den vorherigen Scans nach dem Guss hinsichtlich der Formabweichung verglichen. Diese Vergleiche wurden unter anderem für die Validierung der Simulationsrechnungen verwendet.

II.1 AP 4.2 Integrative Prozess-Simulation: Entwicklung von Verzug und Eigenspannungen beim Gießen und Schweißen

Eine auf ABAQUS basierende Simulation soll die Vorhersage von Verzug und lokalen und globaler Spannungen durch den Repair Prozess ermöglichen. Auf diese Weise soll das Verständnis für den Prozess verbessert und eine Vorhersage über den zu erwartenden Verzug und die Wahrscheinlichkeit von Rissbildung getroffen werden können. Dazu wurde ein thermomechanisches Modell mit gekoppelter Rechnung entwickelt. In ersten Arbeiten wurden Modelle und Rechnungen für die im Projekt verwendeten Plattengeometrien und Einzelspuren entwickelt und anhand der Projektversuche verifiziert. In einer weiteren Arbeit wurde das Modell auf Multispuren und die schaufelähnliche Dummygeometrie erweitert.

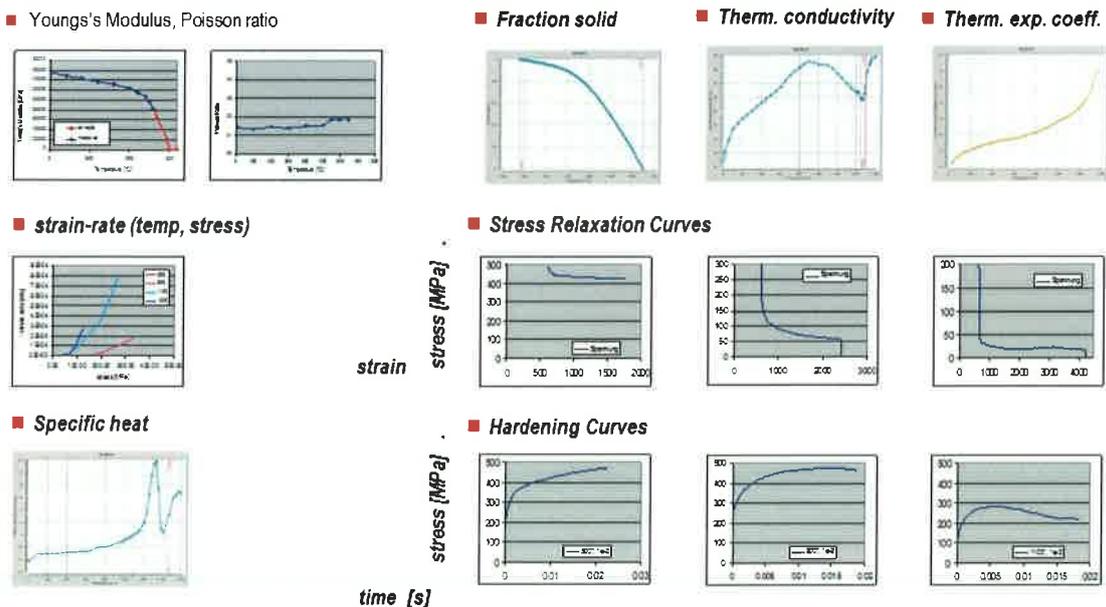


Abb.30: für die thermomechanische Simulation notwendige Eingangsgrößen über den Anwendungsraum (Zeit, Temperatur, Geschwindigkeit...). Diese Datensätze sind für jede Legierung erforderlich.

Eine erhöhte Temperatur und inhomogene Temperaturverteilung im Werkstück führen zu schweißbedingten Verzügen und Eigenspannungen. Das bedeutet, „ein zuvor beanspruchungsfreies Bauteil würde weder Verzug noch Eigenspannungen entwickeln, wenn die Erwärmung und anschließende Abkühlung über alle Bereiche gleichmäßig erfolgt und die thermische Expansion nicht behindert wird. [Langenhorst2015]

Die Inhomogenität der Temperaturverteilung im LA Prozess resultiert aus der Differenz vom zugeführten und dem sich im Bauteil ausbreitenden Wärmestrom. Dazu kommt der Unterschied in der Leistungsdichte zwischen zugeführter Wärme und abfließender Wärme (der zugeführte Wärmestrom ist um ein vielfaches höher), welcher dann in einem Wärmestau resultiert. Folglich wird der prozessferne Bereich gehindert dieselbe Temperatur zu erreichen

wie das Wärmequellenzentrum. Andersherum behindern die kälteren Bereiche das Ausdehnungsbestreben der wärmeren Bereiche. Das Resultat sind Druck- sowie Zugeigenspannungen die entweder zu einer Verformung des Bauteils, oder zu einer spannungsabbauenden Rissbildung oder einer Kombination von beidem führen.

Die Simulation soll einerseits Aussagen ermöglichen welche Prozessparameter Verzug und lokale Spannungen minimieren, aber auch ob eine Probe, oder ein Bauteil auch nach dem Repairprozess innerhalb der geometrischen Toleranzen bleibt. Eine Reparatur wäre nur dann sinnvoll.

Um die Vorgänge im LA auf die Proben mittels Finite Element Rechnungen abbilden zu können, ist eine große Menge an thermophysikalischen Daten erforderlich. Für jede Legierung müssen diese Daten für jeden Zeitpunkt im Versuchsablauf zur Verfügung stehen. Das heißt, dass zum Beispiel die Dehnrates über den gesamten, im simulierten Versuch berührten Temperaturbereiches ermittelt sein muss. Ebenso Wärmeleitfähigkeit oder spezifische Wärme usw.. ACCESS verfügt durch die langjährige Arbeit mit Simulation an Titanaluminiden, über die notwendigen Datenbanken und Materialdaten (Abb.30) und kann fehlende Werte gegebenenfalls selbst ermitteln.

Es ist anzumerken, dass die lokal durch den LA Prozess eingebrachte Wärme auch erhebliche metallurgische Veränderungen um den Schweißbereich verursacht. Die genaue Vorhersage von Restspannungen und Verzerrungen der geschweißten Strukturen erfordert eine genaue Analyse dieser Vorgänge und eine Berücksichtigung dieser Vorgänge im Simulationsmodell. Für die Abbildung der Laserquelle wird folgend das "Gaußsche Verteilungsmodell" mit einer "doppelt ellipsoid" Konfiguration verwendet um die Wärmequelle abzubilden. Dem Modell der Wärmequelle nachgelagert sind dann ein thermisches und ein mechanisches Modell, die für die korrekte Ermittlung der Verformungen gekoppelt gerechnet werden (Abb.31,32). Für die thermische Simulation wurde die ABAQUS Module SFILM&SRDIATE, für die mechanische Simulation DFLUX genutzt.

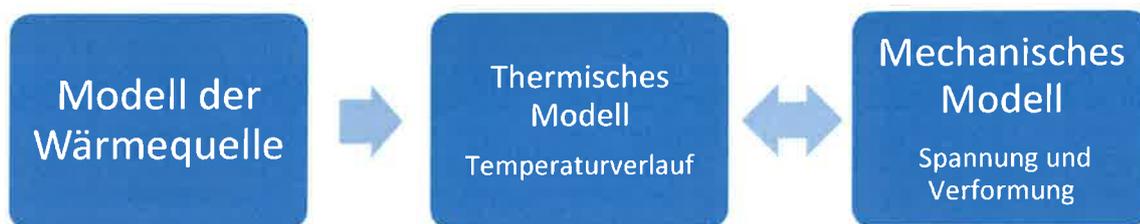


Abb.31: Modellierungskonzept für das Verformungsverhalten beim Laserauftragsschweißen

Die vorgestellte Methode wurde mit der FE-Software ABAQUS™ 6.14-3 umgesetzt. Zur Integration der Wärmequelle sowie zur Berechnung der Spannungen ist jeweils eine Userroutine im Einsatz gewesen.

Governing Equation for thermal analysis

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{dT}{dy} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{dT}{dz} \right) + Q$$

Heat transfer equation

$$K(\Delta T \cdot \mathbf{n}) \begin{cases} [-h_c(T - T_0) - \epsilon\sigma(T^4 - T_0^4)]|\Gamma & \Gamma \notin \Lambda \\ [Q - h_c(T - T_0) - \epsilon\sigma(T^4 - T_0^4)]|\Gamma & \Gamma \in \Lambda \end{cases}$$

Thermal analysis
SFILM & SRDIATE

Mechanical analysis
DFLUX

Heat source [Gaussian distribution]

$$q = \frac{3}{\{(R^2 \times \pi) \times p_f\} \times \left\{ \left(1 - e^{(-p_f \times t)} \right) \times p \right\}}$$

Strain rate

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} + \alpha \dot{T} \delta_{ij} + \lambda \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right)$$

Abb.32: zugrundeliegende Formeln für die gekoppelte thermomechanische Simulation

Simulation von Einzelspuren an Plattengeometrien

Im ersten Abschnitt der Simulationentwicklung wurden die Modelle zunächst für die linear geführten Einzelspuren an den simplen Plattengeometrien entwickelt. Im nächsten Schritt wurden die Modelle auf die 3-Achs Bahnsteuerung und Hatchbetrachtung ausgedehnt. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgte jeweils anhand von optischen 3D Scans (Steinbichler COMETplus und INSPECT plus/Polyworks Software) der zugehörigen Proben (Abb.33). Der Verzug der Platten durch die einseitig in einer Nut aufgebrachte LA Naht zeigte sich im Vergleich der 3D Scans erwartungsgemäß (Abb.34).

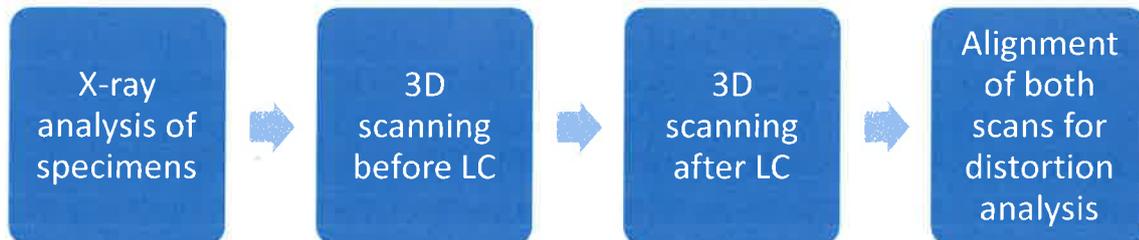


Abb.33: Ablauf der Strukturmessungen an den Plattenproben des Projektes

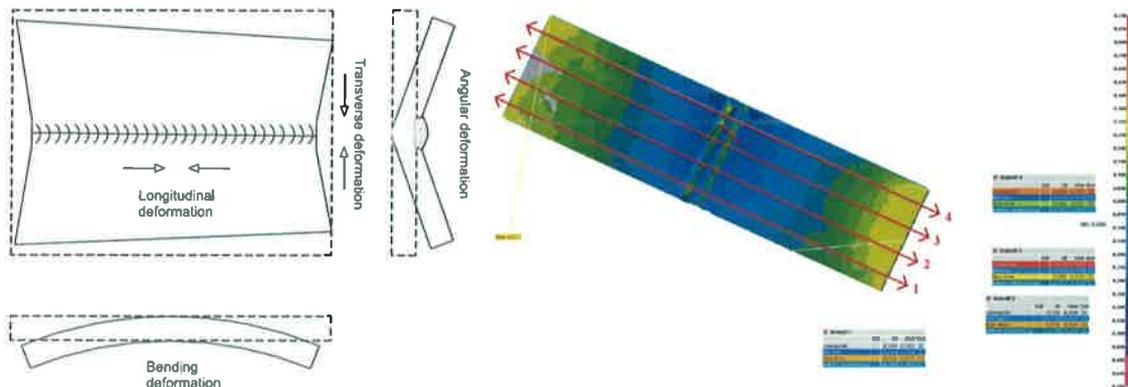


Abb.34: typische Verformungsmoden einer LA Probe [Lundbäck (2003)], farbcodiertes Messbild einer Projektprobe mit vier Messschnittlinien (Diagramm in Abb.37)

