

Luftfahrtforschung und –technologie

Abschlussbericht

Advanced Turbine Center Frame mit neuen Bauweisen (Adv-TCF)

Förderkennzeichen 20T1502

Laufzeit: 01.10.2015 bis 31.12.2019

Berichtersteller: Dr. Lothar Heller



MTU Aero Engines AG

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

München, Juli 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Zusammenfassung.....	5
2.1	Projektstrukturplan.....	5
2.2	Erreichte Ergebnisse	6
2.2.1	HAP1 Advanced Auslegung.....	6
2.2.2	HAP2: Neue Werkstoffe & Bauweisen für Panel, Strebe, Gehäuse.....	10
3	Technische Darstellung der Arbeitspakete.....	20
3.1	HAP1 Advanced Auslegung	20
3.1.1	AP1.1 Integrierte Aero-Auslegung TCF	20
3.1.2	AP1.2 alternative Designkonzepte TCF	26
3.2	HAP2: Neue Werkstoffe & Bauweisen für Panel, Strebe, Gehäuse.....	39
3.2.1	AP2.1 Prüfverfahren CMC-Panels	39
3.2.2	AP2.2 MAR M247-Panels Simulation Porosität	46
3.2.3	AP 2.3 TCF-Strebe: Hochtemperaturbelastetes Strukturbauteil in SLM	53
3.2.4	AP 2.4 TCF-Gehäuse: additive Herstellung Laserauftragsschweißen (LAS).....	64
4	Literaturverzeichnis	73
5	Abkürzungsverzeichnis	73

1 Einleitung

Als eines der höchst belasteten Strukturbauteile ist der Turbine Center Frame (TCF), Verbindungs- und Versorgungselement zwischen Hochdruckwellenlagerung und Gehäuse, enormen thermomechanischen Herausforderungen ausgesetzt. Um weiter die ambitionierte Gewichtsvorgabe und Effizienzsteigerung im Bereich des Moduls TCF zu erreichen, wurden innovative Ansätze in Auslegung und Konzeption, sowie entsprechende Entwicklungen bzgl. Werkstoffen und Bauweisen in diesem Fördervorhaben angegangen. Diese unterstützen die Zielsetzungen gemäß Flightpath 2050.

Durch eine Weiterentwicklung der Auslegungsverfahren und Untersuchung innovativer Konzepte wurde das Strukturgewicht bei gleichzeitig verbesserter Bestimmung der aerodynamischen Zustandsgrößen reduziert. Durch neue Bauweisen und Werkstoffe können neben der Flow-Path Hardware auch Streben und Gehäuse in ihren Eigenschaften und ihrer Herstellung verbessert werden.

Das Vorhaben besteht aus zwei Hauptarbeitspaketen.

- **HAP1 „Advanced Auslegung“**

Hier wurden zum einen die Aussagegenauigkeit der CFD Modellierung hinsichtlich der Modellierung der drallbehafteten Nachlaufeffekte aus der Hochdruckturbine (HDT) verbessert und damit Strouhal- und Durchflusszahl- abhängige Effekte auf TCF Profile realistischer abgebildet (AP1.1). Zum anderen konnten alternative Designs die Masse des TCF deutlich reduzieren. Diese Arbeiten sind durch die Erweiterung der Simulation der komplexen Innenströmung auf 3D-CFD mit unstrukturierter Vernetzung eng verknüpft, um zusätzlich Kühl- und Sperrlufteinsparung zu realisieren (AP1.2).

- **HAP2 „Neue Werkstoffe und Bauweisen für Panel, Strebe und Gehäuse“**

In diesem Hauptarbeitspaket wurden geeignete Prüfverfahren bewertet, um Schadensstrukturen an CMC als Basis für eine verbesserte Lebensdauerbewertung strukturiert zu bewerten (AP2.1). Die LCF-Lebensdauervorhersage für MAR M247 wurde durch die erweiterte Simulation von Porositätseffekten im Legierungsaufbau verbessert und konnte um ein FEM basiertes Rissentstehungs-

modell erweitert werden (AP2.2). Für die SLM basierte Herstellung von statischen Triebwerksbauteilen aus IN718 wurde bei gleicher Werkstoffqualität die Aufbaurate gesteigert und die Einsatzreife mit dem Referenzbauteil TCF erreicht (AP2.3). Durch Laserauftragsschweißen konnte ein Weg aufgezeigt werden, Wertschöpfung von der Herstellung des Schmiederohlings hin zur Fertigbearbeitung zu verlagern und damit das Gewicht des Schmiederohlings zu reduzieren. Insbesondere große Gehäusebauteile können so ressourceneffizienter gefertigt werden (AP2.4).

Auflistung der Arbeitspakete mit durchführenden Teilprojektleitern:

Hr. Behre	AP1.1: Integrierte Aero-Auslegung TCF
Hr. Dr. Heller	AP1.2: Alternative Designkonzepte TCF
Hr. Dr. Albert	AP2.1: Prüfverfahren CMC Panels
Hr. Weiß	AP2.2: MAR M247-Panels: Simulation Porosität
Hr. Dr. Jakimov	AP2.3: Hochtemperaturbelastete Strebe
Fr. Mayer	AP2.4: TCF-Gehäuse: Additive Herstellung LAS

2 Zusammenfassung

2.1 Projektstrukturplan

Abbildung 1 zeigt den Projektstrukturplan des Vorhabens.

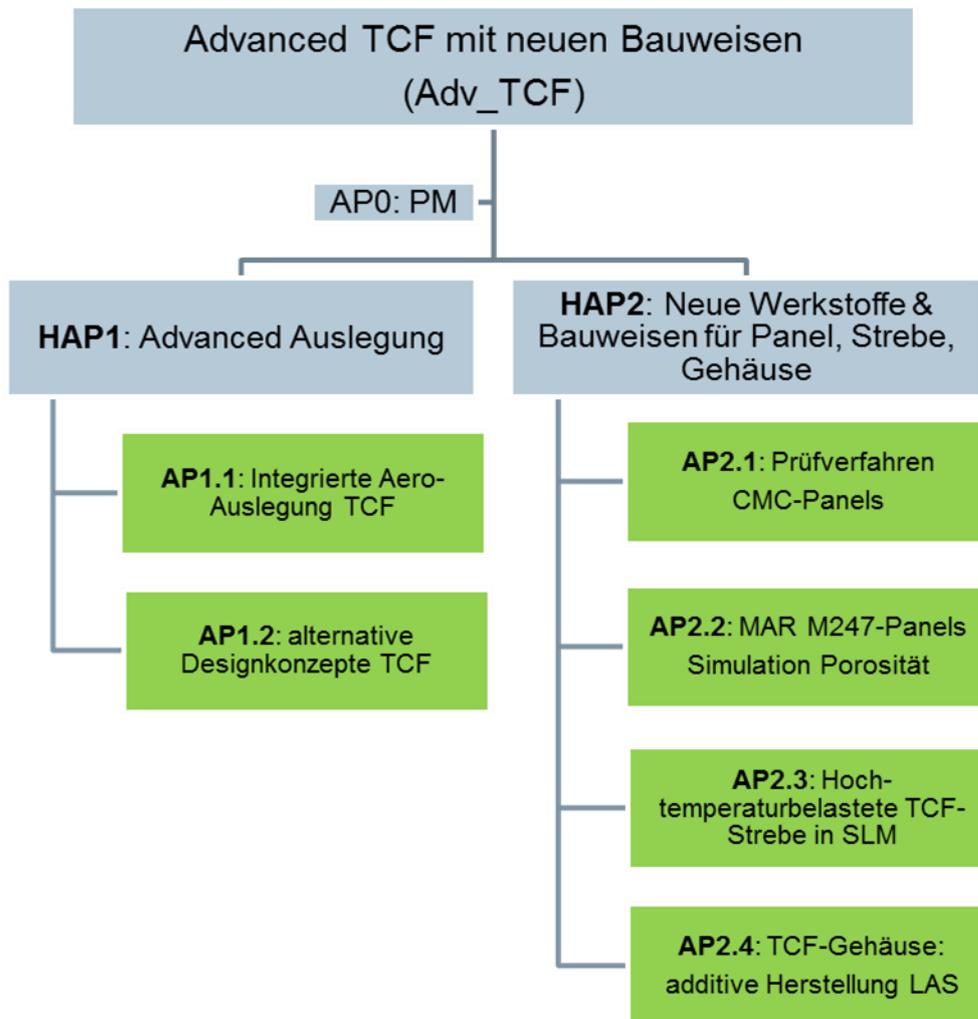


Abbildung 1: Projektstrukturplan

In diesem Projekt waren folgende Hochschulen im Unterauftrag involviert:

AP1.1: Integrierte Aero-Auslegung TCF

TU Graz – Durchführung der Ringgitterkaskasdentests

Uni Hannover – Turbulenz- und Transitionsuntersuchungen mit erweiterten Modellen in TRACE

AP2.1

IKTS-Dresden – Messung physikalischer Daten CMC

Universität Augsburg – Durchführung von Zugversuchen mit Schallemissionsanalyse an CMC Proben

AP2.4

ILT Aachen - Parameteranpassung und Erstellung von Werkstoffproben

Fraunhofer IWS Dresden - Parameteranpassung und Erstellung von Werkstoffproben

2.2 Erreichte Ergebnisse

2.2.1 HAP1 Advanced Auslegung

2.2.1.1 AP1.1 Integrierte Aero-Auslegung TCF

Erreichte Ergebnisse

Durch die im Rahmen des Vorhabens gewonnen Messdaten konnte ein vertieftes Verständnis der wesentlichen Phänomene erreicht und darauf basierend eine verbesserte Auslegungsstrategie für TCF-Geometrien erarbeitet werden. In Kombination mit der verbesserten Vorhersage der TCF-Durchströmung ist überdies eine Optimierung der Niederdruckturbine (NDT) möglich, da die Strömungszustände in der NDT signifikant von der Abströmung des TCFs beeinflusst werden.

AP1.1.1 Rig Montage und Instrumentierung

Für die Tests wurde der Ringgitterversuchsstand AnCa an der TU Graz verwendet. In Ergänzung zu früher durchgeführten Messungen wurde zwischen IGV (Inlet Guide Vane) und TCF ein rotierendes Stabgitter montiert, um instationäre Effekte, in Analogie zur Hochdruckturbine, zu erzeugen und ihre Auswirkung auf die TCF-Durchströmung

zu bewerten. Zusätzlich wurde in Erweiterung der Messtechnik eine instationär messende Totaldrucksonde eingesetzt.

AP1.1.2 Rig-Test

Es wurden umfassende Messungen mit instationären Effekten durchgeführt, die in einer Datenbank für die weitere Auswertung zur Verfügung stehen.

Die anfangs geforderten Drehzahlen konnten wegen Beschränkungen des Antriebsmotors bzw. des sicheren Betriebens des Rigs nicht vollumfänglich umgesetzt werden. Die vorhandene Datenbasis liefert aber wichtige Erkenntnisse für die weitere Validierung der CFD.

