

SCHLUSSBERICHT

Luftfahrtforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie – Verbundprojekt

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Superplastische Umformung von Titanwerkstoffen bei niedrigen Temperaturen



HEGGEMANN AG

Zeppelinring 1-6, 33142 Büren

Dr.-Ing. Thomas Meyer



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 20W0905D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. Projektlaufzeit 01. Juli 2010 bis 30. Juni 2014.

Inhaltsverzeichnis

1	KURZE DARSTELLUNG	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.1.1	FormTech.....	4
1.1.1.1	Modifikation Arbeitspaket FormTech	5
1.1.2	Access	7
1.1.3	HEGGEMANN	8
1.1.4	Helmholtz-Zentrum Geesthacht	9
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	10
1.2.1	FormTech.....	10
1.2.2	Access	11
1.2.3	HEGGEMANN	12
1.2.4	Helmholtz-Zentrum Geesthacht	13
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	14
1.4	Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	16
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	26
2	EINGEHENDE DARSTELLUNG.....	26
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis	26
2.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	39
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	41
2.4	Voraussichtlicher Nutzen	41
2.5	Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	42
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	42
3	KURZFASSUNG	42

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Dank guter Materialeigenschaften wie Festigkeit, Gewicht und Korrosionsbeständigkeit werden metallische Beschlagteile für CFK-Baugruppen zunehmend aus Titanwerkstoffen z.B. Ti6-4 gefertigt. Die heute übliche Fertigung verursacht allerdings einen hohen Zerspanungsverlust von zum Teil über 95%. Neben hohem Einsatz an Rohmaterial bedeutet dies auch eine entsprechend lange Bearbeitungsdauer und eine entsprechende Beanspruchung der Werkzeuge.

Superplastisches Formen (SPF) bietet dagegen für viele Teile die Möglichkeit, das Ausgangsmaterial unmittelbar in die Endform zu bringen. Hierzu wird das Material bei ca. 925°C pneumatisch in die Werkzeugform gedrückt. Nach der Umrissbearbeitung und dem chemischen Abtragen der entstandenen Oxidschicht, die in einer Dicke von 60 bis 120 µm entfernt werden muss, ist das Teil fertig.

Eine neuerdings erhältliche Variante von Ti6-4 weist ein deutlich feinkörnigeres Gefüge auf. Dadurch können die Umformtemperatur und -dauer substantiell reduziert und die Bildung der Oxidschicht vermieden werden. Die umweltbelastende chemische Nachbehandlung entfällt dadurch, der Energieeinsatz je Bauteil wird reduziert und die Zykluszeit verringert. Außerdem können niedriger legierte, kostengünstigere Werkzeugwerkstoffe eingesetzt werden, da die Anforderungen an die Warmfestigkeit weniger hoch sind.

Im Zuge dieses Vorhabens sollen Untersuchungen zur Umformung von feinkörnigem Ti6-4 durchgeführt werden. Es werden folgende Ziele verfolgt:

- Etablierung von Bearbeitungskompetenzen für feinkörniges Ti in Deutschland
- Reduktion von Bauteilgewicht und –kosten
- Verbesserung der Umweltbilanz.

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen und der positiven Ergebnisse soll ein Konzept zur industriellen Anwendung ausgearbeitet werden. Durch eine erfolgreiche Umsetzung werden folgende Vorteile erwartet:

- Kunde: bessere und preiswertere Bauteile
- FormTech: Marktvorteil gegenüber internationalem Wettbewerb.

Das Verbundvorhaben "CoolTiTech – Superplastische Umformung von Titanwerkstoffen bei niedrigen Temperaturen" besteht aus vier Einzelvorhaben, die jeweils durch einen der Verbundpartner FormTech GmbH (FormTech), HEGGEMANN AG (HEGGEMANN), GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH (GKSS) und ACCESS e.V. (ACCESS) bearbeitet werden. Nachfolgend sind die Vorhaben der einzelnen Partner aufgeführt.

1.1.1 FormTech

Das Einzelvorhaben „Verfahrensentwicklung der Superplastischen Umformung von Titanwerkstoffen bei niedrigen Temperaturen“ wird durch den Verbundpartner FormTech GmbH bearbeitet. Es verfolgt laut Antrag die Ziele:

- Entwicklung des Niedertemperaturverfahrens zur Superplastischen Umformung von Ti6-4 „fine grain“
- Definition der technisch und wirtschaftlich sinnvollen Parameterfenster für das Umformverfahren
- Nachweis, dass das chemische Abtragen der Oberfläche eingespart werden kann
- Feststellung des Applikationsspektrums des Werkstoffes Ti6-4 „fine grain“
- Ermittlung von anwendbaren, niedrig legierten Werkzeugwerkstoffen
- Entwicklung von Umformwerkzeugen aus niedrig legierten Werkstoffen
- Nachweis der Anwendbarkeit des Verfahrens anhand von Musterbauteilen

FormTech hat das Ziel, dem Markt technisch bessere und kostengünstigere bzw. wirtschaftlichere Präzisionsbauteile aus Titanwerkstoffen anzubieten. Dazu gehören:

- Verringerung Materialverbrauch
 - o near-net shape
 - o wenig Materialeinsatz
- Reduzierung Prozesszeit
- Aufwandsverminderung Folgearbeitgänge
 - o Entfall chemisches Abtragen
 - o passgenaue Geometrie die für nachfolgende, automatisierte Arbeitsgänge geeignet sind

1.1.1.1 Modifikation Arbeitspaket FormTech

Innerhalb der Projektlaufzeit haben sich folgende Veränderungen ergeben:

- Es wurde im Laufe des Projektes festgestellt, dass die Titanlegierung Ti6-4 „Standard“ (Ti6-4 Std) durch Verbesserung der Thermomechanischen Abläufe bei den Produzenten hinsichtlich der Korngröße mittlerweile annähernd der Titanlegierung Ti6-4 „fine grain“ (Ti6-4 fg), wie sie im Antrag beschrieben und vorgesehen war, entspricht. Die im Projekt alternativ eingesetzte Titanlegierungsvariante Ti6-4 „ultra fine grain“ (Ti6-4 ufg) ist leider auf dem Markt nicht frei verfügbar.
- Alternativ zu den genannten Ti6-4-Legierungsvarianten wurden die Titanlegierungen:
 - o ATI425
 - o Exhaust XT
 - o Ti3Al2,5V

in das Projekt aufgenommen. Diese Titan-Werkstoffe haben ebenfalls alle das Potential, bei niedriger Temperatur umgeformt zu werden.

- Durch den Einsatz von feinkörnigem Ti6Al4V bzw. anderer bei niedriger Temperatur warmumformbarer Titanlegierungen sind ebenfalls Vorteile bei dem Fertigungsverfahren Warmtiefziehen zu erwarten. Dementsprechend wurde in der Projektplanung ebenfalls Warmtiefziehen im Rahmen von Stichprobenuntersuchungen berücksichtigt.
- Eingeschobene Screening Untersuchungen für die zusätzlichen Verfahren Warmtiefziehen und Warmkalibrieren in Zusammenhang mit der erweiterten Werkstoffpalette. Versuche werden durchgeführt mit bereits vorhandenen Werkzeugen.
- Planungsstrand Werkzeugwerkstoffe war die Ermittlung von geeigneten niedrig legierten Werkzeugwerkstoffen zur Kosteneinsparung und die Entwicklung von preiswerten Umformwerkzeugen. Unser Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Projektformulierung besagte, dass für die Gasdruckumformung bei vermindernden Temperaturen ggfs. preiswertere, besser beschaffbare und einfacher zerspanbare Legierungen einsetzbar sind. Die damit verbundene Verminderung der Werkzeugkosten sollte eine wesentliche Eintrittsbarriere für die Gasdruckumformung von Titanlegierungen bei hohen Temperaturen beseitigen.

Im Rahmen der Fokussierung auf die Thematik Ti6-4 Standard, fine grain und ultra fine grain haben wir die Werkzeugentwicklung für geringere Temperaturen zunächst zurückgestellt.

- Im Verlauf der oben genannten erfolgreichen Arbeiten zum Warmtiefziehen und Warmkalibrieren wurde erkannt, dass das Kosteneinsparpotential weniger in der Veränderung / Optimierung von Werkzeugwerkstoffen liegt, sondern das vielmehr in modifizierten Umformverfahren, namentlich Warmtiefziehen, und im Einsatz alternativer Werkstoffe zu Ti6-4 die wesentlichen Potentiale zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit zu finden sind.
- Statt den geplanten, umfangreichen Legierungsuntersuchungen ist es nach Kontakt mit Werkzeugwerkstoffherstellern sinnvoller, die Legierungen mittels Herstellerangaben abzuklopfen und eher die in der Praxis auftretenden Fragen grundlegend zu klären, die bislang nicht befriedigend gelöst sind. Aus diesem Grund wurden folgende Aufgaben mit der Firma PRETECH besprochen und beauftragt:
 - o Grundlagen einer Simulationsmethode zur Reduzierung der Zykluszeit der Umformvorgänge SPF und Warmformen zu entwickeln
 - o Ermittlung Wärmeausdehnungskompensationsfaktoren für Kombination von primär in Frage kommenden Werkzeugwerkstoffen und den unterschiedlichen Titanwerkstoffen in der vorzugsweise anzuwendenden Umformtemperaturspanne
 - o Entwicklung eines Modells zur Optimierung der Abkühlstrategie von Bauteilen zur Vermeidung von Bauteilverzug
- Einsparung von Schliffaufnahmen durch Falt-Biegeproben und Verfahrenskontrolle.

Aus den oben genannten Modifikationen der Arbeitspakete ergeben sich folgende Ziele:

- Entwicklung des Niedertemperaturverfahrens zur Superplastischen Umformung von Ti6-4-Varainten und stichprobenhaft auch für weitere bei niedrigen Temperaturen umformbare Titanlegierungen

-
- Stichprobenhafte Versuche zu Warmformverfahren wie Warmtiefziehen und Warmkalibrieren mit Ti6-4-Varianten und weiteren Titanlegierungen
 - Definition der technisch und wirtschaftlich sinnvollen Parameterfenster für das Umformverfahren
 - Nachweis, dass das chemische Abtragen der Oberfläche eingespart werden kann und Untersuchung von kostengünstigen Qualitätssicherungsverfahren
 - Feststellung des Applikationsspektrums des Werkstoffes Ti6-4 „fine grain“
 - Nachweis der Anwendbarkeit der Verfahren anhand von Musterbauteilen
 - Stichprobenhafte Simulation von Umformvorgängen, Aufheizen von Bauteilen mit verbundenem Transfer, Abkühlen von Bauteilen hinsichtlich Positionierung und Betrachtung von Kompensationsfaktoren von Werkzeugen und Titanbauteilen.

1.1.2 Access

Access war im Projekt CoolTiTech für die Charakterisierung der werkstoffspezifischen Merkmale in den verschiedenen Phasen des Projektes zuständig. Hierzu gehörten insbesondere Korngrößenanalyse, Oberflächengüte und Materialtextur.

- 1) Charakterisierung der beschaffbaren Ti6-4-Bleche zur superplastischen Umformung (super-plastic-forming SPF) (AP 1 und 2):
Das Ausgangsgefüge der im Projekt genutzten Fine grain und nachfolgend Ultrafine grain Bleche wurden in Bezug auf Korngröße und Korngrößenverteilung mittels Lichtmikroskopie, REM (BSE und EBSD) ausgewertet, aber auch bzgl. Textur und Gefügeorientierung.
- 2) Charakterisierung der bei Formtech in vielfältigen Prozessen umgeformten Bleche (AP 4):
Bei Access fand begleitend zu den konkreten Umformprozessen bei Formtech eine detaillierte Charakterisierung der Gefügeveränderungen durch die Umformung statt. Besondere Schwerpunkte: Evaluation der alphaangereicherten Randschicht und Veränderung der Mikrostruktur (Körner und Textur). Ziel hierbei war die Optimierung der Umformprozesse und Qualifikation der verschiedenen eingesetzten Materialien.
- 3) Systematische Wärmebehandlung (Umwidmung AP 3.5)
Die ursprünglich geplante „Machbarkeitsstudie zur Herstellung von „fine grain“

Ti6-4“ war nicht mehr notwendig wegen der erweiterten Marktverfügbarkeit von Ti 6-4-Material mit einer Korngröße von ca. 3 µm, welche dem VMSP0 fine grain Material entspricht.

Parallel wurde bei der Charakterisierung der umgeformten Bleche aus den vielfältigen Prozessen bei Formtech deutlich, dass eine systematische Wärmebehandlung mit klar definierten Parametern, d.h. Temperatur, Dauer, Schutzgas, sinnvoll und notwendig war. Diese Wärmebehandlung und die nachfolgende Charakterisierung bzgl. der alphaangereicherten Randschicht wurden bei Access durchgeführt.