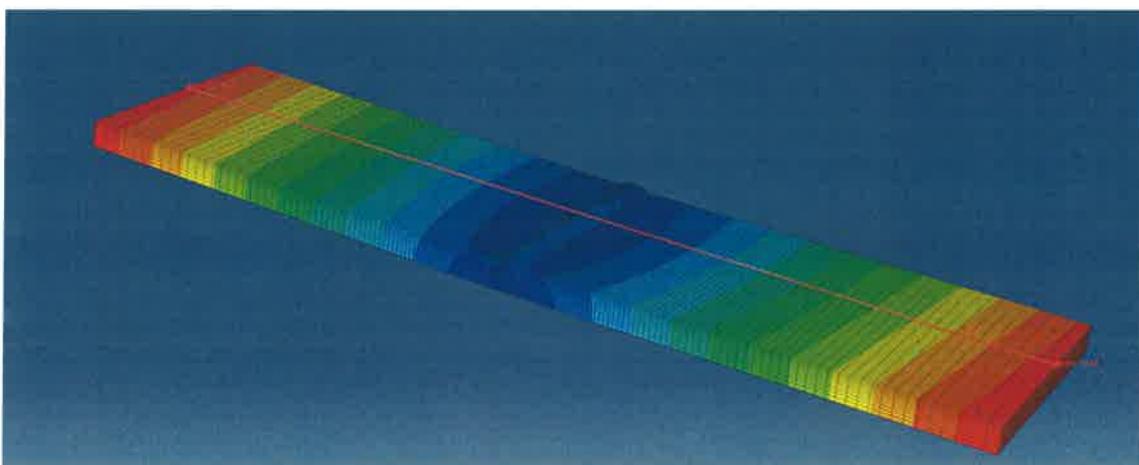


Abb.35: simulierte Verformung einer P1 Platte mit den P2V2 Parametern

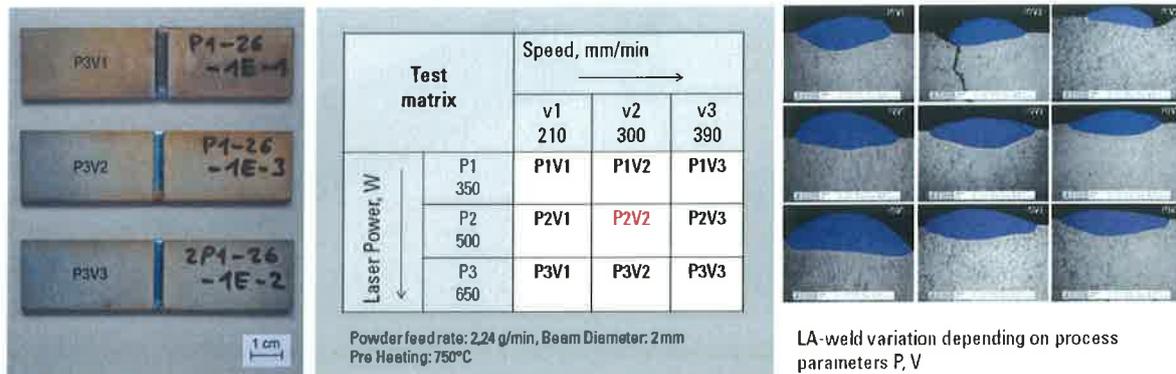
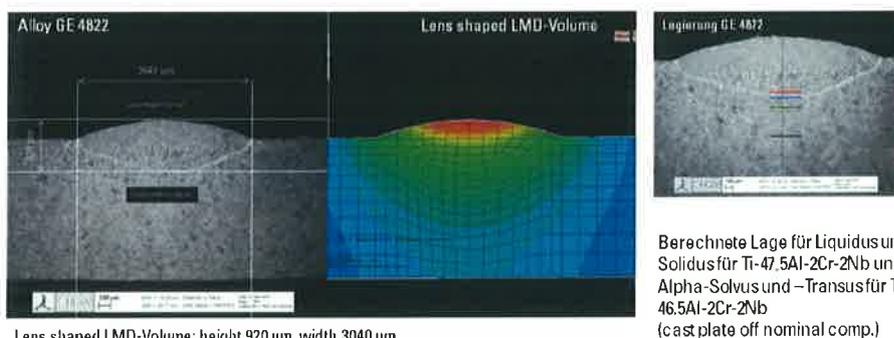


Abb.36: Parametermatrix der Platten LA Versuche (links). Die Simulationsergebnissen mit gleichen Parametern werden mit den zugehörige Naht Geometrien in den Schliffen (rechts) abgeglichen.

Beim Modell der Wärmequelle wurden Daten des ILT bezüglich Laserleistung, Spotsize, Geschwindigkeit, Intensitätsverteilung, Reflektivität zugrundegelegt. Diese Werte waren für TiAl nicht alle in ausreichender Qualität verfügbar. Die Simulation der Temperaturfelder über die Naht mit diesem Modell wurde mit den Ergebnissen aus den Schliffen der Plattenversuche kalibriert. Es wurden dazu die in den Gefügeschliffbildern der Nähte erkennbaren Morphologiegrenzen über Korrekturen der für den TiAl-LA Prozess bisher unscharfen Werte (z.B. effektive Laserleistung) mit den gerechneten Linien zu $T_{solidus} = 1505^{\circ}\text{C}$ und $T_{liquidus} = 1474^{\circ}\text{C}$ der Simulation zur Deckung gebracht (Abb.37). [Hukkerikar2015, Izadi2016] Für die Reihe der P3 Proben etwa zeigte die Simulation zu Beginn bei einem $P3_{eff} = 240.5 \text{ W}$ ein viel zu tiefes eintauchen der $T_{liquidus}$ Linie.



Lens shaped LMD-Volume: height 920 μm , width 3040 μm

Abb.37: Vermessung der Realnaht und vernetzte Simulation mit Temperaturfeld (links), gerechnete Lage von Liquidus, Solidus und α -Transus (Mitte), von Mises Stresses entlang der Naht (rechts)

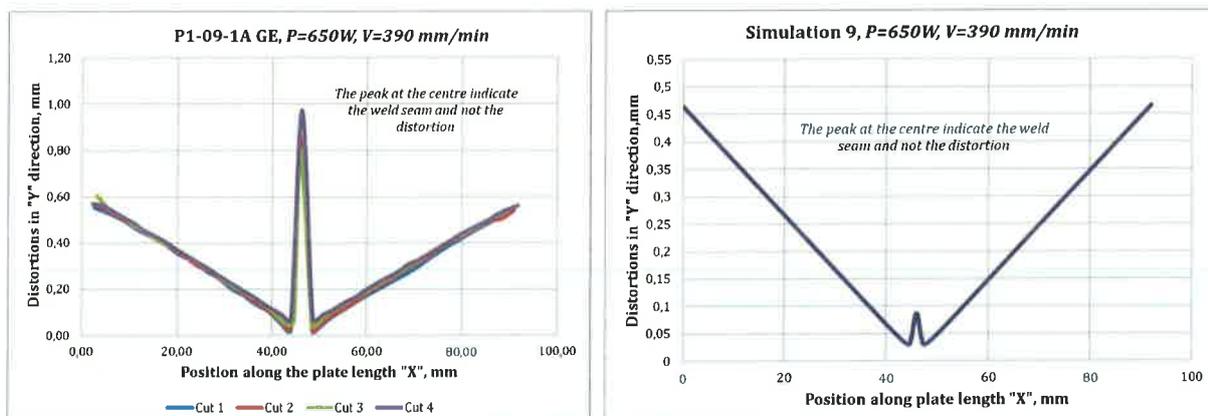


Abb.38: Vergleich zwischen Simulation und Messung, links: 4 Messschnitte aus 3D Scans der LA geschweißten Probe (Abb.32), rechts: Simulationsergebnis des Verzugs bei den selben Bedingungen gerechnet (in dieser Entwicklungsphase wurde die Nahtform noch nicht korrekt abgebildet, daher die Abweichung im Nahtbereich)

Nach Kopplung der kalibrierten Thermischen Simulation mit dem mechanischen Teil brachte auch die Verzugssimulation der Plattenschweißungen sehr gute Ergebnisse im Vergleich zum Realfall (Abb.37,38, Tabelle4).

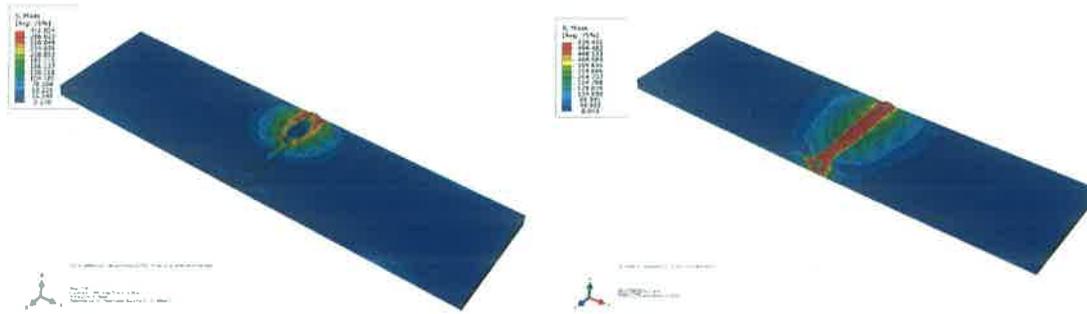


Abb.39: Restspannungen mit den P2V2 Parametern während des LA Prozesses und nach Abkühlung auf Raumtemperatur. Hier Von Mises Spannung [MPa]

Erwähnenswert ist, dass der in Probe P1V2 sichtbare Riss aufgrund innerer Restspannungen, die während des LA Prozesses erzeugt wurden, erst während der Präparation auftrat. Der Riss trat vermutlich durch Stress Relaxation während des Trennens der Probe für die REM Präparation auf. Aufgrund der Ergebnisse der Plattenschweißversuche und Simulationen wurde die Parametervariante P2V2 für die weiteren Versuche zu Verzug und Spannungen ausgewählt.

	Distortion in Y direction for $x=0$ mm [mm]	Distortion in Y direction for $x=92$ mm [mm]	Averaged Distortion [mm]
P2V2 model	0.50689	0.51211	0.5095
P2V2 specimen	0.483	0.476	0.4795
Table 4: Vergleich Real/Simulation des maximalen Verzuges an den Enden einer kleinen Plattenprobe (2x24x92mm)			Difference = 0.03 mm Rel.Difference = 5.9%

Simulation von Verzug und Spannungen durch Multispuren an Schaufelähnlichen Geometrien (Dummy Blades)

Die sogenannte MockUp (oder Dummy)-Schaufel (Abb.15) bildet von der Komplexität her den Übergang von den Platten zur Originalturbinenschaufel. Es gibt jetzt zusätzlich das Deckband und den Fuß. Eine Seite des ‚Blattbereiches‘ ist weiterhin plan, die andere aber profiliert (Abb.16).

Darüber hinaus ist keine Verdrehung, wie bei Freiformschaufeln, versehen. ‚Leading Edge‘ und ‚Trailing Edge‘ werden durch simple Radien gebildet.

Das Hauptziel dieses Arbeitspaketes liegt in der Weiterentwicklung der Simulation von linear geführten LA Nähten an Plattengeometrien hin zur Simulation von realen Repairprozessen mit Multispuren an einem künstlich generierten Kaltlauf der Dummyblade-Geometrie. Das Hauptaugenmerk liegt jetzt auf den resultierenden Spannungen und Verzügen, besonders auch im Hinblick auf Rissbildung und der kritischen Betrachtung zur Einhaltung von Bauteiltoleranzen.



Abb.38: Vernetzung der Dummygeometrie mit hoher, spurauflösender Netzfeinheit im Repairbereich und grob im LA fernen Bereich (Tetraeder/Hexaeder Netz). Eine Netzfeinheit von 0,2mm im LA Bereich war erforderlich um Artefakte in der lokalen Prozessabbildung sicher zu vermeiden. Eine Vereinfachung des Modells besteht darin, dass nicht mit Hatch gearbeitet wurde, sondern eine Lage aus drei (im dicken unteren Bereich) respektive zwei Lagen nebeneinander (im dünnen oberen Bereich) gelegten Spuren besteht.

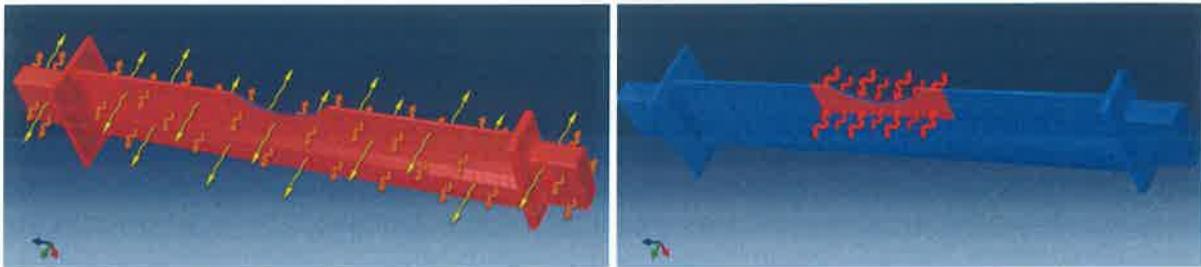


Abb.39: Schematische Darstellung des Wärmestrommodells für die gesamte Probe (links) und für den Bereich der induktiven Vorheizung (rechts)

Um den Laserstrahl im Modell der Wärmequelle richtig abzubilden, werden die realen Prozessparameter benötigt. Diese wurden experimentell bestimmt und liegen aus den Arbeiten zum vorherigen Kapitel bereits vor: Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit, Laserdurchmesser, Pulverfördertrate, usw. werden hier verwendet.

