

Schlussbericht: Zwanzig20 – Additiv-Generative Fertigung – Verbundvorhaben: „ImProVe“; TP7: Airbus Defence and Space GmbH: Demonstrator Metall - BMBF-Förderkennzeichen 03ZZ0210G

31.10.2020

Achim Schoberth

Airbus

Central Research & Technology

XRXG

Title

Schlussbericht: Zwanzig20 – Additiv-Generative Fertigung – Verbundvorhaben: „ImProVe“

Author: Achim Schoberth

Phone (1st Author)
00498960722061

E-mail (1st Author)
Achim.schoberth@airbus.com

Domain (1st Author)
XRXG

Project
pfn „ImProVe“ (ex AGENT3D)

Project-N°
01-0423010-DA-D6

Date of Publication
31.10.2020

Customer

Matthias Funke, ADS; Delphine Carponcin, ADS

Abstract

Motivation to run the German public funded BMBF project „ImProVe“ within the X-project AM-Techbase was the approach to evaluate the enlargement of Additive Manufacturing (AM) material portfolio towards improved performance, reduced weight, reduced cost or improved resource efficiency by reducing or avoiding critical elements. The following materials were investigated:

- A) Super-INVVAR: improved functional performance (very low CTE) w.r.t. INVVAR,
- B) AISi40: functional performance (well adapted low CTE) at lower weight w.r.t. Super-INVVAR,
- C) AlMgCaSc: reducing critical RE Sc at improved melt processing and HT performance w.r.t. AlMgSc,
- D) AlCrZr: avoiding critical RE Sc at improved corrosion resistance and HT performance w.r.t. AlMgSc.

AM (mainly LPB-F) process parameter development of all 4 materials at 9 variants with up to 7 heat treatments each incl. HIP and static mechanical analysis as well as CTE investigation for A) & B) with following major results:

Super-INVVAR can be successfully processed, but well fitting very low CTE is not stable below -50°C,

AISi40 can be successfully processed, has well fitting CTE, but still insufficient ductility,

AlCrZr can be successfully processed, has the expected HT strength, but still insufficient ductility,

AlMgCaSc has improved melt processing (less cost), but still insufficient ductility & RT/HT strength.

Thermal instability of Super-INVVAR is not influenced by specific heat treatments and is not AM specific.

Out of project scope: Further improvements of materials C) and D) are possible in terms of composition optimization, whereas AISi40 requires improved AM processing.

Keywords: Additive Manufacturing, AM, LPB-F, EBM, INVVAR, Super-INVVAR, AISi40, AlCrZr, AlMgCaSc

Data Classification

Company	Privacy	Export Control	Governmental / Defence
Airbus Amber	Not Personal Data	Not Export Control Assessed	Not Governmental/Defence

Acceptance

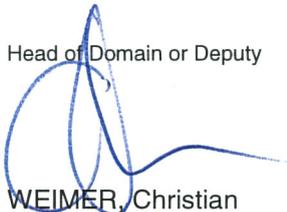
Author


SCHOBERTH, Achim

Reviewed by


PALM, Frank

Head of Domain or Deputy


WEIMER, Christian

Leerseite

Inhaltsverzeichnis

1 Partner, Inhaltsverzeichnis, Tabellen, Abbildungen, Abkürzungen4

2 Aufgabenstellung9

2.1 Übergeordnete Ziele des Gesamtvorhabens9

2.2 Ziele des Airbus CRT Teilvorhabens9

2.3 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen.....9

2.4 Wissenschaftliche und technische Ziele des Teilvorhabens 10

3 Projektvoraussetzungen 11

4 Planung und Ablauf des Vorhabens 11

5 Stand der Technik zu Projektbeginn 13

5.1 Additive Schmelzstrahlverfahren 13

5.2 Werkstoffe und Anwendungen..... 14

5.3 Vorarbeiten des Projektpartners Airbus CRT..... 15

6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 15

7 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse..... 16

7.1 Werkstoff a) INVAR und Super-INVAR..... 16

7.1.1 Pulverbeschaffung und Ergebnisse der Charakterisierung 16

7.1.2 Ergebnisse der Parameterstudien zur Bauprozess-Entwicklung..... 17

7.1.3 Wärmebehandlungsvariationen 18

7.1.4 Ergebnisse der strukturellen Charakterisierung 18

7.1.5 Ergebnisse der funktionalen Charakterisierung20

7.2 Werkstoff b) AlSi40.....21

7.2.1 Pulverbeschaffung und Ergebnisse der Charakterisierung21

7.2.2 Ergebnisse der Parameterstudien zur Bauprozess-Entwicklung.....23

7.2.3 Wärmebehandlungsvariationen 23

7.2.4 Ergebnisse der strukturellen Charakterisierung24

7.2.5 Ergebnisse der funktionalen Charakterisierung25

7.3 Werkstoff c) AlMgCaSc26

7.3.1 Pulverbeschaffung und Ergebnisse der Charakterisierung26

7.3.2 Ergebnisse der Parameterstudien zur Bauprozess-Entwicklung.....27

7.3.3 Wärmebehandlungsvariationen 27

7.3.4 Ergebnisse der strukturellen Charakterisierung27

7.4 Werkstoff d) AlCrZr.....29

7.4.1 Pulverbeschaffung und Ergebnisse der Charakterisierung29

7.4.2 Ergebnisse der Parameterstudien zur Bauprozess-Entwicklung.....30

7.4.3 Wärmebehandlungsvariationen 30

7.4.4 Ergebnisse der strukturellen Charakterisierung31

7.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Zielabgleich 33

7.6 Ergebnisse der Demonstrator-Bewertung (ZfP)..... 35

8	Sonstiges.....	38
8.1	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	38
8.1.1	Material (0813).....	38
8.1.2	Personalkosten (0837).....	38
8.1.3	Reisekosten (0838).....	38
8.1.4	Sonstige unmittelbare Vorhaben (0850)	38
8.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten	38
8.3	Relevante Ergebnisse Dritter während der Projektlaufzeit	39
9	Verwertung der Ergebnisse	39
9.1	Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen	39
9.2	Fortschreibung des Verwertungsplans	39
9.2.1	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	40
9.2.2	Öffentlichkeitsarbeit und projektübergreifende Ergebnisverwertung	40
10	Fazit.....	40
11	Literatur- und Quellenverzeichnis	41

Tabellen

Table 5.1	Vergleich EBM und LPB-F	13
-----------	-------------------------------	----

Abbildungen

Figure 4.1	Balkenplan für alle Projekt-Arbeitspakete und CRT-Beteiligung (AP-Titel fett)	11
Figure 4.2	Planung und Erreichung der Projekt-Meilensteine	12
Figure 4.3	CRT-Arbeitspaketinhalte und geplanter Aufwand (PM)	12
Figure 5.1	Bei CRT verfügbare Anlage SLM 125HL	15
Figure 7.1	REM- (oben) und EDX-Analyse für INVAR (links) und Super-INVAR Pulver.....	16
Figure 7.2	Dichtewerte (oben) & Schliffe nach 5x5 Parametervariation für INVAR (links) & Super-INVAR	17
Figure 7.3	Mechanische Kennwerte (Zug) von INVAR und Super-INVAR AM verschiedener Quellen	19
Figure 7.4	Porosität und Mikrostruktur von Super-INVAR (IFW) für Wärmebehandlung ohne und mit HIP	19
Figure 7.5	CTE-Werte für verschiedene Werkstoff-Varianten, Wärmebehandlungen und Prüfparameter	20
Figure 7.6	CTE-Abhängigkeit von PM-AISi-Werkstoffen (Quelle SANDVIK).....	21
Figure 7.7	REM- (oben) und EDX-Analyse für Si (links) und AISi10Mg Pulver	22

Figure 7.8 REM- (oben) und EDX-Analyse für grobes (links) und feines AlSi40 Pulver.....22

Figure 7.9 Dichtewerte (links) & Schliffe nach 5x5 Parametervariation für AlSi40 Optionen Mix/Grob/Fein.....23

Figure 7.10 Mechanische Kennwerte (Zug) von AlSi40 AM verschiedener Varianten (Mix/Grob/Fein).....24

Figure 7.11 Porosität und Mikrostruktur von AlSi40 (Mix) für Wärmebehandlung ohne und mit HIP25

Figure 7.12 CTE-Werte für verschiedene AlSi40 Varianten, Wärmebehandlungen und Prüfparameter25

Figure 7.13 AlCa10-Massel von KBM AFFILIPS als Vorlegierung für AlMgCaSc Pulverfertigung.....26

Figure 7.14 REM- (rechts) und EDX-Analyse für AlMgCaSc Pulver26

Figure 7.15 Porosität (max./min.) bei AlMgCaSc Parametervariation ohne/mit Bettvorheizung.....27

Figure 7.16 Mechanische Kennwerte von AlMgCaSc als f(T) für verschiedene Wärmebehandlungen.....28

Figure 7.17 REM- (links oben) und EDX-Analyse für AlCrZr Pulver29

Figure 7.18 Dichteanalyse über Schliffbilder bei AlCrZr Parametervariation.....30

Figure 7.19 Härteentwicklung bei AlCrZr als Funktion von Auslagerungs-Temperatur und -Zeit31

Figure 7.20 Einfluss der HIP-Bedingungen auf die Konsolidierung von AlCrZr.....31

Figure 7.21 Mechanische Kennwerte von AlCrZr als f(T) für verschiedene Wärmebehandlungen.....32

Figure 7.22 Bruchfläche einer AlCrZr Probe nach Zugprüfung bei 300°C32

Figure 7.23 Übersicht der besten Ergebnisse aller Werkstoffe ohne/mit HIP und Zielabgleich.....34

Figure 7.24 Kinematische Halterung aus Super-INVVAR: Zeichnung (links) und EBM-Bauteil35

Figure 7.25 Machbarkeitsbauteil aus AlSi40: Zeichnung (links) und LPB-F-Bauteil35

Figure 7.26 µ-CT 3D-Bild des Demonstrators (links) und farbkodierter Soll-Ist-Geometrievergleich.....36

Figure 7.27 µ-CT Soll-Ist-Geometrievergleich durch Farb- & Strichlängenkodierung für beliebige Schnitte.....36

Figure 7.28 µ-CT Schnitt mit porösen Bereichen (orange Ovale) und Rissbildung (rotes Rechteck)36

Figure 7.29 µ-CT des AlSi40 Demonstrators als Aufsicht (links) und zur Fehleranalyse (Durchsicht)37

Figure 7.30 µ-CT Soll-Ist-Geometrievergleich durch Farb-Kodierung (links) und Geometrievermessung.....37

Abkürzungsverzeichnis

AGI	Airbus Group Innovations (neu: CRT)
A	Bruchdehnung
Al	Aluminium
ALM	Additive Layer Manufacturing
AM	Additive Manufacturing
AlCrZr	Aluminium-Chrom-Zirkon-Legierung
AlMgCaSc	Aluminum-Chrom-Zirkon-Scandium-Legierung
AlMgSc	Aluminium-Magnesium-Scandium-Legierung (Scalmalloy®)
AlSi	Aluminium-Silizium-Legierung (AlSi40: 40 % Si)
AP	Arbeitspaket
CRT	Airbus Central Research and Technology (ehemals AGI)
μ-CT	Hochauflösende Computer-Tomographie
CTE	Coefficient of Thermal Expansion (Wärmeausdehnung)
EBM	Electron Beam Melting (Elektronenstrahl-Pulverbett-Schmelzen)
EDX	Energy Dispersive X-ray
HIP	Heiss-Isostatisches Pressen
HT	Hochtemperatur
IFAM	Fraunhofer IFAM, Institutsteil Dresden
IFW	Günter-Köhler-Institut für F ügetechnik & W erkstoffprüfung GmbH
INVAR	Eisen-Nickel-Legierung (FeNi36); Super-INVAR: FeNi32Co5
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
LBM	Laser Beam Melting (Laser Pulverbett Schmelzen)
LPB-F	Laser Powder Bed Fusion (Laser Pulverbett Schmelzen)
NAN	Pulverhersteller NANOVAL
NDT	Non-Destructive Testing (s. ZfP)
PLM	Pulverhersteller POWDER LIGHT METALS
REM	Rasterelektronenmikroskop
RPA	Revolution Powder Analyser (Analyse der Fließfähigkeit von Pulver)
R _m	Zugfestigkeit
R _{p0.2}	Dehngrenze, Streckgrenze
RT	Raumtemperatur
SAN	Pulverhersteller SANDVIK
SLM	Selective Laser Melting (= Laser Pulverbett Schmelzen)
TLS	Pulverhersteller TLS
TRL	Technical Readiness Level
μ-CT	Hochauflösende Computer-Tomographie
Z	Brucheinschnürung
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung (s. NDT)

2 Aufgabenstellung

Ziele des Gesamt- & Teilvorhabens, Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen sowie wissenschaftliche und technische Ziele des Teilvorhabens werden dargestellt.

2.1 Übergeordnete Ziele des Gesamtvorhabens

Das Ziel des Vorhabens „ImProVe“ ist die Überwindung von wirtschaftlich technischen Verfahrensgrenzen additiver Technologien und somit das Schaffen der technologischen Voraussetzungen für eine signifikant häufigere und breitere Anwendung der additiven Fertigung. Ausgehend von den industriell verbreiteten Verfahren für metallische und keramische Werkstoffe ist vor allem eine Senkung von Fertigungsstückkosten und Fertigungszeit, aber auch die Erweiterung der beherrschbaren Werkstoffvielfalt und der Prozess-Sicherheit durch verbesserte Anlagentechnik unumgänglich. Die Überwindung dieser Grenzen ist Voraussetzung, um die Verbreitung der additiven Fertigung auch zur (Massen-) Herstellung von Industriegütern oder Konsumprodukten voranzutreiben.

Mit Bezug auf die Roadmap 2.0 des übergeordneten Gesamtvorhabens **AGENT3D** werden somit folgende Handlungsfelder adressiert:

- 1) Zukunftsfähige Werkstoffe für die additive Fertigung,
- 2) Ressourceneffizienz und flexible Fertigung,
- 3) Hochleistungsprozesse für das 3D-Generieren,
- 4) Hybridfertigung.

2.2 Ziele des Airbus CRT Teilvorhabens

Als übergeordnetes Ziel soll für einen wettbewerbsfähigen Einsatz in der Luft- & Raumfahrt eine verbesserte Ressourceneffizienz und eine Erweiterung der Werkstoffpalette für Struktur- und Funktionswerkstoffe wie Aluminium und INVAR realisiert werden.

Spezifisch geht es um Nutzung der speziellen Vorteile der additiven Fertigung (AM = Additive Manufacturing), wie z. B. Bauteilkomplexität, für

- Funktionsanwendungen wie z. B. Werkstoffe mit geringer Wärmeausdehnung („Erweiterung der Werkstoffpalette“),
- Strukturanwendungen mit erhöhter Kosteneffizienz gegenüber bekannten Werkstoff-Systemen durch alternative Legierungselemente („Ressourceneffizienz“).

Die Ziele decken sich mit den Handlungsfeldern 1 und 2 der Roadmap 2.0 des übergeordneten Gesamtvorhabens **AGENT3D** aus Kapitel 2.1.

2.3 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Ein wesentliches Ziel des Förderprogramms „Unternehmen Region – die BMBF-Innovationsinitiative für die Neuen Länder“ ist es, in den Neuen Bundesländern mittel- und langfristig die wettbewerbsbestimmende Position für spezifische Technologien und Produkte anzustreben. Dazu soll in den Neuen Bundesländern durch die Zusammenführung der Forschungseinrichtungen (insbesondere im Großraum Dresden) und des überwiegenden

Teils der KMUs ein auf längere Sicht tragfähiges Netzwerk generiert werden, das auch überregional und international sichtbare Innovationsstrukturen entstehen lässt. Dieses Netzwerk wird daher durch Partner aus den Alten Bundesländern, die zum wesentlichen Teil Großunternehmen sind, erweitert.

Die im Vorhaben „ImProVe“ innerhalb der 3 Teilprojekte entstandene Partnerstruktur deckt sich sehr gut mit dieser Zielsetzung für den Bereich der additiven Fertigung.

2.4 Wissenschaftliche und technische Ziele des Teilvorhabens

Basierend auf dem übergeordneten Ziel des Teilvorhabens (s. Kapitel 2.2), einer verbesserte Ressourceneffizienz bzw. einer Erweiterung der Werkstoffpalette in der additiven Fertigung (AM = Additive Manufacturing) für häufig eingesetzte Strukturwerkstoffe wie Aluminium bzw. Funktionswerkstoffe wie INVAR, sind nachfolgende technische Ziele definiert bzw. im Laufe des Projektes angepasst worden.

Funktionale Anwendungen

Hier ist eine wichtige technische Zielsetzung, dass auch über AM die relevanten Eigenschaften der vergleichbaren, konventionell hergestellten Werkstoffe erreicht bzw. übertroffen werden, um 1:1-Substitutionen und damit eine schnellere Umsetzung ins Produkt zu ermöglichen. Dies soll für folgende AM-Werkstoffe mit geringer Wärmeausdehnung (CTE = Coefficient of Thermal Expansion) untersucht werden:

- a) **Super-INVAR** als leistungsfähigere Alternative zu **INVAR** (CTE noch geringer),
- b) **AlSi40** als gewichtsreduzierte Option zu **INVAR** (Dichte ca. 1/3).

Allerdings sind auch für Funktionswerkstoffe die mechanischen Kennwerte von Relevanz, d. h. es müssen die Werte von konventionell hergestelltem Material annähernd erreicht werden. Somit wurden folgende Zielwerte (100 %) festgelegt:

Super-INVAR (a): $CTE < 0,63 \times 10^{-6} / K$ (-55 bis 95°C), $R_{p0.2} > 270$ MPa, $R_m > 480$ MPa, $A > 20$ %, $E > 140$ GPa,

AlSi40 (b): $CTE < 13 \times 10^{-6} / K$ (-55 bis 95°C), $R_{p0.2} > 150$ MPa, $R_m > 200$ MPa, $A > 5$ %, $E > 100$ GPa.

Strukturelle Anwendungen

Hier geht es vor allem um potenzielle Alternativen für das von CRT speziell für AM entwickelte Referenzmaterial Scalmalloy® (AlMg4.4Sc0.73ZrMn; kurz AlMgSc):

- c) **AlMgCaSc** für verbesserte Prozessierbarkeit und Warmfestigkeit,
- d) **AlCrZr** für verbesserte Warmfestigkeit und geringere Kosten.

Die Referenz setzt bei den mechanischen Kennwerten hohe Maßstäbe, sodass ähnlich hohe Zielvorgaben für die Alternativen ohne jegliche bisherige AM-Erfahrung unrealistisch wären und reduziert werden müssen:

AlMgCaSc (c) $R_{p0.2} > 360$ MPa, $R_m > 384$ MPa, $A > 6$ %, $Z > 10$ %, $E > 54$ GPa (100 % = 80 % Scalmalloy®),

AlCrZr (d) $R_{p0.2} > 350$ MPa, $R_m > 430$ MPa, $A > 5$ %, $Z > 10$ %, $E > 75$ GPa.