1.1.3 HEGGEMANN

Das Einzelvorhaben „Industrielle Anwendungsgebiete der Superplastischen Umformung von Titanwerkstoffen bei niedrigen Temperaturen“ wurde durch den Verbundpartner HEGGEMANN AG im Gesamtprojekt CoolTiTech bearbeitet. Es verfolgte das Ziel, die eigene Wertschöpfung bei der Herstellung von Umformbauteilen aus Titan u.a. durch die Verringerung des Verschnitt- bzw. Zerspanungsanteils im Vergleich zu den bis dato etablierten Kaltumformverfahren deutlich zu erhöhen.

Die Möglichkeiten zur Schaffung endkonturnaher Titan Bauteil-Strukturen, die eine verbesserte Oberflächenqualitäten beim Umformen von Titanbauteilen unter erhöhten und hohen Temperaturen waren und sind für HEGGEMANN und im Allgemeinen von großem Interesse, da sich die Bauteile in den sich der Umformung anschließenden Prozessschritte mit weniger zeit- und materialtechnischem Aufwand zur Endkontur bearbeiten lassen.

Ein weiterer Vorteil ist die deutliche Verringerung der Oxidzonendicke an der Oberfläche (Alpha-stabilisierte Oberflächenzone) durch deutlich geringere Temperaturen und kürzeren Prozesszeiten im Umformprozess- speziell bei der Warmumformung. Dies ist für die stoffschlüssigen Fügeverfahren „Schweißen“ und „Kleben“ von großer Bedeutung.

Besonders die Verbindung von umgeformten Halbzeugen mittels der sogenannten kalten Fügeverfahren „Nieten“ und „Kleben“ sollte im Rahmen des Teilprojekts durch die HEGGEMANN AG untersucht werden, da zum Zeitpunkt der Projektbeantragung die Erhöhung des Werkstoffanteils von Titan in strukturellen Leichtbau-Mischbauweisen ein strategisch wichtiges Ziel der HEGGEMANN AG darstellte.

Die Arbeiten wurden im Gesamtprojekt in Abstimmung mit den weiteren Verbundpartnern daher in sechs Arbeitspakete aufgeteilt (6 WPs). Ausgehend von theoretischen Betrachtungen, über die Untersuchung von kleinen Enelementproben bis hin zur Herstellung von Demonstratorbauteilen und den dazu erforderlichen Vorrichtungen und Werkzeugen wurden die Aufgaben zur Erfüllung dieser Aufgabenstellung strukturiert.

1.1.4 Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Im Verbundprojekt CoolTiTech verfolgten die Partner das Ziel, eine materialsparende und wirtschaftliche Prozessroute zur Herstellung von integralen Titanbauteilen zu entwickeln. Der Fokus der Abteilung Fügen und Bewerten (WMF) im Geschäftsbereich Werkstoffmechanik des Instituts für Werkstoffforschung lag dabei auf der Umform- und der Laserstrahlschweißtechnik. Insbesondere die Kombination von Laserstrahlschweißen und Umformung angewandt auf luftfahrtzugelassene Ti-Basislegierungen wie Ti6Al4V stellt eine Tailored-Blank-Technologie dar, mit welcher Produktionskosten und Taktzeiten reduziert und Titan-Strukturen hoher Integrität wirtschaftlich realisiert werden können.

Die Abteilung Fügen und Bewerten (WMF) befasste sich im Verbundprojekt mit folgenden Teilaufgaben:

1. werkstoffmechanische Untersuchungen an luftfahrtzugelassenem Ti6Al4V- und an feinkörnigem Ti6Al4V-Blech vor und nach Umformung;
2. Vergleich von Warmtiefgezogenen und umgeformten Blechen hinsichtlich der mechanischen Kenndaten Dehngrenze $R_{p0,2}$, Zugfestigkeit R_m , plastische Bruchdehnung A , Schwingfestigkeit σ_D und zwischen den $da/dN-\Delta K$ Ermüdungsrissausbreitungskurven;
3. Ermittlung von Prozessparametern und -bedingungen zum Laserstrahlschweißen von luftfahrtzugelassenem Ti6Al4V- und von feinkörnigem Ti6Al4V-Blech in Stumpfstoßausführung, mechanische und mikrostrukturelle Charakterisierung sowie superplastisches Umformen (SPF) der Laserschweißverbindungen (Machbarkeitsstudie);
4. Diskussion der Ergebnisse aus den Laserstrahlschweißversuchen und Bewertung des SPF-Verhaltens der Laserschweißverbindungen.

Anzumerken ist, dass die mikrostrukturelle Charakterisierung ausschließlich an den Laserschweißverbindungen erfolgt ist. Hierbei kam insbesondere die Metallmikro-

skopie und die Rasterelektronenmikroskopie (REM) kombiniert mit der energiedispersiven Mikrobereichsanalyse (EDX) und Rückstreuungsdiffraktometrie (EBSD) sowie die Mikrohärtprüfung zur Anwendung. Die Art der Aufgabenstellung zeigt, dass die Arbeiten in enger Kooperation mit dem Partner FormTech GmbH durchgeführt worden sind. Dies betraf die Bereitstellung von Blechen und Umformteilen, die Rückkopplung der im HZG erzielten Versuchsergebnisse auf die Prozesse im Hause FormTech GmbH und die Durchführung von SPF-Versuchen an den Ti6Al4V-Laserschweißverbindungen. Der Vergleich der mechanischen Kenndaten erfolgte mit der luftfahrtzugelassenen Standardlegierung Ti6Al4V als Referenz.

Zu zeigen war, dass die von VSMPO entwickelte Ti6Al4V-Feinkornvariante mindestens das gleiche mechanische Eigenschaftsprofil aufwies wie die Standardvariante, die Umformung nicht zu einer Degradation der Eigenschaften führte und Ti6Al4V-Laserschweißverbindungen superplastisch umformbar sind. HZG-intern wurde die Anforderung formuliert, dass bei superplastischer Umformung kein Aufreißen der Schweißnaht auftreten durfte.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt CoolTiTech wurde mit Einreichung des Projektantrages vom 14.08.2009 durch die Partner des Projektverbundes beantragt. Der Zuwendungsbescheid folgte am 04.10.2010 und gilt für den Zeitraum vom 01.07.2010 bis 30.06.2013. Es wurde von allen Projektpartnern eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung des Projektes auf den 31.03.2014 beantragt und genehmigt. Die Firmen FormTech und HEGGEMANN haben zusätzlich eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis zum 30.06.2014 beantragt und genehmigt bekommen. Die Koordinierung des Projektes erfolgte durch die FormTech GmbH.

1.2.1 FormTech

Die Firma FormTech besteht seit 1999 und verfügt über umfassende Erfahrungen in der Verarbeitung von verschiedenen Titanwerkstoffen für die Luft- und Raumfahrtbranche, die Automobilbranche und die Medizintechnikbranche. Kernkompetenzen sind die Warmumformung und das Diffusionsschweißen. Das Leistungsspektrum um-

fasst dabei Engineering, Entwicklung und Fertigung. Hierzu ist ein eigenes Labor mit Entwicklungs- und Produktionspresse vorhanden.

Der nationale und internationale Kundenstamm besteht aus namhaften Unternehmen der Luft- und Raumfahrt, des Triebwerksbaus, Automobilindustrie und Medizintechnik. Außerdem verfügt FormTech seit Jahren über umfassende und nachhaltige Erfahrungen bezüglich der Teilnahme an Forschungsvorhaben.

Besonders zu nennende Projekte und Referenzen sind zum Beispiel:

- ARIANE V: Entwicklung, Qualifizierung und Fertigung SCA-Tankhalbschalen mit einem Durchmesser von 480 mm sowie von Satelliten-Tankhalbschalen mit einem Durchmesser von 750 mm
- „VETIS“. Übertragung Tankhalbschalenherstellprozess Raumfahrt in andere Industrien „ESA Technology Transfer Programme“
- „SHEFEX“, Entwicklung und prototypische Fertigung von Thermalschutzplatten (TPS) für Wiedereintrittskörper,
- „OPTISTRUCT“ im Rahmen BMBF Spitzenclusterwettbewerb Hamburg. Verfahrensoptimierung und Verbesserung der Lastübertragung von Hybridbauteilen
- „TiBond“ Diffusionsschweißen von Titan und artfremden Metallen
- LuFo: LaTec und RaWid. Strömungslaminarisierung und Widerstandsverminderung von aerodynamischen Profilen
- LuFo: „VITAL“ zur Verfahrensentwicklung von Erosionsschutzblechen aus Titan für hybride Leitschaufeln
- EU: „SILENCER“, „Hortia“, „Friendcopter“, „HEXENOR“ zum Thema Lärmreduzierung
- EU: „Flexform“. Entwicklung flexibler Umformverfahren

1.2.2 Access

Access beteiligt sich kontinuierlich seit Mitte der 1990er Jahre massiv an der Entwicklung von Gießverfahren und an der Werkstoffentwicklung für Hochleistungskomponenten aus Titanwerkstoffen, insbesondere TiAl.

Neben den wissenschaftlichen Grundlagen zur Prozess- und Werkstoffentwicklung im Bereich der Titanlegierungen verfügt Access über umfangreiche analytische Möglichkeiten zur Charakterisierung und Qualifizierung von Werkstoffen. Für klassische metallurgische und metallografische Untersuchungen stehen verschiedene Lichtmik-

roskope zur Verfügung, die mit Polarisationsfiltern ausgestattet sind, um neben der üblichen Gefügeanalyse auch Untersuchungen zur Kristallorientierung durchführen zu können. Mit EDX- (energy dispersive X-ray spectroscopy), EBSD- (electron backscatter diffraction) und FIB- (focused ion beam) Einheiten ausgestattete Rasterelektronenmikroskope ermöglichen genaue Untersuchungen von Korngröße, Seigerungsphänomenen, Textur und Gefügebrauchung sowie dreidimensionale Gefügecharakterisierung.

Im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms 1296: „Heterogene Keim- und Mikrostrukturbildung: Schritte zu einem system- und skalenübergreifenden Verständnis“ arbeitet Access zum Thema „Kornfeinung und Mikrostrukturentwicklung durch Fremdkeimbildung“.

Access beteiligt sich ebenfalls führend an den an TiAl-Werkstoffen durchgeführten Untersuchungen des von der European Space Agency (ESA) koordinierten IMPRESS-Projekts. Das internationale IMPRESS Integrated Project vereint das Fachwissen von 42 Gruppen aus Forschungseinrichtungen und Industrie. Es sind die wissenschaftlichen Ziele, eine Verbindung zwischen Materialverarbeitung, Gefüge und Eigenschaften neuer intermetallischer Werkstoffe herzustellen.

In Zusammenarbeit mit namhaften Firmen aus der Luftfahrt- und Automobilindustrie wie zum Beispiel Rolls Royce Deutschland im Bereich Turbinenschaufeln für Flugzeugtriebwerke und der Daimler AG im Bereich Turbinenräder für Abgasturbolader von Verbrennungsmotoren wurde von Access die Prozessentwicklung für die Herstellung von Titanbauteilen weiter vorangetrieben.

1.2.3 HEGGEMANN

Die langjährige Erfahrung mit metallischen Leichtbauwerkstoffen und eine große Umsetzungskompetenz durch vielfältige In-house-Bearbeitungs- und Qualifizierungsverfahren haben HEGGEMANN von Anfang an das große Potenzial des geplanten Verbundvorhabens CoolTiTech erkennen lassen.

Bauteile und Baugruppen können, nachdem sie den CAD-CAM-Prozess durchlaufen haben, direkt mit CNC gesteuerten Maschinen produziert werden. Neben umfangreichen Zertifizierungen stehen für die Kontrolle der geforderten Toleranzen und Verarbeitungsqualitäten Mess- und Prüfverfahren als integrierter Bestandteil des Produktionsablaufs zur Verfügung. Ebenso gibt es ein eigenes Werkstofflabor. Das Ziel ist es,

Kundenlösungen mit langfristigem Gewinnpotenzial für beide Seiten zu entwickeln und zu fertigen. Dabei setzt HEGGEMANN besonders auf die Entwicklung entsprechender Bauteile und Baugruppen sowie deren Herstellprozesse für die Bearbeitung und Assemblierung von anspruchsvollen metallischen Leichtbaustrukturen, u.a. auch aus unterschiedlichen Titanlegierungen.

Die regelmäßig von HEGGEMANN durchgeführten Marktanalysen zeigten bereits Anfang 2010 einen abflachenden Hype bzgl. reiner Composite-Strukturen. Dies führte zu der Annahme, dass sowohl neue Aluminium-Legierungen (Lithium) und speziell der Werkstoff Titan einen immer größeren Anteil einnehmen werden. Der Nachweis, diese Werkstoffe mit all seinen Vor- und Nachteilen verarbeiten zu können, erschließt neue Möglichkeiten für HEGGEMANN bei bestehenden und neuen Kunden bzw. Märkten. Dies gilt besonders in den Bereichen hochtemperaturbelasteter Bauteile in der Luft- und Raumfahrt, wie z.B. für Triebwerksbauteile und Strukturen.