AP1.1.3 Validierung und Analyse

Die im Rig-Test (AP1.1.2) gewonnenen Daten wurden weiter aufbereitet und für die Validierung der CFD und Analyse der Strömung verwendet.

Die analysierten Messdaten zeigten, dass sich Störungen durch das Stabgitter auf die Messung hinter dem Stabgitter des Totaldrucks auswirken. Durch die sehr tiefen Nachläufe im Totaldruck (große Druckdifferenz) der Stäbe konnte der instationäre Charakter nicht von der stationären Messtechnik erfasst werden. Die Folge ist ein zu hoher Totaldruck in der Zuströmung des TCFs, der unphysikalisch hohe Druckverluste suggeriert. Die Validierung erfolgte aber unter Verwendung der angrenzenden Stufenmessungen. Weiterhin zeigte sich, dass das zeitlich wechselnde Strömungsfeld eine stabilisierende Wirkung auf die TCF-Gehäuseströmung hat und somit Ablösungen, die in früheren Untersuchungen ohne periodische Anregung zu sehen waren, verschwinden.

AP1.1.4 Neuauslegung mit validierter Modellierung

Die Studien an der Ringgitterkaskade AnCa mit und ohne Speichenrad haben gezeigt, dass die Berücksichtigung der Instationarität der Zuströmung im Design-Prozess eines TCFs zwingend erforderlich ist. Eine Neuauslegung darf dabei nicht unabhängig von den angrenzenden Modulen angegangen werden. Es wurde auf Basis verschiedener Rechnungen mit dem validierten Modell eine Korrelation für eine erste grobe Auslegung des TCF erarbeitet. Für eine vollumfängliche Neuauslegung muss das komplexe Zusammenspiel der benachbarten Module berücksichtigt werden.

2.2.1.2 AP1.2 alternative Designkonzepte TCF

Erreichte Ergebnisse

AP1.2.1 Aufbereitung der Erfahrung

In mehreren Workshops zu alternativen Designkonzepten mit Experten aus unterschiedlichen Fachbereichen wurden die verschiedenen Bereiche des gesamten TCF-Moduls hinsichtlich konstruktivem und fertigungstechnischem Verbesserungspotential hinterfragt. Es konnten 6 Bereiche näher identifiziert und erste Konzeptideen daraus abgeleitet werden:

- Studie 1: Nozzle Support Cone
- Studie 2: Nozzleanbindung an Flow Path Hardware (FPH)
- Studie 3: Ground Overlap mit Verschleissausgleich
- Studie 4: Windage Screen /Trennung von HPT Bereich und LPT im Innenbereich)
- Studie 5: Kraftleitung des Hub-Strut Case
- Studie 6: Aufhängung Panel und Fairing

Für die verschiedenen Bereiche sind unterschiedlich aufwändige Ideen entwickelt worden, die die Ziele hinsichtlich Gewicht, Lebensdauer und Wartungsfreundlichkeit unterstützen. Die weitere Untersuchung erfolgte dann im Arbeitspaket AP1.2.2.

AP1.2.2 Design und analytische Bewertung der Konzepte

Für jede Studie wurden bis zu vier Konzeptideen ausgewählt und weiter detailliert.

Näher beleuchtet werden hier die Ergebnisse aus der Studie 1 (Nozzle Support Cone) und 4 (Windage Screen).

Für alle Studien wurden alternative Konzepte erarbeitet, die hinsichtlich Kosten und Gewicht einen Beitrag liefern konnten. Da die Konzeptstudien vornehmlich das Grundkonzept eines Bestands-TCF als Randbedingung hatten, konnte keine signifikante Reduzierung des Gewichts erzielt werden. Die Studien geben aber Hinweise, bei zukünftigen Designs eines TCF diese Bereiche gezielt anzupassen, um dann das volle Potenzial der erarbeiteten Konzepte heben zu können.

AP1.2.5 Analytische Bewertung der TCF Innenströmung

Die Bauteiltemperaturen und die daraus resultierenden thermischen Spannungen haben einen signifikanten Einfluss auf die Masse und die Lebensdauer eines TCF-Moduls. Zur Bestimmung der Bauteiltemperaturen wurden bisher die thermischen Randbedingungen auf der Kühlluftseite innerhalb der Fairing-Kavität noch mittels einfacher 1D-Korrelationen bestimmt, die mit entsprechend aufwendig instrumentierten Tests kalibriert werden mussten. Das Strömungsbild in der Kavität wurde dabei auf Basis von Erfahrungen abgeschätzt.

In Realität erweisen sich die Luftströmungen in der TCF Fairing-Kavität als hochkomplex. Große Querschnittsflächen und äußerst geringe treibende Druckdifferenzen in Kombination mit verhältnismäßig großen Leckagen und einer komplexen Geometrie ergeben ein komplexes, instationäres 3D-Strömungsbild inklusive großer Wirbelstrukturen und Rückströmungen. Das reale Strömungsbild wurde durch hochauflösende 3D CFD Verfahren erfasst und damit die Thermalmodellierung der Fairing-Kavität eines TCF-Modells verbessert, um die Genauigkeit der Temperaturvorhersage zu erhöhen.

Zur Erfassung der realen 3D-Strömung sind einige Schritte erforderlich, beginnend mit der Entwicklung einer Vernetzungsstrategie. Diese Strategie schließt die Bestimmung von Prismenschichten und Netzfeinheit sowie die Handhabung des sogenannten „Ground Overlap“, also des Spalts zwischen Fairing und Panels, mit ein. Das ideale Netz ist ein Kompromiss aus ausreichender Feinheit, z.B. für die Auflösung der Grenzschicht, und einer möglichst geringen Anzahl an Zellen, um Einschnitte bei der Rechenzeit zu vermeiden.

Nach einer ausführlichen Netzstudie wurden im zweiten Schritt die Randbedingungen festgelegt und variiert zum Zweck der Modellrobustheitsbestimmung. Dabei wurden Sensitivitäten der Randbedingungen, z.B. Luftleckagen, Wandtemperatur und die Auswirkung von freier Konvektion, auf das Ergebnis der Analysen untersucht.

Zur Bewertung der Vielzahl an Rechnungen und Studien wurde ein automatisches Auswertungsverfahren mit Hilfe einer kommerziellen CFD-Postprozessing-Software entwickelt. Das Verfahren ermöglicht eine schnelle Analyse des Strömungsfeldes und einen schnellen Vergleich verschiedener Strömungsfelder untereinander. Neben der

Strömungsfeldbewertung wurden verschiedene Methoden zur Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten an den Innenwänden der Kavität untersucht und bewertet. Als letzter Schritt wurde ein 3D CHT-Modell entwickelt und eine konjugierte Berechnung der Innenströmung und Bauteiltemperatur im Fairing aufgesetzt. Das Rechenergebnis wurde mit den einfachen CFD- und FE-Modellrechnungen verglichen. Es zeigte sich, dass wegen des erweiterten Aufwandes bei geringer Ergebnisänderung derzeit die CHT-Berechnung für ein TCF-Modul sich nicht lohnt.

Es steht somit ein Prozess zur Verfügung, um mit optimalem Aufwand bezüglich Rechen- und Auswertungszeit die Innen-Strömung in einem TCF zu berechnen und für die Oberflächentemperaturberechnung zu verwenden.

2.2.2 HAP2: Neue Werkstoffe & Bauweisen für Panel, Strebe, Gehäuse

2.2.2.1 AP2.1 Prüfverfahren CMC-Panels

Erreichte Ergebnisse

AP2.1.1. Entwicklung Prüfstrategie

Zunächst wurden bestehende statische und dynamische Prüfverfahren für CMC adaptiert, um die besonderen Eigenschaften des Werkstoffes und die notwendigen Umfänge testen zu können. Zusätzlich wurden Sonderversuchstechniken identifiziert, die zur zuverlässigen und robusten Untersuchung der Versagensmechanismen in CMC notwendig sind. Hierzu gehören

- die Digitale Bildkorrelation (DIC, z.B. Aramis von GOM)
- die Schallemissionsanalyse
- Mikrostrukturanalysen mittels Röntgen Computertomographie

Die Prüfstrategie wurde entwickelt, um sowohl in-situ während der Prüfung als auch ex-situ in Nachuntersuchungen nach Abschluss der Prüfung die mikrostrukturellen Abläufe während des Versagens untersuchen zu können.

AP2.1.2. Aufbau der Prüfkapazitäten

Für die erfolgreiche standardisierte Prüfung der CMC wurde eine angepasste, normgerechte Probenform erarbeitet. Diese unterscheidet sich für Ox/Ox und SiC/SiC, um

der unterschiedlichen Schubbeständigkeit der Werkstoffe Rechnung zu tragen. Die erarbeiteten Formen wurden erfolgreich an verschiedenen Prüfstellen getestet und ein Versagen im relevanten Bereich, der durch die Norm vorgegeben ist, wurde nachgewiesen.

Die Versuchsdurchführung wurde auf Hochtemperaturbedingungen erweitert und erfolgreich getestet. Die digitale Bildkorrelation (Aramis) wurde erprobt und ausgewertet. Damit steht eine Messmethode zur Bewertung lokaler anisotroper Phänomene zur Verfügung und kann zur weiteren analytischen Bewertung wichtige Hinweise bezüglich des Werkstoffverhaltens geben.

AP2.1.3. Ermittlung von Werkstoff-Kennwerten

Es wurden mit den entwickelten Probengeometrien Werkstoffproben hergestellt. Diese wurden zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte verwendet. Zunächst wurden normgerechte Zugversuche bei hohen Temperaturen durchgeführt. Mit Hilfe der neuen Prüf- und Auswertesystematik konnten unabhängig von der Prüftemperatur für die untersuchten CMC-Werkstoffproben (Ox/Ox) Zugfestigkeiten im Bereich von 220- 250 MPa und Bruchdehnungen im Bereich 0,35 - 0,4% ermittelt werden.

Die gewonnenen Werkstoffkennwerte wurden als Input für die analytische Bewertung der Zugversuche verwendet. Ein Modell der Probenformen wurde in Abaqus aufgesetzt und die ermittelten orthotropen Eigenschaften übernommen. Im linear elastischen Bereich lässt sich dabei eine zufriedenstellende Übereinstimmung erkennen und das Materialverhalten von Ox/Ox und SiC/SiC kann gut voneinander unterschieden werden.

AP 2.1.4 Schallemission bei Zugversuchen

In drei Phasen konnte das Schallemissionsverhalten für CMC Werkstoffe getestet und adaptiert werden.

Zunächst konnte in einer Vorstudie die generelle Anwendbarkeit der Schallemissionsanalyse zur Messung des signifikanten Onset der Schallemission und damit der Matrix cracking stress bei CMC gezeigt werden. Diese Messung wurde mit verschiedenen Variationen der Bestimmung des Proportional Limits verglichen.