3 Projektvoraussetzungen

Airbus CRT (ehemals AGI) arbeitet seit Jahren im Bereich der generativen Werkstoff- und Fertigungstechnologien (Additive Manufacturing – AM) mit eigener Anlagentechnik und verschiedenen Schwerpunkten im Bereich Pulverbett-Schmelzen und Drahtauftrag. In Projekten wie KonRAT (BMBF), RessFAST (BMBF), PROGEN (BMBF), LIMA (LuFo), GenFLY (LuFo), ALM2AIR (LuFo) und AMAZE (EU) wurden breite Kenntnisse zu den verschiedensten Werkstoffen und Fähigkeiten der Fertigungstechnik aufgebaut und stetig erweitert. Darüber hinaus verfügt CRT über langjährige Erfahrung und entsprechende Laborausstattung bei der Werkstoffanalyse und -charakterisierung (phys.-chem., zerstörungsfrei, zerstörend) sowie zur Wärmebehandlung. CRT hat den im Projekt für Strukturanwendungen verwendeten Referenz-Werkstoff AlMgSc entwickelt und geschützt (Scalmalloy®). Dieser ist speziell für den laserbasierten Pulverbett-Prozess (LPB-F = Laser Powder Bed Fusion; oft LBM = Laser Beam Melting oder SLM = Selective Laser Melting genannt) maßgeschneidert. Die bisherigen Projektinhalte zielten vornehmlich auf die Ermittlung und Optimierung von mechanischen Kennwerten typischer AM-Legierungen wie Ti64, INVAR, AlSi10Mg, AlSi7Mg0.6 und AlMgSc. Die AM-basierte Herstellung und Bewertung der 4 neuen Legierungen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz war bisher nicht Inhalt von Förderprojekten mit Beteiligung der Projektpartner.

4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Laufzeit von zunächst nur 2,5 Jahren mit einem Projektbeginn am 01.05.2017 wurde während der Laufzeit auf 3 Jahre verlängert. Das neue Projektende am 30.04.2020 konnte von CRT eingehalten werden. Die Arbeitspakete und der Balkenplan (Ablauf) wurden im Rahmen des Gesamtverbundes festgelegt (Figure 4.1).

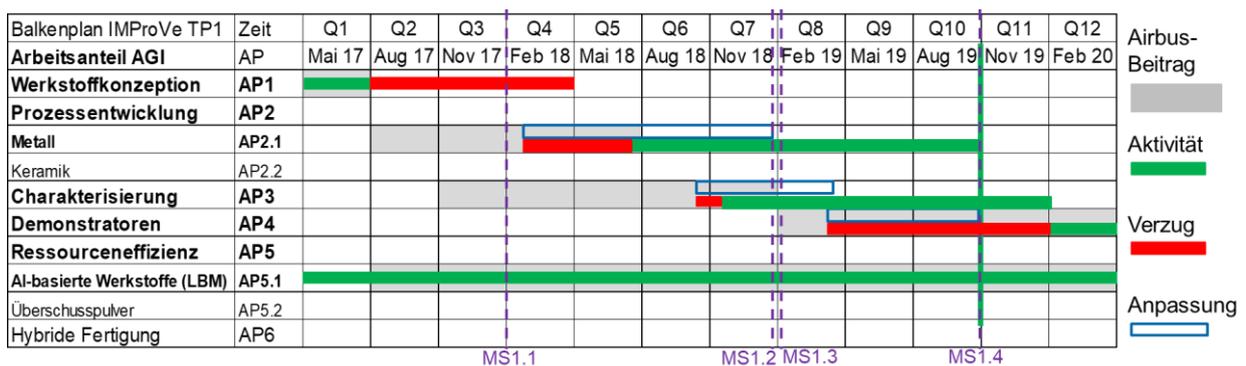


Figure 4.1 Balkenplan für alle Projekt-Arbeitspakete und CRT-Beteiligung (AP-Titel fett)

Die 4 Projekt-Meilensteine mussten im Laufe des Projektes aufgrund von Lieferschwierigkeiten verschiedener Pulver und aufgrund technischer Probleme bei CRT beim Bauprozess von INVAR und Super-INVAR in Abstimmung mit dem Fördergeber verschoben werden und konnten, wenn auch mit weiterer Verspätung, zum Projektende nahezu erreicht werden (Figure 4.2). MS1.2 fordert dabei 90 % der Zielwerte, MS1.3 100 %.

Meilenstein	Beschreibung	Kriterium	Projektmonat	Realistisch
MS 1.1	Prozessfenster für <u>funktionelle</u> Anwendung	Je 1 Parametersatz für max. Baurate und optimale Mikrostruktur	M09 →M09°	M19 (erreicht)
MS 1.2	Benchmark Eigenschaften I (<u>funktionelle</u> Anwendung) und Vergleich mit konventionell verarbeiteten Werkstoffen	90 % der Zielwerte* des Teilvorhabens erreicht	M18 →M21°	M32 (erreicht)
MS 1.3	Benchmark Eigenschaften II (<u>strukturelle</u> Anwendung) und Vergleich der Werkstoffe untereinander	100 % der Zielwerte** des Teilvorhabens erreicht	M18 →M21°	M31 (teilw. err.)
MS 1.4	Evaluation Demonstrator für <u>funktionelle</u> Anwendung	Demonstrator ist anwendungsspezifisch bewertet	M30	M36 (teilw. err.)

* vom Fördergeber akzeptierte Meilensteinverschiebung (Bescheid vom 07.06.18)
Anpassung MS 1.1 trotz langer Lieferzeit der Pulver & Anlagenbelegung von FG nicht akzeptiert

Figure 4.2 Planung und Erreichung der Projekt-Meilensteine

Airbus CRT war gemäß Figure 4.3 in 6 Arbeitspaketen aktiv. Die Zahlen in Klammern geben die ursprünglich geplante Dauer (Monate Mx-My) und die dafür geplanten Personenmonate (PM) an. Neben den zeitlichen Verschiebungen erfolgten mit dem Fördergeber abgestimmte Modifikationen des Materialkonzeptes, um auf neuere Entwicklungen beim Sc-Recycling und Anwendungen in der Raumfahrt zu reagieren.

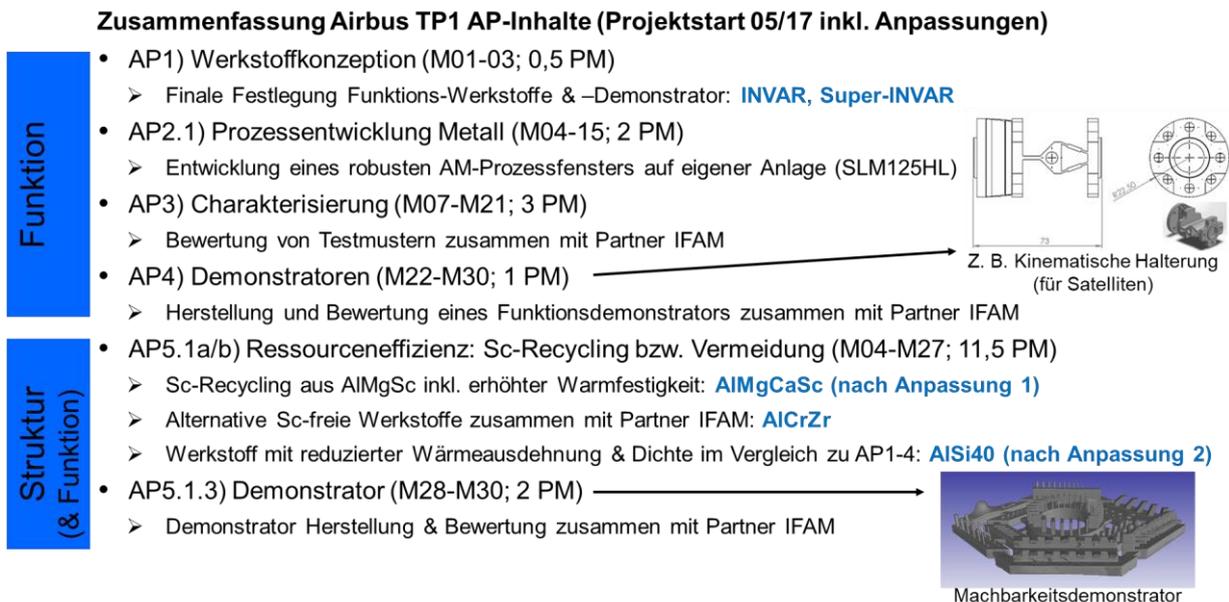


Figure 4.3 CRT-Arbeitspaketinhalte und geplanter Aufwand (PM)

Die Prozessentwicklung (AP2.1, AP5.1) bei CRT für alle 4 Werkstoffe erfolgte durch systematische Parametervariation und Porositätsmessung an entsprechenden Würfelproben mit der Zielsetzung <0,5 % Porosität sowie Bau, Wärmebehandlung, Bearbeitung und Prüfung von Zugproben. Zusätzlich wurden für die 2 Funktionswerkstoffe CTE-Proben gebaut, wärmebehandelt und bearbeitet. Die CTE-Messungen erfolgten bei IFAM.

5 Stand der Technik zu Projektbeginn

Nachfolgend werden folgende Bereiche eingehender beschrieben:

- Additive Schmelzstrahlverfahren,
- Werkstoffe und Anwendungen,
- Vorarbeiten des Projektpartners Airbus CRT.

5.1 Additive Schmelzstrahlverfahren

Hier soll näher auf das von CRT im Projekt verwendete Laser-Pulverbett-Schmelzen (engl. LPB-F – Laser Powder Bed Fusion) und das von Projektpartner IFAM verwendete Elektronenstrahlschmelzen (engl. EBM – Electron Beam Melting) eingegangen werden.

Der große Vorteil dieser Prozesstechniken besteht in dem recht kleinen Schmelzbad, verbunden mit einer raschen Abkühlung des Materials, wodurch sich eine sehr feine Mikrostruktur ergibt, was in der Regel mit erhöhten Festigkeitswerten und – bei entsprechend fehlerarmem Aufbau – auch mit Duktilitätswerten einhergeht, die eine strukturelle Anwendung ermöglichen (Bruchdehnung >5 %, z. T. >10 %). Außerdem lassen sich dadurch endkonturnahe, komplex geformte Bauteile mit hohen Designfreiheitsgraden herstellen.

Die wesentlichen Verfahrensschritte sind für LPB-F und EBM gleich, wobei es auch wesentliche Unterschiede gibt (s. Table 5.1):

- 1) Erstellung eines 3D CAD Modells des zu fertigenden Bauteils,
- 2) Zerlegung dieses Modells in zweidimensionale Schnitte definierter Dicke,
- 3) Aufbringen einer dünnen, planen Pulverlage aus Vorratsbehältern auf eine Plattform,
- 4) Ggf. thermische Vorbehandlung der Pulverschicht (Vorheizen des Pulverbetts),
- 5) Selektives Aufschmelzen basierend auf den Daten des jeweiligen 2D-Schnitts,
- 6) Absenken der Plattform um eine Pulverlage (Schnittdicke),
- 7) Wiederholung von 3) bis 6) bis zum letzten 2D-Schnitt,
- 8) Nach Beendigung des Bauvorgangs Entnahme des Bauteils und Entfernung überschüssigen Pulvers sowie eventuell notwendiger Stützstrukturen.

Table 5.1 Vergleich EBM und LPB-F

Merkmal	EBM (El.-Strahl)	LPB-F (Laser)
<i>Atmosphäre</i>	Vakuum (+ wenig He)	Inertgas
<i>Strahlführung</i>	Ablenkspulen	Galvanometer
<i>Vorheizen des Pulvers</i>	Elektronenstrahl (bis 700°C)	Heizplatte oder Infrarotheizer (bis 200°C)
<i>Scan-Geschwindigkeit</i>	sehr schnell	schnell (begrenzt durch Trägheit des Galvanometers)
<i>Oberflächenqualität</i>	gut - mittel	sehr gut - mittel
<i>Detailgenauigkeit</i>	mittel	gut
<i>Energiedichte</i>	hoch	mittel
<i>Werkstoffe</i>	Metall	Metall, Kunststoff, Keramik

5.2 Werkstoffe und Anwendungen

Der allgemeine Stand der Technik zum verfügbaren Werkstoffspektrum für die generativen Fertigungstechnologien ist in der Gesamtvorhabensbeschreibung ausführlich dargestellt.

In den Airbus Unternehmensbereichen (Airbus Commercial, Airbus Helicopters, Airbus Defence and Space) werden aktuell aufgrund der z. T. völlig verschiedenen Anwendungen viele verschiedene Werkstoffe betrachtet:

- Ti-basiert: vor allem Ti64 für Lasteinleitungselemente in der Luft- und Raumfahrt,
- Al-basiert: AISi7Mg0.6, AISi10Mg, AlMgSc für Lasteinleitungselemente in der Luftfahrt sowie Triebwerkskomponenten in der Raumfahrt,
- Fe-basiert: Invar für Bauteile mit geringer Ausdehnung im Satellitenbereich,
- Cu-basiert: spezifische Legierungen für gekühlte Brennkammern von Raketentriebwerken in der Raumfahrt,
- Ni-basiert: vor allem Inco718 und Inco625 für thermisch belastete Bereiche in der Luftfahrt (Triebwerksaufhängung) und in der Raumfahrt (Triebwerke),
- Edelmetall-basiert: Pt-Legierungen für strahlungs-gekühlte Klein- und Kleinsttriebwerke (z. B. zur Lageregelung) in der Raumfahrt.

Bis auf ein Ti64-Einzelement für einen Satelliten befinden sich bei Airbus alle Werkstoffe und Anwendungen noch in Entwicklungsprozessen unterschiedlicher Reifegrade. Bei Aluminiumlegierungen ist dieser für funktional getriebene Al-Bauteile bei TRL 6–9, für festigkeitsgetriebene Al-Bauteile bei 3-8, je nach Festigkeitslevel und Belastung (statisch oder dynamisch). Dies liegt daran, dass die Oberflächenbelegung mit Sauerstoff (Al_2O_3), Hydroxid (OH) und Wasser einen sehr starken Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils hat, da keine Löslichkeit von Sauerstoff im Atom-Gitter von Aluminium bekannt ist. Die unvermeidliche Oxidbelegung jedes Pulverpartikels muss somit während des Prozesses aufgebrochen werden, um damit eine metallische Anbindung benachbarter Partikel sicherzustellen. Dies kann durch entsprechende Prozessführung positiv beeinflusst werden. Dabei hat Aluminium den großen Vorteil einer hohen Wärmeleitfähigkeit und damit das Potenzial für eine sehr feine Mikrostruktur, verbunden mit höheren Festigkeiten als bei der Herstellung über klassische Routen (z. B. Guss).

Beim AlMgSc kommt noch ein weiterer Effekt hinzu. Durch die hohe Prozesstemperatur im Laser-Schmelzbad und die nachfolgende hohe Abkühlrate gelingt es, besonders viel Sc in Lösung zu halten. Man hat damit die Möglichkeit, einen hohen Anteil extrem feiner Al_3Sc -Ausscheidungen zu generieren. Genau dieser Ausscheidungstyp hat einen stark festigkeitssteigernden Einfluss von ca. 50 MPa je 0,1 % genutztes, d. h. vorab gelöstes Sc. Bei hohen Sc-Gehalten können so Zugfestigkeiten über 600 MPa erreicht werden, bei Guss nur bis 350 MPa. Höhere Gehalte als 0,7 % sind jedoch bisher aus Kostengründen nicht ökonomisch und außerdem wären dann noch höhere Abkühlraten nötig. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Legierung bis 300°C keine Überalterung und damit auch nicht die üblicherweise einhergehende Festigkeitsreduktion nach Überalterung zeigt.

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand wurden die 4 ausgewählten Werkstoffe bisher noch nicht auf ihre Verarbeitbarkeit über AM evaluiert. Somit wird im Rahmen des Projektes Neuland betreten.

5.3 Vorarbeiten des Projektpartners Airbus CRT

Airbus CRT betreibt eine laserbasierte Pulverbettanlage vom Typ SLM 125HL der Firma SLM Solutions, s. Figure 5.1. Die Laserleistung beträgt ausreichende 400 W. Der Bau- raum von 125x125x125 mm eignet sich für Grundlagenuntersuchungen, d. h. zum Aufbau typischer Proben und für entsprechend dimensionierte Demonstratoren. Damit können die im Rahmen des Förderprojektes von CRT geplanten 4 neuen Werkstoffe prozessiert und die Demonstratoren aufgebaut werden.



Figure 5.1 Bei CRT verfügbare Anlage SLM 125HL

Entsprechende Vorarbeiten auf dieser Maschine liefen sowohl firmenintern, als auch in Förderprojekten wie KonRAT (BMBF), RessFAST (BMBF), ALM2AIR (LuFo) und AMAZE (EU) mit typischen Werkstoffen wie Ti64, INVAR, ALSi10Mg, AlSi7Mg0.6, AlMgSc.

Eine Besonderheit stellt das Referenzmaterial AlMgSc dar. Dieser speziell für den LPB-F Prozess maßgeschneiderte Werkstoff wurde bei CRT bereits 2007 zum Patent angemeldet und unter dem Markennamen Scalmalloy® geschützt. Die damit erreichbaren sehr hohen mechanischen Kennwerte ($R_{p0.2} > 450$ MPa, $R_m > 480$ MPa, $A > 8$ %, $Z > 12$ %) dienen als Referenz für die 2 neuen Struktur-Werkstoffe auf Al-Basis.

Vorarbeiten zu den im Rahmen des Förderprojektes von CRT geplanten 4 neuen Werkstoffen wurden nicht durchgeführt.

6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Kooperation innerhalb des Projektes erfolgte durch regelmäßige Beteiligung an halbjährlichen Projekttreffen sowie monatlichen Regelkommunikationsterminen und unter technologischer Einbeziehung verschiedener Projektpartner, insbesondere IFAM (EBM von Super-INVVAR, CTE-Analysen) und IFW (LPB-F von INVVAR und Super-INVVAR).

TESTIA als Tochterfirma von Airbus wurde als externer Unterauftragnehmer einbezogen zur zerstörungsfreien Evaluierung der Demonstratoren über hochauflösende Computer-Tomographie (μ -CT).

7 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse nach 3 Jahren Laufzeit für jedes Material zusammengefasst und an den Projektzielen gespiegelt.

7.1 Werkstoff a) INVAR und Super-INVAR

LPB-F-Arbeiten an INVAR und Super-INVAR erfolgten bei CRT und Projektpartner IWF, EBM-Arbeiten an Super-INVAR parallel bei Projektpartner IFAM.

7.1.1 Pulverbeschaffung und Ergebnisse der Charakterisierung

Verfügbare INVAR Pulverqualitäten verschiedener Pulver-Hersteller (NANOVAL, TLS, PMC, IKH) wurden mit IFAM evaluiert. Insgesamt waren die Pulver tendenziell eher fein (<53 µm), z. T. mit hohem Feinanteil <20 µm. Festigkeiten und E-Modul extern gebauter Proben waren z. T. unzureichend. Daher erfolgte eine Bewertung weiterer Pulverhersteller (SANDVIK, M4P, NMD, CARTECH) hinsichtlich Verfügbarkeit von INVAR und Super-INVAR Pulver für LPB-F und EBM mit weniger Feinkorn als Zielsetzung.