Aus diesen Prognosen wurden für das geplante Verbundprojekt CoolTiTech folgende Punkte als wesentlich zu erwartende Ziele abgeleitet:

Für das Einzelvorhaben:

- mehr Verarbeitung von Titan – speziell warmumgeformter Titanbauteile – mit einer messbar höheren Rentabilität aufgrund geringerer Zerspanungsgrade und Ausschussraten
- Erweiterung der Kompetenz hinsichtlich Weiterverarbeitung von Titanbauteilen – Messbare Größen hierbei sind übliche Qualitätsmerkmale und mechanisch technologische Kenngrößen der hergestellten und geprüften Bauteile, wie z.B. die Dicke der Ti-Oxidschicht

Für das Gesamtvorhaben:

- Erarbeitung von Kennwerten und Ergebnissen, die einen qualitativen Vergleich warmumgeformter Titanbauteile nach dem CoolTiTech Verfahren im Vergleich zu konventionellen Verfahren liefern
- Wirtschaftlichkeit des im CoolTiTech-Verbundprojekt entwickelten Verfahrens

1.2.4 Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Am Helmholtz-Zentrum Geesthacht, mit seinen Standorten Geesthacht und Teltow, engagieren sich rund 900 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in den Bereichen Materialforschung, Küstenforschung sowie der Regenerativen Medizin. Das HZG-Institut für

Werkstoffforschung verfügt über fundierte Erfahrungen in der werkstoffmechanischen und metallografischen Charakterisierung der Ti-Basislegierung Ti6Al4V, welche insbesondere in den von der Europäischen Union geförderten Projekten ASPOW und THERMIE und während einer Kooperation mit Airbus Deutschland GmbH gewonnen wurden. Diese Ausgangslage war eine günstige Voraussetzung für die Mitwirkung im Projekt CoolTiTech. Ein Schwerpunkt der Abteilung Fügen und Bewerten (WMF) des Geschäftsbereiches Werkstoffmechanik ist u.a. das Laserstrahlschweißen von Leichtbauwerkstoffen auf Al-, Mg-, Ti-, TiAl-Basis sowie die entsprechende mechanische und mikrostrukturelle Untersuchung der Verbindungseigenschaften hinsichtlich Festigkeit, Risszähigkeit, Ermüdung (Lebensdauer, Rissausbreitung), Mikrostruktur und Eigenspannungen. Von Bedeutung ist hierbei die Abbildung der Wechselbeziehung zwischen Prozess, Materialeigenschaften und Anwendung. Die Grundlage für diese Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist die Ausstattung der Abteilung WMF mit Laseranlagen und Untersuchungsmethoden, die interne Bündelung von Kompetenzen im Institut für Werkstoffforschung und die Vernetzung mit Universitäten sowie mit Industrieunternehmen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Verbundpartner vereinbarten eine Kooperationsvereinbarung. Mit dem Beiratsmitglied wurde eine Geheimhaltungsvereinbarung geschlossen.

Gegenüber dem ursprünglichen Antrag kam es während des Projektes zu kleineren Änderungen im Zeitplan und auch in der Gewichtung der geplanten Arbeiten der einzelnen Partner. Diese waren bedingt durch die im Laufe des Projektes gewonnenen Erkenntnisse und die personelle Veränderungen der Projektmitarbeiter während der Laufzeit des Projektes. Für den Ablauf des Gesamtprojektes ergaben sich resultierend jedoch keine Abstriche in den erzielten Ergebnissen und Resultaten.

Das gesamte Projekt ist in sechs Arbeitspakete aufgeteilt. Die **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt das Zusammenwirken der einzelnen Partner und qualitativ den Aufbau des Projektes hinsichtlich der Einzelarbeitspakete. Im Beirat des Projektes waren Rolls Royce und EADS IW vertreten. EADS IW Teilnahme ist beendet, da keine faire Konsortialvereinbarung zu erzielen war.

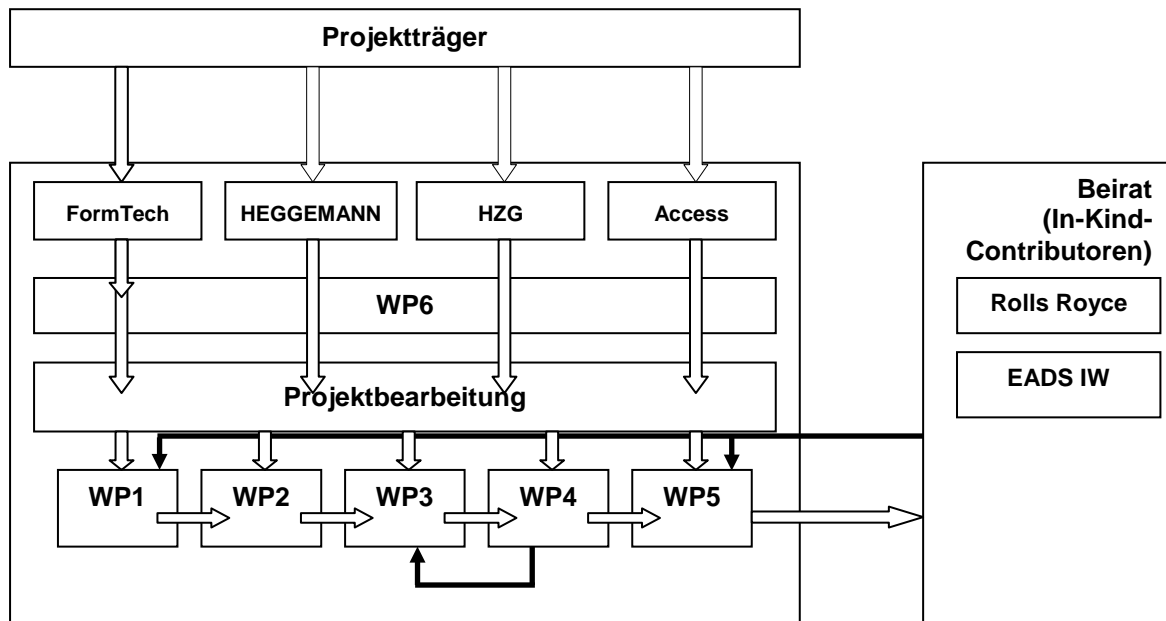


Abbildung 1: Managementplan

Im Folgenden werden die Arbeitspakete im Einzelnen näher beschrieben.

Arbeitspaket 1 - Spezifikation:

In diesem Arbeitspaket wurden zunächst in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern und dem Beiratsmitglied die allgemeinen Anforderungen an Titanwerkstoffe und Bauteile festgelegt. Unter Berücksichtigung der festgelegten Anforderungen wurden Musterbauteile definiert und das Testprogramm inkl. nötiger Materialmengen festgelegt. Im Weiteren wurden mögliche Werkzeugwerkstoffe für den Einsatz bei den erwarteten Umformtemperaturen identifiziert.

Arbeitspaket 2 - Materialvoruntersuchungen:

In diesem Arbeitspakete standen im Vordergrund die Materialbeschaffung und die metallurgische sowie die werkstoffmechanische Voruntersuchungen am Eingangsmaterial. Es wurde eine Versuchsmatrix erstellt, die die Parameterkombination der Versuche umfasst.

Arbeitspaket 3 - Versuchsdurchführung:

Es wurden Werkzeuge definiert, gefertigt und Umformversuche durchgeführt. Zusätzlich wurden zur ersten Ermittlung des Umformverhaltens „Cone-Tests“ durchgeführt. Die Anwendungsmöglichkeiten und –grenzen der Titanlegierungen wurde mit Hilfe einer Machbarkeitsstudie in Form von Tailored Blanks untersucht.

Arbeitspaket 4 - Optimierung:

Es wurden metallurgische Untersuchung der umgeformten Teile hinsichtlich der Mikrostruktur und insbesondere auch die Detailuntersuchung der Oberflächenzone durchgeführt. Im Weiteren wurden die umgeformten Teile werkstoffmechanisch untersucht, indem die Zug- und Biegefestigkeiten überprüft wurden. Aus den gewonnenen Ergebnissen lassen sich die Temperatur-/Druckkombinationen sowie Umformzykluszeiten extrahieren, die bessere Ergebnisse liefern. Auf diesen Werten aufbauend wurde die Versuchsmatrix aktualisiert.

Arbeitspaket 5 - Verwertung:

Die Ergebnisse der Umformversuche wurden bewertet und die Kenndaten für die Titanlegierungen zusammengestellt. Zusätzlich fand eine Übertragungsuntersuchung auf mögliche Bauteilgeometrien statt.

Arbeitspaket 6 - Management:

Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Koordinierung und Führung des Projektes sowie die Erstellung der Projektdokumentation.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Die Verwendung von hochfesten Titanwerkstoffen in zukünftigen Compositflugzeugen ist nötig wegen der Korrosionsgefährdung von Aluminium im Kontakt mit dem kohlfaserverstärkten Kunststoff. Direkt mit dem CFK verbundene Bauteile müssen über die gesamte Flugzeuglebensdauer korrosionssicher sein, was mit dem Einsatz von Titanlegierungen der Fall ist.

Generell ist Titan ein interessanter Werkstoff für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, der chemische Industrie, Medizintechnik und bei Herstellung von Sportgeräten, da er über eine hohe spezifische Festigkeit bei geringem Gewicht verfügt. Gleichzeitig ist seine Korrosionsbeständigkeit außerordentlich hoch. Besonders hervorzuheben sind die Titanlegierungen aufgrund der hohen Bruchfestigkeit von bis 1250 N/mm^2 . Die am häufigsten eingesetzte Titanlegierung ist Ti-6Al-4V mit einer Bruchfestigkeit von 920 N/mm^2 .

Der Herstellprozess des Metalls ist sehr aufwändig. Mittels einer exothermen Reaktion, die hohe Temperaturen erzeugt ($>900 \text{ °C}$) wird aus Titanoxid in kleinen Mengen der sogenannte Titanschwamm gewonnen. Der Schwamm wird zusammen mit Titanschrott und Legierungselementen zu einem Ingot-(Pressbarren) verarbeitet. Der Barren muss im Vakuum umgeschmolzen werden. Als weiterverarbeitete Halbzeuge werden Platten und Bleche sowie Schmiede- und Gussteile angeboten

Titan ist nicht börsennotiert. Der Marktpreis für Blech mit einer Dicke von ca. 1,5 mm ist in den letzten Jahren von ca. 60,- €/kg auf ~250,- €/kg im Jahre 2008 gestiegen. Heute liegt der Preis bei ca. 150,- €/kg bis 180,- €/kg. Plattenmaterial ab einer Dicke von ca. 20 mm notiert zu ca. 50 % dieser Kosten. Die Preise sind volatil und werden von mehreren Einflussfaktoren getrieben.

Neben dem wachsenden Bedarf der Luftfahrt- und Triebwerksindustrie sind auch Sportartikelhersteller ein großer Verbraucher. In der letzten Zeit waren die Preise stark von dem starken Wachstum des Stahlausstoßes geprägt, da Titan ein Legierungselement für höherwertige Stahllegierungen ist und dadurch eine Mangelsituation entstand. Die weltweiten Herstellkapazitäten sind begrenzt. Besonders für Luftfahrtqualitäten gilt eine lange Lieferzeit von > 12 Monaten. Die großen Luftfahrtkunden wie BOEING und AIRBUS haben aus strategischen Gründen langjährige Rahmenvereinbarungen treffen müssen.

Titanwerkstoffe sind aufgrund ihres guten Eigenschaftsprofils aus vielen Anwendungen nicht wegzudenken. Der einfachste Weg besteht in der Zerspanung von dicken Platten. Die konventionelle Titanverarbeitung ist heute weitgehend adaptiert von den Methoden der Aluminiumverarbeitung. Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit der Zerspanungsmaschinen wird bei Aluminium-Bauteilen ein hoher Zerspanungsanteil bis zu 95 % in Kauf genommen. Da es nicht möglich ist, alle nötigen Dicken zu bevorraten, ist es oftmals nötig, eigentlich zu dickes Plattenmaterial einzusetzen. Der

Abfall in Form von Spänen kann hier von ca. 85 - 95 % sein. Bei den o.a. Werkstoffpreisen ist diese Fertigungsweise sehr aufwändig. Folgende Faktoren sprechen unter Kostengesichtspunkten gegen die umfangreiche Zerspanung von Titanteilen aus Platten, Gussstücken oder Schmiedeteilen:

- Der Titanpreis ist vergleichsweise hoch. Der Preis/kg beträgt im Augenblick für Bleche aus Ti6-4 ~180,- €/kg, dies entspricht einem Kostenverhältnis von Titan zu Aluminium von 8 zu 1. Das Titan ist somit 8-mal so teuer wie Aluminium.
- Die Bestelldauer ist lang. Im Augenblick beträgt sie für kleine Mengen ca. 14 bis 18 Monate und gelingt bei großen Mengen nur mit langjährigen Rahmenverträgen mit dem Nachteil der vertragsgemäßen Abnahmegarantien. Die lange Lieferzeit führt zwangsweise aus Absicherungsgründen zu hohen Lagerbeständen und damit zu einer beträchtlichen Kapitalbindung. Besonders bei einem anlaufenden Programm, in dem die meisten Bauteile noch nicht ausdimensioniert sind, müssen darüber hinaus Platten mit reichlich bemessenem Aufmaß beschafft werden. Das Aufmaß muss teuer bezahlt und finanziert sowie anschließend zu Spänen verarbeitet werden. Die Späne werden auf dem Schrottmarkt leider nur mit einem Preis von ca. 0,30 €/kg angenommen.
- Der Fertigungsaufwand bei der Zerspanung ist durch die vergleichsweise viel schlechteren Fräs- und Bohreigenschaften und die zu beachtende Verzugsneigung bei einseitiger Zerspanung hoch. Das Zeitspanvolumen von Titan zu Aluminium beträgt 1 zu 20 bis 40. In einer gleichen Zeiteinheit ist die Zerspannung von nur einer Volumeneinheit Titan möglich während in der gleichen Zeit je nach verfügbarer Spindelleistung 20 bis 40 Volumeneinheiten Aluminium zerspannt werden können.
- Mit den existierenden konventionellen Zerspanungstechniken können aufgrund der werkstoffbedingten hohen Zerspanungskräfte und der somit problematischen Spanntechnik dünnwandige Bauteile unter ca. 2,5 mm nicht sinnvoll aus Titan hergestellt werden.