In diesem Teil des Arbeitspaketes zur Simulation wurde die gesamte verzugsrelevante Prozesskette simuliert. Vorheizen, der spuraufgelöste LA Schweißprozess und die anschließende HIP Wärmebehandlung. Die Wärmeverlustmechanismen werden unter ABOQUS mit den Modulen SFILM und SRADIATE berechnet (Abb.39). Die Simulation der Vorheizsituation (Abb.40) entspricht dabei den Planungen und Vorgaben aus AP 1 (Anforderungsprofil: Einstellen einer Temperatur um 800° im Bereich des LA). Erst zum Ende des Projektes konnte diese Verteilung durch den Einsatz 3D gedruckter Induktorspulen auch im Laborversuch erreicht werden. Das in Abb. gezeigte LA geschweißte Dummyblade wurde aufgrund einer frühen Induktorvariante im Reparaturbereich deutlich niedriger vorgeheizt.

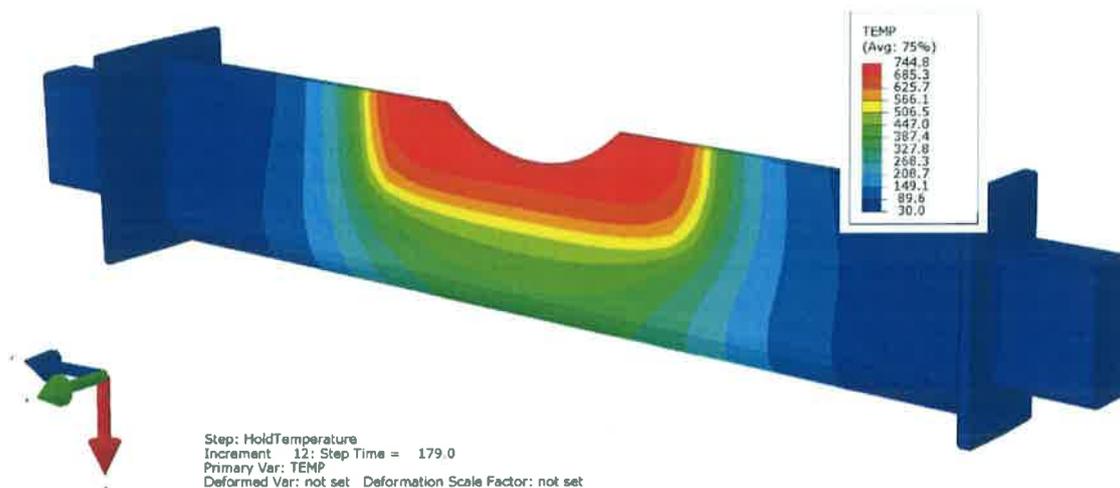


Abb.40: Simulierte Temperaturverteilung nach dem Erreichen der Vorheiztemperatur

Das Modell bringt aus der im Vorfeld durchgeführten Schmelzpoolsimulation des ILT eine umfangreiche Temperaturgeschichte mit, in der die Ursachen für thermische Ausdehnung/Kontraktion und damit für die thermische Spannungen liegen, die letztlich zu einem Verzug eines Werkstücks führen.

Eine praktische Möglichkeit, Aussagen über die Temperaturhistorie eines Werkstücks zu bekommen, ist die Untersuchung von Mikrostrukturänderungen, die zum Beispiel in REM-Bildern sichtbar sind. Bei Access wurden begleitende Untersuchungen durchgeführt, um aus quantitativen und qualitativen Mikrostrukturanalysen, Aussagen abzuleiten welche lokalen Temperaturen die Substrate während des LA Prozesses durchlaufen haben.

Wenn ein Material einem nicht isothermen Temperaturwechsel ausgesetzt wird entstehen thermische Spannungen in Form von Eigenspannung. Beim LA geschieht dies typischerweise dort, wo der Laserstrahl das Material lokal erwärmt. Die lokale Ausdehnung wird durch das umgebende kältere und festere Material behindert. Sobald das Substrat nach dem Schweiß Vorgang abkühlt, kühlen bestimmte Bereiche schneller ab als andere und ziehen sich dabei zusammen, wodurch sich innere Spannungen oder Eigenspannungen bilden. Longitudinale Spannungen σ_z

(Spannungen parallel zur Richtung des LA Prozesses) und transversal Spannungen σ_x (Spannungen die transversal zu σ_z stehen) sind die signifikantesten inneren Spannungen die in einem LA Werkstück auftreten können. Zugkräfte werden hierbei als positive Spannungen, Druckkräfte als negative Spannungen bezeichnet.

Der Bereich des künstlichen Kaltlaufes wurde in der Simulation mit 68 Lagen a 3 Spuren im unteren dicken Bereich und a 2 Spuren im oberen dünnen Bereich gefüllt. Mit jeder Lage wurden 0,125mm aufgebracht. Von 68 Lagen wurden im Nachhinein 52 Lagen in drei Spuren und die restlichen 16 Lagen in zwei Spuren aufgeteilt. Somit ergibt sich die Gesamtanzahl zu 188 Spuren. Mit diesem Netzmodell wurde wie bereits bei den Platten die Simulationsrechnungen durchgeführt. Die Spuren einer Lage werden dabei mäanderförmig durchgerechnet und dann die nächste Lage begonnen. Eigenspannungen oberhalb 500MPa wurden ermittelt. Die Spannungszonen vor und hinter dem Laser sind in den nachfolgenden Abbildungen als rote (Zugspannung) und blaue Bereiche (Druckspannung) zu erkennen.

Liu [Liu2006] und andere berichten über das Auftreten sehr hoher Eigenspannungen in LA Schweiß Prozessen an Ti-45Al-5Nb-0.2C-0.2B (at.%) Platten trotz Vorheizung auf 800°C (Abb.41). Die Eigenspannungen wurden dabei experimentell ermittelt: HEMS [High Energy Materials Science] at Deutsches Elektronen-Synchrotron [DESY]. Auch in der spurgenauen Simulation des an den Dummieschaufeln durchgeführten LA Prozesses finden sich Werte oberhalb 500MPa.

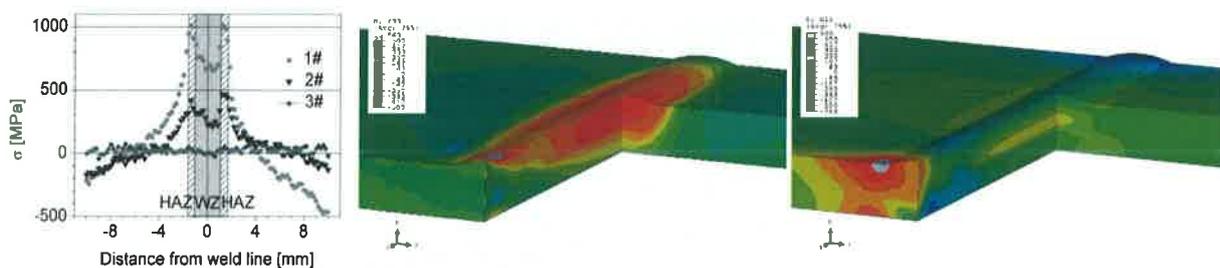


Abb.41: HEMS Messungen der Eigenspannung in einem LA Prozess an TiAl-Platten [Liu2006], auch in der Simulation der PEPTIL Plattenproben erreichen die Werte mehr als 500MPa

Bemerkenswert ist, das die Simulation bei mittlerer Fixierung der Probe eine Auslenkung der Probenenden im Bereich von bis zu 0,8mm bereits durch das Aufbringen der Vorheizung zeigt. Die animierte Simulation des Prozesses zeigt dann eine schwingungsartige Bewegung in y-Richtung um diese Ausgangslage herum in Abhängigkeit ob gerade die äußere oder die innere Spur prozessiert wird. Diese Auslenkungen sind deutlich kleiner als die Auslenkung durch die Vorheizung. Nach Prozessende und Abkühlung hat die Schaufel nahezu ihre ursprüngliche Form (Abb.43).

Sollte in einer Einspannsituation die Schaufel an den Enden gefasst werden, müssten diese Auslenkungsvorgänge bereits bei der Bahnplanung berücksichtigt werden, da es sonst zu Spurfalschlagen bis zum verfehlen des Bauteils kommen könnte.

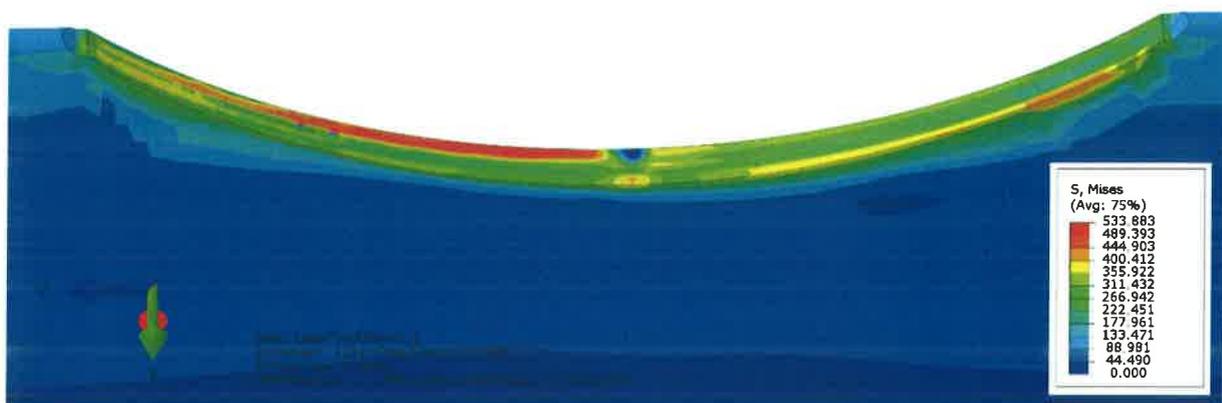


Abb.42: Vergleichsspannungen nach von Mises zur Mitte der dritten Spur der zweiten Lage (t=307,5s)

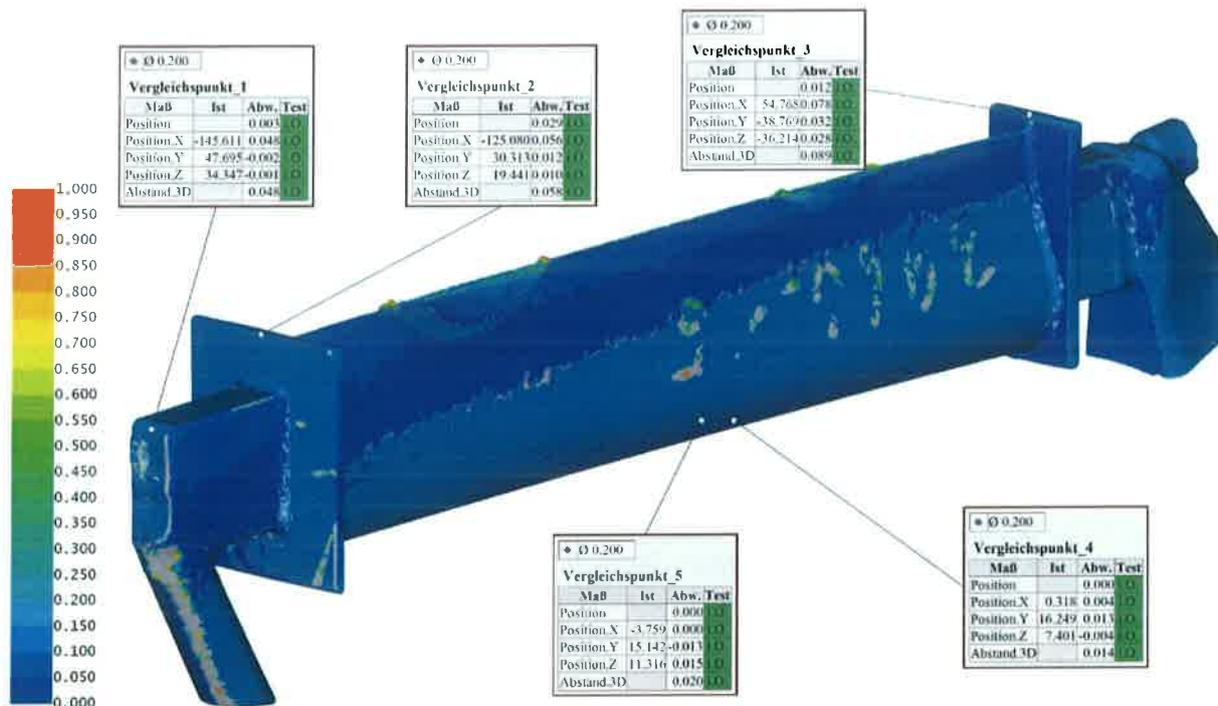


Abb.43: 3D Vergleich der LA geschweißten Dummieschaufel mit dem Scan des Ausgangszustandes



Abb.44: trotz noch nicht ausreichender Vorheizung erfolgreich LA geschweißte Dummieschaufel

Das vorgestellte Verfahren zur FEM-Simulation des Laserauftragsschweißens macht es möglich die entstehenden Spannungen und Verformungen an Titanaluminid Niederdruckturbinenschaufeln zu untersuchen. Die Simulation basiert dabei auf einer thermischen Analyse zur Ermittlung von hervorgerufenen Temperaturgradienten und auf einer mechanischen, die darauf aufbauend die entstehenden Eigenspannungen und Verschiebungen berechnet. Die hohen Eigenspannungswerte (von Mises Stress) zeigen das Ausmaß der Spannungen die durch den LA Vorgang im Werkstück aufgebaut wird. Die Werte lassen deuten darauf hin, dass die Streckgrenze des Materials lokal überschritten und plastische Deformation oder Rissbildung erfolgt.