Gemeinsam mit IFAM wurde SANDVIK aufgrund längster Erfahrung selektiert. Eine LPB-F Kornfraktion 28-75 µm wurde ausgewählt (geringster Feinanteil) und in 08/17 bestellt (je 30 kg INVAR & Super-INVAR), aber mit Verspätung (02&01/18) geliefert.

Die im Carney-Trichter gemessene Fließfähigkeit erweist sich für beide Pulver besser als die für INVAR von Hersteller TLS. REM- und EDX-Bilder zeigt Figure 7.1.

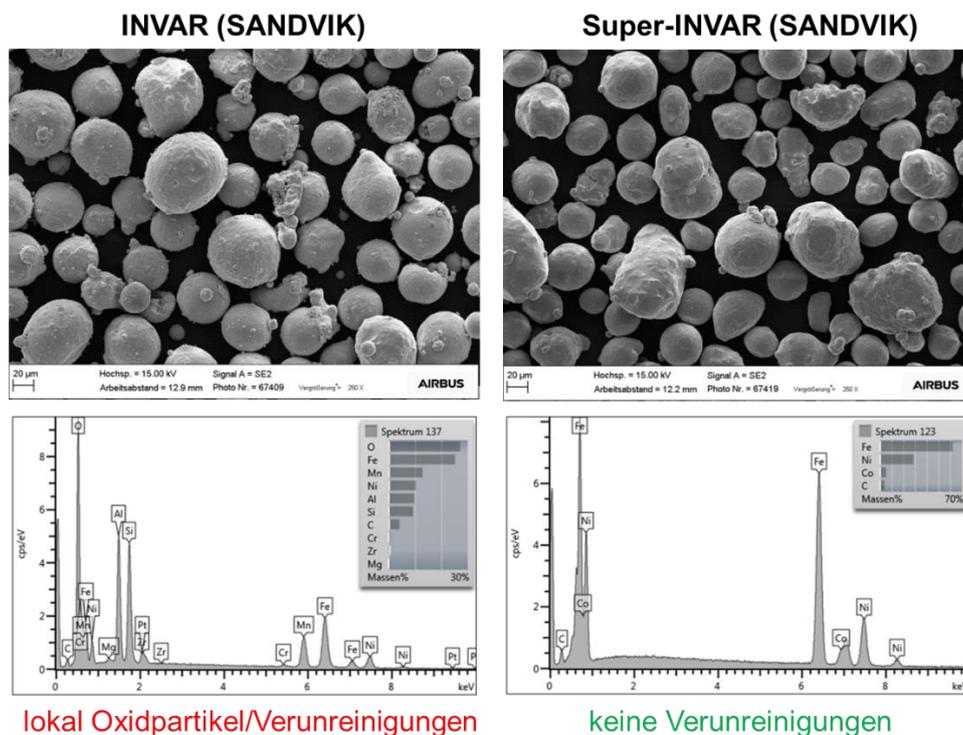


Figure 7.1 REM- (oben) und EDX-Analyse für INVAR (links) und Super-INVAR Pulver

Beide Pulvervarianten haben wie gewünscht überwiegend kugeliges Korn sowie wenig Satelliten und Feinanteil. Im Super-INVVAR Pulver (Herstellerangabe 31-33 % Ni, 5-6 % Co, sowie max. 0,5 % Mn, 0,25 % Si, 0,25 % V, 0,2 % Cr, 0,1 % Al, 0,02 % C, Rest Fe) konnten über EDX keine Verunreinigungen durch andere Elemente oder lokale Oxidpartikel gefunden werden, wohl aber im INVVAR Pulver (Herstellerangabe 35,5-36,5 % Ni, sowie max. 0,50 % Mn, 0,25 % Si, 0,02 % C, Rest Fe). Eine Abschätzung der Verunreinigungsmengen ist aufgrund der nicht statistischen Auswahl der Pulverprobe nicht möglich.

7.1.2 Ergebnisse der Parameterstudien zur Bauprozess-Entwicklung

Dies erfolgt durch Bau von meist 5x5 Würfelproben mit systematischer Variation von je 2 Prozessparametern und eine nachfolgende Analyse der Porosität über Archimedes (Auftriebsprinzip) oder Schliffe. Trotz breiter Parametervariation von Scan-Geschwindigkeit des Lasers V_s (317-2000 mm/s), Laserleistung P_L (130-380 W), Laserlinienversatz H (0,10/0,13 mm), eingebrachter Volumenenergie E_v (45-224 J/mm³), Schichtdicke D_s (30/50 μ m), Fokusslage (0-5 mm), Pulverfeuchte (5,5-24 %; mit/ohne trocknen), Belichtungsart (Streifen oder Schachbrett) und trotz positiver Erfahrungen aus früheren Baujobs mit INVVAR Pulver anderer Hersteller waren aufgrund großer und anhaltender technischer Probleme deutlich mehr Baujobs und mehrere Kundendienste nötig, um nutzbare Probenwürfel und Zugprobenrohlinge aufbauen zu können (dadurch zeitlicher Verzug).

Die Machbarkeit einer ausreichend geringen Porosität über LPB-F wurde von Partner IFW mit einer Prozessdatenvariation von CRT nachgewiesen (Figure 7.2). Vorher hatte IFAM bereits den Nachweis der Eignung des Super-INVVAR Pulvers über EBM erbracht.

INVVAR	Berechnete Dichte [%] Messung mit Wasser	Berechnete Dichte [%] Messung mit Ethanol (alt)	Berechnete Dichte [%] Messung mit Ethanol (frisch)	Porosität Schliff [%]
A1	97,76	97,91	97,76	4,23
A2	97,79	97,95	97,97	
B1	98,83	98,97	99,01	2,06
B2	98,78	99,00	98,93	
C1	99,26	99,55	99,36	0,65
C2	98,80	99,34	99,32	
D1	99,32	99,42	99,46	2,28
D2	99,26	99,61	99,59	
E1	99,14	99,36	99,44	0,86
E2	99,14	99,43	99,42	

Super-INVVAR	Berechnete Dichte [%] Messung mit Wasser	Berechnete Dichte [%] Messung mit Ethanol (alt)	Berechnete Dichte [%] Messung mit Ethanol (frisch)	Porosität Mikroskop [%]
A1	97,18	97,28	97,23	6,00
A2	97,17	97,30	97,52	
B1	98,70	98,77	98,76	2,29
B2	98,67	98,75	98,89	
C1	99,11	99,62	99,72	0,79
C2	99,57	99,66	99,64	
D1	99,51	99,88	99,97	0,62
D2	99,68	100,05	100,07	
E1	99,76	99,92	100,03	0,29
E2	99,77	100,20	99,97	

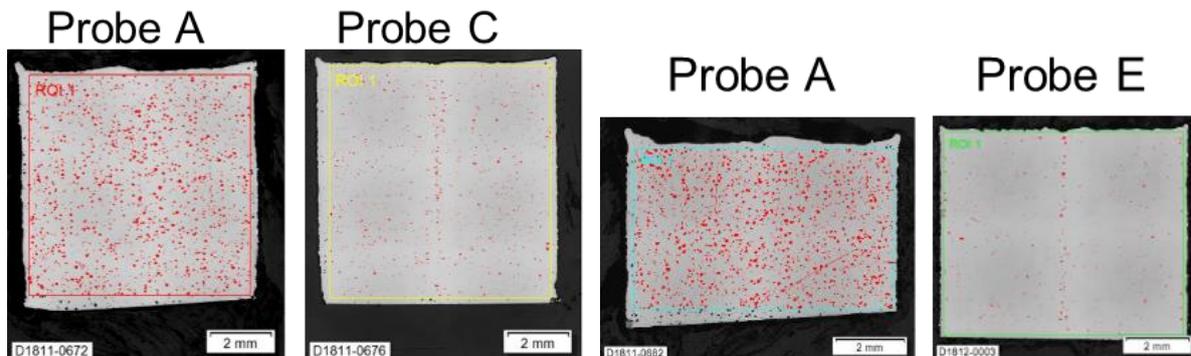


Figure 7.2 Dichtewerte (oben) & Schliffe nach 5x5 Parametervariation für INVVAR (links) & Super-INVVAR

7.1.3 Wärmebehandlungsvariationen

Ein Ziel der Arbeiten an INVAR und Super-INVAR war es, zu klären, inwieweit verschiedene Wärmebehandlungen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte und den CTE haben können. Dazu wurden auch auf verfügbare Quellen zurückgegriffen und letztendlich insgesamt 10 Varianten definiert mit bis zu 4 Prozess-Schritten, verschiedenen Abkühl-Bedingungen (WQ = Water Quench; AC = Air Cooling; FC = Furnace Cooling) und Nachverdichtungsoption über Heiß-Isostatisches Pressen (HIP) bei 1000 bar Druck:

- keine Wärmebehandlung (WB),
- 750°C / 1 h / FC,
- 830°C / 0,5 h / WQ; 300°C / 1 h / AC; 100°C / 0,5 h / FC / 48 h,
- 830°C / 1 h / 1000 bar / FC; 300°C / 1 h / AC; 100°C / 0,5 h / FC / 48 h,
- 843°C / 1 h / WQ; 316°C / 1 h / AC; 93°C / 24 h / AC,
- 920°C / 2 h / 1000 bar / FC,
- 920°C / 2 h / 1000 bar / FC; 300°C / 1 h / AC; 100°C / 0,5 h / FC / 48 h,
- 920°C / 2 h / 1000 bar / FC; 316°C / 1 h / AC; 93°C / 24 h / AC,
- 920°C / 2 h / 1000 bar / FC; 830°C / 0,5 h / WQ; 300°C / 1 h / AC; 100°C / 0,5 h / FC / 48 h,
- 920°C / 2 h / 1000 bar / FC; 843°C / 1 h / WQ; 316°C / 1 h / AC; 93°C / 24 h / AC.

7.1.4 Ergebnisse der strukturellen Charakterisierung

Die in Figure 7.3 dargestellten, bei Raumtemperatur gemessenen mechanischen Kennwerte Streckgrenze $R_{p0.2}$, Festigkeit R_m , Bruchdehnung A , Brucheinschnürung Z und E-Modul E (jeweils Mittelwerte und Standardabweichungen) aus statischen Zugprüfungen von in der Regel 3 stehend (Z) oder liegend (X) gebauten, bearbeiteten (O2) Rund-Zugproben (ZRZ, ZRX) umfassen INVAR (IN) und Super-INVAR (SIN), hergestellt aus Pulver von SANDVIK (SAN) über 2 verschiedene AM-Prozesse (EBM, LBM = LPB-F) bei 3 verschiedenen Projektpartnern (IFW, CRT, IFA = IFAM) und nach 7 verschiedenen Wärmebehandlungen (W0-W9). Die gestrichelten Linien entsprechen den Zielwerten.

Für Super-INVAR nach EBM ergeben sich nahezu unabhängig von der Wärmebehandlung sehr geringe Werte für R_m und E (rote Rahmen). Letzteres ist bereits aus früheren Arbeiten von LPB-F mit INVAR bekannt. Demgegenüber erreichen die E -Werte nach LPB-F (LBM) sowohl von IFW als auch von CRT und unabhängig von der Wärmebehandlung nahezu den Zielwert, was zeigt, dass das Ausgangspulver sehr wahrscheinlich nicht die Ursache ist. Diese kann nur in der unterschiedlichen Prozessführung zwischen LPB-F und EBM liegen, was aber im Rahmen des Projektes nicht final geklärt werden konnte.

Auch die Duktilitätswerte A & Z ($A < 14\%$) erreichen mit dem EBM-Prozess nicht die gemäß MS1.2 geforderten 90 % (18 %) der Zielwerte (20 %), was durch HIP-Wärmebehandlung verbessert werden kann mit einem A -Wert bis 34 %. Im Gegensatz dazu liegen die Werte bei LPB-F deutlich über den Zielwerten ohne nennenswerten HIP-Effekt.

Die Streckgrenze $R_{p0.2}$ liegt in allen Fällen über den geforderten 90 % (243 MPa) des Zielwertes (270 MPa) und erreicht für Super-INVAR nach LPB-F die höchsten Werte.

Die geforderten 90 % (432 MPa) der Zugfestigkeit R_m (480 MPa) werden unabhängig von der Wärmebehandlung für Super-INVAR nach EBM nicht erreicht, wohl aber für LPB-F. Somit werden für LPB-F von Super-INVAR alle Zielwerte erreicht (grüne Rahmen).

Figure 7.4 zeigt am Beispiel der von IFW hergestellten guten Super-INVVAR Qualität aus Figure 7.3 (linker grüner Rahmen) die Porosität im Querschliff einer geprüften Zugprobe nach Wärmebehandlung ohne (links) und mit HIP. Die Porosität in den Kopfbereichen liegt leicht über dem Zielwert (0,5 %) und ohne HIP im Prüfbereich sogar höher. Offenbar kann HIP die Porosität nicht vollständig beseitigen, was die geringen Unterschiede in den Kennwerten erklärt. Die Mikrostruktur ist ohne und mit HIP ähnlich mit nur kurzen (ca. 200 µm) Stängelkristalliten parallel zur Baurichtung, d. h. erfreulich geringer Anisotropie.

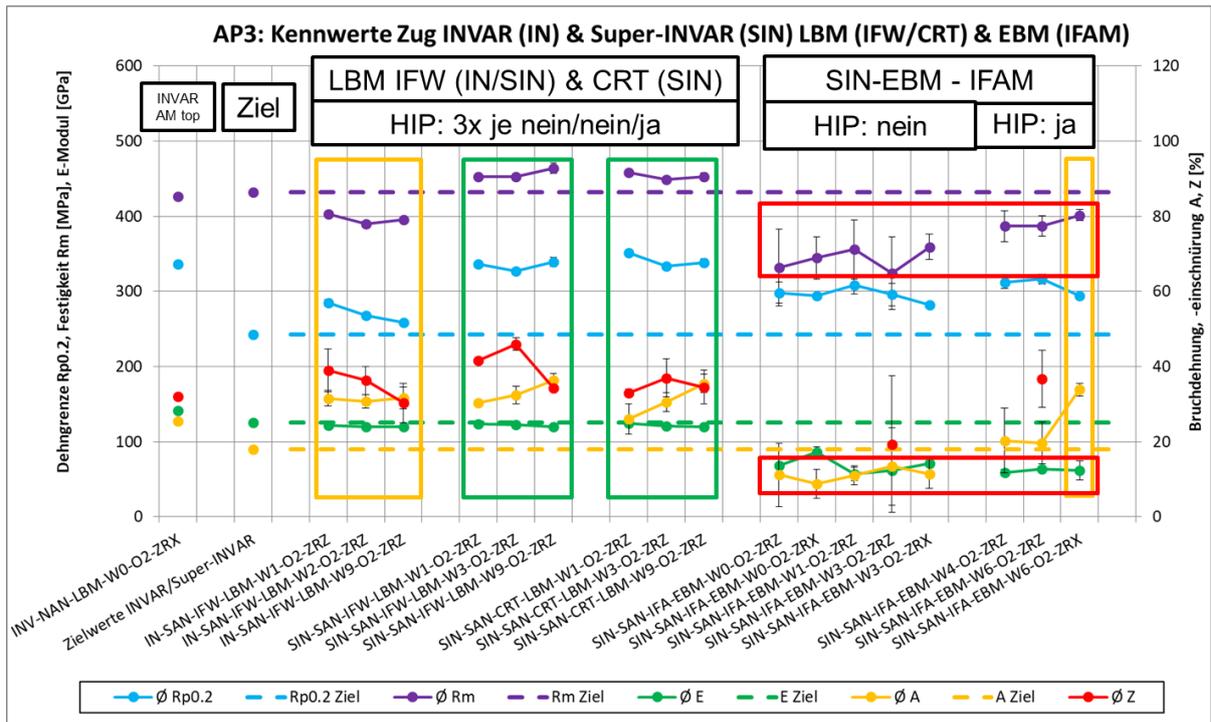


Figure 7.3 Mechanische Kennwerte (Zug) von INVVAR und Super-INVVAR AM verschiedener Quellen

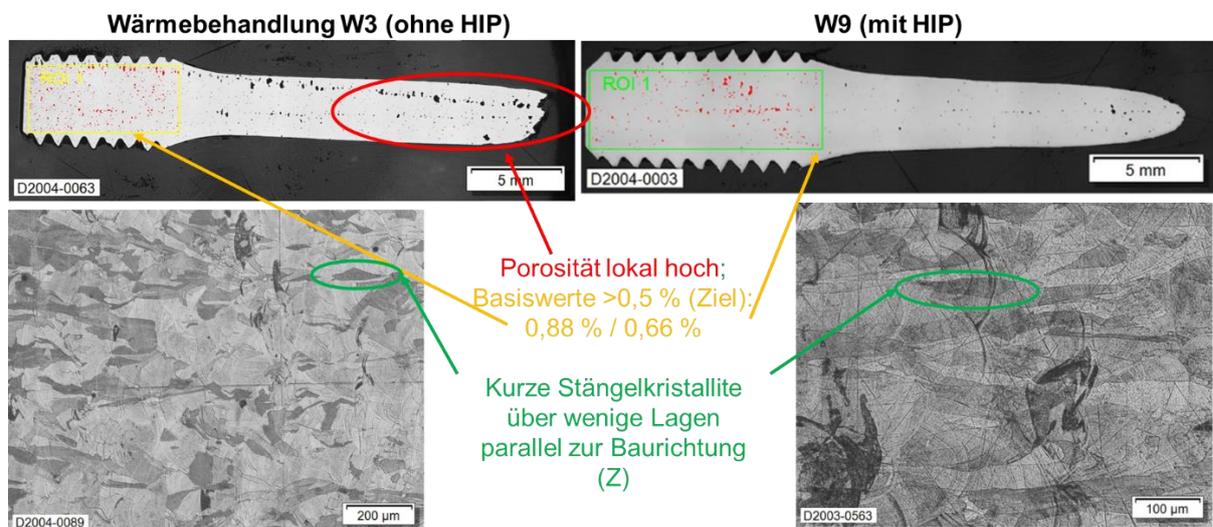


Figure 7.4 Porosität und Mikrostruktur von Super-INVVAR (IFW) für Wärmebehandlung ohne und mit HIP

7.1.5 Ergebnisse der funktionalen Charakterisierung

Figure 7.5 gibt einen Überblick über die von IFAM durchgeführten CTE-Messungen an INVAR (IN) und Super-INVVAR (SIN), entweder als extrudiertes Referenz-Material oder hergestellt über AM von den Projektpartnern IFAM, IFW und CRT nach unterschiedlichen Wärmebehandlungen und für verschiedene Test-Parameter (untere & obere Temperaturgrenze). Jede Variante ist das Mess-Ergebnis an einer komplett bearbeiteten Probe (Ø 5 mm) mit meist 3 identischen Temperaturzyklen (z. B. -40/110°C), wobei der Mittelwert und die Standardabweichung der meist 3 Minimum- (blau) und Maximum-Werte (violett) errechnet wurde sowie der Mittelwert aus all diesen Werten (grün). Die grüne gestrichelte Linie stellt den Zielwert dar. Die CTE-Einheit „ppm/K“ entspricht „10⁻⁶/K“.