Es ist daher von großer strategischer Bedeutung, Titanbauteile mit dem geringst möglichem Materialaufwand und Zerspanungsgrad zu fertigen. Dies ist insbesondere bei dünnwandigen Bauteilen der Fall, welche aus halbfertigen Rohteilen gefertigt werden können, die geometrisch nahe an der vom Konstrukteur vorgegebenen Endkontur liegen. Solche Rohteile werden „Endkonturnahe Halbzeuge“ genannt. Guss-

und Schmiedeverfahren zielen prinzipiell in diese richtige Richtung. Jedoch sind diese Halbzeuge aufwändig herzustellen und haben werkstoffliche Nachteile durch ihre Mikrostruktur, gebrauchen einen beträchtlichen Zeitvorlauf und weisen bis zur Endkontur einen verringerten aber immer noch beachtlichen Zerspanungsgrad von ca. 60 % auf. Dieser hohe Zerspanungsgrad ergibt sich, da die mit diesem Verfahren möglichen Wanddicken weit über den von der Statik berechneten Soll-Dicke liegen. Weiterhin besteht ein signifikantes Verzugsrisiko bei der Zerspanung. Durch das Freischneiden von halbzeugimmanenten Eigenspannungen können sich die Halbzeuge unvorhersehbar verziehen.

Als weitere Alternative zur Herstellung dünnwandiger Bauteile bietet sich die Warmumformung von Titanblechen wie z.B. Ti6Al4V mit Gasdruck, auch unter SPF (Superplastisches Umformen) bekannt, an. Dies ist im Prinzip ein bekanntes und im Flugzeugbau akzeptiertes Verfahren, siehe beispielsweise A320 Randwinkel für die Druckdombefestigung, A320 Heckspitze, B787 Einlaufippe GENXX, usw.

Derzeit werden bei diesem Verfahren standardmäßige Titanwerkstoffe eingesetzt, welche eine Korngröße von ca. 10 μm aufweisen. Die Umformgeschwindigkeit ist damit limitiert und die Zykluszeit verhältnismäßig lang, bei komplexeren Bauteilen sind Zykluszeiten von bis zu 90 Minuten nicht ungewöhnlich.

Gleichfalls ist aufgrund der Umformtemperatur von über 900 °C die Aufnahme von Sauerstoff in die Oberflächen nicht zu vermeiden, wodurch diese spröde Eigenschaften erhält, die unerwünscht sind. Das chemische Abtragen der Sprödschicht von ca. 60 bis 80 μm ist teuer und aus Umweltgesichtspunkten bedenklich. Die Bäder bestehen aus HF und HNO_3 . Wegen der Arbeitssicherheit, der Luftreinhaltung und der Abfallentsorgung sind diese Anlagen unbeliebt und kostenintensiv. Weder Warmformanlagen noch große Anlagen zum chemischen Abtragen sind bei den OEM in Deutschland verfügbar.

Wegen der o.g. historischen Fakten und der mangelnden Ausstattung der Werke hat sich auch in den Konstruktionsabteilungen vielfach der falsche Eindruck gebildet, dass die Warmumformverfahren für Bleche aus Titan-Legierungen nicht einsatzfähig und sinnvoll seien. Dieser Eindruck ist inzwischen klar widerlegt. Die Prozesse sind signifikant weiterentwickelt. Mit zunehmendem Wissen über die Details bei der Umformung und dem Handling sind die Zykluszeiten konkurrenzfähig und liegen bei ca. 30 bis 50 Minuten. Durch die bessere Kontrolle der umgebenden Schutzgasatmo-

sphäre ist es gelungen, die Gasaufnahme zu begrenzen. Heute kann von einer abzutragenden Schichtdicke von lediglich noch ca. 30 bis 40 μm ausgegangen werden.

In den letzten Jahren wurden Untersuchungen in Instituten an postkartengroßen Prüflingen aus feinkörnigem Ti6-4 durchgeführt. Es konnte aufgezeigt werden, dass dieser Werkstoff signifikante Vorteile bei der Superplastischen Umformung bietet. Es zeigte sich, dass es mit der feinkörnigeren Variante des Werkstoffs Ti6-4 möglich ist die Umformtemperaturen deutlich zu reduzieren [1-2, 6-12]. In [9] wird eine Untersuchung beschrieben, in welcher die Eigenschaften von Ti6-4-Feinblech mit einem mittleren Korndurchmesser von 0,3 μm und der Blechdicke von 2 mm mit denen von kommerziellem Titan-Feinblech verglichen werden, dessen mittlere Korngröße 3,0 μm betrug.

Die Titan-Basislegierung Ti6-4 zeigt ein ausgeprägtes superplastisches Verformungsverhalten bei Temperaturen ab ca. 880 °C und höher mit Dehnraten von 10^{-4} bis 10^{-3} s^{-1} [1]. Voraussetzung ist, dass deren Gefüge feinkörnig ist [2]. Bei superplastischer Verformung wird Ti6-4 mit globularem Gefüge bevorzugt [3]. Im isothermen Zugversuch bei 50 % Schmelztemperatur liefert Ti6-4 Gleichmaßdehnungen von über 1000 %. Selbst während langsamer superplastischer Umformung bei ca. 925 °C gibt es nahezu kein Kornwachstum. Standard-SPF-Titanlegierungen haben eine Korngröße von $< 10 \mu\text{m}$, eine globulare Kornform und sind in ihrer Mikrostruktur homogen [4]. Bei superplastischer Verformung von vielkristallinen Werkstoffen wirken Korngrenzgleitung, Kornrotation und Korngrenzdiffusion zusammen, wobei die Parameter Temperatur und Dehnungsgeschwindigkeit für die Superplastizität richtig gewählt werden müssen [4, 5].

Eine Reduzierung der mittleren Korngröße verschiebt den Bereich der superplastischen Verformung in Richtung niedrigere Temperaturen und höhere Dehnraten [2]. Aus der Literatur bekannte Methoden zur Einstellung von Korngrößen bis in den Submikrometerbereich sind das SPD (**S**evere **P**lastic **D**eformation)- [1, 6, 7], ECAP (**E**qual **C**hannel **A**ngular **P**ressing)- [2, 10], ECAE (**E**qual **C**hannel **A**ngular **E**xtrusion)- und das Warmtorsions-Verfahren [4]. Die Anwendung dieser Methoden auf Titanlegierungen bietet den Vorteil, dass die Umformtemperatur um ca. 150 °C bis 200 °C reduziert und die Umformgeschwindigkeit sowie die maximale Dehnung gesteigert werden können [4].

Es wird in [2] berichtet, dass in sehr feinkörnigem Ti6-4 hohe Gleichmaßdehnungen selbst bei Temperaturen von 625 °C und 650 °C mit sehr hohen Dehnraten von 10^{-2} bis 10^{-1} s^{-1} erzielt worden sind. Die mittlere Korngröße dieser Legierung bewegte sich hier in einem Bereich zwischen 0,1 μm und 0,2 μm . Die Herstellung von superplastisch verformbaren Ti6-4-Knüppeln mit Abmessungen von 150 mm im Durchmesser und 200 mm in der Länge durch mehrstufiges isothermes Schmieden ist möglich, es wurde dadurch in Ti6-4 ein homogenes Gefüge mit einer mittleren Korngröße von 0,4 μm erzielt [8]. Ein optimales superplastisches Verformungsverhalten von Ti6-4 mit einem mittleren Korndurchmesser von 0,4 μm liegt vor bei einer Temperatur von 775 °C mit Dehnraten von 10^{-2} bis 10^{-1} s^{-1} [2, 9]. In [9] wurde, wie zuvor erwähnt, das superplastische Verhalten von Ti6-4-Blech mit einem mittleren Korndurchmesser von 0,3 μm untersucht. Die Anwendung des ECAP-Verfahrens reduziert die Korngröße in Ti6-4 im Anlieferungszustand von 3,0 μm auf 0,16 bis 0,17 μm [10]. Die Feinkörnigkeit hat eine Erhöhung der Dehngrenze und Zugfestigkeit bei Raumtemperatur sowie eine Verringerung der Bruchdehnung zur Folge [2, 6, 8-10]. Die Dauerfestigkeit wird durch Einstellung eines feineren Gefüges verbessert [10].

Die Realisierung von feinkörnigem Ti6-4 mit mittleren Korndurchmessern von 0,1 bis 0,4 μm hat zu einer Reduzierung der Umformtemperatur und einer Erhöhung der Dehnraten geführt. Damit gingen außerdem eine Erhöhung der Dehngrenze, Zug- und Dauerfestigkeit sowie ein geringfügiger Verlust an Bruchdehnung einher.

Bis dato sind diese sehr feinkörnigen Werkstoffe nur im Zuge von Laboruntersuchungen in sehr geringen Mengen und Abmessungen verfügbar (z.B. ECAP: ca. 4 cm^2).

Gemäß neuer Informationen ist es dem Titanhersteller VSMPO, Salda, GUS, gelungen, die Korngröße von Blechen aus Ti6-4 gemäß der Spezifikation AMS 4911 auf einen Mikrometer einzustellen. Mit der Verfügbarkeit dieser feinkörnigen Variante des bekannten Werkstoffes Ti6Al4V auf dem freien Markt können somit die Vorteile der reduzierten Umformtemperatur und der gleichzeitig erhöhten Umformgeschwindigkeit für den kommerziellen Einsatz der superplastischen Umformung genutzt werden. Dadurch kann die Zykluszeit um ca. 50 % gekürzt werden und es ergeben sich neue Möglichkeiten, eine wirtschaftliche, umformtechnische Fertigung von Blechbauteilen zu entwickeln. Insbesondere für den konkurrenzfähigen Bau von Verkehrsflugzeugen

aus CFK-Werkstoffen bietet diese Konstellation entscheidende Impulse. Ebenfalls ergeben sich ggf. signifikante Vorteile für den Einsatz in Triebwerkskomponenten.