Die Simulation des LA Prozesses unter Einbeziehung einer nachfolgenden Wärmebehandlung die neben der Einstellung der gewünschten Morphologie auch auf den Abbau der inneren Spannungen abzielt, war eines der vor-

dersten Ziele des Projektes. Die Simulationsergebnisse zeigen auch, dass die inneren Spannungen durch die Wärmebehandlung drastisch reduziert werden, eine bereits erfolgte Verformung wird dadurch aber nicht rückgängig gemacht.

Ein Problem wurde identifiziert im Konflikt aus einerseits benötigter Feinheit des Modells für die hochaufgelöste Spursimulation mit Rissvorhersage und dem Wunsch daraus die Verformung im gesamten Teil abzuleiten. Im Zuge der Rechenzeitoptimierung wurden Vereinfachungen getroffen, die zwangsläufig zu Ergebnisabweichungen geführt haben. Langfristig gesehen, erscheint aus Sicht der Fertigungstechnik eine Verknüpfung aus Simulation und Reparaturprozess sinnvoll und erstrebenswert. Die Simulation bietet eine kosteneffektivere Methode zur Beurteilung von entstehenden Verformungen und Spannungen an den Schaufeln und kann bei rechenzeitoptimiertem Prozess die Reparatur deutlich beschleunigen und bestmöglich gestalten.

II.1 AP 5 Wärmebehandlung und mechanische Eigenschaften

Aufgrund der hohen Abkühlraten beim Laserauftragschweißen ist zu erwarten, dass sich die gewünschten Gefügestrukturen nicht direkt im LA Prozess einstellen. Daher sind Wärmebehandlungsverfahren zu erarbeiten, um diese einzustellen. Hier kann nur bedingt auf vorhandene Wärmebehandlungsparameter zurückgegriffen werden, da sich die Gefüge der Auftrag geschweißten Schichten erheblich von denen gegossener oder geschmiedeter Bauteile unterscheiden. Die Versuche werden zunächst in einem Ofen durchgeführt, ggfs. erfolgt eine Übertragung auf die Vorwärmtechnologie, so dass die Wärmebehandlung direkt in der Schweißaufspannung erfolgen kann und eine Nachbehandlung im Ofen entfällt.

Weiterhin werden bei ACCESS Zugversuche zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften an Auftrag geschweißten Proben durchgeführt.

II.1 AP 5.1 Wärmebehandlung (ACCESS, Unterauftragnehmer)

Im LA-Ausgangszustand ist das Gefüge der Legierungen im Wesentlichen ultrafein lamellar aufgebaut und anhand der Mikroseigerungen ist die ursprüngliche, dendritische Erstarrungsstruktur der primären $\beta(\text{Ti})$ -Phase klar zu erkennen. Die Ausgangsgefüge weisen zudem auf der Längenskala der einzelnen Lagen bzw. Spuren charakteristische chemische und strukturelle Inhomogenitäten auf, die in 2D Schliffen als so genannte „Bänder“ zu erkennen sind. Beispiele dafür in der Legierung GE4822 sind in Abb.45 enthalten. Innerhalb der Bänder, die aus der Überlappung benachbarter Spuren / Lagen entstehen, ist das Gefüge der alten Lage teilweise wieder angeschmolzen

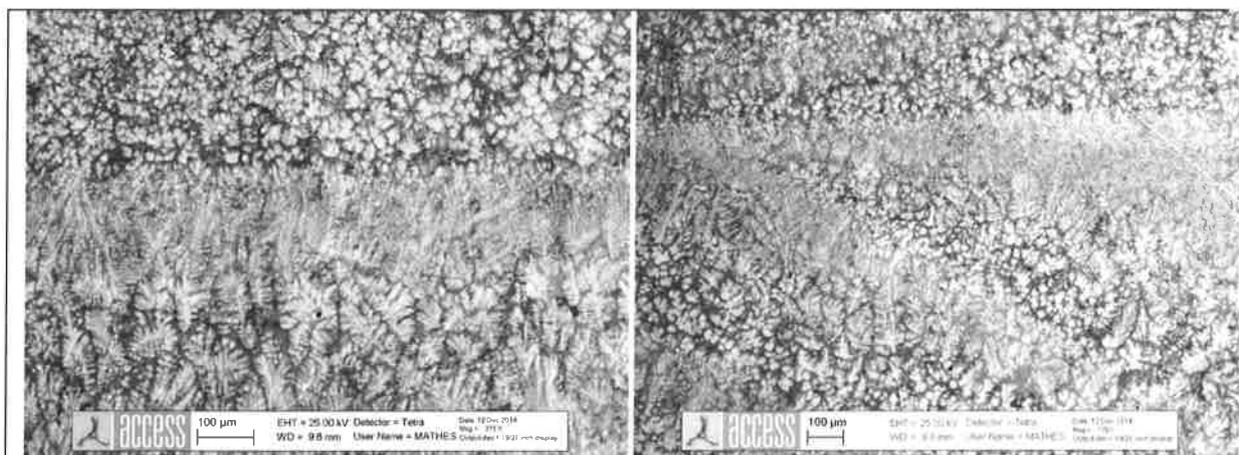


Abb.45: REM-Aufnahmen der Gefüge in GE4822 (LA-Vollkörper) mit den charakteristischen „Bändern“ die aus der Überlappung benachbarter Spuren / Lagen entstehen.

bzw. einer lokalen Wärmebehandlung nahe der Solidustemperatur ausgesetzt. Dadurch wird die Mikroseigerung deutlich reduziert, aber an der Aufschmelzgrenze bildet sich zwischen fest / flüssig ein Konzentrationsunterschied ΔC ; aus, der durch eine hochdynamische Relaxation in Richtung des thermodynamischen Gleichgewichts mit C_{FEST}

$\neq C_{\text{FLÜSSIG}}$ entsteht. In den untersuchten TiAl-Legierungen beläuft sich ΔC_i für das Legierungselement „i“ – Aluminium auf 0.5 bis 0.8 at.%. Die absoluten Werte sind an sich gering, wirken sich aber auf die späteren Gefügeumwandlungen aus, deren Umwandlungstemperatur sensitiv von der chemischen Zusammensetzung abhängt, z.B. beträgt die Steigung der Alpha-Transus Linie im Phasendiagramm rund $25^\circ\text{C} / \text{At.}\% \text{ Al}$ (vergl. Abb.48) Vor diesem Hintergrund und im Kontext der Reparatur gießtechnisch hergestellter Proben / Schaufeln stellten sich für die Optimierung der Wärmebehandlung in AP5 folgende Aufgaben:

Aufgabe 1:

Untersuchung der Korngrößen und Gefüge am Übergang vom Gussmaterial zum LA-Material. Dafür wurde das Laserauftragschweißen einer Einzelspur in eine vorgefräste Nut gegossener Platten gewählt. Variiert wurden die LA-Parameter Laserleistung P und Laserscan-Geschwindigkeit v und die Wärmebehandlung wurde unter HIP-Bedingungen durchgeführt mit den HIP-Parametern: $T=1185^\circ\text{C}$, $t=240 \text{ min}$, $p=172 \text{ MPa}$, Kühlrate 10 K/min . Die Versuche wurden an der Legierung GE4822 durchgeführt, insgesamt wurden 9 Kombinationen (P,v) analysiert. Die Ergebnisse sind in einer Masterarbeit dokumentiert [Abel 2015], repräsentative Ergebnisse werden in Abb. WB2 und WB3 dargestellt.

Aufgabe 2:

Untersuchung der Gefüge-Entwicklung als Funktion der WB-Temperatur und der LA-charakteristischen Inhomogenitäten. Dafür wurden zylindrische LA-Vollkörper des Partners ILT im Temperaturgradienten wärmebehandelt. Die Versuche erfolgten für die Legierungen GE4822, TNM und 4522XD und bieten einen guten Überblick zum Verhalten additiv gefertigter TiAl-Legierungen über ein breites Spektrum von Temperaturen, für eine feste Haltezeit von 240 Minuten und einer abschließenden kontrollierten Abkühlung mit einer Abkühlrate von 12 K/min . Die Ergebnisse dieser Versuche sind zurzeit noch nicht veröffentlicht, eine gemeinsame Veröffentlichung mit dem Fraunhofer ILT ist geplant.

AP 5.1.a: LA-Einzelspur in vorgefräster Nut / Substrat Guss Material , Legierung GE4822, HIP