Auffällig sind die z. T. hohen CTE-Mittelwerte von Super-INVVAR (rote Rahmen), die unabhängig von der Wärmebehandlung dann auftreten, wenn die untere Temperaturgrenze <-50°C beträgt. Der Effekt ist nicht reversibel und tritt nicht nur für AM-Material auf, sondern kann auch für extrudiertes Super-INVVAR (SIN extr.) nachgewiesen werden. Konkret liegt der Mittelwert bei -40°C wie erwartet bei 0,3 ppm/K und steigt bereits bei -50°C auf 1,1 ppm/K (rechter gelber Rahmen) bzw. bei -130°C auf 4,3 ppm/K. Es wird eine bisher nicht allgemein bekannte Umwandlung der Gitterstruktur vermutet, die die CTE-stabile Anwendung des Werkstoffs auf Temperaturen oberhalb von -40°C einschränkt.

Bei Temperaturuntergrenzen >-50°C lassen sich für Super-INVVAR nach EBM und LBM nahezu unabhängig von der Wärmebehandlung CTE-Werte nahe oder unter dem Zielwert ermitteln (grüne Rahmen). Eine Ausnahme bildet W1, wobei auch der hohe Wert nach W3 für IFW-Material (1,6 ppm/K) unklar ist (mittlerer gelber Rahmen).

Für INVAR (linker gelber Rahmen) scheint dagegen HIP (W9) einen positiven Einfluss zu haben, ohne dass bei unterer Temperaturgrenze von -110°C hohe CTE-Werte auftreten.

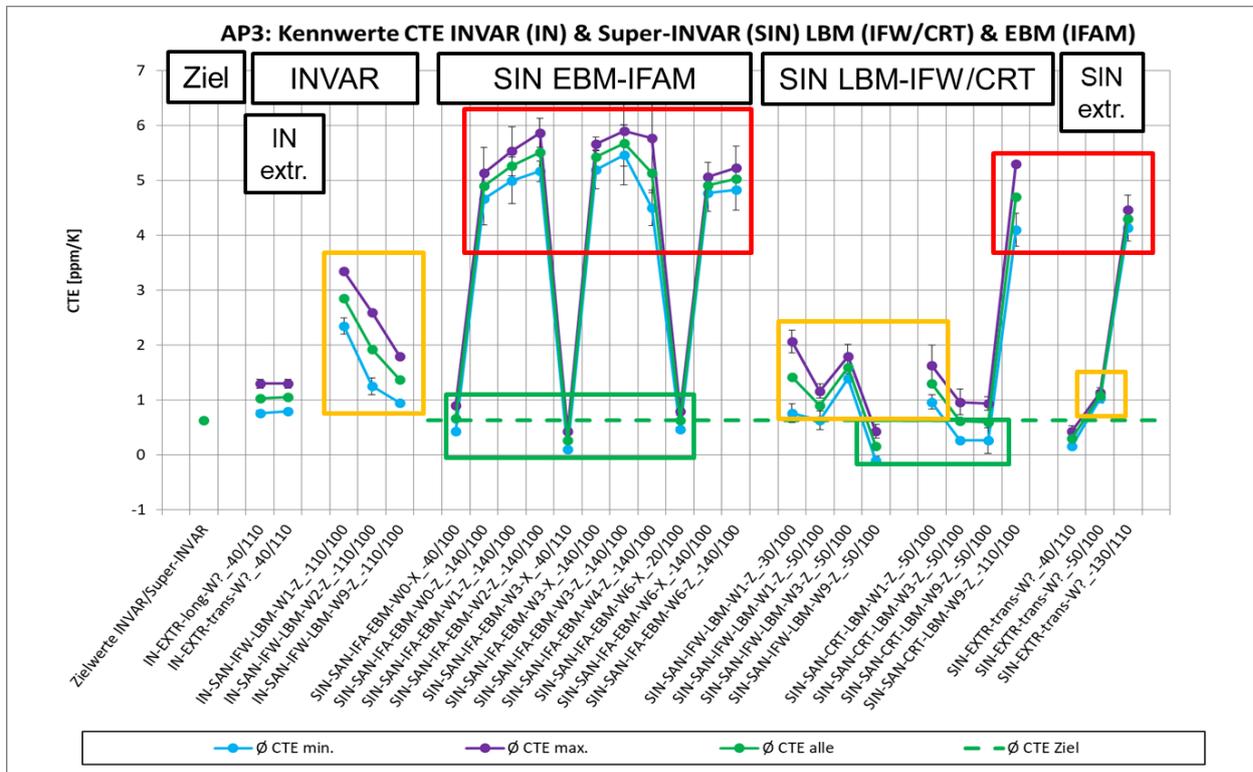


Figure 7.5 CTE-Werte für verschiedene Werkstoff-Varianten, Wärmebehandlungen und Prüfparameter

7.2 Werkstoff b) AISi40

LPB-F-Arbeiten an AISi40 wurden ausschließlich bei CRT durchgeführt. Bei der Definition der Zielkennwerte erfolgte eine Orientierung an vorhandenen, pulvermetallurgisch (PM) hergestellten AISi-Werkstoffen der Firma SANDVIK mit verschiedenen Si-Gehalten, wie beispielhaft in Figure 7.6 für den Ziel-CTE (<13 ppm/K) dargestellt.

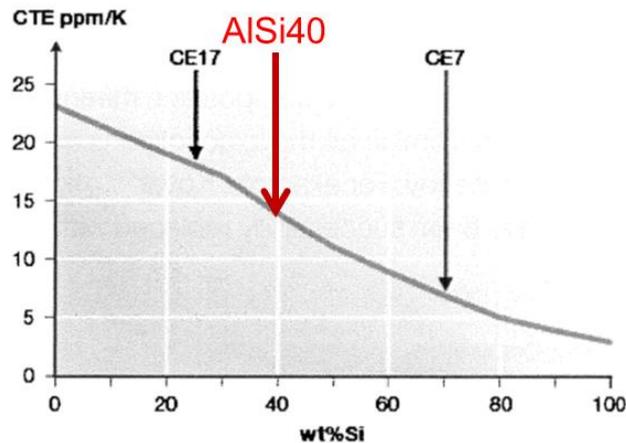


Figure 7.6 CTE-Abhängigkeit von PM-AISi-Werkstoffen (Quelle SANDVIK)

7.2.1 Pulverbeschaffung und Ergebnisse der Charakterisierung

Da bei Projektstart der Si-Gehalt noch nicht fixiert war und AM-taugliche AISi-Pulver in Mengen <30 kg bei bekannten Herstellern standardmäßig nicht verfügbar waren, wurde beschlossen, bei CRT verfügbares AISi10Mg-Pulver (Hersteller TLS, EIGA-Verfahren) und Rein-Silizium-Pulver (Si) bedarfsgerecht je nach Si-Gehalt zu mischen (Option Mix). Bei TLS wurden 08/17 20 kg Si-Pulver der Kornfraktion (20-63 µm) bestellt. Die Lieferung erfolgte verspätet in 12/17. Anfang 2018 erfolgte Airbus-intern dann die Festlegung auf AISi40 als Variante mit optimalem CTE für Spiegelanwendungen in der Raumfahrt.

In 2018 ergab sich die Möglichkeit, kostenfrei bereits vorlegiertes AISi40 Pulver von Hersteller POWDER LIGHT METALS (PLM) über Airbus zu erhalten und dieses parallel zu untersuchen. Je 5 kg feines und grobes AISi40 Pulver (25-63 µm und 63-150 µm) wurde 11/18 und damit verspätet von PLM geliefert (Option Fein/Grob).

Die Messung der Fließfähigkeit über den Carney-Trichter erwies sich wegen der geringen Dichte der 3 Material-Varianten wie erwartet als nicht möglich.

Gemäß REM-Bilder (oben) in Figure 7.7 haben die Si- (links) und AISi10Mg-Pulver ein wie gewünscht überwiegend kugeliges Korn mit wenig Satelliten und etwas höherem Feinanteil im Si-Pulver. Die EDX-Analyse (unten) zeigt keine Verunreinigungen.

Die REM-Bilder (oben) der legierten AISi40 Pulver in Figure 7.8 (oben) zeigen dagegen ein unerwünschtes, sehr spratziges Korn, auch wenn Feinanteil und Satellitenbildung in beiden Fällen gering sind. Dazu kommen Fe-Verunreinigungen gemäß EDX-Analyse (Bilder unten) in der weniger wichtigen groben Kornfraktion.

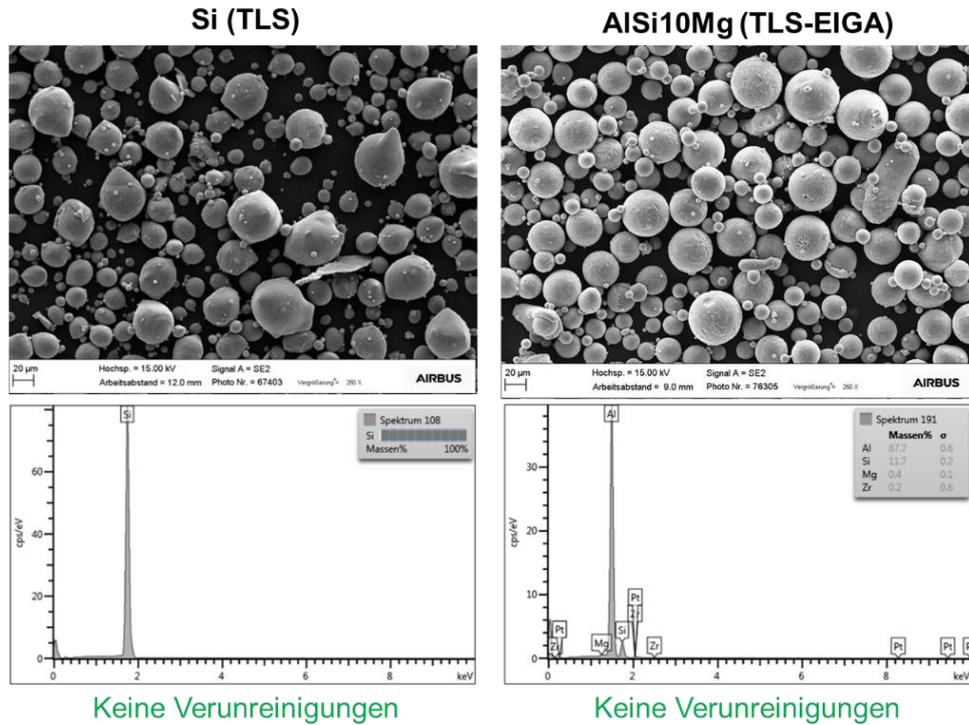


Figure 7.7 REM- (oben) und EDX-Analyse für Si (links) und AlSi10Mg Pulver

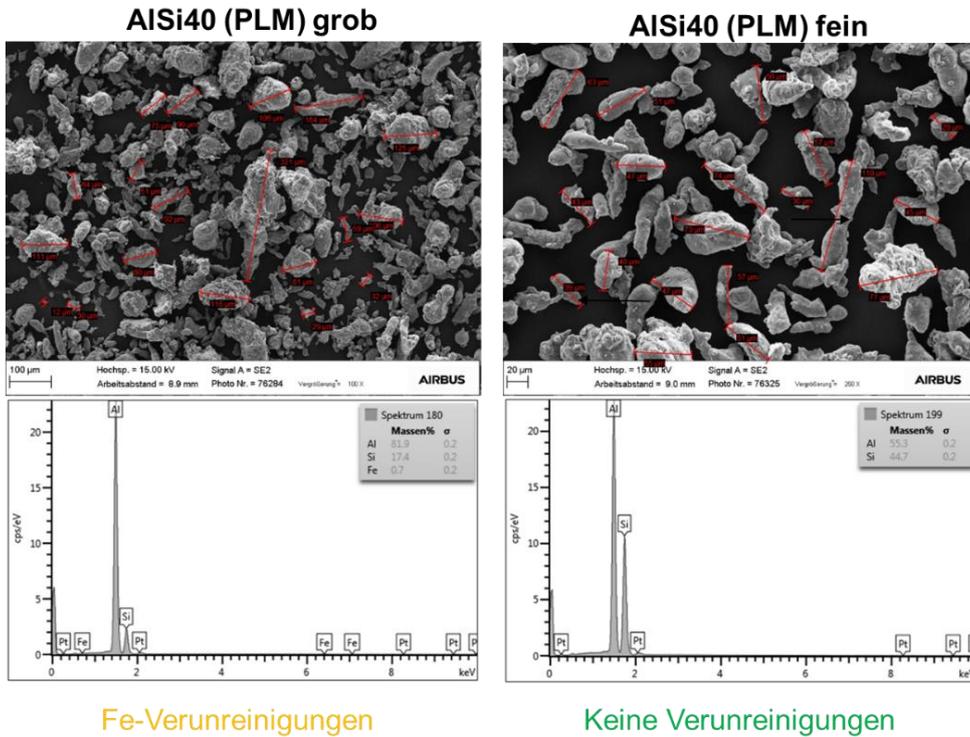


Figure 7.8 REM- (oben) und EDX-Analyse für grobes (links) und feines AlSi40 Pulver

7.2.2 Ergebnisse der Parameterstudien zur Bauprozess-Entwicklung

Die Entwicklung erfolgte auch hier über den Bau von 5x5 Würfelproben mit systematischer Variation von je 2 Prozessparametern und eine nachfolgende Analyse der Porosität über Archimedes (Auftriebsprinzip) oder Schliffe. Insgesamt 10 Baujobs zur Herstellung von Probenwürfeln und Zugprobenrohlingen waren nötig unter Variation der Scan-Geschwindigkeit des Lasers V_s (500-1100 mm/s), der Laserleistung P_L (310-370 W), des Laserlinienversatzes H (0,10-0,14 mm) und der eingebrachten Volumenenergie E_v (95-245 J/mm³) bei verschiedener Fokuslage (0/-2/-4/-6 mm), Belichtungsart (Streifen oder Schachbrett) und konstanter Schichtdicke D_s (30 µm) und Pulverfeuchte (getrocknet).

Über Auftriebsmessung konnte die Ziel-Porosität <0,5 % konnte nicht ganz erreicht werden. Figure 7.9 (links) zeigt Minimal-Werte für die 3 Optionen Mix/Grob/Fein im Bereich <1 %, wobei über Schliffe (Bilder rechts) auch Werte <0,5 % gemessen wurden.

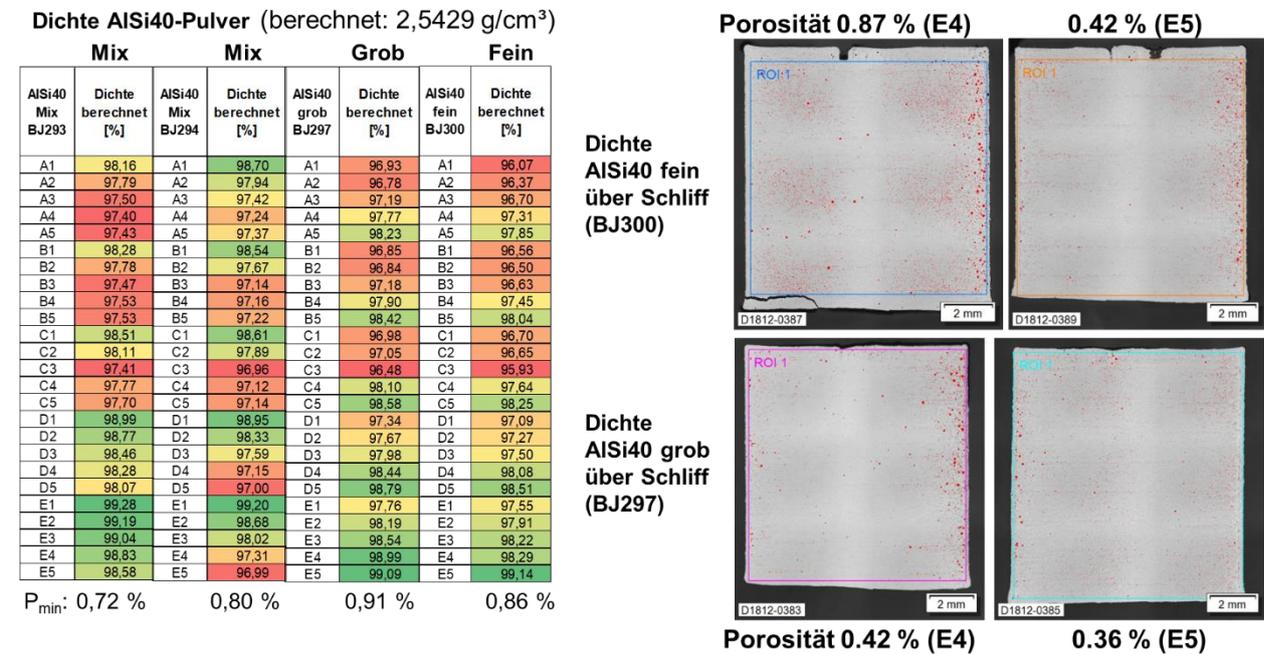


Figure 7.9 Dichtewerte (links) & Schliffe nach 5x5 Parametervariation für AISi40 Optionen Mix/Grob/Fein

7.2.3 Wärmebehandlungsvariationen

Ein Ziel der Arbeiten an AISi40 war es, zu klären, inwieweit eine Wärmebehandlung wie die des PM-Werkstoffs Vorteile liefern kann bzgl. mechanischer Kennwerte und CTE. Dies wurde erweitert durch eine Nachverdichtungsoption über Heiß-Isostatisches Pressen (HIP) bei 2000 bar Druck, um vor allem den Einfluss auf die Duktilität zu klären:

- keine Wärmebehandlung (WB),
- 350°C / 3,5 h / FC (Furnace Cooling),
- 350°C / 3,5 h / 2000 bar / FC (Furnace Cooling).

7.2.4 Ergebnisse der strukturellen Charakterisierung

Die in Figure 7.10 dargestellten, bei Raumtemperatur (RT) und 350°C (HT) gemessenen mechanischen Kennwerte Streckgrenze $R_{p0.2}$, Festigkeit R_m , Bruchdehnung A , Brucheinschnürung Z und E-Modul E (jeweils Mittelwerte und Standardabweichungen) aus statischen Zugprüfungen von in der Regel 3 über LPB-F liegend (X) mit teils 2 Parametersätzen (P1, P2) in verschiedenen Baujobs (BJxyz) gebauten, komplett bearbeiteten (O2), meist im Prüfdurchmesser reduzierten (mod) Rund-Zugproben (ZRX) umfassen die Varianten „Mix“ (links, AS10+S) sowie legiert, unterteilt in „Grob“ (mitte, AS40G) und „Fein“ (rechts, AS40F), hergestellt aus gemischtem AlSi10Mg und Si Pulver (AS10+S) von TLS (TLS) bzw. aus legiertem AlSi40 Pulver (AS40G, AS40F) von PLM (PLM) nach 3 verschiedenen Wärmebehandlungen (W0-W2). Gestrichelte Linien entsprechen den Zielwerten gemäß Meilenstein MS1.2 (90 % der Referenz, s. Figure 4.2).

Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Kennwerte der legierten Varianten unabhängig von Wärmebehandlung und verwendetem Parametersatz (P1/P2) tendenziell geringer sind als für die gemischte Variante, ggf. aufgrund der unterschiedlichen Pulverqualität, worauf auch der unter dem Zielwert liegende E-Modul für die legierten Varianten deuten würde. Zumindest liegen alle Festigkeitswerte ($R_{p0.2}$, R_m) über den RT-Zielmarken, nicht jedoch alle Duktilitätswerte (A , Z). Diese lassen sich auch durch einen HIP-Prozess nicht verbessern, obwohl die Festigkeiten bei 350°C (HT) eigentlich gering genug sind (<100 MPa, grüne Rahmen), um Poren schließen zu können. Dies wird durch Bilder in Figure 7.11 am Beispiel von AlSi40 (Mix) ohne (links) und mit HIP belegt. Damit kann Porosität als Ursache für die geringe Duktilität ausgeschlossen werden.

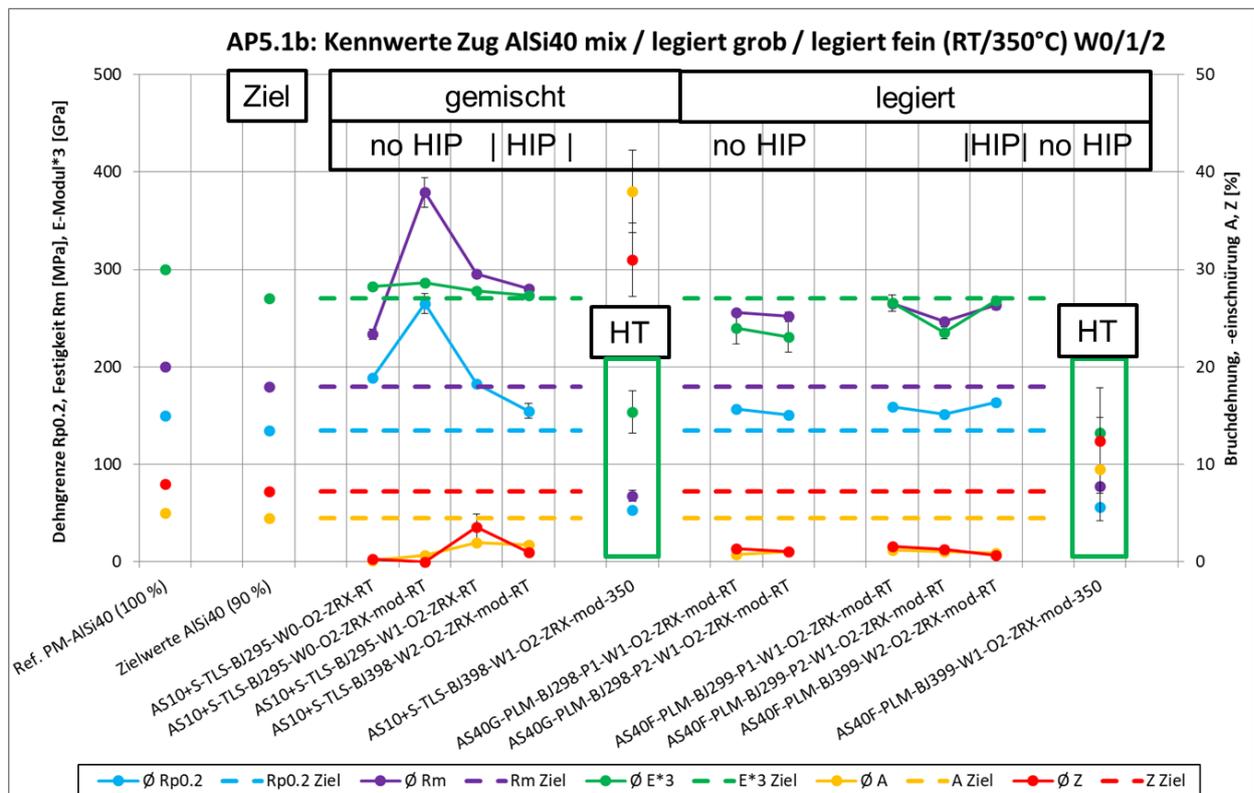


Figure 7.10 Mechanische Kennwerte (Zug) von AlSi40 AM verschiedener Varianten (Mix/Grob/Fein)

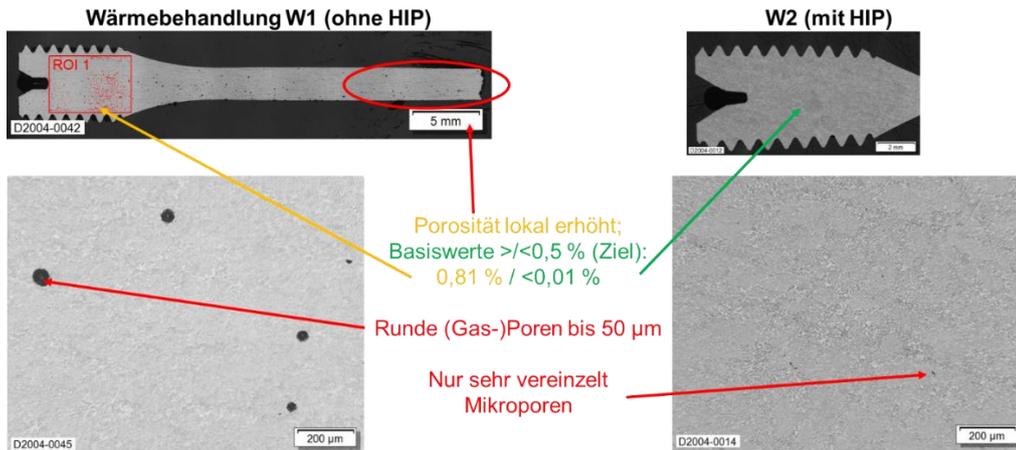


Figure 7.11 Porosität und Mikrostruktur von AlSi40 (Mix) für Wärmebehandlung ohne und mit HIP

7.2.5 Ergebnisse der funktionalen Charakterisierung

Figure 7.12 gibt einen Überblick über die von IFAM durchgeführten CTE-Messungen an den drei AlSi40 Varianten (Mix/Grob/Fein), von CRT über AM liegend (X) gebaut (teilweise mit 2 Parametersätzen P1/P2) nach unterschiedlichen Wärmebehandlungen und für verschiedene Test-Parameter (untere & obere Temperaturgrenze). Jede Variante ist das Mess-Ergebnis an einer Probe mit meist 3 identischen Temperaturzyklen (z. B. -40/110°C), wobei Mittelwert und Standardabweichung der 3 Minimum-/Maximum-Werte (blau/violett) sowie der Mittelwert aus all diesen Werten (grün) errechnet wurde. Die grüne gestrichelte Linie stellt den Zielwert dar. Die CTE-Einheit „ppm/K“ entspricht „10-6/K“.

Bis auf eine Messung sind alle Werte unabhängig von AlSi40 Variante, Parametersatz und Wärmebehandlung sehr ähnlich. Der einzelne hohe Wert für AS40F ist ggf. eine Fehlmessung und liegt nicht an der geringeren Zyklustemperatur (-110°C), denn bei der Mix-Variante existiert ein gleicher Temperaturzyklus ohne Einfluss auf den CTE.

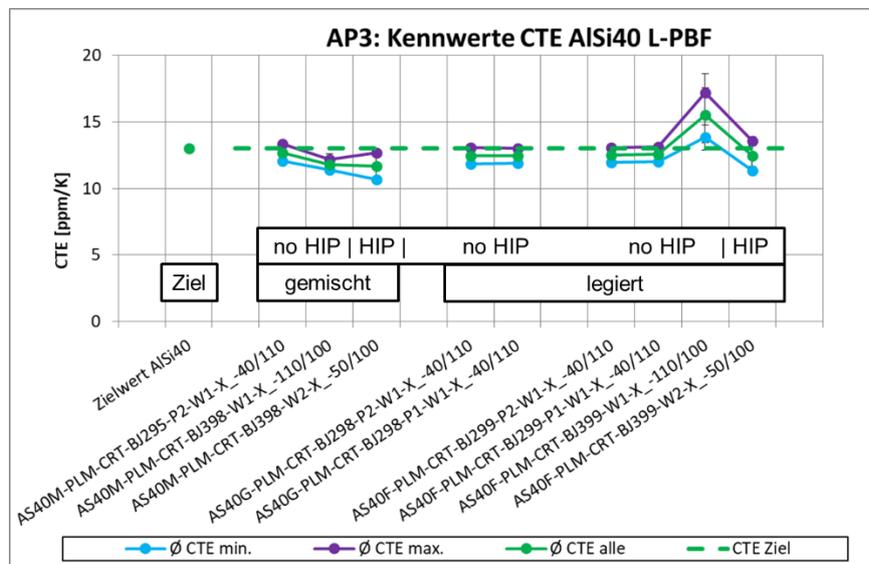


Figure 7.12 CTE-Werte für verschiedene AlSi40 Varianten, Wärmebehandlungen und Prüfparameter

7.3 Werkstoff c) AlMgCaSc

LPB-F-Arbeiten an AlMgCaSc wurden ausschließlich bei CRT durchgeführt. Das Material ist eine Ableitung des Referenzwerkstoffs Scalmalloy® (AlMg4.4Sc0.73ZrMn; kurz AlMgSc) mit einem Teilersatz von Mg durch Ca (Dichte-Reduktion, bessere Prozessführung, erhöhte Warmfestigkeit erwartet) und einer Reduktion des Sc-Gehaltes (Minimierung seltener Erden). Vor allem letzteres wurde bei der Definition der Zielkennwerte durch Absenkung auf 80 % der Referenz berücksichtigt.

7.3.1 Pulverbeschaffung und Ergebnisse der Charakterisierung

Zur Vorbereitung der Pulverherstellung bei TLS wurden in 10/17 bei KBM AFFILIPS AlCa10-Masseln bestellt und 12/17 geliefert, Figure 7.13.

Die Masseln und 57 kg AlMgScZrYb (Bestand CRT) wurden 02/18 an TLS geliefert zur Erzeugung von 20 kg Pulver der richtigen Pulverfraktion 20-63 µm. Der Liefertermin 06/18 verzögerte sich auf 09/18. Insgesamt wurde nur 12 kg verwertbares Pulver geliefert.

Die Messung der Fließfähigkeit über den Carney-Trichter erwies sich wegen der geringen Dichte des Materials wie erwartet als nicht möglich. Gemäß REM-Bilder (rechts) in Figure 7.14 hat das Pulver kugeliges Korn, aber viele Satelliten und viel Feinanteil. Die EDX-Analyse (links) konnte keine Verunreinigungen durch Fremdelemente nachweisen.



Figure 7.13 AlCa10-Massel von KBM AFFILIPS als Vorlieferung für AlMgCaSc Pulverfertigung

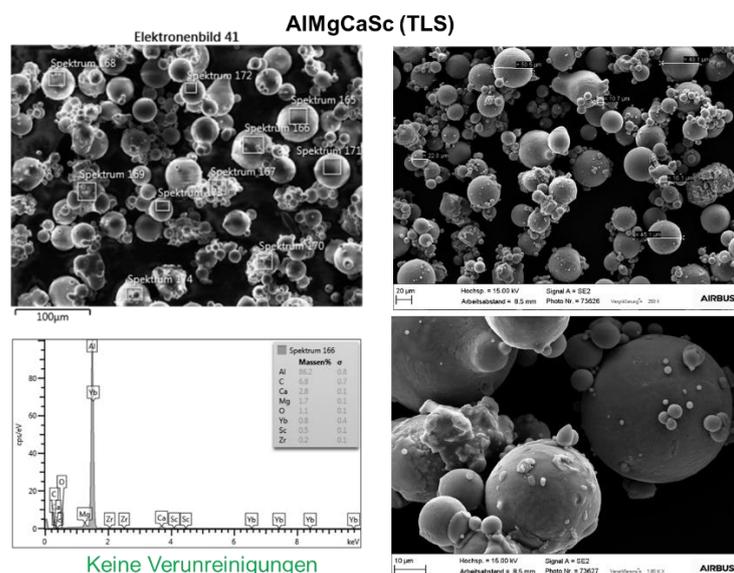


Figure 7.14 REM- (rechts) und EDX-Analyse für AlMgCaSc Pulver

7.3.2 Ergebnisse der Parameterstudien zur Bauprozess-Entwicklung

Die Entwicklung erfolgte auch hier über den Bau von 5x5 Würfelproben mit systematischer Variation von je 2 Prozessparametern und eine nachfolgende Analyse der Porosität über Archimedes (Auftriebsprinzip) oder Schlicke. Insgesamt 11 Baujobs zur Herstellung von Probenwürfeln und Zugprobenrohlingen waren nötig unter Variation der Scan-Geschwindigkeit des Lasers V_s (600-1200 mm/s), der Laserleistung P_L (310-370 W), des Laserlinienversatzes H (0,08-0,13 mm) und der eingebrachten Volumenenergie E_v (102-257 J/mm³) bei verschiedener Pulverfeuchte (mit/ohne trocknen) und konstanter Fokusslage (0 mm), Belichtungsart (Streifen) und Schichtdicke D_s (30 µm).

Gemäß Figure 7.15 (links) kann die Ziel-Porosität <0,5 % für optimale Prozessparameter erreicht werden (A4: 0,1 %), doch zeigt sich für ungünstige Parameter eine ausgeprägte Rissigkeit (D5) unabhängig vom AM-Prozess ohne und mit Bettvorheizung (rechts).

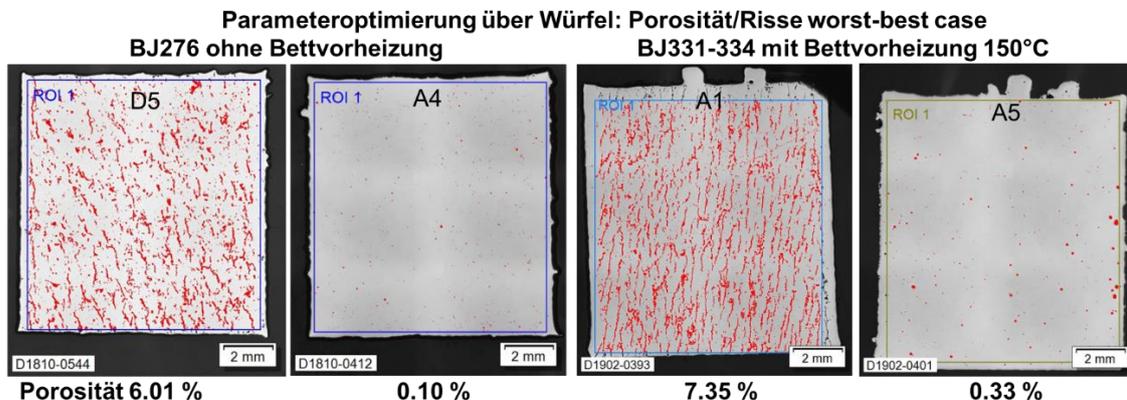


Figure 7.15 Porosität (max./min.) bei AlMgCaSc Parametervariation ohne/mit Bettvorheizung

7.3.3 Wärmebehandlungsvariationen

Ein Ziel der Arbeiten an AlMgCaSc war es, zu klären, ob die Wärmebehandlung wie die des Referenz-Werkstoffs verwendbar ist. Dies beinhaltet auch eine Nachverdichtungsoption über Heiß-Isostatisches Pressen (HIP) bei 1000 bar Druck, um vor allem die Duktilität positiv zu beeinflussen:

- keine Wärmebehandlung (WB),
- 300°C / 2 h / FC (Furnace Cooling),
- 325°C / 2 h + 325°C / 2 h / 1000 bar / FC (Furnace Cooling).

7.3.4 Ergebnisse der strukturellen Charakterisierung

Die in Figure 7.16 dargestellten, bei Raumtemperatur (RT) und bis 120°C gemessenen mechanischen Kennwerte Streckgrenze $R_{p0.2}$, Festigkeit R_m , Bruchdehnung A , Brucheinschnürung Z und E-Modul E (jeweils Mittelwerte und Standardabweichungen) aus statischen Zugprüfungen von in der Regel 3 über LPB-F stehend (Z) in verschiedenen Baujobs (BJxyz) ohne (RT) oder mit (150) Bauraumheizung (150°C) gebauten, komplett be-

arbeiteten (O2) Rund-Zugproben (ZRX), hergestellt aus AlMgCaSc Pulver (ACS) von TLS (TLS) nach 3 verschiedenen Wärmebehandlungen (W0, W2, W4). Gestrichelte Linien entsprechen den Zielwerten gemäß Meilenstein MS1.3 (100 % Zielwerte, s. Figure 4.2, d. h. 80 % der Referenz AlMgSc). Im rechten Teil sind die Kennwerte bei erhöhten Temperaturen (70/90/120°C) aufgetragen und verglichen mit der Referenz bei 120°C.

Der E-Modul liegt über der Zielmarke und ist nahezu unabhängig von Baujob (BJ), Bettvorheizung (RT, 150°C) und Wärmebehandlung (W0, W2, W4). Der höchste Wert wird in Zusammenhang mit einer HIP-Wärmebehandlung erreicht, was auf die erwartete Reduktion der geschlossenen Porosität hindeutet.

Mit HIP gelingt es auch, die Festigkeiten ($R_{p0.2}$, R_m) nahe an die Zielwerte heranzuführen (99/91 %, grüner Rahmen). Leider kann die Duktilität (A, Z) durch HIP nicht signifikant erhöht werden (roter schmaler Rahmen) und liegt sogar noch unterhalb der Werte, die für Proben aus BJ292 ohne jegliche Wärmebehandlung (W0) erzielt werden konnten, d. h. bleibt deutlich hinter den Zielwerten zurück.

Die Duktilität steigt zwar deutlich mit der Prüftemperatur und der Abfall der Festigkeit bei 120°C ist mit ca. 23 % etwas geringer als der von AlMgSc (ca. 28 %), doch liegt insgesamt die Warmfestigkeit unter der von AlMgSc (rechter roter Rahmen), sodass eines der übergeordneten Ziele (verbesserte Warmfestigkeit) an der Stelle nicht erreicht wird.