In der Literatur wurden keine Hinweise auf das Bruchverhalten von "fine-grained" Ti6Al4V-Feinblechen unter statischer und zyklischer Beanspruchung gefunden. Es kann hier deshalb nur auf Literatur Bezug genommen werden, welche "kommerzielles" Ti6Al4V betrachtet. Das Bruchverhalten von ($\alpha+\beta$)-Ti-Basislegierungen unter statischer und zyklischer Beanspruchung wird primär durch deren Gefügestand bestimmt und weniger durch Legierungselemente beeinflusst [3, 14, 15]. Ti6Al4V mit einem grob-lamellarem Gefüge weist eine höhere Bruchzähigkeit auf als im feinglobularen Gefügestand [3]. Der feinglobulare Gefügestand und dessen Verfeinerung sind aber Voraussetzung für superplastische Verformung bei niedrigeren Temperaturen [3, 4]. Der Widerstand eines Werkstoffes wird im Dauerschwingversuch ermittelt. So führt die Verringerung der α -Lamellenbreite von 10 auf 0,5 μm im lamellaren Ti6Al4V zu einer Erhöhung der Dauerfestigkeit von 480 auf 675 MPa, ebenso hat eine Reduzierung der α -Korngröße von 12 auf 2 μm im globularen Ti6Al4V eine Erhöhung der Dauerfestigkeit von 560 auf 720 MPa zur Folge [16]. Eine Gefügeverfeinerung resultiert dementsprechend in einen höheren Widerstand gegen Rissbildung und damit in eine höhere Dauerfestigkeit [3, 10, 16]. Hierin zeigt sich auch, dass Bruchzähigkeit und Dauerfestigkeit bei Ti6Al4V gegenläufige Eigenschaften sind. Die Rissbildung in Werkstoffen unter zyklischer Beanspruchung stellt das erste Schädigungsstadium dar. Das zweite Schädigungsstadium ist die Ermüdungsrissausbreitung. Ti6Al4V im grob-lamellarem Gefügestand ist gegen Ermüdungsrissausbreitung von Langrissen deutlich beständiger als mit feinglobularem Gefüge, bei Kurzrissen kehren sich diese Verhältnisse um. So wird beispielsweise berichtet, dass Oberflächenrisse in einem grob-lamellaren Gefüge sich schneller ausbreiten als in einem globularen Gefüge [16]. Die höhere Beständigkeit von Ti6Al4V im lamellaren Gefügestand gegen Ausbreitung von Langrissen wird in [16] damit erklärt, dass Langrisse Rissfrontgeometrie und Risschließung zusätzliche Widerstandsbeiträge liefern, welche die Ermüdungsrissausbreitung gegenüber Kurzrissen verlangsamen. Ein Gefüge in Ti6Al4V, welches durch eine hohe Dauerfestigkeit und dementsprechend einen höheren Widerstand gegen Rissbildung gekennzeichnet ist, ist demnach weniger beständig gegen die Ausbreitung von Langrissen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das mechanische Verhalten von ($\alpha+\beta$)-Ti-Basislegierungen, zu denen das Ti6Al4V gehört, unter statischer und zyklischer Be-

anspruchung primär durch deren Gefügemorphologie bestimmt wird [3, 10, 14, 13]. Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes sind besonders die folgenden Beobachtungen von großem Interesse:

- Für gute superplastische Verformung ist ein möglichst feinkörniges globulares Ausgangsgefüge vorteilhaft [4].
- Je feinkörniger das Gefüge ist, desto höher ist der Widerstand gegen Ermüdungsrissbildung und Mikrorisswachstum. Dies spiegelt sich direkt in einer Erhöhung der Dauerfestigkeit wieder [3, 10, 16].
- Je feinkörniger das Gefüge ist, desto geringer ist der Rissausbreitungswiderstand gegen lange Makrorisse. Was folglich zu einer Erhöhung der Risswachstumsgeschwindigkeit führt [3,16].
- Beim Übergang von einem groben, lamellaren Gefüge zu einem feinen, globularen Gefüge nimmt die Bruchzähigkeit ab [3].

Die hier angeführten allgemeinen Aussagen sind jedoch in starkem Maße von der genauen Gefügemorphologie abhängig. Die Beurteilung, ob aus einer Verfeinerung der Korngröße im Endeffekt bessere oder schlechtere Gebrauchseigenschaften der hergestellten Strukturen resultieren, ist daher sehr komplex und macht die im Rahmen des HZG-seitigen Einzelvorhabens geplante umfassende Charakterisierung der Werkstoff Variante Ti6Al4V „fine grain“ sowohl im Ausgangszustand als auch im superplastisch umgeformten Zustand unbedingt notwendig.

Der Flugzeughersteller Boeing (USA) besitzt bereits Kompetenzen bezüglich des Einsatzes von feinkörnigem Titan zum Superplastischen Formen bei niedrigen Temperaturen. Leider sind die dort gewonnenen Erkenntnisse nicht bekannt und auch nicht öffentlich zugänglich. Es existieren hierzu Patente der Patentfamilie mit dem Titel „Superplastic forming and diffusion bonding of fine grain titanium“ (US000007533794B2, US020050218193A1, GB000002412621A, GB000002412621B und AT000000435712E). Zu diesen Patenten liegt jedoch in umfassendem Maße entgegenhaltende Literatur vor, die den Rechtsanspruch der Patente widerlegt. Diese Literaturquellen belegen, dass bereits vor der Anmeldung des ersten dieser Patente im Jahre 2004 der Effekt der vorteilhaften Eigenschaften von feinkörnigem Titan bei dem Superplastischen Formen allgemein bekannt waren. Kaibyshev [13] beschrieb bereits 1992 die vorteilhaften Eigenschaften von feinkörni-

gen Werkstoffen bei der superplastischen Umformung. Als weitere Literaturquellen, die die vorteilhaften Eigenschaften von feinkörnigem Titan beim Superplastischen Formen behandeln und vor dem Jahr 2004 datieren sind unter anderem [1, 6, 9, 12] zu nennen. Die oben genannten Patente stehen einer Verwertung der im Zuge des Projekts CoolTiTech zu erzielenden Ergebnisse nicht im Wege.

Bezüglich der Herstellung von feinkörnigem Titan liegt ein Patent mit dem Titel „method of processing titanium alloys and the article“ und der Nummer WO001998017836A1 von Kaibyshev et al. vor. Es handelt sich um ein innerrussisches Patent, welches die Herstellung der Blechhalbzeuge beschreibt. VSMPO verkauft solches feinkörniges Titan-Blech auf dem Weltmarkt. Somit gibt es offensichtlich eine GUS-interne Regelung. Außerdem hat dieses Patent ohnehin keine Auswirkung auf das Vorhaben CoolTiTech, da das Patent nicht die Umformung von Endprodukten beschreibt und berührt.

Die Patentrecherche der Verbundpartner in den einschlägigen Datenbanken hat ergeben, dass keine anderweitigen Patente der Ergebnisverwertung entgegenstehen.

Literaturverzeichnis

[1] A. V. Sergueeva, V.V. Stolyarov, R. Z. Valiev, A. K. Mukherjee: Enhanced superplasticity in a Ti-6Al-4V alloy processed by severe plastic deformation, *Scripta Materialia*, 43, 2000, pp. 819-824.

[2] L. Saitova, I. Semenova, H. W. Höppel, R. Valiev, M. Göken: Enhanced superplastic deformation behavior of ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloy, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2008, 39, No. 4-5, pp. 367-370.

[3] M. Peters, J. Hemptenmacher, J. Kumpfert, C. Leyens: Titan und Titanlegierungen: Struktur, Gefüge, Eigenschaften, Titan und Titanlegierungen, Hrsg.: M. Peters, C. Leyens, Wiley-VCH, 2002, Weinheim, S. 1-37.

[4] W. Beck: Superplastisches Umformen und Diffusionsschweißen von Titan und Titanlegierungen, Titan und Titanlegierungen, Hrsg.: M. Peters, C. Leyens, Wiley-VCH, 2002, Weinheim, S. 285-301.

[5] M. G. Zelin: Processes of Microstructural Evolution during Superplastic Deformation, *Materials Characterization*, 37, 1996, pp. 311-329.

-
- [6] R. S. Mishra, V.V. Stolyarov, C. Echer, R. Z. Valiev, A. K. Mukherjee: Mechanical behavior and superplasticity of a severe plastic deformation processed nanocrystalline Ti-6Al-4V alloy, *Materials Science and Engineering*, A298, 2001, pp. 44-50.
- [7] A. V. Sergueeva, V. V. Stolyarov, R. Z. Valiev, A. K. Mukherjee: Superplastic behaviour of ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloys, *Materials Science and Engineering*, A323, 2002, pp. 318-325.
- [8] S. V. Zharebtsov, G. A. Salishchev, R. M. Galeev, O. R. Valiakhmetov, S. Yu. Mironov, S. L. Semiatin: Production of submicrocrystalline structure in large-scale Ti-6Al-4V billet by warm severe deformation processing, *Scripta Materialia*, 51, 2004, pp. 1147-1151.
- [9] S. N. Patankar, J. P. Escobedo, D. P. Field, G. Salischev, R. M. Galeev, O. R. Valiakhmetov, F. H. Froes: Superior superplastic behavior in fine-grained Ti-6Al-4V sheet, *Journal of Alloys and Compounds*, 345, 2002, pp. 221-227.
- [10] L. R. Saitova, H. W. Höppel, M. Göken, I. P. Semenova, R. Z. Valiev: Cyclic deformation behavior and fatigue lives of ultrafine-grained Ti-6Al-4V ELI alloy for medical use, *International Journal of Fatigue*, 31, 2009, pp. 322-331.
- [11] Rinat V. Safiullin, Werner Beck, Arthur R. Safiullin, Maria A. Murzinova: Processing Properties Of Advanced Ti Sheet Materials, *Proceedings Of The 6th European Conference On Superplastic Forming Euro SPF '06*, 2006.
- [12] G.A. Salishchev, O.R. Valikhmentov, R.M. Galeev, F.H. Froes: Characterization of Submicron-Grained Ti-6Al-4V Sheets with Enhanced Superplastic Properties, *Superplasticity in Advanced Materials-ICSAM 2003*, *Materials Science Forum* vols. 447-448, 2004, pp. 441-446.
- [13] Oscar A. Kaibyshev: *Superplasticity Of Alloys, Intermetallides And Ceramics*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1992.
- [14] U. Zwicker: *Titan und Titanlegierungen, Reine und angewandte Metallkunde in Einzeldarstellungen*, Herausgegeben von W. Köster, Band 21, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1974.
- [15] G. Lütjering: Property optimization through microstructural control in titanium and aluminium alloys. In: *Materials Science and Engineering A263* (1999), S. 177-126.
- [16] L. Wagner, J. K. Gregory: *Ermüdung von Titanlegierungen, Titan und Titanlegierungen*, Hrsg.: M. Peters, C. Leyens, Wiley-VCH, 2002, Weinheim, S. 163-196.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In Zusammenarbeit mit den im Beirat mitwirkenden OEM EADS-Innovation Works und RollsRoyce-Deutschland, sowie dem Partner FormTech wurden potenzielle Applikationen ermittelt und hieraus die repräsentativen Demonstratorbauteile abgeleitet.

Im Einzelvorhaben „Industrielle Anwendungsgebiete der Superplastischen Umformung von Titanwerkstoffen bei niedrigen Temperaturen“ wurden alle Arbeiten eigenständig von der HEGGEMANN AG ohne Vergabe von Unteraufträgen an Dritte ausgeführt.

Alle im Projekt geplanten und erforderlichen Arbeiten wurden kontinuierlich zwischen den Projektpartnern abgestimmt und stetig wurde der Arbeitsfortschritt mit dem Arbeitsplan in der Gesamtvorhabenbeschreibung bzw. den ausführlichen Beschreibungen in den Einzelvorhaben in Arbeitspakete abgeglichen.

Die technologisch begründeten inhaltlichen Änderungen im Projektverlauf sowie die daraus resultierenden zweimaligen Projektverlängerungen wurden im Projektkonsortium inkl. des Beirats abgestimmt und von dem Projektträger bewilligt.

Die Abstimmung im laufenden Projekt erfolgte in regelmäßigen Projektsitzungen zwischen allen Partnern, z.T. auch unter Teilnahme der Beiratsunternehmen. Je nach Arbeitspaket und Problemstellung wurden auch bilaterale Meetings, Telefonkonferenzen und Web-Meetings abgehalten, wobei immer alle Partner im Informationsfluss eingebunden waren.

2 EINGEHENDE DARSTELLUNG

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis

Die inhaltliche Projektarbeit konnte mit dem Zuwendungsbescheid vom 04.10.2010 begonnen werden. Die Bewilligung der Zuschüsse erfolgte rückwirkend zum 01.07.2010. Die für das Projekt bereitgestellten Eigenmittel und Zuschüsse wurden zum überwiegenden Teil für Personalkosten aufgewendet. In den letzten sechs Monaten wurde dazu der Großteil der Materialkosten bei der Umsetzung des Demonstratorbauteils verwendet.

Das Kick-Off Meeting fand am 25.11.2010 statt. Dabei wurden erste Ideen und Anforderungen für Musterbauteile gesammelt. Desweiteren wurden Grundlagen für das

Prüfprogramm erarbeitet und abgestimmt. Zudem konnte die weitere Terminalschiene für die anstehenden Arbeiten definiert werden.