In der zweiten Phase wurde dies auf ausgelagerte Proben erweitert. Hierzu wurden bei hohen Temperaturen CMC-Proben gealtert. Mit Hilfe der Schallemission zeigten

sich eindeutig eine Materialveränderungen, die mit rein mechanischen Messungen nicht sichtbar waren. Damit wurde erfolgreich das Potential der Schallemissionsanalyse in der Bewertung von Alterungseffekten in CMC nachgewiesen.

In der dritten Phase wurde die Statistik um weitere Ox/Ox Proben erweitert und erste Versuche an SiC/SiC durchgeführt. Dabei konnten Unterschiede in der Prüfung der beiden Materialklassen erkannt werden und nötige Weiterentwicklungen für eine zukünftige erfolgreiche Prüfung an SiC/SiC aufgezeigt werden.

2.2.2.2 AP2.2 MAR M247-Panels Simulation Porosität

Erreichte Ergebnisse

Die Lebensdauer von statisch und dynamisch belasteten Bauteilen, wie es die Panels der Flow Path Hardware des TCF sind, wird stark negativ von der Rissbildung beeinflusst. Diese Risse entstehen vornehmlich an Ungängen, die bei Gussteilen vornehmlich aus Fremdkörnern und Poren bestehen.

Dazu wurden die beiden Bereiche Fremdkörper und Poren und ihr Einfluss auf die Rissbildung untersucht.

AP2.2.1 Materialbeschaffung und Probenversuche

Poren:

Es wurden gezielt porenbehaftete Gussproben aus MAR-M247 hergestellt, welche möglichst typische Poren aufweisen. Daraus wurden HCF- und LCF Proben herausgearbeitet und erfolgreich getestet und damit die Belastungsniveaus ermittelt. Für die bruchauslösenden Poren wurden die Bruchflächen aufwändig nachuntersucht und dokumentiert. Somit steht eine qualitativ hochwertige Datenbank nachuntersuchter Bruchflächen zur Verfügung, die im weiteren Verlauf für die Bewertung und Modellierung verwendet wurde.

Kornstrukturfehler:

Um den Einfluss von Kornstrukturabweichungen auf die Ermüdungseigenschaften zu untersuchen wurden Materialien beschafft, aus denen Proben mit den entsprechenden

Gussfehlern hergestellt werden konnten. Bei den Werkstoffen handelte es sich um typischerweise im Turbine Center Frame eingesetzte Nickel-Gusslegierungen. Mit dem bereitgestellten Material konnten ausreichend viele Probenversuche durchgeführt werden, um die geplanten Prüfmatrizen abdecken zu können. Die Ermüdungslebensdauer der Proben wurde im LCF- (low cycle fatigue) und HCF- (high cycle fatigue) Schwingversuchen getestet. Anschließend wurden die Proben mittels Metallographie, REM (Rasterelektronenmikroskopie) und EBSD (electron backscatter diffraction) nachuntersucht, um die Ausrichtung der Körner und Seigerungen zu bestimmen. Die Ergebnisse wurden für den Aufbau der FEM Modelle verwendet.

AP2.2.2 Bewertung und Modellierung

Poren:

Die durchgeführten Probenversuche wurden ausgewertet und die Ergebnisse für den Vergleich mit der Analytik verwendet. Dabei wurde besonderer Fokus auf das Verfahren der klassischer Rissfortschrittsrechnung gelegt. Dieses basiert auf dem Paris-Gesetz unter Berücksichtigung von ElHaddad und lieferte folgende Ergebnisse:

- Im Bereich geringer Lebensdauern ist die berechnete Lebensdauer konservativ, d. h. zu kurz. Hier dominieren plastische Effekte, die mittels CTOD oder J-Integral bewertet werden können.
- In einem mittleren Bereich stimmen die gerechneten Ergebnisse mit den gemessenen Ergebnissen gut überein.
- Im Bereich langer Lebensdauern weicht die Analytik von den Messungen ab. Diese Divergenz erklärt sich dadurch, dass die Rissinitierung die Lebensdauer bestimmt.
- Die gerechneten Lebensdauern für Karbide sind systematisch zu lange (nicht konservativ), die gerechneten Lebensdauern für Poren konservativ (zu kurz).
- Die Rechnung liefert für viele gebrochene Proben eine unendliche Lebensdauer, da der Schwellenwert unterschritten ist.
- Der ElHaddad-Wert zur Berücksichtigung des größenabhängigen Schwellwertes muss an die Prüfbedingungen angepasst werden. Nur so ist sichergestellt,

dass bei experimentell gebrochenen Proben eine Lebensdauer gerechnet werden kann.

Um gesamten Bereich der Lebensdauer (LCF und HCF) abzubilden, muss ein kombinierter Ansatz verwendet werden. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Verwendung der experimentell bestimmten Lebensdauer für kleine Fehler mit anschließender Rissfortschrittsrechnung. In diesem Fall ist die Rissinitiierung in der Lebensdauerkurve enthalten.
- Bestimmung der Lebensdauerkurve aus einer Rissfortschrittsrechnung für kurze Lebensdauern und Bestimmung der Dauerfestigkeit aus Schwellwertversuchen
- Ermittlung einer Kurve „Rissinitiierung“ als Funktion der Spannung basierend auf den Ergebnissen. Die Rissinitiierung wird zu der analytisch bestimmte Lebensdauer addiert.

Kornstrukturfehler:

Bei der Simulation kamen Rissentstehungs-, Rissfortschritts- und Lebensdauermodelle sowie FEM (Finite Elemente Methode) zum Einsatz. Die Lebensdauer der Proben ließ sich mit kalibrierten Werkstoffmodellen im Rahmen der angestrebten Genauigkeit gut vorhersagen.

AP2.2.3 Übertragung auf Bauteilbewertung

Poren:

Die erarbeiteten Ansätze wurden erfolgreich im Prozess der Bauteilbewertung angewendet. Es wurde gezeigt, dass diese Ansätze für die Bauteilbewertung funktionieren. Aktuell werden die Ansätze parallel zum klassischen Ansatz angewendet, um weitere Erfahrung für die Bauteilbewertung zu erhalten und so die Voraussetzung für einen potenziellen Einsatz im produktiven Designprozess zu schaffen.

Kornstrukturfehler:

Die Lebensdauer-Ergebnisse wurden für die Bewertung von Bauteilen aufbereitet. Hierzu wurden Modellkurven an die experimentellen Daten angepasst und für die

strukturmechanische Bauteilbewertung bereitgestellt. Für spezifische Kornstrukturabweichungen wurden besondere Bewertungsansätze erarbeitet und mittels der experimentellen und simulativen Ergebnisse validiert. Damit stehen Lebensdauerkurven zur Verfügung, mit denen die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen abhängig von der lokalen Spannung bewertet werden können.

2.2.2.3 AP 2.3 TCF-Strebe: Hochtemperaturbelastetes Strukturbauteil in SLM

Erreichte Ergebnisse

AP2.3.1 Datenermittlung

Mit diesem Arbeitspaket wurde die Datenbasis für die Werkstoffdaten des Werkstoffs IN718 SLM erweitert. Fokus lag auf Tests, um die Lebensdauervorhersage des Werkstoffs bei hohen Anwendungstemperaturen unter Last zu verbessern.

Die Gefügebeschaffenheit von additiv hergestellten Werkstoffen unterscheidet sich von Werkstoffen, die durch Gießen oder Schmieden hergestellt worden sind, erheblich. Kornform, Korngröße, Kornorientierung und die Verteilung der Gefügebestandteile hängen wesentlich von den additiven Herstellparametern (Energieeintrag) ab. Die Gefügebeschaffenheit zeigt eine merkliche Anisotropie. Die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften sind deshalb auch anisotrop. Für das Kriechverhalten wurde ebenfalls eine entsprechende Anisotropie erwartet.

Die Lebensdauervorhersage der zeit- und temperaturabhängigen plastischen Verformung wurde für unterschiedliche Lastniveaus an 44 Kriech- & Zeitstandversuchen ermittelt. Die Untersuchungen dokumentieren die Dehnungen von 0,1% bis zum Bruch. Insgesamt erfolgte die Ermittlung auf 3 unterschiedlichen Lastniveaus mit einer Laufzeit von bis zu 600h. Sämtliche Proben wurden im Anschluss fraktografisch untersucht und Ihre Gültigkeit bewertet.

Aufgrund der untersuchten Anisotropie der Mikrostruktur sowie der unterschiedlichen statischen Festigkeiten in Abhängigkeit der Richtung, erfolgte die Charakterisierung der Kriech- und Zeitstandfestigkeit an Proben aufgebaut in vertikaler, horizontaler und 45° Richtung zur Bauplattform.

Die Ergebnisse zeigen die bereits erwartete Anisotropie des additiv gefertigten Materials. Die ertragbaren Spannungen bis zum Bruch in Abhängigkeit der Richtung liegen hierbei je nach Aufbaurichtung über bzw. unter der von Schmiedematerial.

AP2.3.2 Desinganpassung

Das Original-Strebendesign, optimiert für die Herstellung mittels Guss, wurde für die Herstellung mittels SLM untersucht. Dabei mussten die Aspekte der anisotropen Werkstoffkenngrößen und die Rahmenbedingungen des additiven Aufbaus berücksichtigt werden. Beschränkend waren hierbei die maximale Aufbauhöhe der SLM-Maschine, die Ausrichtung des Bauteils, um weiterhin die Belastbarkeit sicherzustellen, die Vermeidung von Überhängen, um Nacharbeiten zu vermeiden sowie Optimierung von Supportstrukturen für eine optimale Aufbaugeschwindigkeit. Einschränkend war auch das Bestreben, das Bauteil möglichst nah am Originaldesign zu belassen und größere Designoptimierungen für SLM nicht zu berücksichtigen.

Es wurde ein optimiertes Design gefunden, das diese Aspekte berücksichtigt. Die Strebe wurde in einer Mischung aus Roh- und Fertigteil konstruiert und in einem Probeaufbau bestätigt.

AP2.3.3 Strukturmechanische Bewertung

Parallel zu den Designanpassungen wurde das Design strukturmechanisch bezüglich Lebensdauer unter Betriebslast bewertet und kritische Bereiche herausgearbeitet. Für die Berechnungen mussten Werkstoffkennwerte für geschliffene Oberflächen verwendet werden, da sonst die geforderte Zyklenzahl nicht erreicht wurde. Kleinere Anpassungen in kritischen Bereichen durch Materialaufdickung und modifizierte Radien wurden im Design (AP2.3.2) berücksichtigt. Das Festigkeitspotential für eine Anwendung des Bauteils ist somit gegeben, sofern die Oberfläche mit einem geeigneten Verfahren nachbearbeitet wird.