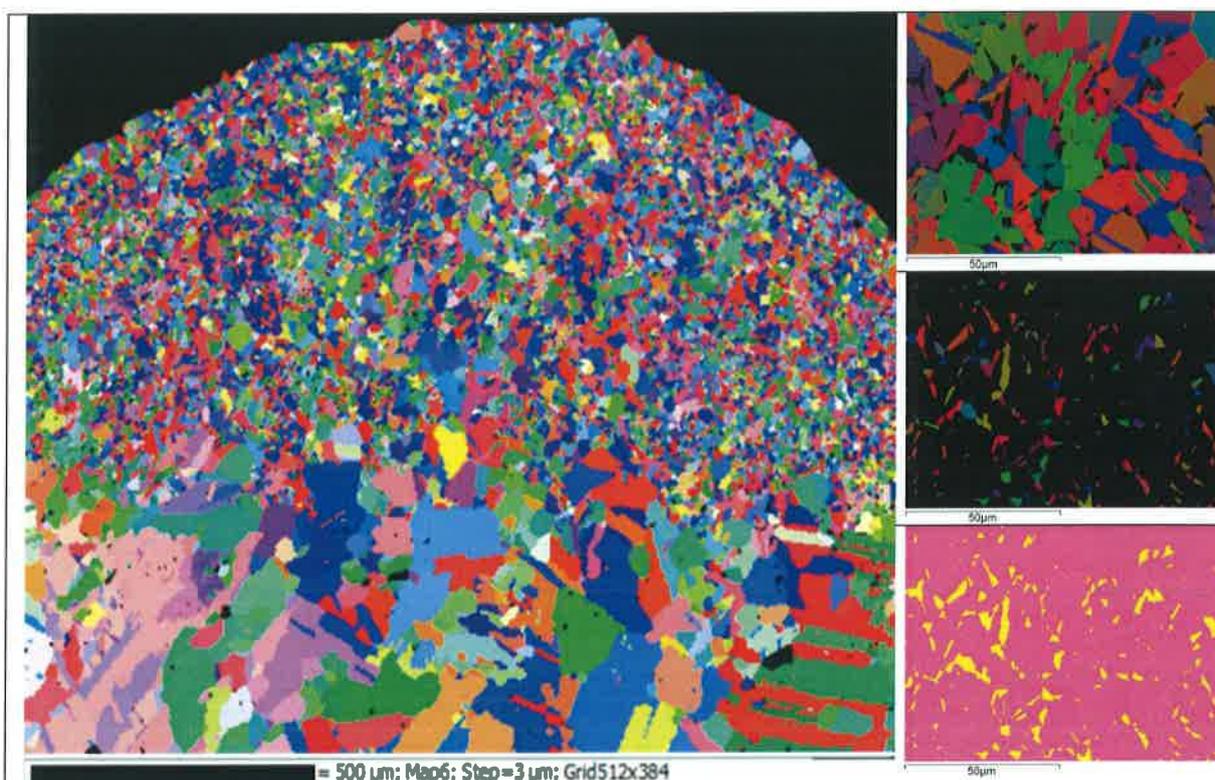
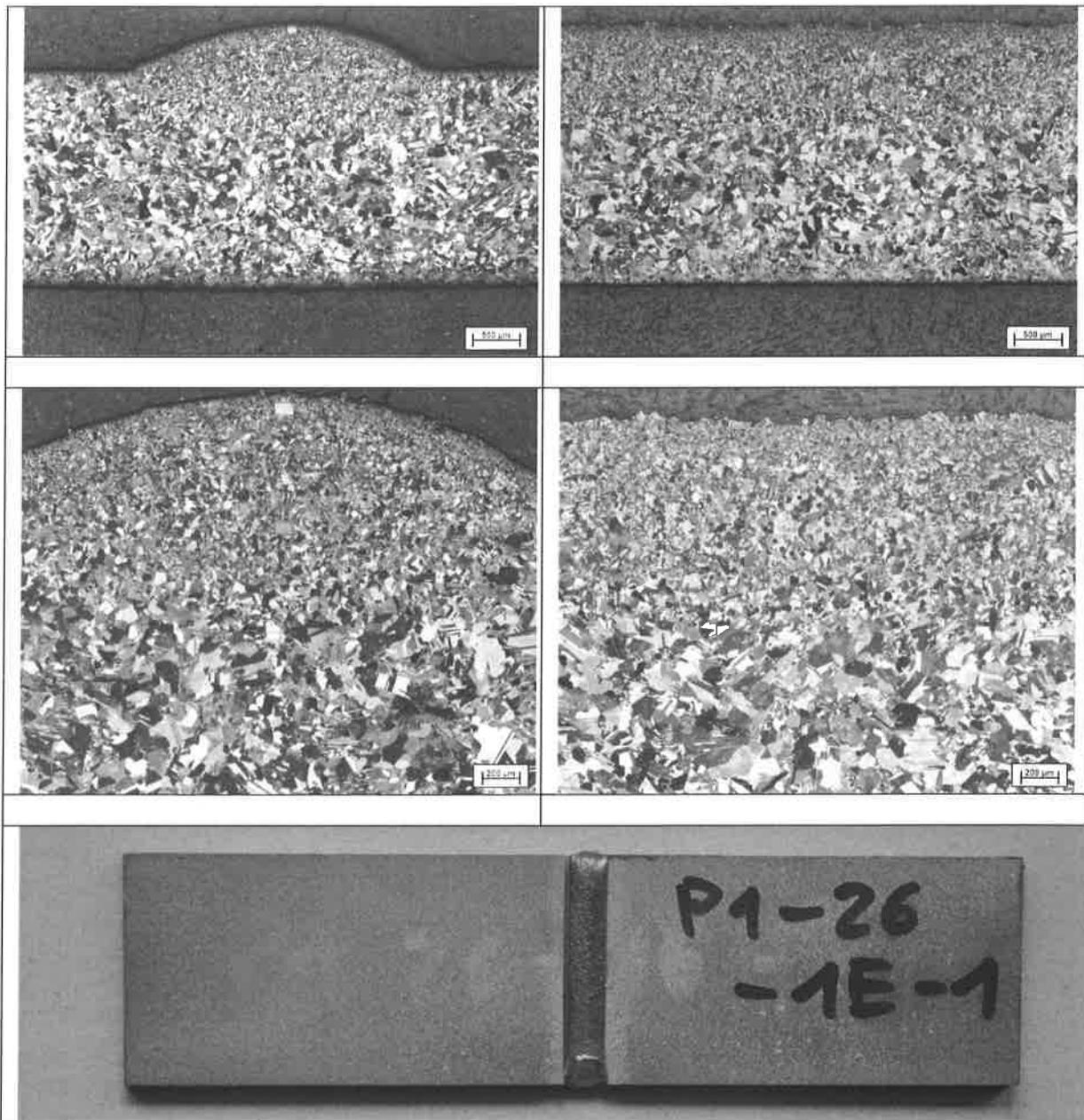


Abb.46: EBSD-Messung der Kornstruktur in der Legierung GE4822 nach Laserauftragschweißen einer Einzelspur in eine vorgefräste Nut (LA-Parameter $P=350 \text{ W}$, $v= 390 \text{ mm/min}$, Vorwärmung 700°C) und nachfolgender Wärmebehandlung (HIP-Parameter: $T=1185^\circ\text{C}$, $t=240 \text{ min}$, $p=172 \text{ MPa}$, Kühlrate 10 K/min). Links – alle Phasen; rechts – Phasen gesondert dargestellt auch im Phasenmapping mit $\gamma\text{-TiAl}$ (pink) und $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ (gelb).



Härte HV30	LA-Naht	Grundmaterial
Messung 1	224	227
Messung 2	238	209
Messung 3	232	207
Messung 4	225	218
Messung 5	228	213
Messung 6	225	222

Abb.47: Kornstruktur in der Legierung GE4822 nach Laserauftragschweißen einer Einzelspur in eine vorgefräste Nut (LA-Parameter $P=650\text{ W}$, $v=300\text{ mm/min}$, Vorwärmung 700°C) und nachfolgender Wärmebehandlung (HIP-Parameter: $T=1185^\circ\text{C}$, $t=240\text{ min}$, $p=172\text{ MPa}$, Kühlrate 10 K/min). Dargestellt ist das Gefüge nach Kroll-Ätzung im Quer- und Längsschliff durch die Einzelspur (siehe Foto). Die Kornstruktur im LA-Bereich ist relativ gleichmäßig, wenn auch einzelne Bereiche mit groben $\gamma\text{-TiAl}$ -Körnern auf etwa halber Höhe zu erkennen sind (roter Marker-Keis).

Abb.46 zeigt ein Beispiel für GE4822 im Querschnitt durch eine Einzelspur, die in eine vorgefräste Nut mittels LA aufgetragen wurde. Die Korngrößen wurden im Rahmen einer Masterarbeit [Abel 2015] systematisch als Funktion

der LA-Parameter Laserleistung P und Laserscan-Geschwindigkeit v untersucht. Die mittlere Korngröße der γ -TiAl Phase variiert kaum mit (P, v) und liegt ausgedrückt als äquivalenter Kreisdurchmesser bei rund $15 \mu\text{m}$, rund 3 Mal feiner als im gegossenen Substratmaterial. Die Legierung enthält für die gewählten HIP-Parameter keine lamellaren Bereiche weder im LA noch im Gußzustand. Abb.47 zeigt eine Übersicht des Gefüges nach Kroll-Ätzung. Die nur geringfügig höhere Härte im Bereich der LA-Naht ist überraschend und die zurzeit noch laufenden Zugversuche bei Exova sollen hierzu weitere Rückschlüsse ermöglichen.

AP 5.1.b: LA-Vollkörper, Gefüge-Entwicklung als Funktion der WB-Temperatur

Um die Gefüge-Entwicklung als Funktion der WB-Temperatur zu untersuchen wurden Wärme-behandlungen im Temperaturgradienten für die Legierungen GE4822, TNM und 4522XD durchgeführt: Die Haltezeit im definierten Temperaturgradienten betrug jeweils 240 Minuten. Danach wurden die Proben mit einer Kühlrate von 12 K/min abgekühlt. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

Zylindrische LA-Vollkörper ($\varnothing 10 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$) wurden von dem Projektpartner Fraunhofer ILT für die Versuche zur Verfügung gestellt. Sie wurden auf $\varnothing 8 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ abgedreht und jeweils in einen Bridgman-Ofen eingebaut, der im oberen Ofenraum eine regelbare Heizzone und im unteren Ofenraum eine Kühlzone integriert hat, die voneinander durch eine ringförmige adiabate Zone getrennt sind (vergl. Abb. WB4 (a)). Das obere Drittel der Probe befindet sich in der Heizzone, das untere Drittel in der Kühlzone, so dass in Probenlängsachse ein axialer Temperaturgradient entsteht. Der Temperatur-verlauf wurde in einem gesonderten, instrumentierten Versuch mit einem Thermoelement gemessen (Abb. WB4 (b)). Im Versuchsaufbau konnte die Relativ-Bewegung zwischen Thermo-element und Probe, d.h. das axiale Temperaturprofil, sehr genau bestimmt werden, indem der Ofen mit fest integrierter Probe über das fest stehende Thermoelement gesteuert bewegt wurde und schrittweise eine bekannte, neue Position angefahren wurde. Das gemessene Temperaturprofil wurde mit einem Polynom 4-ter Ordnung gefittet (Abb. WB4 (b)). Damit ist jeder axialen Position z in Probenlängsachse eine eindeutige Temperatur zuzuweisen. Die Auswertung der Gefüge erfolgte anschließend im Längsschliff durch die Probe anhand einer Reihe von REM oder LiMi Aufnahmen, die zu einem Mosaik-Bild der ganzen Probe zusammengefügt wurden.

Abb. WB4(c) zeigt einen Ausschnitt des LiMi-Mosaik-Bildes für die Legierung GE4822 im Temperaturbereich von 1300°C bis 1350°C . Die Bandstruktur bleibt bis 1338°C erhalten und löst sich erst auf, wenn die Alpha-Transus-Temperatur überschritten wird. Oberhalb der Alpha-Transus Temperatur befindet sich die Probe im einphasigen α -Ti Gebiet und entsprechend schnell erfolgt hier das Kornwachstum. Bei der Abkühlung am Versuchsende mit 12 K/min entsteht die klassische lamellare Struktur innerhalb der α -Ti Körner. Innerhalb der Bänder ist Alpha-Transus schon ab 1326°C erreicht, und die Struktur der Bänder erscheint nach Abkühlung lamellar. Die am Gefüge der Probe bestimmten Temperaturen sind in guter Übereinstimmung mit thermodynamischen Berechnungen (Abb. WB4(d)), wissend, dass der Aluminium-Gehalt der Legierung innerhalb der Bänder um rund 0.7 at.% Al geringer ist als Al-Gehalt der benachbarten Bereiche. Ob Sauerstoff eine zusätzliche Rolle spielt, wurde nicht untersucht.

Der Versuch mit GE4822 zeigt, dass LA-Material nach WB unterhalb der Alpha-Transus-Temperatur unweigerlich die charakteristische Bandstruktur als periodische Gefüge-Inhomogenität beibehält. Dieser Befund ist für TiAl-Legierungen nicht überraschend, denn es ist bekannt, dass kleine Konzentrations-unterschiede zu staken Gefügeunterschieden führen. Die Legierungen TNM und 4522XD verhalten sich in dieser Hinsicht ähnlich, und werden an dieser Stelle nicht detailliert dokumentiert.

Anhand der Versuche, lassen sich auch gut geeignete Wärmebehandlungsparameter für LA- Vollkörper definieren, die das LA-Gefüge dem Gussgefüge nach WB annähern, wenn es auch grundsätzlich feinkörniger bleibt. Ein Beispiel für 4522XD zeigt Abb.WB 5.