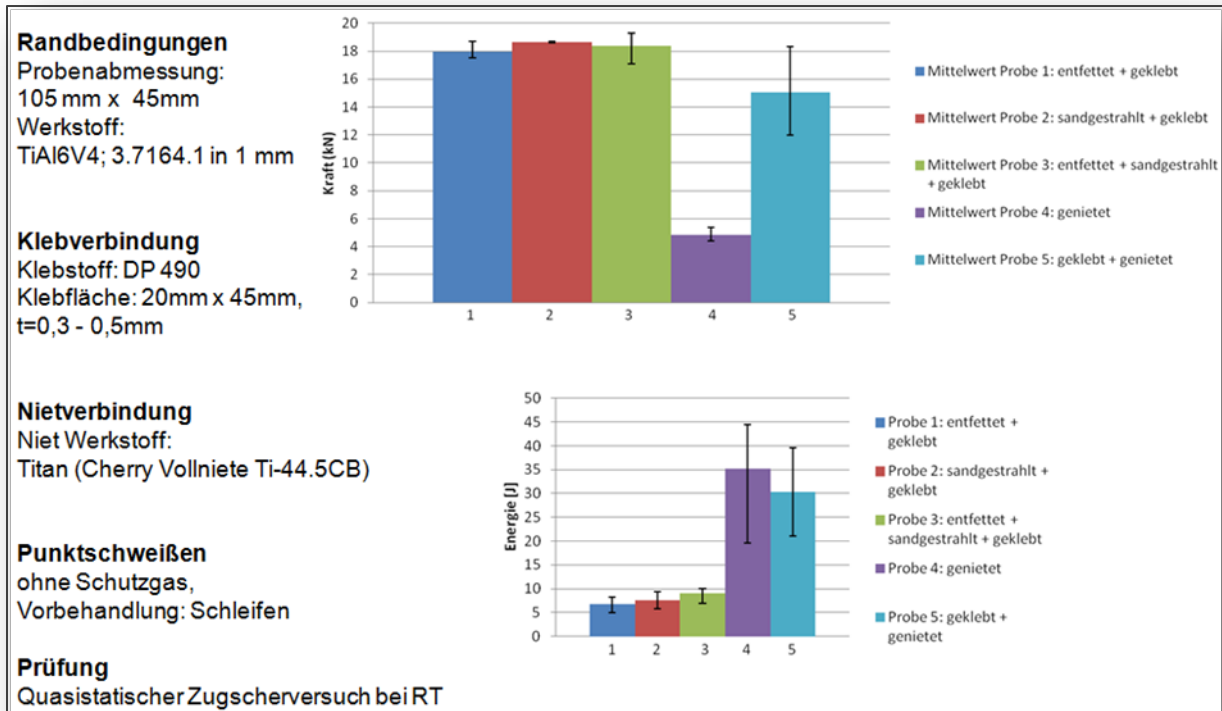
Die Auswertung der anschließend durchgeführten metallografischen Untersuchungen sowie der Recherche bei Titanherstellern hat dann ergeben, dass das fine grain Ti-6Al-4V Material gegenüber dem „konventionellen“ grobkörnigen Standard Ti-6Al-4V Material Vorteile hinsichtlich der Umformung bei niedrigeren Temperaturen aufweist.

Durch die Fokussierung auf die Thematik Ti6-4 Standard, Fine grain und Ultra-fine grain wurden die Screening Untersuchungen für das zusätzlichen Verfahren „Warmtiefziehen“ in Abstimmung mit allen Projektpartnern zunächst zeitlich zurückgestellt.

Stattdessen wurden die Arbeitspakete mit den Grundlagenuntersuchungen bzgl. zu verwendender Verbindungstechniken vorgezogen. Screeningversuche, einfache Klebstoff-Peeltests und Untersuchungen zur Bestimmung der Scherzugfestigkeit von Kleb-, Niet- und Hybridverbindungen wurden ebenso durchgeführt wie Untersuchungen zur Oberflächenvorbehandlung und Referenztests mit punktgeschweißten Probenkörpern.

Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse dieser Projektphase zusammenfassend dargestellt.





Als Fazit der Versuche zur Bewertung der unterschiedlichen Verbindungstechniken konnte gezeigt werden, dass

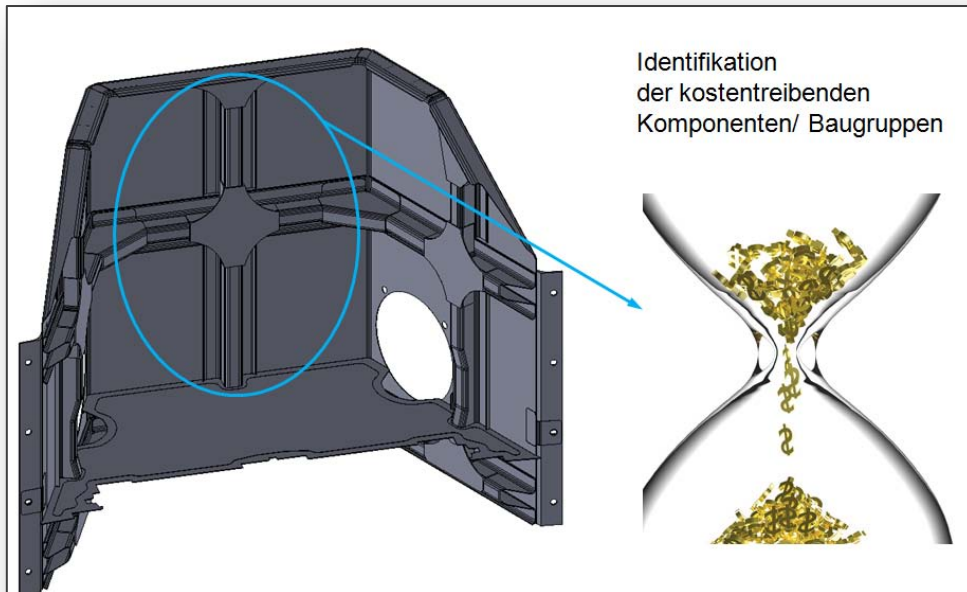
- Hybridverbindungen aus Nieten und Kleben die besten kombinierten Eigenschaften bei wärmearmen Fügeverfahren (Maximalkraft und Energieaufnahme) liefern
- Klebverbindungen hinsichtlich ihrer thermischen Beständigkeit in ihrem Einsatzbereich für viele Luft- und Raumfahrtanwendungen nur eingeschränkt einsetzbar sind
- der beste Kompromiss aus Aufwand und Nutzen bei stoffschlüssigen Verbindungen durch den Einsatz von Schweißverfahren zu erreichen ist (Vorgelagerte Prozesse beim Nieten sind aufwändig).

Parallel wurde bei HEGGEMANN nach erfolgter Abstimmung mit Industriepartnern bzgl. der Anforderungen an entsprechende Ti-Bauteile die theoretische Machbarkeitsstudie zum Einsatz der superplastischen Umformung von Titanhalbzeugen gestartet. In enger Kooperation mit FormTech wurden mögliche Musterbauteile zur Demonstration der untersuchten Fertigungstechnologien identifiziert. Der Fokus der Untersuchungen lag auf einem Titan Thermalschutzcover, welches in klassischer

Bauweise (Kaltumformung, Zerspanung, Nietverbindungen) in vergleichbarer Form in der Raumfahrt eingesetzt wird (siehe nachfolgende Abbildung).



Mit dem Ziel, die bisher üblichen Fertigungsverfahren zu optimieren, wurden daher zunächst die kosten- und bearbeitungszeitintensiven Unterbaugruppen und Prozesse identifiziert.



Es wurden Konzepte zur optimierten Herstellung mit den untersuchten Fertigungstechnologien skizziert und qualitativ bewertet. Die Verringerung bisher erforderlicher Flanschbreiten und Materialdopplungen (für die Nietverbindungen) wurden ebenfalls betrachtet und im theoretischen Modell in eine diffusionsschweißgeeignete Geometrie überführt. Die Design-Varianten des Musterbauteils basierten auf unterschiedlichen Fertigungskonzepten. Es erfolgte eine Bewertung der einzelnen Varianten hinsichtlich acht relevanter Kriterien über eine Bewertungsmatrix (8 Kriterien: Einmalkosten NRC, Herstellkosten für das Bauteil RC, Realisierungskosten bis zur Herstellbarkeit, Gewicht, Steifigkeit, generelle Machbarkeit der Gesamtstruktur, Anteil der kostenintensiven manuellen Fertigung und Ausschussquote als messbare Größe für die Prozesssicherheit). Die Bewertungsmatrix ist nachfolgend dargestellt. Die Kriterien wurden von gut nach schlecht absteigend wie folgt bewertet:

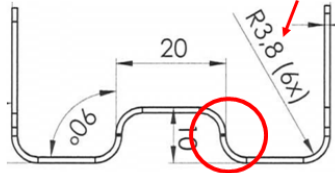
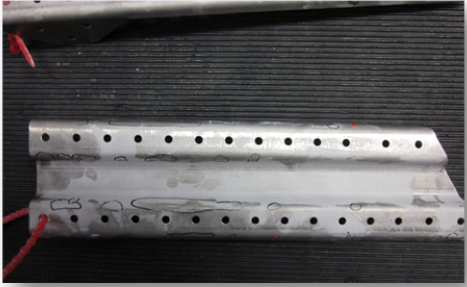
- ++ / + (Sehr) gut geeignet, günstig oder mit wenig Aufwand umsetzbar
- O Bedingt geeignet / Kosten- oder aufwandsneutral
- / - (Sehr) schlecht geeignet, sehr teuer oder aufwendig

Nr.	Variante Thermalschutzcover	Kosten NRC	Kosten RC	Realisierungskosten	Gewicht	Steifigkeit *	Machbarkeit Fertigung	Anteil manuelle Fertigung	Außenschußquote	Bemerkung
0	bestehende Fertigung	+	-	/	-	...	++	-	-	
1	bestehendes Design mit Produktionsoptimierung	-	+	-	-	...	+	+	+	U-Profile warmformen
2	Integralbauweise Kreuz über SPF	o	o	o	+	...	+	+	+	Blechdicke min. ca. 0,4 mm ($t_0=0,8$), schweres Frästeil entfällt
3	SPF/DB Haut + Kreuz	+	-	+	++	...	+	+	+	4-Lagen Sandwich, gleichmäßige Wanddicke, Niete entfallen außer am Rand
4	Komplett Sandwich-Haut	-	-	--	+++	...	o	+	+	
		* Steifigkeit der bestehenden genieteten Bauweise wird mit stoffschlüssig gefügter Bauweise verglichen			--> Schwingfestigkeit des Bauteils wird nicht berücksichtigt!					
<p>Variante 3 wird als Optimum hinsichtlich Bauteil-Anforderungen und integraler Fertigungsmethoden theoretisch betrachtet!</p> <p>=> Variante 1 wird als praktisches Anwendungsbeispiel umgesetzt!</p>										

Bei HEGGEMANN wurde über einen längeren Zeitraum die aktuelle Fertigung ähnlicher Bauteile hinsichtlich möglicher Optimierungspotenziale untersucht, um die geplanten Entwicklungen mit dem Stand der (Fertigungs-)Technik vergleichen zu können. Da die Umformung der Titanbleche bei Raumtemperatur erfolgt, treten im Bereich der Biegeradien ($R=4$ mm) nach Rückfederung des Werkstoffes Risse auf. Nachfolgend werden die Analyse der gerissenen Bauteile sowie die wesentlichen Optimierungsansätze schematisch aufgezeigt.

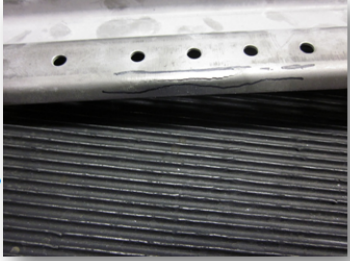
Analyse der Rissproblematik

- Aufeinanderfolgende und enge Biegeradien
Umformgrade

Parametervariation des Umformprozesses unter folgenden Aspekten:

- Materialcharge
- Nutzung von Ziehölen zur Optimierung der Tribologie
- Polieren des Werkzeugs und des Bauteils
- Manuelles Vorwärmen und Kühlen
- Änderung der Walzrichtung
- Verrundung der Kanten → Vergrößerung Biegeradius



Die Definition und Erarbeitung von Grenzmustern bzgl. kaltumgeformter und z.T. nach geschweißter Probenstücke war demnach Ausgangspunkt für die Optimierung des Herstellprozesses mittels temperaturunterstützter Umformung im Rahmen des CoolTiTech Verbundprojekts. Ziel war die Festlegung kritischer Geometrien, bei denen sich in Abhängigkeit des verwendeten Materials eine Fertigung von Unterbaugruppen mittels Warmumformung wirtschaftlich darstellen lässt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden sowohl der Prozessparameter Umformgeschwindigkeit, die Werkzeugoberfläche (Polieren der Werkzeuge zur Vermeidung überlagerter Spannungszustände) als auch die Geometrie (Biegeradius) variiert. Trotz umfangreicher Versuche zur Variation der o. g. Parameter konnte mit der klassischen Fertigungsmethode kein technisch zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden. Es traten wiederkehrend bei einigen Bauteilen – zum Teil auch erst zeitversetzt – sogenannte Spannungsrisse auf, die bis zu einer Risslänge von 30 mm durch Reparaturschweißungen nachgearbeitet werden können.

Die aufwendigen Nacharbeit mittels Schweißen sowie die zu erbringenden Nachweise (Verfahrensprüfungen und Tests) bei der klassischen Fertigungsmethode sind nachfolgend symbolisch dargestellt.