AP2.3.4 Herstellung Demo-Bauteil einer Strebe mittels SLM

Die Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit/Abstimmung mit den Arbeitspaketen 2.3.2 und 2.3.3 durchgeführt. Entscheidend waren die Berücksichtigung der maximalen Aufbauhöhe der SLM-Maschine, die Ausrichtung des Bauteils, die Vermeidung von

Überhängen, um Nacharbeiten zu vermeiden sowie Optimierung von Supportstrukturen für eine optimale Aufbaugeschwindigkeit. Auf diese Weise konnte ein Demo-Rohrteil hergestellt werden. Die Rauigkeitsanforderung sowohl innen als auch außen (siehe AP2.3.3) konnten durch ein neu entwickeltes Gleitschleifverfahren eingehalten werden. Mit Hilfe dieses Oberflächenverfahrens konnten die von der Strukturmechanik geforderte Oberflächenrauigkeit erfüllt werden.

Auf Basis dieser Ergebnisse konnte jetzt ein AM Demobauteil der Strebe in einer seriennahen Umgebung die komplette Prozesskette von der AM Herstellung bis zur Rohreifertigungsbearbeitung durchlaufen.

AP2.3.5 Einfluss Pulveralterung auf Materialqualität

Ziel dieses Arbeitspakets war es, in einem ersten Schritt grundlegende Erkenntnisse über den Einfluss von wiederverwendetem Pulver zu gewinnen. Dazu wurde Pulver aus IN718 beschafft und die originäre Pulverqualität dokumentiert. Mit diesem Pulver wurden in der ersten Verwendung Proben aufgebaut, um die initiale Qualität der Proben hinsichtlich Werkstoffkenngrößen und Fehlern zu erhalten. Das verbleibende Pulver wurde für weitere Aufbauten verwendet.

Dazu wurde das nicht verschweißte Pulver mehrfach, ohne Beimischung von Neumaterial, gesiebt, analysiert und wiederverwendet. Bei der Analyse des Pulvers wurden folgende Eigenschaften überprüft: Partikelgröße und deren Verteilung, Pulvermorphologie sowie chemische Veränderungen.

Bei den Analysen konnten über 11 Iterationen weder bei der Korngrößenverteilung, noch bei der Partikelgeometrie Veränderungen festgestellt werden. Ein signifikanter Trend wurde lediglich bei der Sauerstoffaufnahme sichtbar, die sowohl im Pulver, als auch in verbauten Material ermittelt wurde. Bei Sicherstellung eines stabilen Prozessablaufes und Überwachung des Sauerstoffanteils im Pulver kann aufgrund der ermittelten Ergebnisse das IN718 Pulver im AM-Prozess mehrfach wiederverwendet werden.

2.2.2.4 AP 2.4 TCF-Gehäuse: additive Herstellung Laserauftragsschweißen (LAS)

Erreichte Ergebnisse

Im Zeitraum seit Oktober 2015 konnten beim Auftragschweißen folgende Fortschritte erzielt werden. Die erreichten Ergebnisse sind nach den einzelnen Arbeitspaketen aufgelistet.

AP2.4.1 Verfahren

Im Arbeitspaket 2.4.1 wurden zu Beginn unterschiedliche Verfahren zum Auftragschweißen untersucht: Die zwei Laserverfahren Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA) und Laser-Draht-Auftragschweißen (LDA) sowie das Lichtbogenverfahren Metall-Schutzgas-Auftragschweißen (MSG). Durch metallografische Untersuchungen sowie die Prüfung von Festigkeitsproben kristallisierte sich das Laser-Draht-Auftragschweißen als vielversprechendstes Verfahren für die Anwendung auf Triebwerks-Gehäusen heraus. Anschließend wurden mit diesem Verfahren noch weitere Parameteroptimierungen durchgeführt.

AP2.4.2 Werkstoff/Festigkeit

Im Arbeitspaket Werkstoff/Festigkeit wurden von allen Verfahren Probekörper metallografisch auf kritische Fehlstellen untersucht. Zudem wurden sowohl statische als auch dynamische Festigkeitsproben untersucht und bewertet. Die Bruchflächen wurden anschließend mittels REM untersucht, um die bruchauslösenden Fehlstellen zu dokumentieren.

AP2.4.3 Entwicklung, Optimierung Prozesskette

Im Rahmen von Arbeitspaket 2.4.3 wurde die Prozesskette für das Laserauftragsschweißen von Features auf Gehäusebauteile festgelegt. Im Rahmen dieser Prozesskette wurde die Wärmebehandlung für diese Hybrid-Bauteile festgelegt. Zudem wurde im Rahmen von Versuchen die Zerspanbarkeit des LDA-Werkstoffes nachgewiesen. Zuletzt wurden unterschiedliche Prüfverfahren untersucht und bewertet.

AP2.4.4 Konstruktion/Bauteil

In Arbeitspaket 2.4.4 wurden unterschiedliche Rohteile konstruiert, die das nachträglich Auftragen von Bossen oder Flanschen mittels LDA berücksichtigen.

Der Versuch an einem TCF-Gehäuse zeigten keine Probleme bei der Handhabung des Bauteils sowie bei der Schweißung darauf. Die Ergebnisse der Verzugsmessung zeigten, dass sich der Schrumpf an dem Gehäuse gleichmäßig über den Radius ausbreitet. Zudem liegt er in einer beherrschbaren Größenordnung. Somit ist der Versuch an dem Demobauteil erfolgreich durchgeführt worden.

3 Technische Darstellung der Arbeitspakete

3.1 HAP1 Advanced Auslegung

3.1.1 AP1.1 Integrierte Aero-Auslegung TCF

AP1.1.1 Rig Montage und Instrumentierung

Für den Test wurde in diesem Vorhaben auf einen bestehenden Ringgitter-Prüfstand (siehe Abbildung 2) an der TU Graz aufgesetzt, der um ein rotierendes Speichenrad erweitert wurde.

Um die Zu- und Abströmung zum TCF sowie den Effekt auf das erste Leitrad der stromabliegenden LPT (Low Pressure Turbine) optimal zu vermessen, sind die Ebenen B0, C und D über den gesamten Umfang vermessen worden. Hierzu ist eine Verteilung der Rechen verwendet worden, die eine gegenseitige Beeinflussung der Rechen untereinander verhindert. Sowohl Totaltemperatur als auch Totaldruck sind in den Ebenen A, B0, C und D vermessen worden.

Um darüber hinaus Informationen über Zuströmwinkel, Machzahl und statischen Druck zu erhalten, sind in den Ebenen B0 und C auch Fünflochsonden zum Einsatz gekommen.

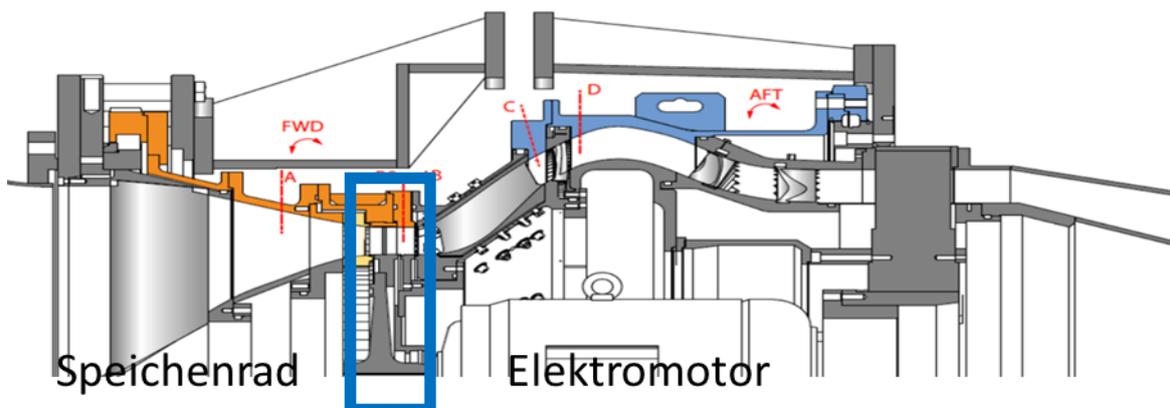


Abbildung 2: Schnittdarstellung der 3D-Kaskade (AnCa) inklusive Messebenen und kurzer Erläuterung zum Speichenrad

AP1.1.2 Rig-Test

Ein wesentliches Ziel in diesem Arbeitspaket war der Forderung nach definierten, zeitlich periodischen Strömungsstörungen. Hierzu wurde die Strouhalzahl S_r als dimensionsloser Vergleichsparameter herangezogen, um den Vergleich zur Hochdruckturbinenabströmung zu gewährleisten. Die Definition lautet wie folgt:

$$S_r = \frac{\text{Geschwindigkeit}}{\text{Frequenz} \cdot \text{Länge}} \quad \text{Gl. (1-1)}$$

Über die Strouhal-Zahl der Hochdruckturbinen, den Stabdurchmesser, der Stabanzahl sowie der Strömungsgeschwindigkeit konnte die notwendige Drehzahl (Frequenz) des Speichenrads definiert werden.

Wegen der Drehzahl-Begrenzung durch eine stärker als erwartete Aufheizung des vorhandenen Elektromotors konnte aber die geforderte maximale Drehzahl nicht erreicht werden. Eine zur Hochdruckturbinen vergleichbare Strouhalzahl konnte so nicht eingestellt werden. Dies lässt eine direkte Validierung der CFD unter Berücksichtigung der HPT Strouhal-Zahl nicht zu, lässt sich aber mit geringer Unsicherheit auf diese Werte skalieren.

AP1.1.3 Validierung und Analyse

Zur Validierung der Ergebnisse sind in einem ersten Schritt die Messdaten aus einer vorangegangenen Messkampagne, in denen eine gute Vergleichbarkeit zwischen CFD (Computational Fluid Dynamics) und dem Experiment erreicht werden konnte, mit jenen Daten in diesem Arbeitspaket verglichen worden.

Die Nachläufe des stromaufliegenden IGVs sind auch mit Speichenrad (Abbildung 3 (b)) klar zu erkennen. Durch die Zunahme des Teilungsverhältnisses in Richtung Gehäuse kommt es allerdings beim Speichenrad zu einer Massenstromverschiebung in Richtung Gehäuse, infolgedessen eine Kippung des Totaldruckprofils vorliegt (vergleiche Abbildung 4 (a) mit (b)). Das erhöhte Totaldruckgebiet am Gehäuse ist Folge des Radialspalts zwischen Stab und Gehäuse.