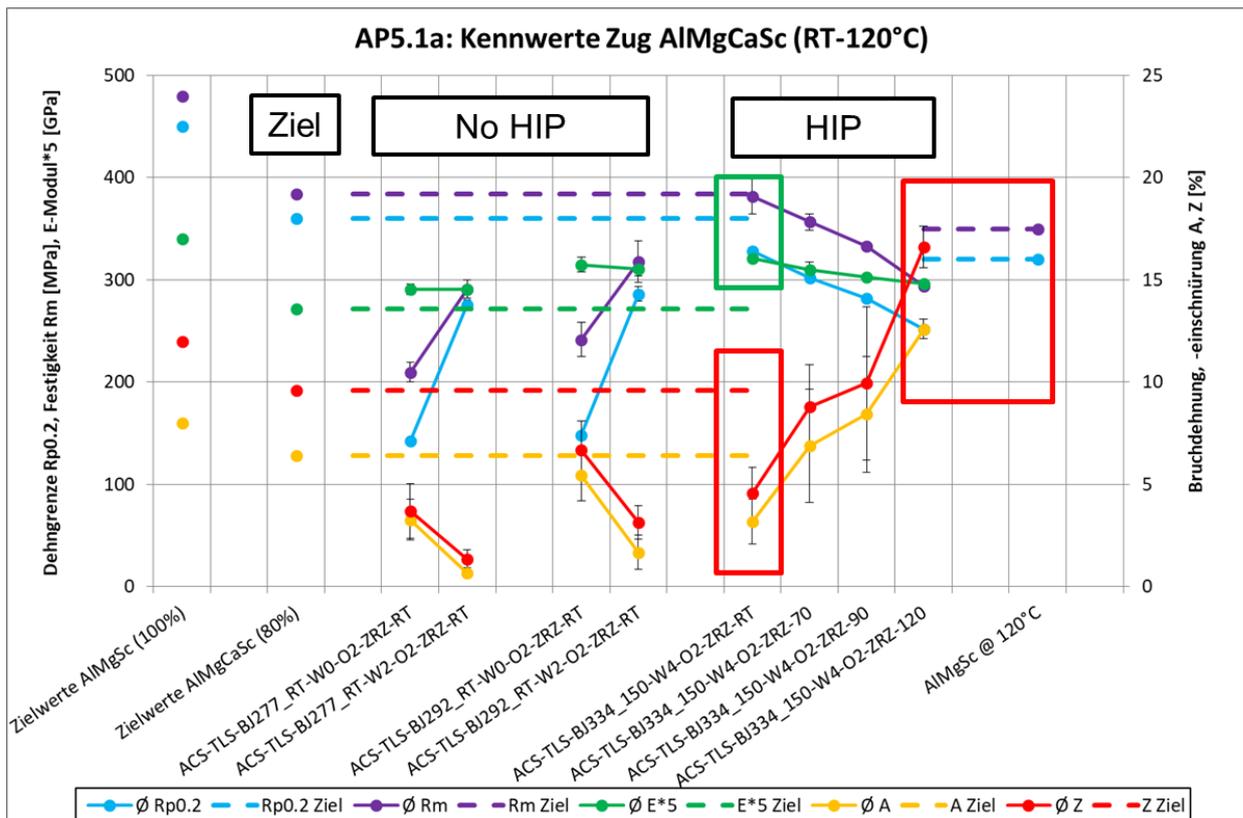


Figure 7.16 Mechanische Kennwerte von AlMgCaSc als f(T) für verschiedene Wärmebehandlungen

7.4 Werkstoff d) AlCrZr

LPB-F-Arbeiten an AlCrZr wurden ausschließlich bei CRT durchgeführt auf der Basis des Projekt-Werkstoffkonzeptes „Sc-freie Al-Legierung“. Die Legierungsauswahl erfolgte nach Literaturrecherche bzgl. hochfester Al-Legierungen auf Basis AlNiFe, AlFeVSi und AlCrZrMn zusammen mit Partner IFAM. Sie wurde von Alcan International bereits vor ca. 30 Jahren über schnell abgekühltes Pulver und nachfolgende Extrusion hergestellt und erzielte ähnlich hohe Kennwerte wie der Referenzwerkstoff Scalmalloy® (AlMg4.4Sc0.73ZrMn; kurz AlMgSc). Wegen der fehlenden AM-Erfahrung mit dem Werkstoff wurden die Zielwerte für das Vorhaben reduziert (s. Kapitel 2.4).

7.4.1 Pulverbeschaffung und Ergebnisse der Charakterisierung

Zur Vorbereitung der Pulverherstellung bei NANOVAL wurden bei KBM AFFILIPS in 11/17 AlCr10 und AlMn10 Vorlegierungsmasseln bestellt (ähnlich Figure 7.13) und 12/17 geliefert.

Diese Masseln und zusätzliche AlZr5-Masseln (Bestand CRT) wurden 12/17 an NANOVAL geliefert zur Erzeugung von 25 kg Pulver der richtigen Pulverfraktion 20-63 µm über Tiegelverdüsung. Die Lieferung erfolgte 03/18 wie geplant.

Die Messung der Fließfähigkeit über den Carney-Trichter erwies sich wegen der geringen Dichte des Materials wie erwartet als nicht möglich. Gemäß REM-Bilder (links oben) in Figure 7.17 hat das Pulver kugeliges Korn und wenig Satelliten, aber viel Feinanteil. Die EDX-Analyse (links unten, rechts) konnte oxidische Verunreinigungen nachweisen.

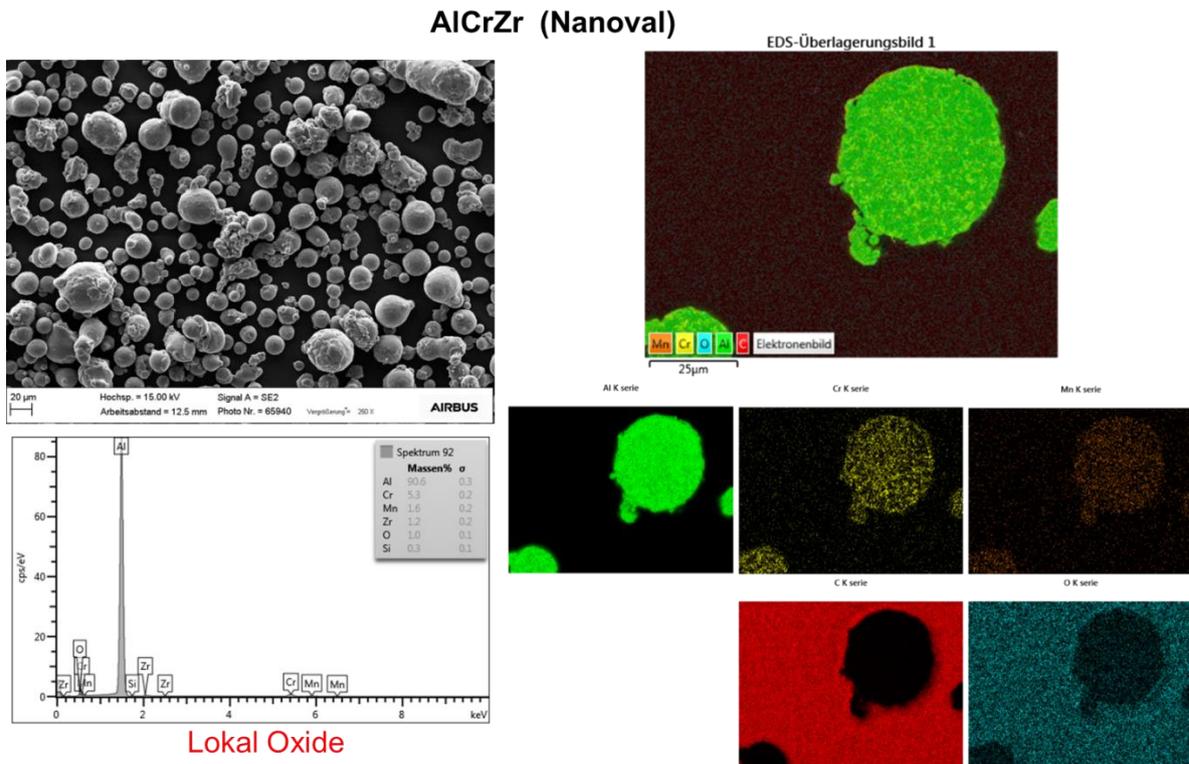


Figure 7.17 REM- (links oben) und EDX-Analyse für AlCrZr Pulver

7.4.2 Ergebnisse der Parameterstudien zur Bauprozess-Entwicklung

Die Entwicklung erfolgte über den Bau von 5x5 Würfelproben mit systematischer Variation von je 2 Prozessparametern und eine nachfolgende Analyse der Porosität über Archimedes (Auftriebsprinzip) oder Schliche. Insgesamt erfolgten 38 Baujobs zur Herstellung von Probenwürfeln und Zugprobenrohlingen unter Variation der Scan-Geschwindigkeit des Lasers V_s (500-1600 mm/s), der Laserleistung P_L (300-400 W), des Laserlinienversatzes H (0,05-0,15 mm) und der eingebrachten Volumenenergie E_v (50-194 J/mm³) bei verschiedener Pulverfeuchte (mit/ohne trocknen), Belichtungsart (Streifen oder Schachbrett) und Fokusslage (0/-2/-4/-6 mm) sowie konstanter Schichtdicke D_s (30 μ m).

Gemäß Figure 7.18 (rechts) kann die Ziel-Porosität <0,5 % nach Schlichauswertung für alle Prozessparameter erreicht werden. Bei solch geringen Porositäten kann die Auftriebs-Auswertung zu unsinnigen Werten führen (hier Dichte >100 %), wenn die angenommene Materialdichte nicht zu 100 % richtig gemessen wurde. Nachteilig ist eine Tendenz zur Rissbildung (Bild mitte) unabhängig von der Porosität.

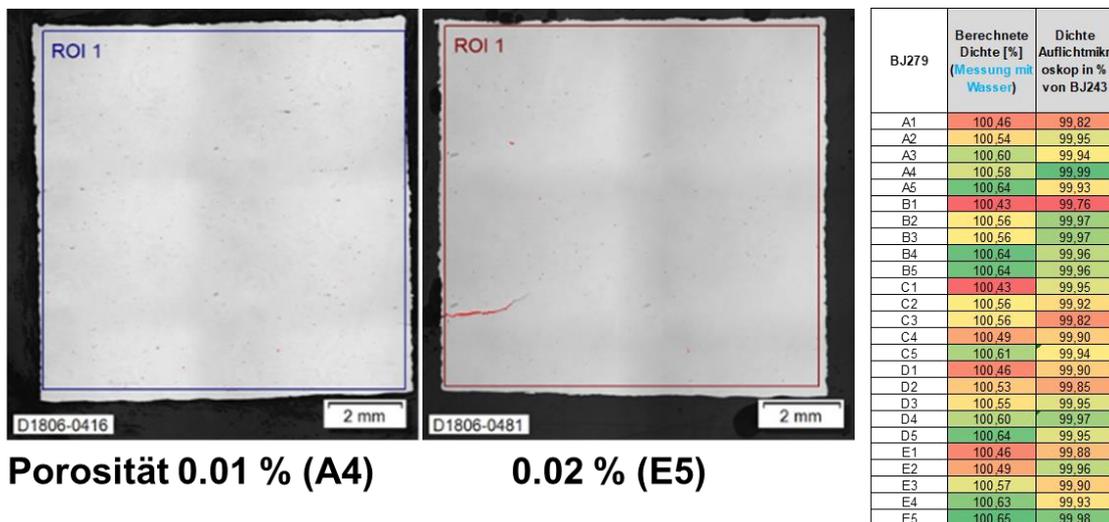


Figure 7.18 Dichteanalyse über Schlicfbilder bei AlCrZr Parametervariation

7.4.3 Wärmebehandlungsvariationen

Zur Festlegung einer optimalen Wärmebehandlung wurde basierend auf der des PM-Werkstoffs (350°C, 1 h) anhand von Würfelproben eine Variation der Aushärtungstemperatur (150-500°C) und der Haltezeit (0,5/1/2/4/8/16 h) durchgeführt und der Einfluss auf die Härte (HB) ermittelt. Das Ergebnis in Figure 7.19 zeigt, dass bei 400°C eine maximale Härte bereits nach 1-2 h erreicht werden kann. Ab 450°C kommt es zur Überalterung mit entsprechendem Härte- bzw. Festigkeits-Abfall aber ggf. erhöhter Duktilität.

Wie bei den anderen Werkstoffen wurde eine zusätzliche Nachverdichtungsoption über Heiß-Isostatisches Pressen (HIP) zur Verbesserung der Duktilität analysiert. Vorversuche bei 325°C und 1000 bar bzw. 400°C und 2000 bar an Würfeln zeigen, dass eine Konsolidierung nur bei ausreichend Temperatur und Druck möglich ist und nur auf geschlossenen Poren wirkt (Figure 7.20).

Somit ergeben sich folgende Wärmebehandlungs-Varianten:

- W0 = keine Wärmebehandlung (WB),
- W2 = 400°C / 2 h / FC (Furnace Cooling) für max. Festigkeit,
- W4 = 500°C / 2 h / FC (Furnace Cooling) für erhöhte Duktilität,
- W5 = W2 + 400°C / 2 h / 2000 bar / FC (Furnace Cooling) für erhöhte Duktilität.

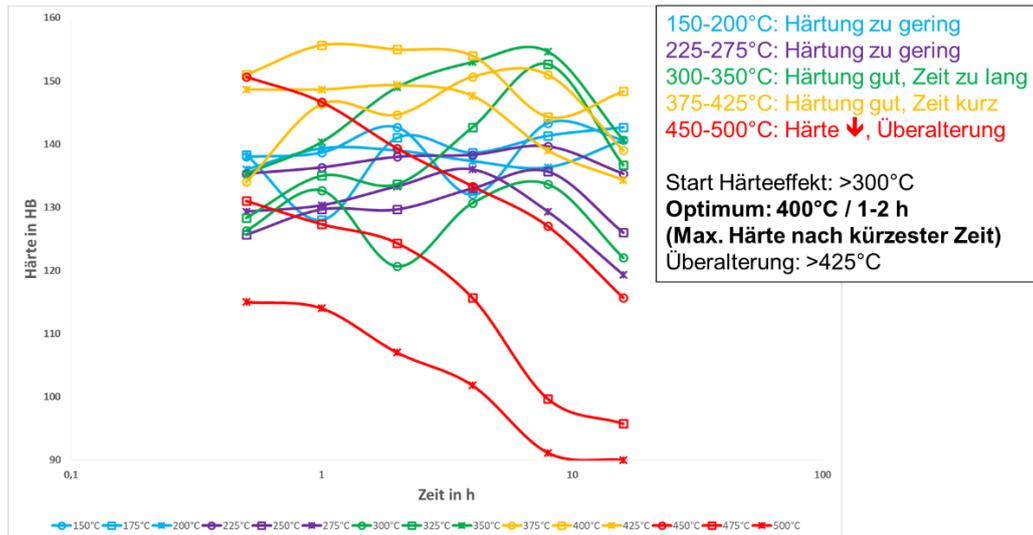


Figure 7.19 Härteentwicklung bei AlCrZr als Funktion von Auslagerungs-Temperatur und -Zeit

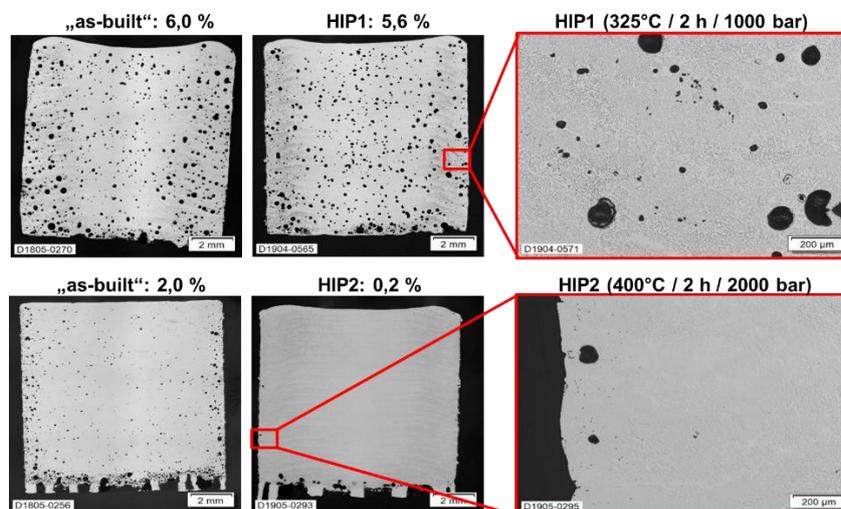


Figure 7.20 Einfluss der HIP-Bedingungen auf die Konsolidierung von AlCrZr

7.4.4 Ergebnisse der strukturellen Charakterisierung

Die in Figure 7.21 dargestellten, bei Raumtemperatur (RT) und 300°C gemessenen mechanischen Kennwerte Streckgrenze $R_{p0.2}$, Festigkeit R_m , Bruchdehnung A , Bruchdehnung Z und E-Modul E (jeweils Mittelwerte und Standardabweichungen) aus statischen Zugprüfungen von in der Regel 3 über LPB-F stehend und liegend (Z , X) in verschiedenen Baujobs (BJxyz) gebauten, komplett bearbeiteten (O2) Rund-Zugproben

(ZRZ, ZRX), hergestellt aus AlCrZr Pulver (ACZ) von NANOVAL (NAN) nach 4 verschiedenen Wärmebehandlungen (W0, W2, W4, W5). Gestrichelte Linien entsprechen den Zielwerten gemäß Meilenstein MS1.3 (100 % Zielwerte, s. Figure 4.2). Mit „HT“ gekennzeichnet sind die Kennwerte bei erhöhter Temperatur (300°C).

Der E-Modul liegt bei guter Bauqualität über der Zielmarke und ist nahezu unabhängig von Baujob (BJ) und Wärmebehandlung (W). Der schlechteste Wert (BJ325, W2) korreliert mit insgesamt sehr schlechter Materialqualität und wird durch eine HIP-Wärmebehandlung nur leicht bis an die Zielmarke verbessert.

Die Festigkeiten ($R_{p0.2}$, R_m) liegen bereits ohne Wärmebehandlung im Bereich der Zielwerte und lassen sich mit entsprechender Wärmebehandlung sogar bis in die Nähe der ursprünglichen PM-Legierung anheben. Dies geht allerdings deutlich zu Lasten der Duktilität (A, Z). Eine Überalterung liefert höhere Werte bei deutlich reduzierter Festigkeit, d. h. insgesamt geringerer Leistungsfähigkeit als ganz ohne Wärmebehandlung.

Außerdem kann HIP weder Festigkeit noch Duktilität signifikant verbessern und auch die Prüfung bei 300°C führt nicht zu der zu erwartenden Duktilisierung (rote Rahmen). Eine Erklärung ist die Rissneigung des Materials, die sehr stark ausfallen kann (Figure 7.22).