Legierung	Wärmebehandlung für LA-Material, Empfehlung
GE4822	T= 1085°C , t = 240 Min., dT/dt= 10 bis 15K/min (Near-Gamma-Gefüge)
TNM	T= 1290°C , t = 240 Min., dT/dt= 10 bis 15K/min (Lamellares Gefüge)
4522XD	T= 1250°C , t = 240 Min., dT/dt= 10 bis 15K/min (Lamellares Gefüge)

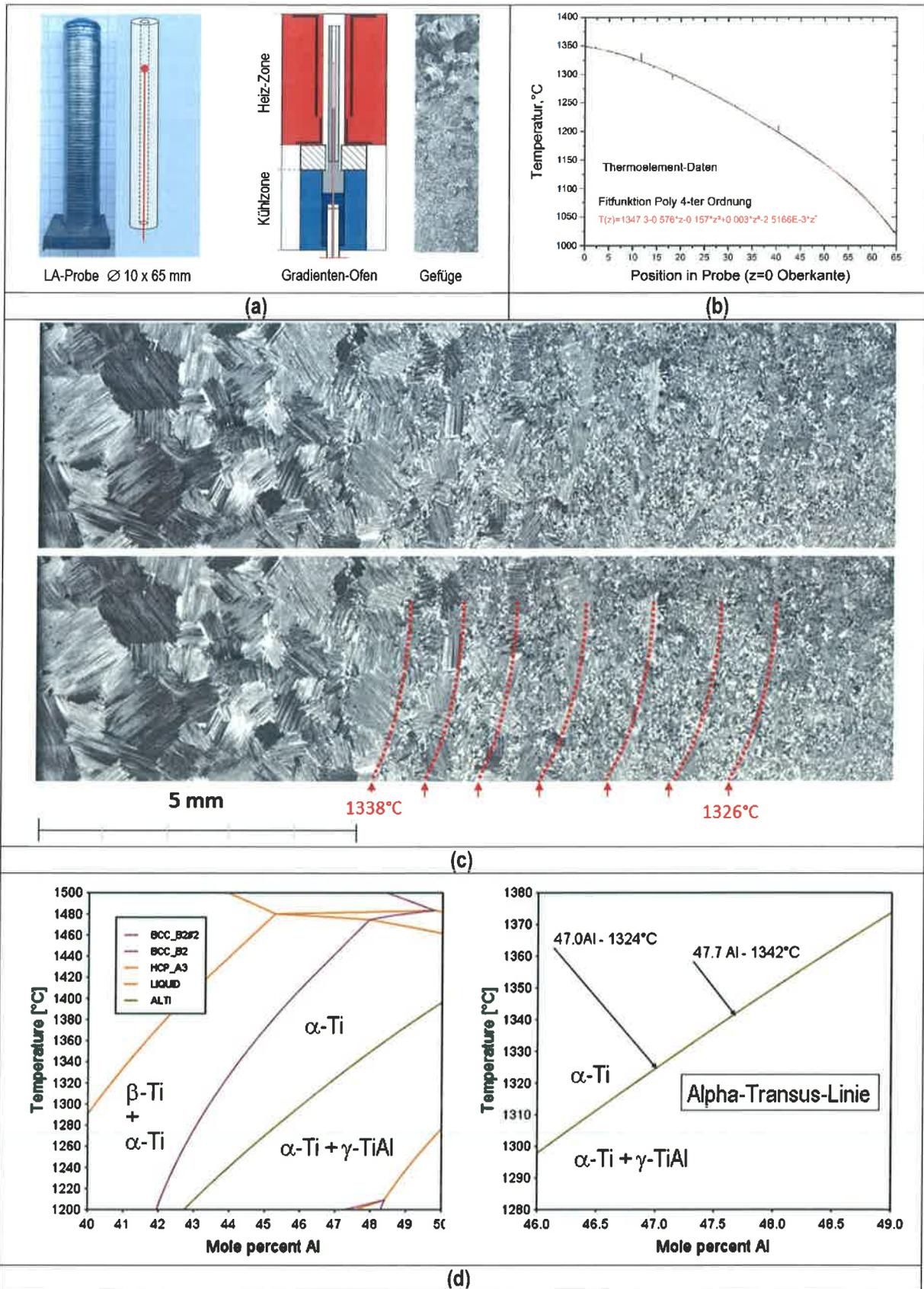
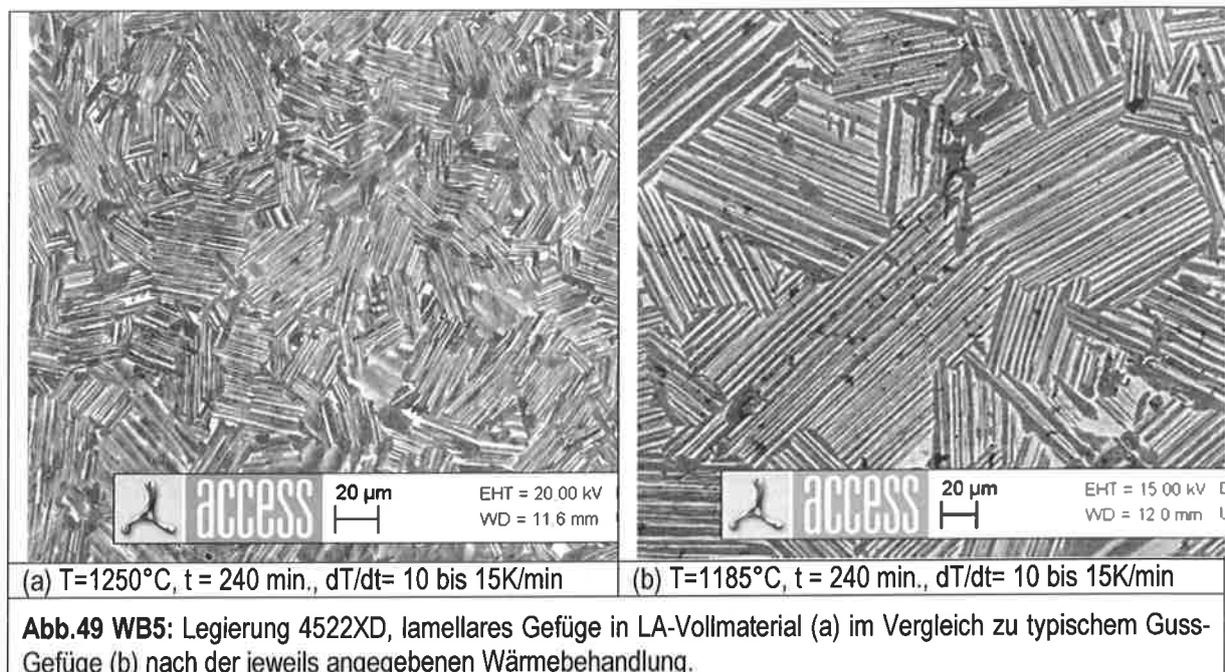


Abb.48: Wärmebehandlung im Temperaturgradienten (a), für GE4822 im Temperaturbereich 1000°C bis 1350°C über eine Probenlänge von 65 mm (b). Die Bandstruktur (c) ist bis 1338°C erhalten (Alpha-Transus-Temperatur). Innerhalb der Bänder ist Alpha-Transus schon ab 1326°C erreicht, in guter Übereinstimmung mit thermodynamischen Berechnungen (d) und der Beobachtung, dass der Aluminium-Gehalt der Legierung innerhalb der Bänder um rund 0.7 at.% Al geringer ist.



Vielversprechend ist in oben genannter Hinsicht der im Vorhaben verfolgte Ansatz, die zu schweißenden Probekörper und Schaufeln im Guss Zustand zu belassen und die vollständige Wärmebehandlung erst danach, am geschweißten Teil zu machen. Dadurch wird eine bessere Angleichung der Gefüge möglich. Im Kontext „repair & overhaul“ ist dieser Kniff nicht möglich, es sei denn, dass das gealterte Gefüge einer im Triebwerk gelaufenen Schaufel durch Wärmebehandlung erneuert werden kann (rejuvenile treatment). Dieser Frage im Detail nachzugehen würde den Projektrahmen überschreiten. Aber weil sie wissenschaftlich interessant und zukunftsweisend ist, sollen einige Facetten im Rahmen einer parallel zum Vorhaben laufenden Diplomarbeit aufgegriffen und geklärt werden.

II.1 AP 5.3 Mechanische Eigenschaften hybrid aufgebauter Proben

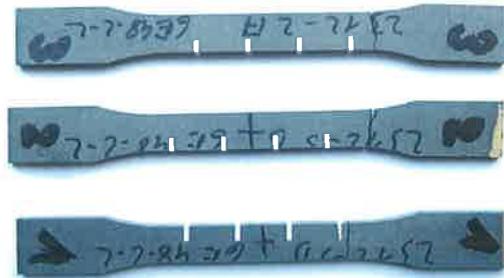
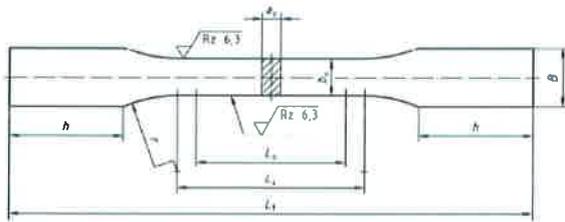
Im Rahmen dieses Projekts beschränken sich die mechanischen Prüfungen auf Zugversuche bei Raumtemperatur, die an Flachzugproben durchgeführt werden sollen, um den reparaturgeschweißten Schaufelblättern möglichst gut zu entsprechen. Allerdings gelten Flachzugproben für TiAl-Werkstoffe als problematisch, weil das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen hoch ist und TiAl empfindlich auf Oberflächendefekte reagiert. Für reparaturgeschweißte Proben ist damit zu rechnen, dass der Bruch frühzeitig und nicht im Bereich des aufgetragenen Materials oder in der Wärmeeinflusszone erfolgt, sondern von bearbeitungsbedingten Defekten an der Oberfläche, insbesondere an den Kanten, ausgeht.

Einige Tests wurden mit GE4822 durchgeführt, um zu prüfen, ob sich Flachzugproben Typ E nach DIN 50125 für die im Projekt geplanten Zugversuche eignen. Aus gegossenen und anschließend wärmebehandelten Platten (3x25x65 mm³) wurden Proben mit $a_0=3$ mm, $b_0=8$ mm, $L_0=30$ mm durch Wasserstrahlschneiden herausgearbeitet. An der Länge h wurde eingespart, weil die Gesamtlänge des Materials nicht ausreichte. Die Oberfläche der Proben war sandgestrahlt und an der Schnittkontur nicht weiter bearbeitet, siehe Abb. 5.

Die im Zugversuch bei Raumtemperatur gemessenen Eigenschaften sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Das Gefüge der Proben und der Bruchflächen sowie Vergleichswerte für zylindrische GE4822-Proben sind in Abb.50 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Streckgrenze $R_{p0,2}$ den Erwartungswert von rund 306 MPa erreicht, der für GE4822 mit reinem Gamma-Gefüge aus vorhandenen Daten für zylindrische Proben abgeschätzt wurde (vergl. Abb.51c). Allerdings sind Zugfestigkeit und Bruchdehnung dieser ‚preliminary‘ Proben deutlich geringer als erwartet, d.h. $R_m < 392$ MPa und $A < 0,9\%$ und deuten, wie eingangs gesagt, auf bearbeitungsbedingte Defekte auf der Oberfläche bzw. an den Kanten. Eine größere Menge an repräsentativen Proben, auch zu Creep und

Fatigue Eigenschaften, wurde im Rahmen einer Aufstockung nachgefertigt, konnte aber in der Projektklaufzeit bisher nicht ausgewertet werden.

Flachzugprobe Typ E, DIN 50125



(a)

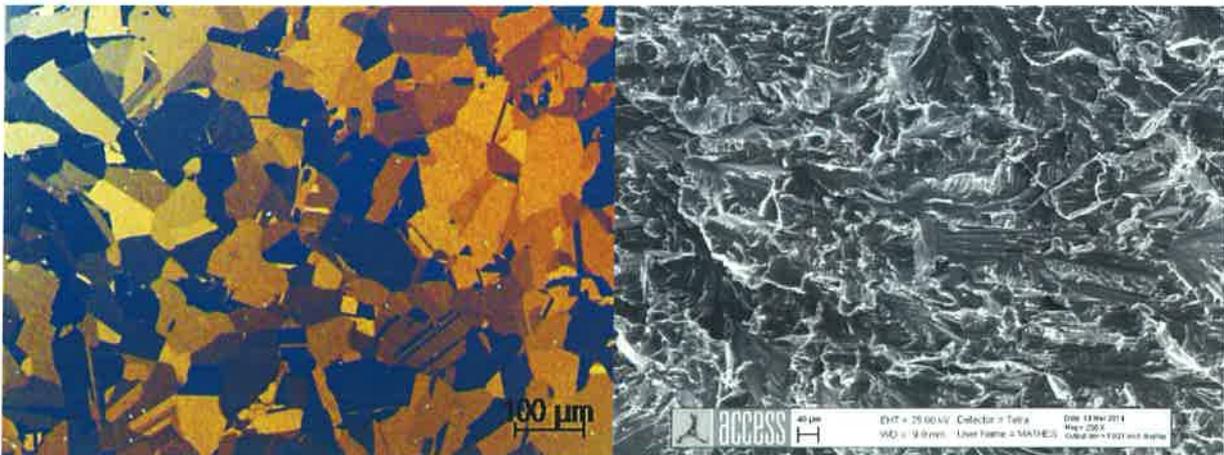
(b)

Abb.50: Flachzugproben Typ E (a) aus GE4822 nach Zugversuch (b). Die Bruchstellen befinden sich rechts im Bild, am Übergang vom Radius zur eigentlichen Messlänge.