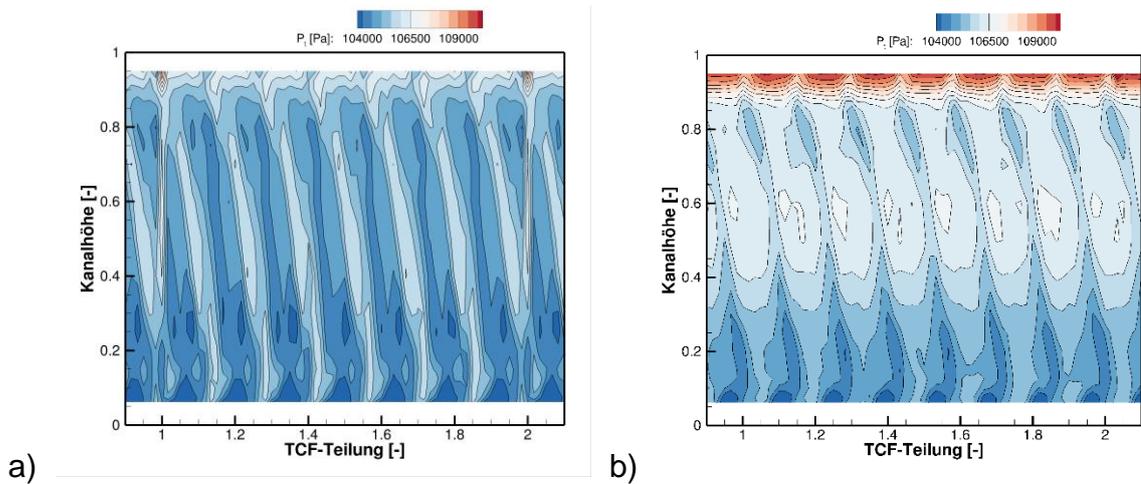


Abbildung 3: Totaldruckkontur in der Zuströmung des TCFs stromab der IGVs in Ebene B0: a) ohne Speicherrad; b) mit Speicherrad

Im Vergleich der zwei Messtechniken, Totaldruckrechen und Fünflochsonde (5LS), konnte eine gute Übereinstimmung erreicht werden. Der Vergleich zwischen dem Totaldruck der 5LS-Messung und den Rechenmessung im Fall mit Speicherrad zeigt hingegen einen signifikante Offset (vergleiche hierzu Abbildung 4 (b)). Der Grund für diesen Offset begründet sich mit dem Einfluss des zeitlich variierenden Strömungsfelds.

Da das Druckniveau der Fünflochsonde eher den Voraussagen der CFD entspricht, wird vermutet, dass das Ergebnis dieser Messtechnik vertrauensvoller ist. Aufgrund der Unsicherheit erfolgt der detaillierte Vergleich zwischen Numerik und Experiment auf Basis von Ebene C, stromab des TCFs, in welcher die Schwankungen durch die Stäbe bereits stark abgeklungen sind (vergleiche Abbildung 5).

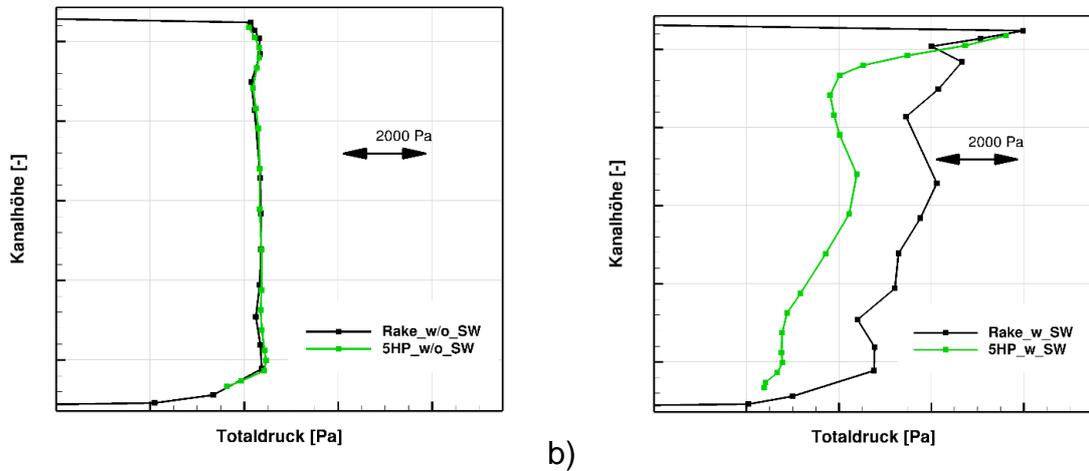


Abbildung 4: In Umfangsrichtung flächengemittelt Totaldruckprofil der Fünflochsonde und des Totaldruckrechen: a) ohne Speicherrod (w/o SW), b) mit Speicherrod (w SW).

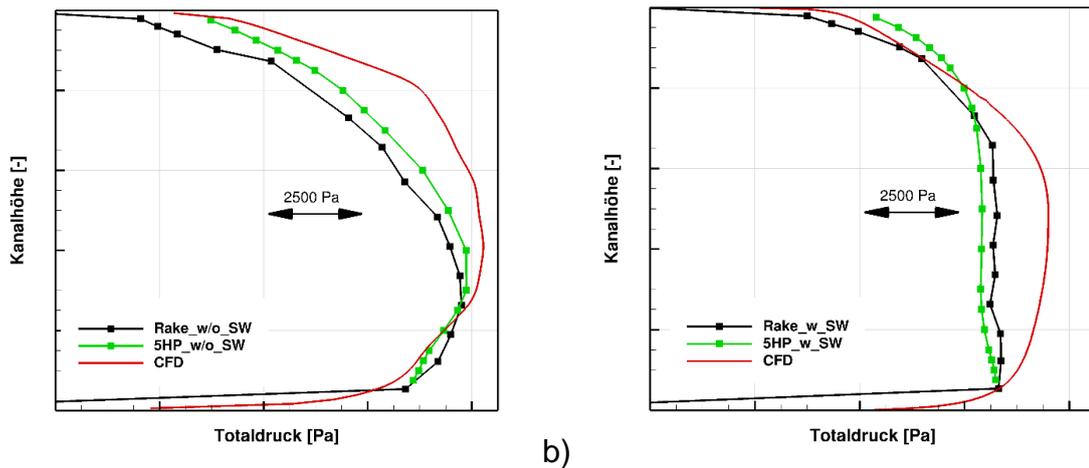


Abbildung 5: In Umfangsrichtung flächengemittelt Totaldruckprofil der Fünflochsonde und des Totaldruckrechen inklusive stationärer CFD: a) ohne Speicherrod (w/o SW), b) mit Speicherrod (w SW).

Im Gegensatz zur Ebene B0 liegen die von den zwei Messtechniken gemessenen Totaldrücke wieder näher beieinander. Der Grund in der bestehenden Abweichung wird den immer noch existenten instationären Nachläufen des Speicherrods zugesprochen. Die deutlichen Unterschiede im stationären Fall sind die Folge der Strömungsablösung am Gehäuse im Experiment, die mit der CFD nicht nachvollzogen werden konnte.

Eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Modellkombinationen gibt die nachfolgende Tabelle:

Tabelle 1: Zusammenstellung der Modellkombinationen

	Turbulenzmodell	Erweiterung
Referenz 1	SST-Modell	none
Referenz 2	k- ω -Modell (Wilcox)	none
k- ω _VRPM	k- ω -Modell	VRPM
k- ω _VB_VRPM	k- ω -Modell	VB + VRPM
k- ω _TM2	k- ω -Modell	VB + VRPM + VGJ + CF
k- ω _SLC	k- ω -Modell	Stream-line-Curvature ¹
SST_VRPM	SST-Modell	VRPM

Abkürzung	Bedeutung
VB	Viscous Blending
VRPM	Vortex Reactive Production Model – wirbelreaktives Produktionsmodell)
VGJ	Vortex Generating Jet
CF	Crossflow
SST	Shear Stress Transport

Für Details zu den einzelnen Modellen sei auf [1] – [5] verwiesen.

Das für die Nachrechnung verwendete numerische Modell nutzt zur besseren Abbildung des Experiments zwischen TCF und IGV ein zonales Interface, um ein Ausmischen der IGV-Nachläufe zu verhindern. Da die Ablösung am Gehäuse ohne Speichenrad nicht wiedergegeben werden konnte, ist die Abweichung in der Radialverteilung in der Ebene C (vergleiche Abbildung 5) zwischen CFD und Experiment besonders groß. Die mit dem Speichenrad unterdrückte Ablösung bewirkt eine Homogenisierung des Abströmprofils des TCFs, das beide Messtechniken übereinstimmend zeigen (vgl. Abbildung 5 (b)). Im Fall der CFD-Vorhersage ist das Totaldruckprofil etwas bauchiger ausgeprägt, was auf eine vorliegende Massenverschiebung in Richtung Nabe zurückzuführen ist. Ursache für die Unterschiede zwischen CFD und Experiment ist das unterschiedliche Ausmischverhalten zwischen der CFD und dem Experiment. Mit Bezug zu Abbildung 6 sind im Fall der CFD noch klar die Nachläufe der IGVs zu erkennen, während diese im Experiment nicht mehr identifiziert werden können. Die in

der Realität vorliegende, erhöhte Ausmischrate, die das homogene Abströmprofil bedingt, kann von der CFD so nicht wiedergegeben werden.

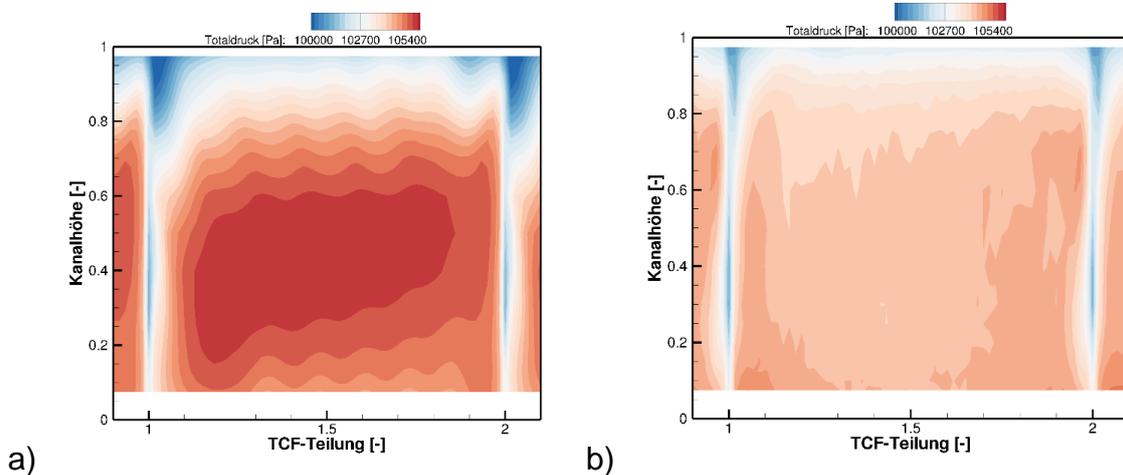


Abbildung 6: Totaldruckverteilung in Ebene C (stromaufblickend): a) CFD (interpoliert auf Messgitter); b) EXP.