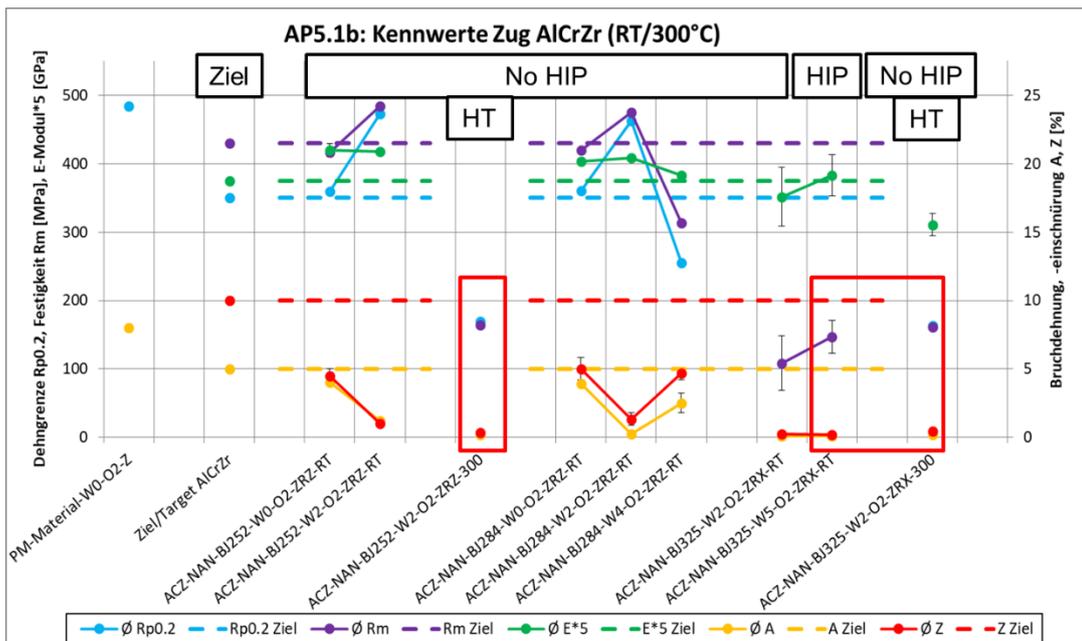


Figure 7.21 Mechanische Kennwerte von AlCrZr als f(T) für verschiedene Wärmebehandlungen

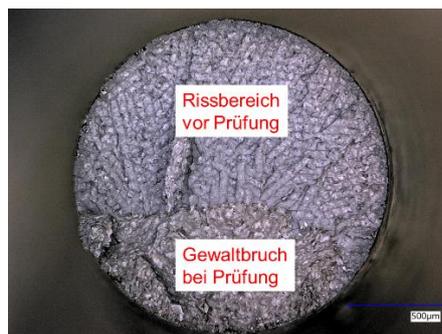


Figure 7.22 Bruchfläche einer AlCrZr Probe nach Zugprüfung bei 300°C

7.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Zielabgleich

Die besten Ergebnisse der Porositätsuntersuchungen, mechanischen Prüfungen (Zug) und CTE-Analysen, getrennt nach Wärmebehandlung (WB) ohne und mit HIP, sind in nachfolgender Übersicht (Figure 7.23) für alle Werkstoff-Varianten, AM-Prozesse (LPB-F, EBM) und herstellende Partner (IFAM, IFW, CRT) zusammengestellt, wobei sich im oberen Teil die Funktionswerkstoffe (INVAR, Super-INVAR, AISi40 Mix/Grob/Fein) und im unteren die Strukturwerkstoffe (AlMgCaSc, AlCrZr) befinden.

Je Materialblock liefert die oberste Zeile die Referenzkennwerte, die 2. Zeile die Zielkennwerte im Projekt und die 3. Zeile die gemäß Meilensteinplanung zu erreichenden Werte. Die folgende Zeile zeigt die ermittelten Kennwerte für die beste Variante ohne HIP, die nächste die Zielerreichung in %, bezogen auf die Meilensteinplanung. Dem folgen nach gleicher Systematik die ermittelten Kennwerte und die Zielerreichung für die beste Variante mit HIP (falls vorhanden).

Die Zielabweichung zu schlechteren Werten ist farblich hervorgehoben (grün <5 %, orange 5-25 %, rot >25 %).

Es zeigt sich über alle Werkstoffvarianten, dass die erzielbare Porosität zwar z. T. gemäß Definition stark um >25 % vom Zielwert (0,5 %) nach oben abweicht (rot), doch liegen alle absoluten Werte unter 1 %, was in diesem Entwicklungsstadium ein guter Wert ist.

Beim E-Modul E werden die Zielwerte in den allermeisten Fällen erreicht oder liegen nur leicht darunter (INVAR und AISi40 Grob). Eine Ausnahme ist Super-INVAR, hergestellt über EBM. Es werden nur etwa 50 % erreicht, während LPB-F normale Werte liefert. Der Effekt wurde bereits früher vereinzelt an INVAR Proben nach LPB-F beobachtet und ist noch nicht verstanden, wird aber bei Partner IFAM weiter untersucht.

Bei den Festigkeitskennwerten (Streckgrenze $R_{p0.2}$, Festigkeit R_m) lassen sich ebenfalls in den meisten Fällen die Zielwerte erreichen. Es gibt keine Abweichungen >25 % (rot) bis auf eine Ausnahme (AlCrZr, W5). Hier zeigt sich sehr gut, dass ein stark rissbehaftetes Ausgangsmaterial durch HIP nicht „geheilt“ werden kann, wenn die Risse Verbindung zur Oberfläche haben, d. h. bei HIP keine Druckdifferenz aufgebaut werden kann.

Anders ist das Bild bei der Duktilität. Hier liegen nur INVAR und Super-INVAR (z. T. deutlich bis 200 %) über dem Zielwert mit einer negativen Abweichung nach EBM ohne HIP (W3). Mit HIP (W6) wird der Zielwert dann doch erreicht, wenn auch nur knapp (109 %). Bei AISi40 liegt die Zielerreichung bei unter 50 %, wobei die gemischte Variante noch die deutlich höheren Werte liefert, ggf. ein Effekt der deutlich besseren Pulverqualität. Ein HIP-Effekt ist nicht zu erkennen. Auch bei AlMgCaSc liegt die Zielerreichung unter 50 %, doch ist zumindest ein HIP-Effekt erkennbar. Dies ist bei AlCrZr nicht der Fall, doch werden zumindest 78 % der Ziel-Bruchdehnung erreicht.

Der CTE-Zielwert kann für AISi40 für alle Varianten erreicht werden, während das bei Super-INVAR nur dann möglich ist, wenn die untere Grenztemperatur nicht unter -50°C fällt (s. Figure 7.5).

Insgesamt erreicht somit nur eine Materialvariante (Super-INVAR, LPB-F@IFW, HIP) alle Zielvorgaben (Spalte Ziel-err.: ja), doch sind auch bei anderen Super-INVAR Varianten nach LPB-F die Abweichungen eher gering. Bei AISi40 und AlCrZr kann die Zielerreichung bestenfalls als „halb“ beschrieben werden, während AlMgCaSc zu viele Teilziele nicht erreicht, d. h. nicht nur bei der Duktilität, sondern auch bei Festigkeit und Warmfestigkeit Schwächen zeigt.

Trotzdem kann das Ergebnis der Entwicklungsarbeit insgesamt als gut deklariert werden.

Material / Probenkennung	Meilenstein	Err.- Grad	WB	HIP	Poros. [%]	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]	E [GPa]	CTE [ppm/K]	Bemerkung	Zielerr.	Dem.
INVAR (IFW)					0,50%	270	480	20		140		Standard-INVAR		
Projekt-Vorgabe =		100%			0,50%	270	480	20,0		140		s. TVB		
Meilenstein Ziel	MS 1.2	90%			0,50%	243	432	18,0		126		Funktion		
IN-SAN-IFW-LBM-W1-O2-ZRX			W1	nein	0,65%	285	403	31,5	39,0	122	2,85	Bau @ IFW		
Zielerreichung Meilenstein					77%	117%	93%	175%	---	97%	---	Porosität <1 %	fast	nein
IN-SAN-IFW-LBM-W9-O2-ZRX			W9	ja	0,65%	259	395	31,7	30,3	120	1,38	Bau @ IFW		
Zielerreichung Meilenstein					77%	107%	91%	176%	---	94,9%	---	HIP nicht besser	fast	nein
Super-INVAR (IFW)					0,50%	270	480	20,0		140	0,63	Standard-INVAR		
Projekt-Vorgabe =		100%			0,50%	270	480	20,0		140	0,63	s. TVB		
Meilenstein Ziel	MS 1.2	90%			0,50%	243	432	18,0		126	0,70	Funktion		
SIN-SAN-IFW-LBM-W1-O2-ZRX			W1	nein	0,29%	336	453	30,3	41,7	123	0,90	Bau @ IFW		
Zielerreichung Meilenstein					172%	138%	105%	168%	---	98%	78%	CTE fast erreicht	ja	nein
SIN-SAN-IFW-LBM-W9-O2-ZRX			W9	ja	0,29%	339	464	36,3	34,3	120	0,17	Bau @ IFW		
Zielerreichung Meilenstein					172%	140%	107%	202%	---	95,4%	420%	A ↑ mit HIP	ja	nein
Super-INVAR (CRT)					0,50%	270	480	20,0		140	0,70	Standard-INVAR		
Projekt-Vorgabe =		100%			0,50%	270	480	20,0		140	0,70	s. TVB		
Meilenstein Ziel	MS 1.2	90%			0,50%	243	432	18,0		126	0,78	Funktion		
SIN-SAN-CRT-LBM-W1-O2-ZRX			W1	nein	0,86%	352	459	26,0	33,0	125	1,30	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					58%	145%	106%	144%	---	99%	60%	Porosität <1 %	fast	nein
SIN-SAN-CRT-LBM-W9-O2-ZRX			W9	ja	0,86%	338	453	35,5	34,5	120	0,60	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					58%	139%	105%	197%	---	95,1%	130%	Porosität <1 %	ja	nein
Super-INVAR (IFAM)					0,50%	270	480	20,0		140	0,63	Standard-INVAR		
Projekt-Vorgabe =		100%			0,50%	270	480	20,0		140	0,63	s. TVB		
Meilenstein Ziel	MS 1.2	90%			0,50%	243	432	18,0		126	0,70	Funktion		
SIN-SAN-IFA-EBM-W3-O2-ZRX			W3	nein	0,30%	282	359	11,5	---	71	0,27	Bau @ IFAM		
Zielerreichung Meilenstein					167%	116%	83%	64%	---	57%	263%	E-Modul kritisch	halb	nein
SIN-SAN-IFA-EBM-W6-O2-ZRX			W6	ja	0,30%	316	387	19,7	36,7	64	0,63	Bau @ IFAM		
Zielerreichung Meilenstein					167%	130%	90%	109%	---	51%	111%	E-Modul kritisch	halb	ja
AlSi40 (mix)					0,50%	150	200	5,0	8,0	100	13,0	PM AlSi40		
Projekt-Vorgabe =		100%			0,50%	150	200	5,0	8,0	100	13,0	s. TVB		
Meilenstein Ziel	MS 1.2	90%			0,50%	135	180	4,5	7,2	90	14,4	Funktion		
AS10+S-TLS-BJ295-W1-O2-ZRX-RT			W1	nein	0,72%	183	296	2,0	3,6	93	12,7	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					69%	135%	164%	43%	49%	103%	114%	Duktilität gering	halb	ja
AS10+S-TLS-BJ398-W2-O2-ZRX-mod-RT			W2	ja	0,72%	155	280	1,7	1,0	91	11,7	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					69%	115%	156%	39%	14%	101%	124%	Duktilität kritisch	nein	nein
AlSi40 fein (legiert)					0,50%	150	200	5,0	8,0	100	13,0	PM AlSi40		
Projekt-Vorgabe =		100%			0,50%	150	200	5,0	8,0	100	13,0	s. TVB		
Meilenstein Ziel	MS 1.2	90%			0,50%	135	180	4,5	7,2	90	14,4	Funktion		
AS40F-PLM-BJ299-P1-W1-O2-ZRX-mod-RT			W1	nein	0,86%	159	265	1,2	1,6	89	12,6	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					58%	118%	147%	27%	22%	98%	115%	Duktilität kritisch	nein	nein
AS40F-PLM-BJ399-W2-O2-ZRX-mod-RT			W2	ja	0,86%	163	263	0,9	0,7	89	12,5	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					58%	121%	146%	20%	10%	99%	116%	Duktilität kritisch	nein	nein
AlSi40 grob (legiert)					0,50%	150	200	5,0	8,0	100	13,0	PM AlSi40		
Projekt-Vorgabe =		100%			0,50%	150	200	5,0	8,0	100	13,0	s. TVB		
Meilenstein Ziel	MS 1.2	90%			0,50%	135	180	4,5	7,2	90	14,4	Funktion		
AS40G-PLM-BJ298-P1-W1-O2-ZRX-mod-RT			W1	nein	0,91%	157	256	0,8	1,3	80	12,5	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					55%	116%	142%	17%	19%	89%	116%	Duktilität kritisch	nein	nein
AlMgCaSc					0,50%	450	480	8,0	12,0	68	---	AM Scalmalloy®		
Projekt-Vorgabe =		80%			0,50%	360	384	6,4	9,6	54	---	s. TVB		
Meilenstein Ziel	MS 1.3	100%			0,50%	360	384	6,4	9,6	54	---	Struktur		
ACS-TLS-BJ292_RT-W2-O2-ZRX-RT			W2	nein	0,30%	286	318	1,7	3,1	62	---	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					167%	80%	83%	26%	33%	114%	---	Duktilität kritisch	nein	nein
ACS-TLS-BJ334_150-W4-O2-ZRX-RT			W4	ja	0,30%	328	381	3,2	4,6	64	---	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					167%	91%	99%	50%	48%	118%	---	Fest.&Dukt. gering	nein	nein
AlCrZr					0,50%	484	---	8,0	---	---	---	PM-Literatur		
Projekt-Vorgabe frei def.		---			0,50%	350	430	5,0	10,0	75	---	s. TVB		
Meilenstein Ziel	MS 1.3	100%			0,50%	350	430	5,0	10,0	75	---	Struktur		
ACZ-NAN-BJ284-W0-O2-ZRX-RT			W0	nein	0,10%	361	420	3,9	5,0	81	---	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					500%	103%	98%	78%	50%	108%	---	Duktilität gering	halb	nein
ACZ-NAN-BJ325-W5-O2-ZRX-RT			W5	ja	0,10%	0	147	0,1	0,2	77	---	Bau @ CRT		
Zielerreichung Meilenstein					500%	0%	34%	2%	2%	102%	---	Stark rissbehaftet	nein	nein
Limits Zielerreichung Meilenst.	>95%	75-95%	<75%											

Figure 7.23 Übersicht der besten Ergebnisse aller Werkstoffe ohne/mit HIP und Zielabgleich

7.6 Ergebnisse der Demonstrator-Bewertung (ZfP)

Auf der Basis der Ergebnis-Bewertung in Kapitel 7.5 wurde beschlossen, je einen Demonstrator aus Super-INVVAR (kinematische Halterung für Satelliten) bei IFAM über EBM und AISi40 (Machbarkeits-Bauteil) bei CRT über LPB-F zu bauen und bei CRT über zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) zu untersuchen.

Figure 7.24 zeigt die kinematische Halterung als Zeichnung (links) und 3D-Bild (mitte unten) und den fertig gebauten Demonstrator ohne Bearbeitung.

In Figure 7.25 ist das 3D-Bild des Machbarkeitsbauteils (links) dem real gebauten Teil auf der Bauplatte gegenübergestellt. Die feinen Strukturen sind sehr gut reproduziert.

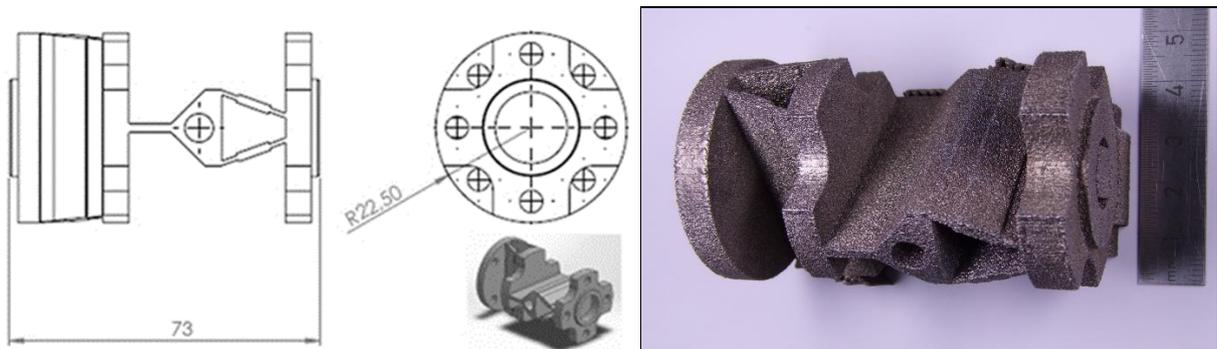


Figure 7.24 Kinematische Halterung aus Super-INVVAR: Zeichnung (links) und EBM-Bauteil

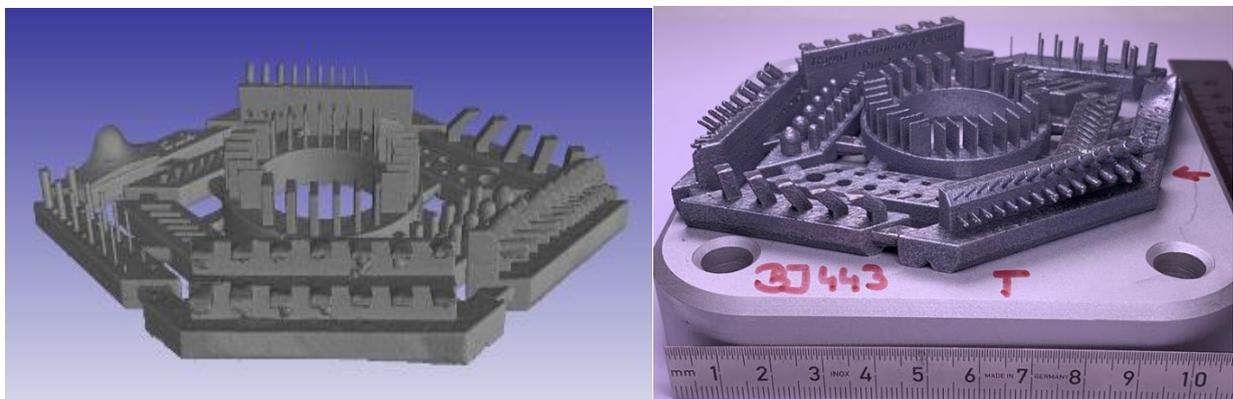


Figure 7.25 Machbarkeitsbauteil aus AISi40: Zeichnung (links) und LPB-F-Bauteil

Beide Bauteile wurden bei CRT zerstörungsfrei über hochauflösende Computer-Tomographie (μ -CT) bewertet.

Das Super-INVVAR Bauteil wurde mit einer Voxelgröße von $78 \times 78 \times 78 \mu\text{m}$ analysiert. 3 Voxel in jede Raumrichtung sind nötig, um geometrische Besonderheiten wie Poren oder Risse als solche zu erkennen. Aufgrund der hohen Dichte und der spezifischen, eher massiven Geometrie ergeben sich Rekonstruktions-Artefakte vor allem im Bereich der beiden Scheiben mit den jeweils 4 Aussparungen (Figure 7.26, links), sodass ein Vergleich zwischen nomineller und aktueller Geometrie fehlerbehaftet ist, wie das farb-kodierte 3D-Bild zeigt (rechts). Geometrie-Abweichungen lassen sich auch in beliebigen Schnitten über Farb- und Stricklängenkodierung darstellen (Beispiel in Figure 7.27).

Neben dem geometrischen Soll-Ist-Vergleich dient die μ -CT-Analyse insbesondere zur Suche nach internen Baufehlern. Figure 7.28 zeigt beispielhaft einen μ -CT-Schnitt mit porösen Bereichen (orange Ovale) und Rissbildung (rotes Rechteck), ggf. aufgrund thermischer Spannungen beim Bau trotz des geringen CTE und der hohen Duktilität. Insgesamt zeigen Bau-Genauigkeit und –Qualität noch Verbesserungspotenzial.