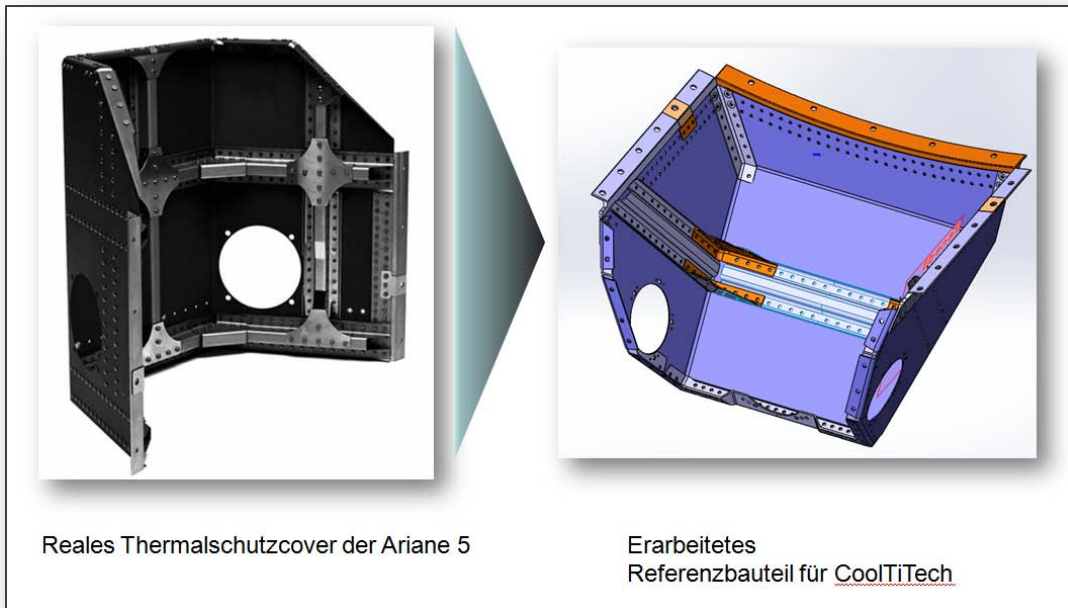
- Manuelles WIG-Nachschweißen treibt die Kosten in die Höhe
- Funktionale Integrität des Bauteils muss durch strukturmechanische Betrachtung nachgewiesen werden



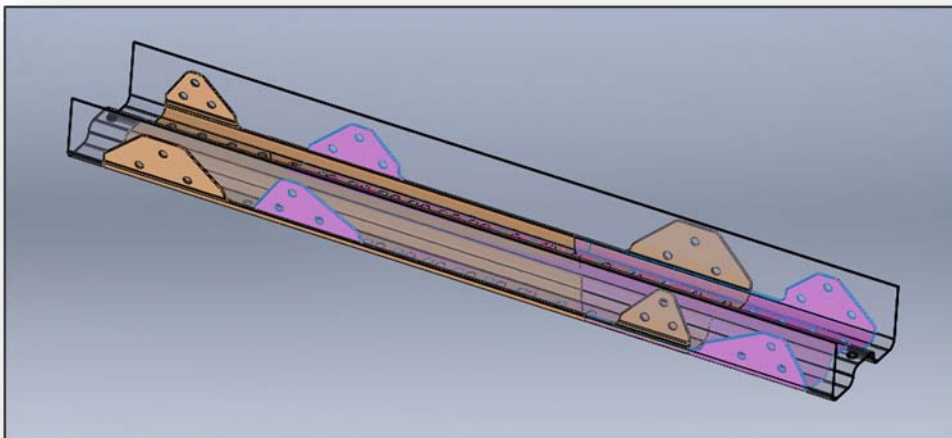
Hieraus resultiert ein großes Optimierungspotenzial hinsichtlich Prozesssicherheit und Herstellkosten durch die im Verbundprojekt CoolTiTech entwickelte Fertigungstechnologie für derartige Geometrien im Zusammenspiel mit dem bei HEGGEMANN im Rahmen des Projektes erarbeitete Grundlagenwissen bzgl. Umformung von Titanwerkstoffen bei erhöhten Temperaturen.

Nachdem dann die Projektergebnisse gezeigt haben, dass das größte Kosteneinsparungspotenzial bei der Umformung von Titanwerkstoffen nicht im Material sondern in einem optimierten Warmumformprozess liegt („Warmtiefziehen“ statt „Super Plastischer Umformung“) konnte die Werkzeugentwicklung für ein Musterbauteil zu Demonstrationszwecken inkl. Festlegung der zu verwendenden Materialien für die umformtechnische Herstellung bei geringeren Temperaturen angegangen werden.

Daher wurde gemäß Projektplan als nächster Arbeitsschritt ein Referenzbauteil sowie das entsprechende 3D-Modell definiert und umgesetzt. Für einen Ausschnitt dieser Referenzstruktur wurden dann zusammen mit FormTech Werkzeugkonzepte erarbeitet, um das Demonstratorbauteil im Rahmen des Projektes in Hardware zu realisieren. Nachfolgend ist die auf Basis einer realen Raumfahrtstruktur (Foto „Thermalcover“, links) vergleichbare aber etwas vereinfachte Struktur als 3-D CAD Modell dargestellt (rechte Abbildung).

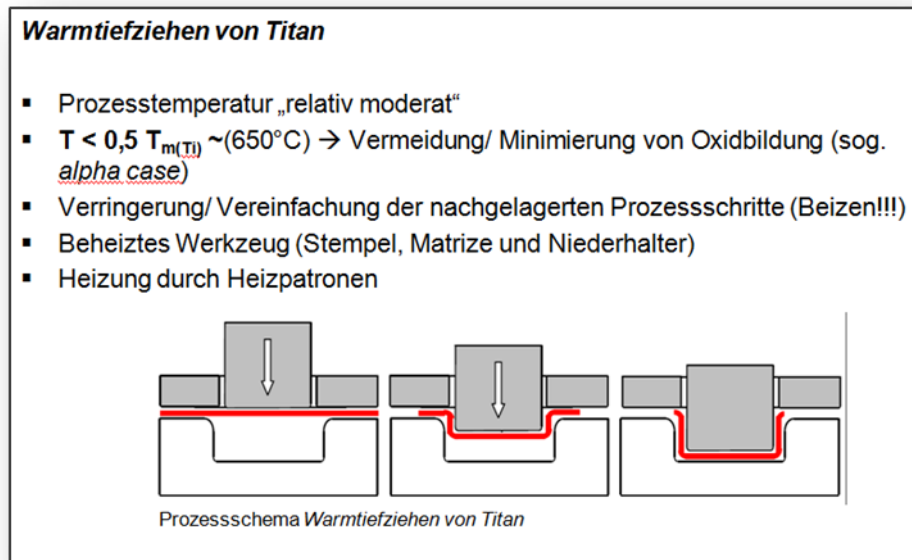


Das mittels Warmumformung herzustellende Bauteil wurde konstruktiv so gestaltet, dass aus einem Umformteil drei unterschiedliche Bauteile für das Referenzcover durch nachgelagerte Bearbeitungsprozesse hergestellt werden können. Somit wurde das komplexeste Umformteil der Baugruppe ausgewählt, um auch für die relative kleinen Biegeradien die prozesssichere Machbarkeit nachweisen zu können. Dieses 380 mm lange Umformteil konnte derart entwickelt werden, dass durch einen nachgelagerten Beschnitt drei unterschiedliche Spanten aus einem Halbzeug gefertigt werden könnten (siehe nachfolgende Abbildung).

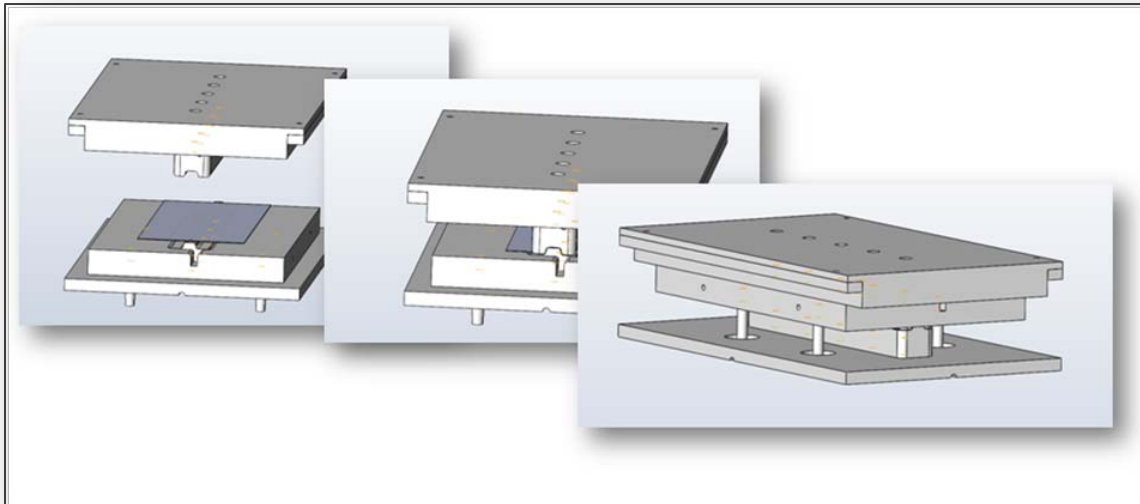


Wie zuvor beschrieben erfolgt die Umformung mittels Warmtiefziehen in einem Werkzeug, welches aus Stempel und Matrize besteht. Die folgende Darstellung zeigt

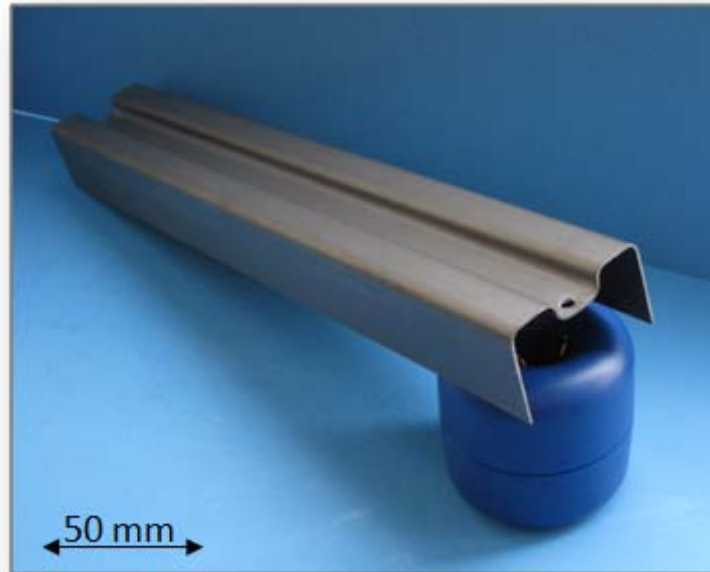
hierzu das Prinzip der werkzeuggebundenen Warmumformung und die obere Grenze der Prozesstemperatur. Diese Informationen dienten als Input für die Werkzeugentwicklung und Konstruktion, die nach Abstimmung mit FormTech bei HEGGEMANN ausgeführt wurde.



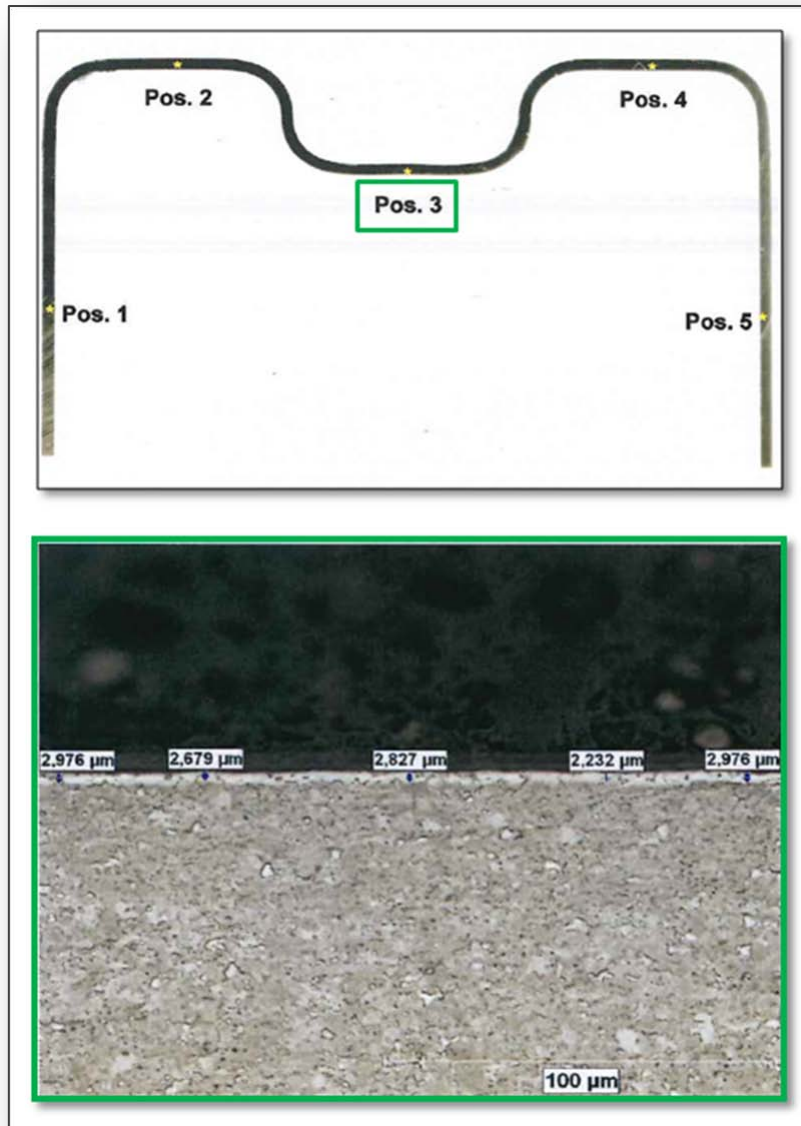
Die Konstruktion für das Warmtiefziehwerkzeug wurde im anschließenden Arbeitsschritt in mehreren Iterationsschleifen bei HEGGEMANN ausgeführt. Dabei konnte auch das vorhandene Wissen im Bereich der Werkzeugkonstruktion sehr gut eingesetzt werden, um direkt ein industrialisierbares Werkzeugkonzept zu generieren. Die beiden nächsten Abbildungen zeigen das Werkzeug als 3-D Modell sowie die Einzelteile in der Fertigung bei HEGGEMANN.