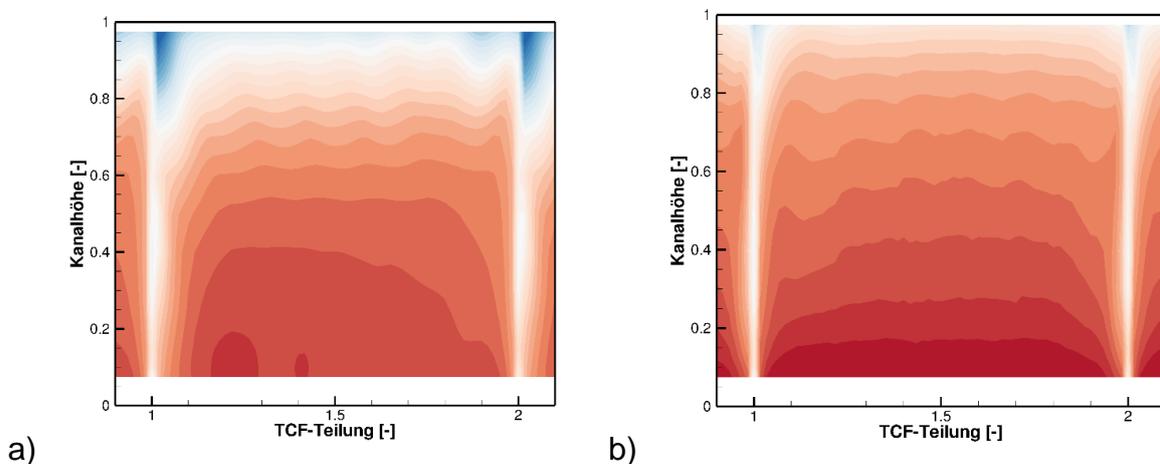


Abbildung 7: Machzahlverteilung in Ebene C (stromaufblickend): a) CFD (interpoliert auf Messgitter); b) EXP.

Anhand des Totaldrucks wird ersichtlich, dass die CFD, bedingt durch das nicht abgeschlossene Ausmischen der Nachläufe, die Verluste gegenüber dem Experiment in der Passage unterschätzt. Ein weiteres Indiz für die nicht abgeschlossene Mischung ist das sehr homogene Machzahlprofil im Austritt des TCFs (vergleiche Abbildung 7). Während im Experiment zwischen Saug- und Druckseite kein Gradient mehr vorliegt,

ist er in der CFD, besonders am Gehäuse nahe des TCF-Nachlaufs, noch zu erkennen.

AP1.1.4 Neuauslegung mit validierter Modellierung

Auf Basis der Messdaten und der validierten CFD konnte für die Nachrechnung dieses Prüfstands ein entsprechendes Setup definiert werden. In AP1.1.3 wurde auch gezeigt, dass das zeitlich wechselnde Strömungsfeld ein zentrales Element im Design-Prozess eines TCFs ist und bei der Auslegung durch instationäre CFD mit berücksichtigt werden muss. Dabei spielen die periodischen Zuströmbedingungen eine entscheidende Rolle. Die Neuauslegung eines TCF ist damit sehr aufwendig und nur mit der Kenntnis des angrenzenden Moduls HPT (Hochdruckturbine) sinnvoll zu optimieren. Nur bei Kenntnis und richtiger Vorhersage dieser periodischen Effekte ist ein TCF-Redesign sinnvoll möglich.

Diese Erkenntnis war zu Beginn des Projektes nicht absehbar und übersteigt bei weitem den geplanten Anspruch und ist mit einem hohen Maß an Komplexität verbunden. Die aus den Versuchen abgeleiteten Korrelationen für eine erste grobe Machbarkeitsstudie von neuen TCF konnten aber erarbeitet und prototypisch angewandt werden.

3.1.2 AP1.2 alternative Designkonzepte TCF

AP1.2.1 Aufbereitung der Erfahrung

In diesem Arbeitspaket wurden mehrere Workshops mit den Experten zu alternativen Designkonzepten abgehalten. Es wurden die verschiedenen Bereiche des gesamten TCF-Moduls hinsichtlich konstruktivem und fertigungstechnischem Verbesserungspotential hinterfragt.

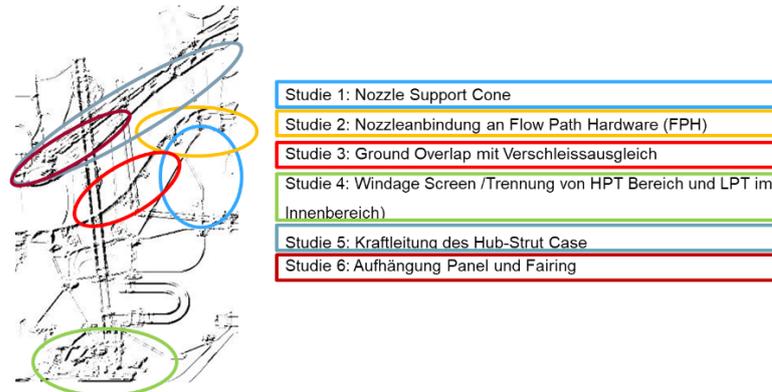


Abbildung 8: TCF mit Position der zu untersuchenden Verbesserungspotentiale

Es konnten 6 Bereiche näher identifiziert und erste Konzeptideen daraus abgeleitet werden:

- Studie 1: Nozzle Support Cone
- Studie 2: Nozzleanbindung an Flow Path Hardware (FPH)
- Studie 3: Ground Overlap mit Verschleissausgleich
- Studie 4: Windage Screen /Trennung von HPT Bereich und LPT im Innenbereich)
- Studie 5: Kraftleitung des Hub-Strut Case
- Studie 6: Aufhängung Panel und Fairing

Für die verschiedenen Bereiche sind unterschiedlich aufwändige Ideen entwickelt worden, die die Ziele hinsichtlich Gewicht Lebensdauer und Wartungsfreundlichkeit unterstützen. Die weitere Untersuchung erfolgte dann im Arbeitspaket AP1.2.2.

AP1.2.2 Design und analytische Bewertung der Konzepte

Für jede Studie wurden bis zu vier Konzeptideen ausgewählt und weiter detailliert.

Näher beleuchtet werden hier die Ergebnisse aus der Studie 1 (Nozzle Support Cone) und 4 (Windage Screen) als typische Bereiche für untersuchte Konzeptvarianten.

Für den Bereich des Nozzle-Support-Cone, der in Studie 1 untersucht wurde, sind die untersuchten Konzepte in Tabelle 2 zusammen mit den Auswirkungen aufgelistet.

Tabelle 2: Untersuchte Designstudien im Bereich des Nozzle-Support Cone

#	ID	Bereich	Konkretes Thema	Kurzbeschreibung	Priorität	Kosten/Gewichtsvorteil
1	N1	Nozzle-Pin-Design	Nozzle Cone/Nozzle Support	Sheet metal inducers	A	Positiver Einfluss auf Gewicht und Kosten
2	N2	Nozzle-Pin-Design	Nozzle Cone/Nozzle Support	Nozzle Support	A	Positiver Einfluss auf Gewicht und Kosten
3	N3	Nozzle-Pin-Design	Nozzle Cone/Nozzle Support	Anbindung NSC-Strebe	A	Positiver Einfluss auf Gewicht und Kosten
4	N4	Nozzle-Pin-Design	Nozzle Cone/Nozzle Support	Nur Cone mit "Iso-mesh"	A	Positiver Einfluss auf Gewicht und Kosten

Für Studie 4 wurden vier konkrete Themen ausgewählt und weiter ausgearbeitet, wie in Abbildung 9 dargestellt.

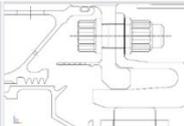
Version	V1	V2	V2a	V3	V4
					
Ausführung Windage Screen	Dreh-/Frästeil	Dreh-/Frästeil	Blech	Blech	Blech
Verbindungstechnik	Presssitz	Presssitz	Presssitz (+ geschweißte Umfangsnaht)	Schweißen	Schweißen
Potentielle Massenreduktion (vgl. Excel sheet)	+	-	+	++	++

Abbildung 9: Konzeptstudie für Windage Screen

Die anschließende Bewertung erfolgte mit starker Gewichtung von Kosten und Gewicht. Damit war Konzept V4 präferiert. Die Umsetzung des Schweißens als Verbindungstechnik wurde als kritisch gesehen und wird in weiteren Projekten untersucht. Da in diesem Fall vornehmlich ein Bauteil angefasst wurde, konnte eine Kombination verschiedener Konzepte nicht weiter diskutiert werden.

Für alle Studien wurden alternative Konzepte erarbeitet, die hinsichtlich Kosten und Gewicht einen Beitrag liefern konnten. Die Studien dienen dazu, bei zukünftigen Designs eines TCF auf diese Bereiche ein verstärktes Augenmerk zu legen, um das volle Potenzial der erarbeiteten Konzepte heben zu können.

AP1.2.5 Analytische Bewertung der TCF Innenströmung

Die Innenströmung der Luft durch die hochzerklüfteten Kavitäten eines TCF-Fairings sind hochkomplex, da es Bereiche gibt, in denen die Querschnittsflächen groß sind und geringe treibende Druckdifferenzen vorliegen. Daraus resultiert ein komplexes, instationäres 3D-Strömungsbild inklusive großer Wirbelstrukturen und Rückströmungen. Ziel dieses Arbeitspakets war es, das reale Strömungsbild durch hochauflösende 3D CFD Verfahren zu erfassen und dabei die Thermalmodellierung der Fairing-Kavität eines TCF-Modells zu verbessern, mit dem übergeordneten Ziel, die Genauigkeit der Temperaturvorhersage zu erhöhen. Parallel sollte dies mit einer hinsichtlich Netzgröße und Rechenzeit optimierten Analyse erfolgen.

Geometrie und Randbedingungen

Die in diesem Projekt untersuchte Geometrie ist ein Segment eines Turbine Center Frames, TCF (Abbildung 10a). Das TCF-Modell besteht aus 1) einem äußeren Bereich zwischen Gehäuse (grau) und OD-Panels, in der sich ein dünnes Hitzeschutzblech (dunkelblau) befindet, 2) einer großen stromlinienförmigen Verkleidung, dem sogenannten Fairing (hellgrün), in dem sich eine kleine Strebe, der sogenannte Strut (orange), befindet, und 3) einem inneren Bereich zwischen ID-Panels (rot) auf der einen Seite und Hub-Box bzw. Dichtungsträger auf der anderen. Das gesamte Volumen wird TCF-Fairingkavität genannt.

Auf den Seitenwänden des Modells (gelb) sind periodische Randbedingungen aufgebracht. Bei allen anderen Wänden wird eine Temperaturverteilung auf die Wände aufgeprägt, die aus einer Thermalrechnung eines FE-Modells stammt.