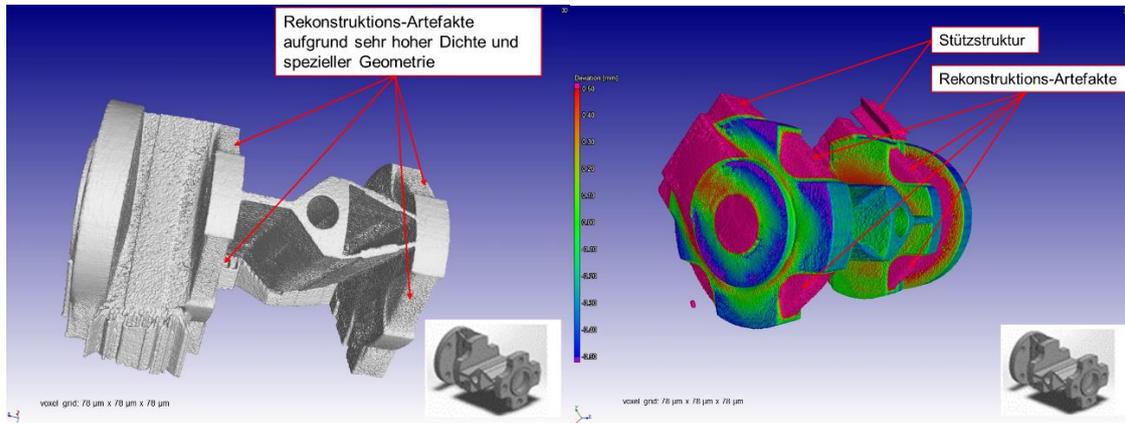


Figure 7.26 μ -CT 3D-Bild des Demonstrators (links) und farbkodierter Soll-Ist-Geometrievergleich

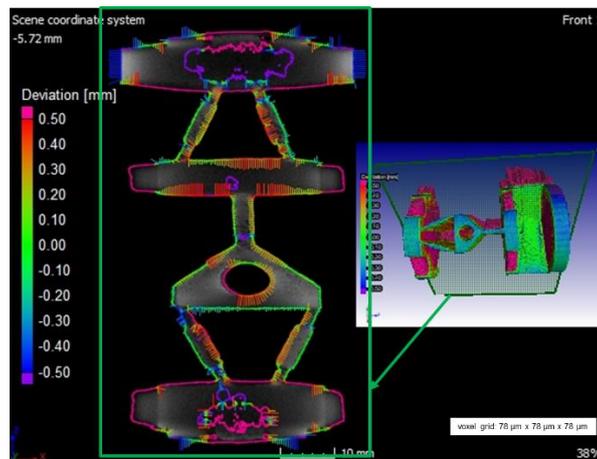


Figure 7.27 μ -CT Soll-Ist-Geometrievergleich durch Farb- & Strichlängenkodierung für beliebige Schnitte

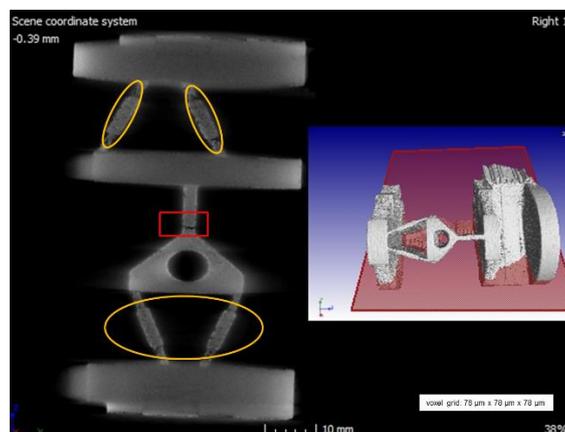


Figure 7.28 μ -CT Schnitt mit porösen Bereichen (orange Ovale) und Rissbildung (rotes Rechteck)

Die Analyse des eher feingliedrigen AlSi40 Demonstrators mit deutlich geringerer Dichte war deutlich einfacher und genauer, wie die sehr detailgetreue Aufsicht in Figure 7.29 (links) zeigt. Sogar der mitgedruckte Schriftzug unten rechts ist gut und scharf zu erkennen. Die Durchsicht (rechts) dient zur Darstellung von Fehlern, insbesondere Porosität (orange Ovale) und Risse (rote Rechtecke). Insbesondere die dünnen Stege stellen in Verbindung mit der geringen Duktilität des Materials eine Schwachstelle dar.

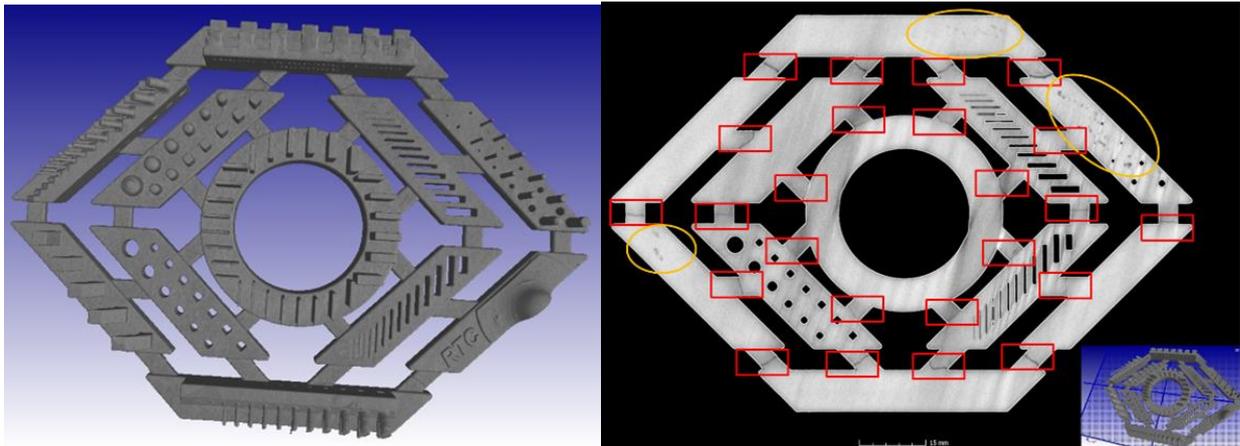


Figure 7.29 μ-CT des AlSi40 Demonstrators als Aufsicht (links) und zur Fehleranalyse (Durchsicht)

Der farbcodierte Soll-Ist-Vergleich in Figure 7.30 (Bild links) zeigt leichte Verzüge in der Bauebene (blaue und rote Flächen, $> \pm 0,5$ mm) und größere Abweichungen vor allem bei den schräg stehenden Elementen, wohingegen senkrecht stehende Strukturen und Aussparungen offenbar sehr präzise gebaut werden können. Genaue lokale Geometriedaten lassen sich mit der Vermessungsfunktion der μ-CT sehr gut darstellen (Bild rechts).

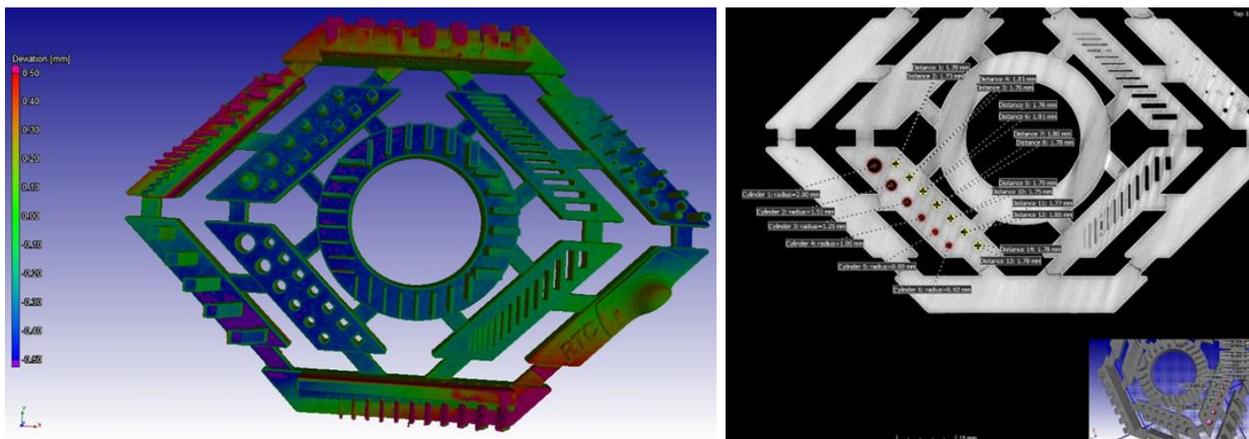


Figure 7.30 μ-CT Soll-Ist-Geometrievergleich durch Farb-Kodierung (links) und Geometrievermessung

8 Sonstiges

8.1 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wurde Corona-bedingt etwas verspätet erstellt. Insgesamt erreichen die Aufwendungen ca. 91 % der ursprünglich geplanten Kosten. Nachfolgend kurze Informationen zu den verschiedenen Kostenarten.

8.1.1 Material (0813)

Die Aufwendungen erreichen ca. 95 % der ursprünglich geplanten Kosten.

8.1.2 Personalkosten (0837)

Die Aufwendungen liegen bei 88 % der ursprünglich geplanten Kosten (s. Kap. 8.1.1).

8.1.3 Reisekosten (0838)

Die Aufwendungen erreichen nur ca. 46 % der geplanten Kosten. Dies liegt daran, dass viele Reisen mit dem Dienstfahrzeug anstatt wie geplant mit dem Flugzeug erfolgten. Viele Besprechungen konnten oder mussten (Corona-bedingt) außerdem ganz ohne Reisetätigkeit als Webex- oder Telefon-Konferenz durchgeführt werden.

8.1.4 Sonstige unmittelbare Vorhaben (0850)

Diese in der ursprünglichen Planung nicht enthaltenen Kosten ergaben sich durch eine betriebliche Umstrukturierung während der Projektphase, verbunden mit einer Ausgliederung der zuvor betriebsinternen Werkstatt an die Airbus-Tochter APWORKS. Dies erklärt zu einem gewissen Teil die geringeren Personalaufwendungen (s. Personalkosten).

8.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Zu Projektbeginn gab es im Konsortium keine Erkenntnisse in Bezug auf die 4 neuen Werkstoffe Super-INVAR, AISi40, AlMgCaSc und AlCrZr im Zusammenspiel mit den als Zukunftstechnologie angesehenen AM-Prozessen. Die Bewertung dieser Werkstoffe für die AM-Fähigkeit war jedoch von hoher Relevanz, um diese vielversprechende Technologie auf eine breitere Basis zu stellen und damit Produkte zu erzeugen, die weniger Ressourcen bei der Herstellung und/oder der Nutzung verbrauchen, d. h. die immer stärker geforderte Nachhaltigkeit in Produktion und Anwendung unterstützen. Somit können die aufgewendeten Eigen- und Fördermittel aufgrund der z. T. erfolgversprechenden Ergebnisse und neuen Erkenntnisse als notwendig und angemessen angesehen werden.

8.3 Relevante Ergebnisse Dritter während der Projektlaufzeit

Die Arbeiten waren sehr fokussiert auf die Bewertung der AM-Tauglichkeit für die 4 neuen Werkstoffe über die ermittelten physikalischen und mechanischen Kennwerte im Rahmen der gut funktionierenden Partnerschaft und der technologischen Fähigkeiten innerhalb des Konsortiums, wobei bei allen 4 Werkstoffen im Rahmen des Konsortiums Neuland betreten wurde. Dies ist vermutlich ein wesentlicher Grund dafür, dass für 3 der 4 Werkstoffe keine F&E-Ergebnisse Dritter bekannt geworden sind, die für die Durchführung des Vorhabens relevant gewesen wären. Einzig für AISi40 AM stellte sich leider erst gegen Ende der Projektlaufzeit im Rahmen der BMBF Abschlussveranstaltung „Additive Fertigung“ am 18. September 2019 im VDMA in Frankfurt heraus, dass am IOF (Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering) in Jena parallele Arbeiten zur Herstellung von Spiegeln für die Raumfahrt laufen. Die Informationen wurden bereits durch Weitergabe an die Airbus-internen Raumfahrt-Bereiche verwertet.

9 Verwertung der Ergebnisse

9.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen

Während der Projektlaufzeit wurde das Materialkonzept AlCrZrX (mit X z. B. Sc, Mn, etc.) durch Airbus/CRT zum Patent angemeldet und ist als Marke „ScanCromAl“ beim Deutschen Patent- & Markenamt eingetragen. Das Materialkonzept AlCaSc ist seit 2018 patentiert und als Marke „CalciScAl“ beim Deutschen Patent- & Markenamt eingetragen.

9.2 Fortschreibung des Verwertungsplans

Als Konzernforschung von Airbus und zentrale Plattform zur Bewertung neuer und Weiterentwicklung bestehender Technologien ist es die Aufgabe von Central R&T (CRT), Innovationen in Kooperation mit den Airbus Divisionen zu erarbeiten und diese zur Optimierung ihrer Produkte zu transferieren. CRT stellt die im Vorhaben erzielten Ergebnisse in erster Linie dem Raumfahrtbereich von Airbus Defence and Space (Ottobrunn, Friedrichshafen) zur Verwertung zur Verfügung, da das Projekt durch diese Division unterstützt wurde, z. B. durch Bereitstellung von AISi40 Pulver. Zusätzlich nutzt CRT die gewonnenen Erkenntnisse zur Verbreitung innerhalb der weiteren Airbus Divisionen.

Dem Unternehmen Airbus helfen die vielfältigen Ergebnisse und Erkenntnisse, Aussagen zur Ressourceneffizienz und zum wirtschaftlichen Potential der AM-Fertigungsverfahren und der untersuchten Werkstoffe zu treffen. Auf dieser Grundlage können einerseits die Demonstratoren zukünftig in Produkte überführt werden. Zum anderen können neue Produkte konzipiert oder bestehende Produkte aus den erfolgversprechenden Werkstoffen struktur- oder funktionsoptimiert werden, wodurch Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit verbessert werden und eine Stärkung der eigenen Marktposition möglich ist.

9.2.1 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Additive Fertigungstechnologien und hier besonders das Laser-Pulverbettverfahren (LPB-F) erobern immer mehr Anwendungsgebiete und Märkte. Es ist davon auszugehen, dass nach erfolgreicher Qualifizierung, gerade durch die doch sehr konservative Luft- und Raumfahrtfertigung, verbunden mit fortschreitender Weiterentwicklung der Laser-Pulverbett-Anlagen (steigende Bauteilgrößen und Baugeschwindigkeiten) viele neue Applikationen möglich werden. Nach Meinung vieler Technologen und Zukunftsforscher wird das Thema „3D-Drucken“ die Fertigung und die Art und Weise, wie sich Fertigung organisiert (Schlagworte: „Produktion 4.0“ und „Internet der Dinge“) in den nächsten 20 Jahren revolutionieren. Die im Rahmen dieses Vorhabens erarbeiteten Erkenntnisse lassen sich in Folgeprojekten an vielen anderen Stellen, auch außerhalb der Luft- und Raumfahrt einsetzen oder auf andere Werkstoffe übertragen.

Für Airbus bedeutet die Bewertung der untersuchten Werkstoffe hinsichtlich AM-Fähigkeit und Ressourceneffizienz bei einhergehenden wirtschaftlichen Vorteilen einen Anschlag für weitere Entwicklungsprojekte, um zu einem breiteren Einsatz der additiven Fertigung entsprechender Bauteile in der Produktion zu kommen. Diese Entwicklungen können sowohl intern, als auch bei oder zusammen mit den Zulieferern (z. B. Premium Aero-tec und APWORKS) oder externen Dienstleistern erfolgen.

9.2.2 Öffentlichkeitsarbeit und projektübergreifende Ergebnisverwertung

Die während der Projektlaufzeit erarbeiteten Ergebnisse wurden in Abstimmung mit, oder durch die Projektpartner selbst über Vorträge auf nationalen Plattformen und internationalen Konferenzen sowie durch entsprechende Publikationen in Fachzeitschriften veröffentlicht. Einzelne Themenschwerpunkte wurden bei CRT teilweise im Rahmen von studentischen Arbeiten (Praktikum/Bachelor/Master) bearbeitet.

10 Fazit

Motivation zur Durchführung des BMBF geförderten Projektes „**ImProVe**“ war der Antritt, das AM-Material-Portfolio auszuweiten hin zu verbesserter Leistungsfähigkeit, geringem Gewicht, geringeren Kosten oder verbesserter Ressourcen-Effizienz durch Reduktion oder Vermeidung kritischer Elemente (z. B. seltene Erden). Dazu wurden die folgenden Werkstoffe ausgewählt und untersucht:

- A) Super-INVVAR: verbesserte Funktion (sehr geringer CTE) im Vergleich zu INVVAR,
- B) AlSi40: verbesserte Funktion (geringer CTE) bei weniger Gewicht zu Super-INVVAR,
- C) AlMgCaSc: Reduktion seltener Erden (Sc) bei vereinfachtem Schmelzverhalten und höherer Hochtemperaturfestigkeit im Vergleich zu AlMgSc,
- D) AlCrZr: Vermeidung seltener Erden (Sc) bei besserer Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturfestigkeit im Vergleich zu AlMgSc.

Die Entwicklung der AM-Prozessparameter (LPB-F) für alle 4 Werkstoffe bzw. 9 Varianten mit je bis zu 7 Wärmebehandlungsvariationen inklusive HIP und statischer mechanischer (A bis D) sowie CTE Analyse (A & B) ergibt folgende wesentliche Ergebnisse:

- A) Sehr gut prozessierbar mit sehr geringem CTE, doch ist dieser nicht stabil unter -50°C,
 - B) Gut prozessierbar mit erwartetem CTE, zeigt aber eine begrenzte Duktilität,
 - C) Gut prozessierbar mit erwarteter HT-Festigkeit, zeigt aber eine begrenzte Duktilität,
 - D) Vereinfachtes Schmelzverhalten, zeigt aber begrenzte Duktilität & RT-/HT-Festigkeit.
- Die thermische Instabilität von Super-INVVAR (A) konnte nicht durch Wärmebehandlungen beeinflusst werden und ist nicht AM spezifisch. Verbesserungen der Werkstoffe C) und D) sind über eine Optimierung der chemischen Zusammensetzung möglich. Für AlSi40 (B) ist eine Optimierung des AM-Prozesses notwendig.

11 Literatur- und Quellenverzeichnis

Während Projekt-Antragstellung & –Laufzeit erfolgte Zugriff auf folgende Literaturstellen:

- [1] K. Schmidtke, F. Palm, "Exceptional grain refinement in directly built up Sc-modified AlMg-alloys is promising a quantum leap in ultimate light weight design", 9th International Conference on Trends in Welding Design, Chicago, 2012.
- [2] G. Scharf, I. Mathy, „Entwicklung von Aluminium-Knetwerkstoffen aus schnell erstarrten Legierungspulvern“, METALL, Heft 6, 41. Jahrgang, 1987, S. 608.
- [3] Aluminum alloy FVS0812 for high temperature / high stiffness applications, Allied Signal data sheet, 1987.
- [4] Aluminum alloy FVS1212 for high temperature / high stiffness applications, Allied Signal data sheet, 1987.
- [5] High Strength High Temperature RS Alloys, RSP Technologies data sheet
- [6] K. Hummert et al, "Nanostructured High Strength Aluminium for Automotive Applications", World Congr. on Powder Metallurgy & Particulate Mat. – paper A, 2008.
- [7] H. Buhl, "Advanced Aerospace Materials", Springer Verlag, 1992, S. 50-52.
- [8] Liebermann, "Rapidly Solidified Alloys: Processes-Structures-Properties-Applications", CRC Press, 1993, S. 348-349.