Mit dem bei HEGGEMANN hergestellten Werkzeug wurden dann bei FormTech mit der luftfahrtzugelassenen Titanlegierung 3.7164 (Ti6-Al4) in der Dicke 1 mm in mehreren Iterationsschritten die optimalen Prozessparameter bzgl. der Pressenkraft, der Umformtemperatur und der Umformgeschwindigkeit ermittelt. Somit konnte dann das auf der folgenden Abbildung dargestellte erste Demonstratorbauteil mittels Warmtiefziehen maßhaltig bei FormTech hergestellt werden (siehe nachfolgende Abbildung).



Ein weiterer Vorteil der Warmumformung mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen $T < 0,5 T_{m(Ti)} \sim (650^\circ\text{C})$ im Vergleich zum SPF ist die sich deutlich dünner darstellende Alpha-Case Schicht. Diese liegt bei dem hergestellten Profil bei gerade einmal $2 - 3 \mu\text{m}$, wie auf den nachfolgend gezeigten Darstellungen der metallografischen Untersuchungsergebnisse gut zu erkennen ist.



Diese relativ dünne Schicht des oxidartigen Alpha-Case kann mittels Beizreinigungsverfahren vergleichsweise einfach und kostengünstig entfernt werden. Anders als bei den deutlich dickeren Alpha-Case Schichten nach einer SPF Umformung (→ Höhere Temperaturen und längere Prozesszeiten führen zu der dickeren Alpha Case Schicht von mind. 10 μm) muss hier kein langwieriger und teurer chemischer Abtragungsprozess nachgeschaltet werden, um die oxidartige Schicht zu entfernen.

Fazit

Die Potenziale zur Optimierung von umformtechnisch hergestellten Ti-Strukturen wurden im Verbundprojekt CoolTiTech gemeinschaftlich erarbeitet. Grundlagenwissen und anwendungsspezifisches Know How konnten erfolgreich miteinander kombiniert werden. Grundlegende Versuche zur Verbindungstechnologie entsprechender Titanhalbzeuge wurden erfolgreich durchgeführt und ausgewertet.

Ein repräsentatives Bauteil wurde auf Basis der bestehenden Probleme mit klassischen Herstellverfahren abgeleitet, konstruiert und maßhaltig in Hardware umgesetzt. Zwei unterschiedlich integrative Herstell- bzw. Umformverfahren wurden erarbeitet und bewertet (Super Plastic Forming + Diffusion Bonding und Warmtiefziehen). Unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen und technischen Randbedingungen konnte ein repräsentatives Musterbauteil erfolgreich im Warmtiefziehprozess umgesetzt werden.

Somit kann abschließend festgestellt werden, dass die inhaltlichen Zielstellungen der HEGGEMANN AG (siehe Kapitel 1.2.3) sowohl für das Teilprojekt „Industrielle Anwendungsgebiete der Superplastischen Umformung von Titanwerkstoffen bei niedrigen Temperaturen“ als auch für das Gesamtverbundprojekt CoolTiTech vollumfänglich erreicht wurden.

Die positiven Projektergebnisse tragen wesentlich zur nachhaltigen technologischen und wirtschaftlichen Absicherung der HEGGEMANN AG bei.

2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die für das Projekt bereitgestellten Eigenmittel und Zuschüsse wurden zum überwiegenden Teil für Personalkosten aufgewendet. Lt. Förderantrag waren ca. 96% der zuwendungsfähigen Kosten für Personalmittel eingeplant. Auf Basis der vorliegenden Mittelabrufe wurden ca. 98 % der förderfähigen Kosten für Personal aufgewendet.

Die nachfolgende Übersicht zeigt zusammengefasst die Budgetausschöpfung der HEGGEMANN AG als geförderter Partner im Verbundprojekt CoolTiTech in Summe sowie herunter gebrochen auf die einzelnen Kostenarten über die Gesamtprojektlaufzeit (1.7.10 – 30.6.14). Ebenfalls ist die Abweichung der tatsächlichen Kosten (IST) zu den beantragten Kosten (SOLL) ausgewiesen.

Abrechnung Förderprojekt			
Projekt: CoolTiTech	Laufzeit: 01.07.10-30.06.2013 --> 2 x verlängert bis 30.06.2014		
Zuwendungsfähige Kosten:	SOLL	IST	Abweichung
Material:	10.000,00 €	5.480,47 €	- 45,2 %
Personal	342.500,00 €	350.302,14 €	+ 2,2 %
Fremdleistungen:	0,00 €	0,00 €	-
übrige Kosten:	3.000,00 €	1.686,60 €	- 37,1 %
Summe:	355.500,00 €	357.469,21 €	+ 0,6 %
Fördersatz:	50,00%	50,00%	
Zuwendung	177.750,00 €	178.734,61 €	+ 0,6 %

Die Kostenarten „Material“ und „übrige Kosten“ (Reisekosten) weichen mehr als 20% vom geplanten Umfang ab.

Begründung:

Die tatsächlichen „Materialkosten“ fallen um 45,2 % geringer aus als beantragt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass aufgrund der zusätzlichen Untersuchungen zur Findung eines Parameterfensters für die Umformung bei geringeren Temperaturen als im SPF-Prozess (Warmumformung / Warmtiefziehen) sowie umfangreicheren Entwicklungsarbeiten zur Realisierung des Demonstratorbauteils keine Carbonwerkstoffe beschafft werden mussten. Der Fokus der Projektarbeit hat sich wegen des großen Einsparpotenzials beim Warmtiefziehen in Richtung der Optimierung der Prozessparameter verschoben. Ursprünglich war zusätzlich die grundlegende Untersuchung einer Hybridverbindung der Titanwerkstoffe mit kostenintensiven Carbonwerkstoffen geplant, was jedoch nach erfolgter Abstimmung in der Projektgemeinschaft aufgrund o. g. Priorisierung nicht bis zu Versuchen in Hardware weiterverfolgt wurde.

Die tatsächlichen „Übrigen Kosten“ fallen um 37,1 % geringer aus als beantragt. Dies betrifft die veranschlagten Reisekosten, welche nicht im geplanten Umfang benötigt wurden. Viele Absprachen und technische Lösungsfindungen konnten mittels Telefonkonferenzen und Web-Meetings durchgeführt werden.

Die absoluten Beträge der Abweichungen sind im Verhältnis zu der Kostenart „Personal“ jedoch sehr gering. Über die 4-jährige Projektlaufzeit weicht die Gesamtsumme der förderfähigen Kosten daher lediglich um + 0,6 % ab.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit den Ergebnissen des Verbundprojekts CoolTiTech wurden Möglichkeiten erarbeitet, sowohl die Kosten als auch das absolute Gewicht dreidimensional ausgeformter Titanbauteile in dünnen Wandstärken zu reduzieren. Hierbei kommen insbesondere die Stärken der Umformung bei erhöhten Temperaturen zum Tragen, das höher integrierte Bauteile und dünnere Materialquerschnitte ermöglicht als die bisherigen z. T. rein zerspanende Fertigungsverfahren.

Um dieses Potenzial für die HEGGEMANN AG zu heben, wurde ein dezidierter Arbeitsplan in Abstimmung mit allen Projektpartnern erstellt. Auf Basis der erarbeiteten Projektergebnisse wurde der Fokus in den jeweiligen Teilprojekten jedoch im Zuge der Projektbearbeitung in Absprache mit den Verbundprojektpartnern und den Beiratsunternehmen geändert. Dies führte auch zu der zweimaligen Verlängerung der Projektlaufzeit. Die sehr positiven Ergebnisse besonders auch im Teilprojekt von HEGGEMANN im Hinblick auf die bereits während der Projektlaufzeit erfolgreich gestartete Ergebnisverwertung zeigen letztendlich, dass die getroffenen Entscheidungen richtig waren.

Bei HEGGEMANN stellen diese Ergebnisse des F&E-Projekts im Vergleich zum bisherigen Portfolio des Unternehmens in Bezug auf den Werkstoff Titan einen großen Innovationssprung dar, weil derart vorgeformte Ti-Strukturen nicht verfügbar waren und somit auch keine Erfahrung zur reproduzierbaren Weiterverarbeitung vorhanden war. Daher wäre auch eine alleinige interne Umsetzung mit eigenen Mitteln auch vor dem Hintergrund der zu schließenden Wissenslücken im Grundlagenbereich und im Bereich der Warmumformung ohne die öffentliche Förderung und ohne die Projektpartner nicht durchführbar gewesen!

2.4 Voraussichtlicher Nutzen

Durch das im Projekt generierte Know How werden bereits seit Mitte 2013 erste Kundenprojekte unter Verwendung der erarbeiteten Ergebnisse aus dem CoolTiTech-Projekt generiert. Die interne Fortführung der Projektergebnisse durch Übertragungsuntersuchung auf andere Projekte sowie die gezielte vertriebliche Verwendung der positiven Resultate werden bereits erfolgreich angewendet.

Durch die hier erarbeiteten Ergebnisse hat die HEGGEMANN AG Erfahrungen im Bereich vorgeformter Titanbauteile erlangen können und setzt diese 1:1 als anerkannter Anbieter integrierter Leichtbausystemlösungen um.

2.5 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Für das Teilprojekt der HEGGEMANN AG sowie für das Gesamtverbundprojekt sind keine F&E-Ergebnisse von dritter Seite und keine neuen Erkenntnisse entsprechender Mitbewerber bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Durch einen Vortrag auf folgender Veranstaltung wurde das Projekt der Öffentlichkeit beziehungsweise Fachpublikum vorgestellt:

- 28.08.2014: EUROSPF 2014 in Liechtenstein

3 KURZFASSUNG

Im Zuge des Verbundvorhabens „CoolTiTech – Superplastische Umformung von Titanwerkstoffen bei niedrigen Temperaturen,“ wurde das Applikationsspektrum von feinkörnigen Titanwerkstoffen u.a. bezüglich SPF-Niedertemperaturverfahren ermittelt. Die Verbundpartner sind FormTech GmbH, HEGGEMANN AG, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH und ACCESS e.V.. Des Weiteren beteiligt sich das Unternehmen Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG als „In-Kind-Contributor“ im Beirat.

Dank guter Materialeigenschaften wie Festigkeit, Gewicht und Korrosionsbeständigkeit werden metallische Beschlagteile für CFK-Baugruppen zunehmend aus Titanwerkstoffen, z.B. Ti6-4, gefertigt. Die heute übliche Fertigung verursacht hohen Zerspanungsverlust. Superplastisches Formen (SPF), Warmtiefziehen und Warmformen bieten für viele Blechformteile die wirtschaftliche Fertigungsmöglichkeit mit enormem Kostensenkungspotential. Durch neue Ti6-4 Varianten und die weiteren untersuchten Ti-Werkstoffe wie ATI425, TIMETAL Exhaust XT und Ti3Al2,5V können die Umformtemperatur und die Zykluszeit deutlich reduziert werden. Die Oxidschicht ist signifi-

kant minimiert bzw. vermieden. Die umweltbelastende, chemische Nachbehandlung kann entfallen, der Energieeinsatz je Bauteil wird reduziert.

Im Zuge dieses Vorhabens wurden Versuche zur Umformung von feinkörnigem Ti6-4 und den weiteren, o.g. Titanwerkstoffen durchgeführt. Machbarkeitsstudien zum Einsatz von „Tailored Blanks“ erfolgten ebenfalls. Die Versuchsbauteile werden anhand von mechanischen und metallkundlichen Untersuchungen bewertet. Insbesondere die Zeitstandfestigkeit der umgeformten Werkstoffe wird umfangreich ermittelt.

Die Arbeiten verdeutlichen, dass Titanbauteile mit neuen Verfahren hergestellt werden können, die das Potential zur Serienfertigung mit hohen Stückzahlen besitzen. Diese Verfahren beinhalten darüber hinaus die Option auf eine Abkehr von Einzelprüfungen und die Hinwendung zu Verfahrenskontrollen. Die Herstellung präziser Blechformteile aus Titanlegierungen ist innovativ und ermöglicht die Automatisierung von Folgeprozessen, was zu einer deutlichen Gesamtkosteneinsparung führt.