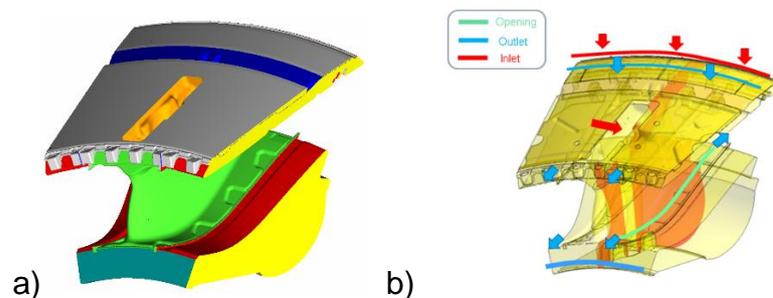


Abbildung 10: Geometrie und Interface-Zonen des TCF-Modells; a) CAD Modell; b) Interfaces der Luftströmung

Bereiche mit ein- und ausströmender Luft sind in Abbildung 10b dargestellt. Die Luft wird über den äußeren Bereich zugeführt. Die Kühlluft wird entweder nach innen transportiert oder geht über die Segmentspalte in den Heißgaskanal. Während bei der Luftzuführung Totaldruck und -temperatur vorgegeben werden, wird ab den Luftauslässen der Massendurchsatz festgelegt. An den Kontaktstellen zwischen Panels und Fairing befindet sich ein axialer Spalt, der sogenannte Ground Overlap. Hier wird die statische Druckverteilung aus einer CFD-Rechnung der Heißgasströmung als Randbedingungen aufgeprägt.

Netzstudie

In der Netzstudie wurde die notwendige Auflösung des Netzes untersucht. Ziel war es ein geeignetes Netz für die weiteren CFD-Rechnungen zu finden, das ausreichende Genauigkeit bei möglichst geringer Zellenanzahl besitzt. Die Vernetzungsstrategie sieht vor, die gesamte TCF-Fairingkavität in drei Teilen zu vernetzen und die Teile miteinander mittels Interface-Bedingungen zu verbinden. Vorteile dieser Methode sind eine schnelle Vernetzung und die Möglichkeit, eine Verfeinerung des Netzes in einem der drei Teile vorzunehmen ohne das komplette Netz neu erstellen zu müssen.

Es wurden insgesamt 17 Netze erstellt und untersucht. Diese Netze weisen Variationen in der Ground Overlap Spaltbreite, in der Anzahl der Prismenschichten im wandnahem Bereich sowie in lokalen Verfeinerungen auf. Ein detaillierter Vergleich der Rechenergebnisse wurde vorgenommen. Die Variante mit 44 Mio. Zellen, 12 Prismenschichten zeigte den besten Kompromiss aus Rechenaufwand und Ergebnis gegenüber dem aufwändigsten Netz. Entscheidungskriterien waren:

- gute Auflösung der Grenzschicht, d.h. akzeptable y^+ -Werte
- gute Übereinstimmung des Massendurchsatzes mit der 1D-Bewertung des Luftsystems
- gutes Konvergenzverhalten
- gute Stabilität

Strömungsstruktur

Die Strömung oberhalb des Hitzeschutzblechs stellt Abbildung 11 dar. Die Luft verlässt die Öffnung im Strut mit hoher Geschwindigkeit in Umfangsrichtung, trifft auf den Strut

im nächsten Segment und wird dort durch den Spalt zwischen Hitzeschutzblech und Strut nach unten umgelenkt.

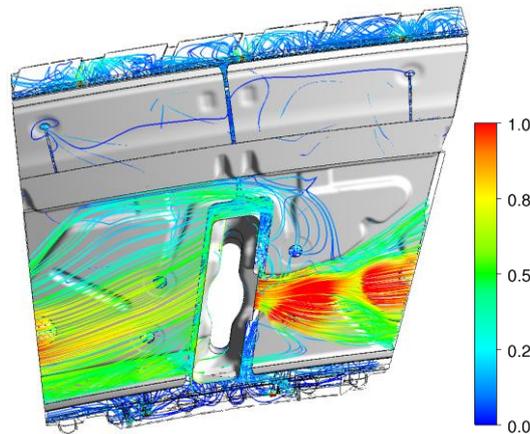


Abbildung 11: Stromlinien mit dimensionsloser Strömungsgeschwindigkeit im Bereich oberhalb des Hitzeschutzblechs

Unterhalb des Hitzeschutzblechs wird die Strömung noch komplexer. Von oben kommend strömt die Luft mit hoher Geschwindigkeit auf der einen Seite nach innen. Auf der anderen Strutseite strömt relativ wenig Luft mit geringer Geschwindigkeit zuerst nach unten, teilweise dann wieder nach oben. Es bilden sich dabei größere Wirbelstrukturen aus.

Automatisches Auswerteverfahren

Zur Auswertung der Vielzahl an CFD-Rechnungen für die Netzstudie und für weitere Studien wurde eine Strategie zur Bewertung der Strömungsstruktur entwickelt. Dabei spielten die beiden Faktoren eine Rolle: eine sinnvolle Parameterwahl für die Charakterisierung der Strömung und die Möglichkeit, das Auswerteverfahren in einem vorhandenen kommerziellen Postprozessingtool zu automatisieren.

Basierend auf diese Strategie wurde für die automatische Auswertung ein 11.000-Zeilen-Skript in der CFX-Skriptsprache entwickelt. Das Skript verarbeitet ein CFD-Ergebnis, erzeugt dabei sogenannte User-Surfaces im Rechendomain und berechnet auf diesen Surfaces eine Reihe von Kennzahlen, z.B. Durchsatz, massengemittelte Totaltemperatur, Strömungsrichtung, mittlere Geschwindigkeit, Geschwindigkeitskompo-

nenten, Wandschubspannung, usw. Darüber hinaus wird eine Vielzahl von Darstellungen automatisch erzeugt und als png-Files exportiert. Abbildung 12 zeigt einige Beispiele.

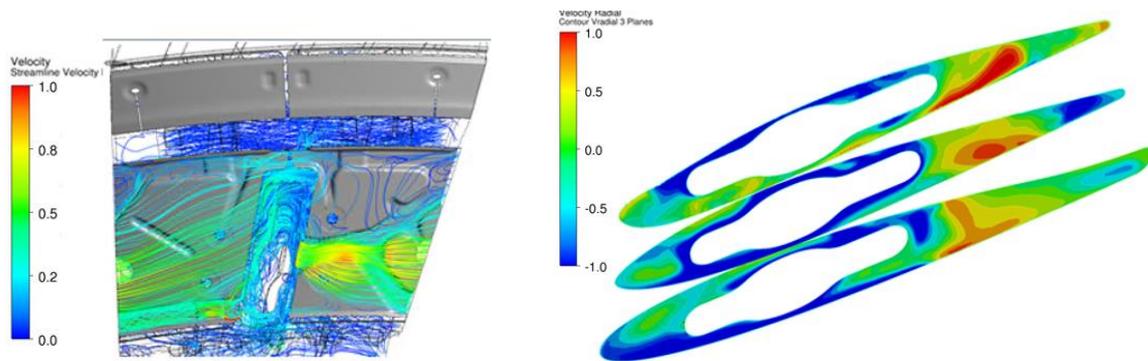


Abbildung 12: Beispieldarstellungen der Schnittebenen für die automatische CFD-Auswertung.

Stabilitätsstudie

In den oben beschriebenen Netzstudien kamen teils geringe teils große Unterschiede in der Strömungsstruktur mit den verschiedenen Netzen zu Tage. Obwohl alle Rechnungen auskonvergiert waren, blieb die Frage, inwiefern die Unterschiede durch Strömungsinstabilitäten beeinflusst waren. Um dies zu untersuchen, wurde für eine stationäre Rechnung das Referenznetz mit einem weiteren Netz verglichen und die Ergebnisse an verschiedenen Iterationsstellen ausgewertet. Untersucht wurden viele Parameter inklusive Durchsätze, Geschwindigkeiten und Totaltemperaturen. Aus dem Ergebnis konnten Streuung und Standardabweichung bestimmt werden.

Die Strömung zeigt für beide Netze ein instationäres Verhalten. Die Standardabweichung dient als Maßstab für die Instationarität. Die Standardabweichung für den Masendurchsatz durch bestimmte User Surfaces in der Strömung stellt Abbildung 13 beispielhaft dar. Das Referenznetz weist ein besseres Stabilitätsverhalten auf als das Netz ohne Prismenschichten.

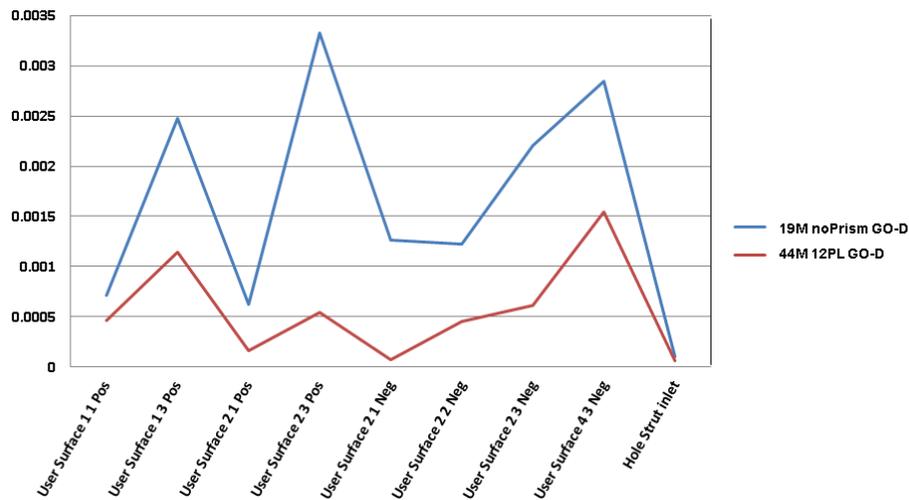


Abbildung 13: Standardabweichung des Massendurchsatzes durch ausgewählte Querschnittsflächen.

Leckagestudie

Ziel der Leckagestudie war es, die Auswirkung der Bauteilfertigungs- und Lagetoleranzen auf die Kavitätenströmung systematisch zu untersuchen und die sensitiven Einflussgrößen zu ermitteln. Hierzu wurden die Fertigungstoleranzen systematisch an den verschiedenen Leckagestellen ermittelt und extremste Kombinationen aus diesen Toleranzen abgeleitet. Aus den Variationen der Leckageflächen wurde somit die Sensitivität der verschiedenen Parameter auf die Innenströmung untersucht. Die Ergebnisse wurden dann mit folgendem Ergebnis analysiert:

- Eine Variation der Leckage im oberen Bereich der Kavität hat einen relativ geringen Einfluss auf das Strömungsverhalten.
- Änderungen in der Leckagefläche im unteren Bereich der Kavität haben den größten Einfluss auf den Gesamtdurchsatz und auf die Strömungsstruktur inklusive Strömungsrezirkulation. Darüber hinaus beeinflusst eine Zunahme der Leckagefläche die Strömungsstruktur stärker als eine Abnahme der Fläche.
- Der Massendurchsatz durch Ground Overlap war relativ konstant.

Wandtemperaturstudie

Ziel der Wandtemperaturstudie war es, die Auswirkung der Wandtemperatur auf die Strömungsstruktur zu untersuchen. In dieser Studie wurden bei konstant gehaltenen Druck- und Durchsatzrandbedingungen die Wandtemperaturen derjenigen Zonen um

$\pm 100\text{K}$ variiert, die sich im Kontakt mit heißen Bauteilen befinden. Die betroffenen Zonen sind Fairing, Panels und Hitzeschutzblech.