Probennr.	Rm (MPa)	Rp 0,2% (MPa)	Ag (%)	A (%)	E-Modul (MPa)
1	350	302	0,67	0,44	153864
2	335	307	0,50	0,29	149741
3	316	292	0,40	0,20	150868

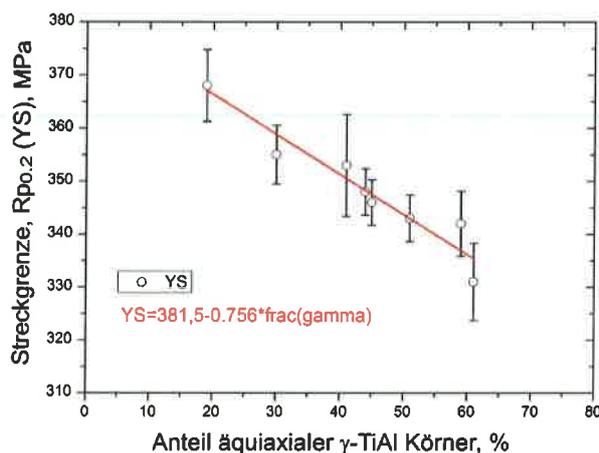
A - Bruchdehnung , Ag – Gleichmaßdehnung

Tabelle 5: Eigenschaften der Flachzugproben aus GE4822



(a)

(b)



(c)

Abb.51: Das Gefüge der Flachzugproben stellt sich als reines Gamma-Gefüge dar, bestehend aus ~100% äquiaxialen γ -TiAl Körnern (a). Entsprechend zeigt auch die Bruchfläche in jedem γ -TiAl Korn den charakteristischen, muschel-artigen Bruch (b). Die Streckgrenze der Legierung GE4822 nimmt linear mit dem Anteil der γ -TiAl Körner ab (c); für 100% γ -TiAl ergibt sich durch Extrapolation der Daten für zylindrische Zugproben ein Erwartungswert von Rp0,2=306 MPa. Dieser wird in Flachzugproben definitiv erreicht, Rm- und A-Werte hingegen nicht.

Die Arbeiten zu AP5 sind noch nicht vollständig abgeschlossen. Quantitative Gefügeanalysen stehen noch aus, die an den hybrid aufgebauten Zugproben (nach erfolgten Zugversuchen) durchgeführt werden sollen.

II.1 AP 10 Test Demonstrator anlage (Laservorm, ILT, ACCESS)

Der Projektpartner Laservorm steht als LA Anlagenhersteller für die Integration der erarbeiteten Vorgehensweise in den Industriellen Prozess. Auch die Arbeiten im Rahmen von AP10 bei Laservorm wurden von Access analytisch begleitet. Bei Laservorm mussten, im Gegensatz zur voll abgeschirmten Anlage am ILT, andere Vorheiz- und Sauerstoffabschirmkonzepte verfolgt und entwickelt werden. Im Zusammenhang damit standen hauptsächlich Fragen zur O₂ Aufnahme und zu Chemie und Gefüge der Schweißversuche im Mittelpunkt.

Als Beispiel hier die Untersuchung der Wirkung von Schweißpunkten ohne Pulvereintrag. Hiermit sollte Zusammenhänge zwischen Laserleistung, Spotsize und Energieeintrag auf Tiefenwirkung und WEZ gewonnen werden. Normalerweise erstarrt die ‚saubere‘ Legierung GE4822 (Ti-48Al-2Cr-2Nb) primär über die kubisch raumzentrierte β (Ti)-Phase. Das Vorhandensein der in der Umschmelzzone gefundenen hexagonaler Dendriten ist aber ein sicherer Hinweis dafür, dass die Erstarrung hier über α (Ti) erfolgte. Im Liquidbereich anreicherndes Alu hat dort α (Ti) Erstarrung zur Folge, während am Übergang zum Festkörper demzufolge eine starke Al Verarmung entsteht. Grund dafür sind sehr schnelle Transportvorgänge vermutlich auch heftige Konvektion im Pool.

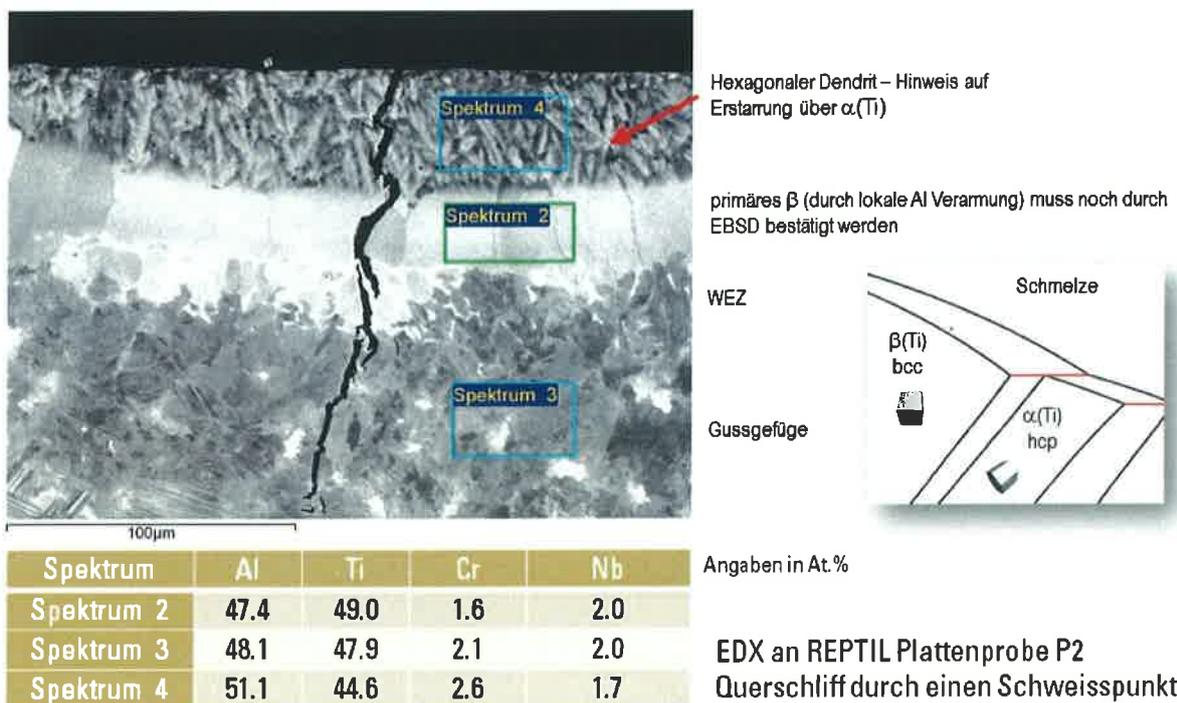


Abb.52: Voruntersuchungen zum Zusammenhang zwischen Laserparametern und Morphologischen Effekten an einer der GE TiAl Versuchsplatten

II.2 Nutzen und Verwertbarkeit

Hier ist wieder zu unterscheiden zwischen dem Einsatz des Verfahrens im Produktionsumfeld und der MRO (Maintenance/Repair/Overhaul) Anwendung.

Für anstehende Produktionsaufträge können die Ergebnisse des Projektes unmittelbar in die laufenden Planungen einbezogen und mit den beteiligten OEMs für die dann anstehende Qualifizierung des Verfahrens diskutiert werden. Der Zeithorizont kann dabei sehr kurz sein (0-2 Jahre nach Projektabschluss) hängt aber mittel- und langfristig davon ab, wie gut das Verfahren in die vorhandenen Produktionsrouten integrierbar ist und von der Luftfahrtindustrie akzeptiert wird. Mit dem Einsatz von Schweißprozessen im Blattbereich von TiAl Schaufeln wird bisher im Einsatz nicht akzeptiertes Neuland betreten. Hier müssen die nötigen Nachweise der Technologieeignung erst noch erbracht werden.

Im MRO Bereich ist in einem Zeitraum von 1-3 Jahren nach Projektende mit den ersten ausgemusterten TiAl-Schaufeln zu rechnen. TiAl als Schaufelwerkstoff ist in den aktuellen GenX Triebwerken von GE in der 787 und in der 747/800 bereits im Einsatz. Von MTU (GTF u.a. für A320 Neo) und Snecma (LEAPX für drei Typen) ist der Einsatz ab 2015 fest geplant, so dass hier gerade ein Markt mit großem Potential entsteht.

Zurzeit besteht noch keine Reparaturstrategie für Titanaluminid-Turbinenschaufeln. Somit wäre das Verfahren zunächst konkurrenzlos. Hier ist entscheidend die Technologie stärker an die entsprechenden Industriepartner heranzutragen und zu qualifizieren. Bisher war völlig unklar inwieweit die gesamte Kette bis hin zur automatisierten LA Schweißung für Titanaluminid Schaufeln getrieben werden kann. Im REPTIL Projekt konnte man hier zu der Aussage zu kommen, dass eine Reparatur verfahrenstechnisch möglich, beherrschbar und ökonomisch sinnvoll ist. In weiteren Projekten müssen Werkstofftechnische Fragestellungen, etwa zu Beherrschung und Auswirkung von Sauerstoffaufnahme und Vorheizung, näher untersucht werden. Um den Prozess marktfähig zu machen sind weitere Arbeiten zur Integration der Prozesskette zu machen und mit den Marktteilnehmern Konzepte für die Akzeptanz und Einführung des Verfahrens zu erarbeiten..

In den letzten fünf Jahren sind durch Technologienentwicklungen zum Thema TiAl bei Access und dessen Partnern bereits 50 Arbeitsplätze entstanden, die sich ausschließlich mit TiAl beschäftigen. Das Bestreben den Gussstandort Aachen die Feingussproduktion auf bis zu 150.000 Schaufeln/Jahr, auszuweiten ist klar definiert. Hierbei wird von derzeit 180 neuen Arbeitsplätzen bis 2016 ausgegangen. Das Verfahren trägt für ACCESS zur Produkterweiterung und Sicherung der internationalen Konkurrenzfähigkeit des Standortes bei.

Das Verfahren sollte für alle Gruppen von Interesse und Nutzen sein, die sich mit der Herstellung von Titanaluminid Bauteilen und mit Reparatur und Fügearbeiten an TiAl Bauteilen (MRO) befassen. Der MRO Markt für TiAl Luftfahrtteile entsteht gerade erst. Die Erfolgsaussichten durch den Technologievorsprung werden sehr hoch eingeschätzt.

Profitieren könnten neben ACCESS auch Firmen wie

- Lufthansa Technik
- Sulzer Turbo Services
- Siemens
- MTU

II.3 Fortschritt anderer Stellen

Alle Partner haben vom Projekt REPTIL stark profitiert und signifikante Fortschritte erzielt.

Bei TLS wurde der für die Herstellung der im Projekt benötigten Titanaluminid Pulver verwendete EIGA Prozess weiterentwickelt. Eine neu entwickelte Düsen Konfiguration wurde für zwei unterschiedliche Elektrodenvorschubraten und zwei Elektrodendurchmesser untersucht und ermöglichte die Reduktion der mittleren Partikelgröße d50 um 10µm. Das bedeutet weniger Sichtsungsverluste und eine deutlich bessere Ausbringung des Prozesses für die im LMD Prozess benötigten feinen Pulver. Weitere Arbeiten konzentrierten sich auf die weitere Reduktion der Sauerstoffaufnahme im Verdünnungsprozess.

Am Fraunhofer ILT konnten in den Vorversuchen TiAl Vollmaterialproben aus GE, TNM und XD Material bei einer Substratvorheizung von 750°C unter Argonatmosphäre rissfrei hergestellt werden. Die Proben wiesen eine Dichte von 99% auf. Die feinkörnige Mikrostruktur konnte durch Wärmebehandlung bei 1180° in nahezu γ -Struktur umgewandelt werden.

Mabotik und Laservorm haben gemeinsame Fortschritte in der Bahngenerierung und Bahnsteuerung der bei Laservorm im Projekt modifizierten Anlage erreicht. Mabotik entwickelte die Technologie um aus den Geometriedaten von Laserscans der Kaltläufe automatisiert die Bahnsteuerung für die Steuerung des LMD Kopfes zu erzeugen.

Laservorm entwickelte verschiedene Strategien um die Sauerstoffaufnahme im Repairprozess ohne aufwändige Einhausung des gesamten Arbeitsraumes zu unterbinden. Eine Scaneinheit zur genauen Aufnahme von Form und Lage des zu reparierenden Bereiches wurde in die modifizierte LMD Maschine integriert. Die Parameter um in einer solchen Konfiguration hochreaktives Titanaluminid auf ein vorhandenes Teil aufzutragen wurden im Projekt erarbeitet.

II.4 Veröffentlichungen

S.K. Rittinghaus, A. Weisheit, M. Mathes, W. Garcia Vargas, Laser Metal Deposition of Titanium Aluminides – A Future Repair Technology for Jet Engine Blades?, Manuscript submitted to The 13th World Conference on Titanium, August 16-20, 2015, San Diego, California

II.4.1 Konferenzbeiträge

„REPTIL - Repair of Titanium Aluminide Turbine Blades“, Vortrag, 5th International Workshop on Titanium Aluminides (IWTA2016), Tokyo Institute of Technology

II.4.2 Studentische Arbeiten

[Izadi2016] „Simulation von Laserauftragsschweißen an Niederdruckturbinenschaufeln: Voruntersuchung von Prozessparametern“, Bachelor of Engineering in Aerospace Technology, Saeed Izadi, University of Applied Sciences Aachen, 2016

[Abel2016] „Quantitative Gefüge Analyse laserauftragsgeschweißter-TiAl-Materialien“, Masterarbeit, Dominic Abel, RWTH-Aachen, 2015

[Hukkerikar2015] „Laser Auftragsschweißen an Titan Aluminiden: Simulation von thermischen Spannungen und Verzug“, Masterarbeit, Abhishek Hukkerikar, RWTH-Aachen, 2015

II.4.3 Verwendete Fachliteratur

[Appel2011] F. Appel, J.D.H. Paul, M. Oehring, Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, (2011) ISBN: 978-3-527-31525-3

[Bewlay2013] B. P. Bewlay, M. Weimer, T. Kelly, A. Suzukia, P.R. Subramanian, The Science, Technology and Implementation of TiAl Alloys in Commercial Aircraft Engines, 2012 MRS Fall Meeting, MRS Proceedings Vol. 1516, (2013), 49-58

[Arenas2003] M.F. Arenas, V.L. Acoff, Analysis of Gamma Titanium Aluminide welds produced by Gas Tungsten Arc welding, Welding J. 72(5), (2003), 110 -115

[Çam2006] G. Çam, G. İpekoğlu, K. -H. Bohm, M. Koçak, Investigation into the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded TiAl alloys, J. Mater. Sci. 41, (2006), 5273-5282

- [Herrmann2009] D. Herrmann und F. Appel, Diffusion Bonding of β (TiAl) Alloys: Influence of Composition, Microstructure and Mechanical Properties, Metall. Mater. Trans. A 40, (2009), 1881-1902
- [Pyczak2013] F. Pyczak, K. Hauschildt, U. Lorenz, A. Stark, N. Schell, Diffusion brazing of β -TiAl alloys: Investigations of the joint by electron microscopy and XRD, Gamma TiAl Alloys Technology 2013 Conference, Toulouse, Juni 2013
- [Kelbassa2008] I. Kelbassa, P. Albus, J. Dietrich, J. Wilkes, Manufacture and repair of aero engine components using laser technology, Proc. 3rd Pacific Int. Conf. on Application of Lasers and Optics, (2008), 208-212
- [Nowotny2007] S. Nowotny, S. Scharek, E. Beyer, K. H. Richter, Laser beam build-up welding: precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition, Journal of Thermal Spray Technology, 16(3), (2007), 344-348
- [Peters2010] T. Peters, Laser metal forming with 5 axes simultaneously, Sulzer Technical Review 3/2010, 22-24
- [Sexton2002] L. Sexton, S. Lavin, G. Byrne, A. Kennedy, *Laser cladding of aerospace materials*, Journal of Materials Processing Technology 122 (2002), 63–68
- [Richter2004] K.-H. Richter, S. Orban, S. Nowotny, *Laser cladding of the titanium alloy Ti2242 to restore damaged blades*, Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics 2004
- [Aguilar2011] J. Aguilar, A. Schievenbusch, O. Kättlitz, Investment casting technology for production of TiAl low pressure turbine blades – Process engineering and parameter analysis, Intermetallics, Volume 19, Issue 6, (2011) 757-761
- [Biamino2011] Biamino, S. et al., Intermetallics, 2011. 19(6): p. 776
- [Cormier2007] Cormier, D. et al., Research Letters in Materials Science, 2007. Article ID 34737: p. 1
- [Eiken2009] J. Eiken, M. Apel, V.T. Witusiewicz, J. Zollinger, U. Hecht, Interplay between α (Ti) nucleation and growth during peritectic solidification investigated by phase-field simulations, Journal of Physics of Condensed Matter 18;21(46), (2009) 464104.
- [Fillipini2011] Fillipini, M. et al., Procedia Engineering, 2011. 10(0): p. 3677
- [Gasser2010] A. Gasser, G. Backes, I. Kelbassa, A. Weisheit, K. Wissenbach: Laser additive manufacturing, Laser Technik Journal 7, 2 (2010), 58-63. ISSN: 1613-7728
- [Hecht2008] U. Hecht, V. Witusiewicz, A. Drevermann, J. Zollinger, Grain refinement by low boron additions in niobium-rich TiAl-based alloys, Intermetallics, Volume 16, Issue 8, (2008)
- [Kelbassa2006] I. Kelbassa, et al.: Laser Metal Deposition of TiAl Alloys, in Proc. 2nd Pacific Int. Conf. Applications of Lasers and Optics, 2006, Melbourne, Australia
- [Kelbassa2012] I. Kelbassa, T. Wohlers: Quo vadis laser additive manufacturing?, J. Laser App., Vo. 24, No. 5, 2012
- [Mur2010] Murr, L.E. et al., Acta Materialia, 2010. 58(5): p. 1887
- [Ocylok2011] S. Ocylok, A. Weisheit, I. Kelbassa: Increased wear and oxidation resistance of titanium aluminide alloys by laser cladding, Adv. Mat. Res. 278, 515-520, 2011

- [Reisgen2010] U. Reisgen, S. Olschok, A. Backhaus, Electron beam welding of titanium aluminides – Influence of the welding parameters on the weld seam and microstructure, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Special Issue: Materials Science and Engineering (MSE 2010), Volume 41, Issue 11, (2010) 897–907
- [Richter2009] K.H. Richter, E. Beyer, R. Münster, M. Pfennig: Reparatur von Bliskschaufeln mittels Laserstrahlgenerieren, Ergebnisbericht zum Verbundvorhaben 'FLEXILAS - Flexible 3D-Bearbeitung durch laserbasierte Fügeverfahren mit integrierter Werkstoffzufuhr, BMBF-Forschungsbericht. (2009) Seite 1-47, Förderkennzeichen: 02PB2133, 02PB2134
- [Srivastava1999] D. Srivastava, I.T.H. Hu, M.H. Chang, D. Loretto: The influence of thermal processing route on the microstructure of some TiAl-based alloys, *Intermetallics*, 1999. 7(10)
- [Sriivastava2000] D. Srivastava, et al., *Materials and Design*, 2000. 21(4): p. 425
- [Vil2010] Vilaro, T. et al., *Advanced Materials Research*, 2010. 89-91: p. 586
- [Wil2002] J. Wilden, J., et al., Rapid Prototyping gerichtet erstarrter Titanaluminidstrukturen, in 47. Int. Wiss. Kolloquium. 2002, TU Ilmenau
- [Witusiewicz2008] V.T. Witusiewicz, A.A. Bondar, U. Hecht, S. Rex, T.Ya. Velikanova, The Al–B–Nb–Ti system: III. Thermodynamic re-evaluation of the constituent binary system Al–Ti, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 465, Issues 1–2, 6 (2008) 64-77
- [Witusiewicz2009a] V.T. Witusiewicz, A.A. Bondar, U. Hecht, T.Ya. Velikanova, The Al–B–Nb–Ti system: IV. Experimental study and thermodynamic re-evaluation of the binary Al–Nb and ternary Al–Nb–Ti systems, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 472, Issues 1–2, (2009) 133-161
- [Witusiewicz2009b] V.T. Witusiewicz, A.A. Bondar, U. Hecht, J. Zollinger, L.V. Artyukh, T.Ya. Velikanova, The Al–B–Nb–Ti system: V. Thermodynamic description of the ternary system Al–B–Ti, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 474, Issues 1–2, (2009) 86-104
- [Wit2011] J. Witzel, J. Schrage, A. Gasser, I. Kelbassa: Additive manufacturing of a blade-integrated disk by laser metal deposition, *ICALEO. 30. Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics*, October 23-27, 2011. Paper 502, 7 S., 2011
- [Abel2015] Dominik Abel, Master-Arbeit „Quantitative Gefüge Analyse laserauftraggeschweißter-TiAl-Materialien“, Gießerei-Institut der RWTH, 2015
- [Langenhorst2015] Langhorst, M.: Beherrschung von Schweißverzug und Schweißseignspannungen. Herbert Utz Verlag, München, 2015.
- [Liu2006] X. B. Liu, H. Wang, Modification of tribology and high-temperature behavior of Ti–48Al–2Cr–2Nb intermetallic alloy by laser cladding, *Applied surface science* 252(16), (2006), 5735-5744

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
<p>3. Titel REPTIL – Entwicklung eines Reparaturverfahrens für Triebwerksschaufeln aus Titanaluminiden mit generativem Laserauftragschweißen</p> <p>Beschreibung der Arbeitspakete Access e.V.</p>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dipl.Ing. M.Mathes	<p>5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.12.2016</p> <p>6. Veröffentlichungsdatum 30.06.2017</p> <p>7. Form der Publikation Projekt-Abschlussbericht</p>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Access e.V. Intzestrasse 5 52072 Aachen	<p>9. Ber. Nr. Durchführende Institution</p> <p>10. Förderkennzeichen 20T1311B</p> <p>11. Seitenzahl 44</p>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	<p>13. Literaturangaben 38</p> <p>14. Tabellen 5</p> <p>15. Abbildungen 52</p>
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) PTJ-LL	
<p>18. Kurzfassung</p> <p>Das Verbund-Projekts REPTIL zielte darauf hin, die LA-Technologie für verschiedenen TiAl-Legierungen in grundlegenden Aspekten zu untersuchen und für die Reparatur gießtechnisch gefertigter Turbinenschaufeln zu entwickeln. Dabei wurde die Geometrie der zu reparierenden Probekörper schrittweise komplexer gestalten, angefangen von einfachen Stäben und Plattenkörpern über Dummy-Schaufeln bis hin zu einer realen Turbinenschaufel. Von Beginn an war die im Projekt zu entwickelnde Reparaturtechnologie sowohl für die Reparatur neuer Guss-schaufeln, als auch von ‚used‘ Schaufeln aus dem MRO Zyklus vorgesehen. Im Giessereibetrieb dient das Verfahren der Steigerung der Ausbringung und schont damit Ressourcen durch die Verringerung von Ausschuss. Im MRO Zyklus wird die Lebensdauer der Turbinenschaufeln verlängert und damit ebenfalls zur Ressourcenschonung beigetragen.</p> <p>Im seinem Teilprojekt befasste sich Access mit der Herstellung der Probekörper für die Verbundpartner durch zentrifugalen Feinguss, sowie mit werkstofftechnischen Aspekten der Gefügeoptimierung und –Charakterisierung. Außerdem wurde durch Experimente und thermomechanische Simulationen der kritischen Frage nach dem Verzug bzw. dem Entstehen von Spannungen nachgegangen. Die technischen Ergebnisse aus den durchgeführten Arbeiten werden in Abschnitt 2.1 dargestellt. Der Nutzen und die Verwertungsperspektiven werden in Abschnitt 2.2 erläutert.</p>	
19. Schlagwörter Titanaluminid, Simulationsmodelle, Spannungen, Laserauftragschweißen, MRO, Reparatur, Turbinenschaufeln	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title REPTIL – Development of an additive Laser based Repair Process for Titanium Aluminide Turbine Blades ACCESS e.V. Project parts: Production of Project samples, Heat Treatment development, Simulation of LC induced deformation and Survey of Micro- and Macrostructure of Project samples by SEM, CT, 3D Scan, Microscopy	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dipl.Ing. M.Mathes	5. end of project 31.12.2016 6. publication date 30.06.2017 7. form of publication Project report
8. performing organization(s) (name, address) Access eV Intzestrasse 5 52072 Aachen	9. originator's report no. 10. reference no. 20T1311B 11. no. of pages 44
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 38 14. no. of tables 5 15. no. of figures 52
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) PTJ-LL	
18. abstract The consortial project REPTIL aimed at fundamental investigations of Laser Cladding Technology for different Titanium Aluminide alloys and to further investigate first steps for repair of precision casted low pressure turbine blades. Whereas the complexity of the test cases was increased stepwise, from simple rod- and plate samples over MockUp blade like structures to real turbine blade geometries. From beginning on the process technology to be developed was seen as a repair technology for the casting houses as well as for 'used' blades in the MRO cycle. In the casting houses the repair technology reduces their scrap rates. In the MRO cycle it helps to prolong the life time of a turbine blade and thus saves resources. Access was responsible for production of all Titanium Aluminide parts and sample materials by precision casting during the project, including QS and machining. Other Access work packages were: <ul style="list-style-type: none"> - development of a simulation tool for the prediction of stress generation during the clad process and distortion prediction - Survey of micro- and macrostructures during the project by SEM, EBSD, EDX, CT, 3D Scans - Development of adequate heat treatment and morphology optimization 	
19. keywords Titanium Aluminide, Simulation Model, Deformation, Laser Cladding, MRO, Repair, Turbine Blades	
20. publisher	21. price