Das Ergebnis der Studie zeigt zwar eine leicht zunehmende Totaltemperatur in der Strömung mit zunehmender Wandtemperatur aber einen nur geringen Einfluss auf die Strömungsstruktur. Lediglich der Gesamtdurchsatz am Eintritt zeigt eine eindeutige Tendenz mit der Wandtemperatur. Grund dafür ist die Abhängigkeit des Massendurchsatzes am Ground Overlap mit der Luftdichte. Je höher die Wandtemperatur, desto geringer die Luftdichte, umso geringer der GO-Austrittsdurchsatz bei konstanten Druckbedingungen. Der Einfluss ist allerdings gering.

Studie der freien Konvektion

Ziel der Studie zur freien Konvektion war es festzustellen, ob die Schwerkraft eine nennenswerte Auswirkung auf die Strömung hat, da bei der geringen Strömungsgeschwindigkeit konvektive Terme die Strömung beeinflussen können.

Dazu wurde ein 360° Modell für eine genaue Untersuchung aufgebaut. Da das Referenznetz als Basis für dieses Umfangsmodell zu groß war, wurde zunächst das Segmentmodell weiter vereinfacht und mit dem Ergebnis des Referenzmodells verglichen, um weiterhin vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Das komplette 360° -Modell umfasst ca. 102 Millionen Zellen. Eine Rechnung unter nominalen Bedingungen wurde mit eingeschalteter Schwerkraft durchgeführt. Eine Auswertung fand in den drei axialen Ebenen in Abbildung 14 mit den Bezeichnungen „Front Plane“, „Middle Plane“ und „Rear Plane“ statt.

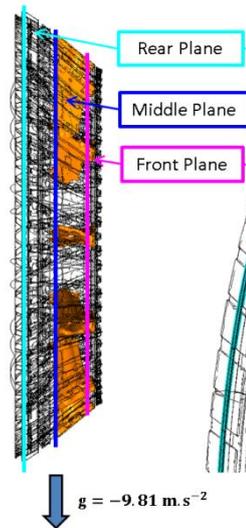


Abbildung 14: Auswertungsebenen im 360°-Modell

Die Ergebnisse aller Strömungsparameter und in allen Auswerteebenen zeigen keinerlei Einfluss der Schwerkraft.

Studie zur Bestimmung des Wandwärmübergangs

Für eine thermomechanische Bewertung eines TCF-Designs dient ein FE-Thermalmodell mit hochwertigen Randbedingungen inklusive einer Verteilung des Wärmeübergangskoeffizienten (HTC) auf den internen Wänden der Fairingkavität. Die Bestimmung einer solchen Verteilung für die komplexe Strömung ist nicht trivial. Eine Vielzahl verschiedener Methoden wurde in dieser Studie untersucht. Diese Methoden sind gemäß Abbildung 15 klassifiziert und wie folgt beschrieben:

- Standardmethoden per HTC-Definition. Für diese Methoden werden Wandwärmestromdichte, Wandtemperatur und die lokale Temperatur in der freien Strömung benötigt. Für die Bestimmung der freien Strömungstemperatur oberhalb der Grenzschicht gibt es mehrere Möglichkeiten:
 - konstanter Mittelwert über eine Kontrollfläche
 - lokaler Wert in einem festgelegten konstanten Abstand zur Oberfläche
 - lokaler Wert in einem konstanten Abstand zur Oberfläche, bestimmt durch die Grenzschichtdicke $\delta = \nu \Delta^+ / u_\tau$ mit konstanten Δ^+ , ν , und u_τ
 - lokaler Wert in einem lokal variablen Abstand zur Oberfläche, bestimmt durch die Grenzschichtdicke $\delta = \nu \Delta^+ / u_\tau$ mit konstantem Δ^+ und lokalen ν

und u_τ

- Superpositionsprinzip. Hier wird der lokale HTC-Wert aus der Differenz zwischen zwei diabaten Rechnungen mit unterschiedlichen Wandtemperaturen gebildet. Es wird angenommen, dass die Strömungsstruktur und die Fluidtemperatur nicht durch die Wandtemperatur beeinflusst sind. Für diese Methode werden nur Properties direkt an der Wand benötigt, nämlich Wandtemperatur und Wandwärmestromdichte.
- Kader-Methode. Grundlage dieser Methode ist die Ähnlichkeit der Wandschubspannung mit der Wandwärmestromdichte in einer turbulenten Grenzschicht einer vollausgebildeten Strömung. Mit Hilfe einer empirischen Wandfunktion wird der HTC in Relation zur turbulenten Wandschubgeschwindigkeit gesetzt. Für diese Methode werden nur Properties direkt an der Wand und eine dimensionslose Grenzschichtdicke Δ^+ benötigt.

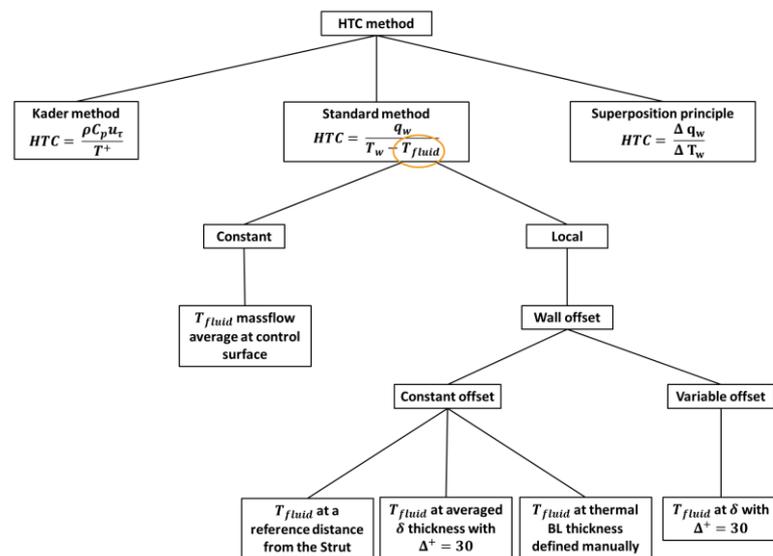


Abbildung 15: Klassifizierung der untersuchten Methoden zur HTC-Bestimmung.

Ergebnisse der Standardmethoden zeigen Diskontinuitäten und Konturen mit HTC gleich Null oder sogar negativ. Dieses unphysikalische Ergebnis liegt zum Teil daran, dass die Strömung unmittelbar in der Nähe des Struts sehr komplex ist und z.B. rezirkulierende wärmere Luft von unten nach oben aufweist. Ferner liegt das schlechte Ergebnis dieser Methoden zum Teil an der Problematik, dass der Abstand zwischen Struts

und Fairing so gering ist, dass es keine feste Grenzschicht bzw. keine freie Strömung in diesem Bereich gibt, in der sich eine lokale Fluidtemperatur korrekt bestimmen lässt. Ergebnisse der Superpositions-Methode sind auch nicht zufriedenstellend, denn die Annahme, dass sich Strömung und Fluidtemperatur unabhängig von der Wandtemperatur verhalten, trifft in unmittelbarer Nähe des Strut nicht zu. In diesem Bereich ist eine starke Kopplung zwischen Wand- und Fluidtemperatur zu erwarten.

Die Kader-Methode ist von allen Methoden am vielversprechendsten. Diese Methode ist gegenüber der Wahl des Δ^+ -Parameters relativ unempfindlich und zeigt stetige Variationen ohne Diskontinuitäten. Lediglich im Bereich der Prallwirkung, wo die Annahme einer vollausgebildeten Strömung nicht gilt, zeigt die Kader-Methode leichte Defizite.

Abbildung 16 zeigt das Ergebnis der Kader-Methode mit $\Delta^+=30$ auf der oberen Hälfte des Strut. Die Prallwirkung ist durch die erhöhten Werte links oben ersichtlich.

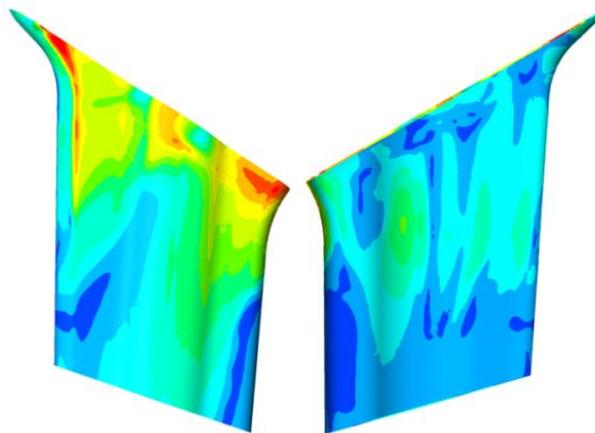


Abbildung 16: HTC-Verteilung am Strut (obere Hälfte) bestimmt mit der Kader-Methode und konstantem $\Delta^+=30$.

CHT-Modell

Ziel der Conjugate Heat Transfer (CHT)-Studie war es, das CFD-Ergebnis durch das CHT-Verfahren zu bestätigen, und darüber hinaus festzustellen, ob der Mehraufwand eines CHT-Verfahrens durch ein qualitativ besseres Ergebnis zu rechtfertigen ist.

Für das CHT-Netz wurde das CFD-Referenznetz übernommen und modifiziert. Anstelle der festen Wände wurde die Geometrie der angrenzenden TCF-Bauteile vernetzt und an das CFD-Netz angehängt. Dies gilt für Fairing, Panels, Gehäuse, Hub-Box und

innere Dichtungsträger. Durch das FE-Netzteil werden ca. 66 Millionen Zellen mehr verwendet.

An der Außenseite des FE-Netzteils wurde eine konvektive Randbedingung, d.h. Fluidtemperatur und Wärmeübergangskoeffizient, aus einer CFD-Rechnung der Heißgasströmung aufgeprägt.

Die Bauteiltemperatur im FE-Netzteil wird gleichzeitig mit der Strömung im CFD-Netzteil berechnet. Da der Strahlungsaustausch das CHT-Rechenmodell weiter kompliziert hätte, wurde dieser nicht als Rechnung mit in das Modell genommen. Stattdessen wurden Strut und Fairing nicht in als CHT Modell mit einbezogen, sondern die Temperaturen aus den vorangegangenen Rechnungen als Randbedingung auf der Oberfläche vorgegeben. Diese Maßnahme ersetzt den Wärmeaustausch durch Strahlung nicht, reduziert aber die negative Auswirkung des Weglassung im CHT-Modell.

Obwohl die Strömung Instationaritäten aufweist, wurde wegen der erheblichen Netzgröße nur stationär gerechnet. Das Ergebnis der CHT-Rechnung wurde mit dem des CFD-Modells unter Referenzbedingungen verglichen. Hierbei wurde z.B. Durchsatzverteilung, Fluid- und Wandtemperaturverteilung, Wandwärmestromdichte und Wärmeübergangskoeffizient untersucht. Abbildung 17 vergleicht beispielhaft die Ergebnisse der mit der Kader-Methode berechneten HTC-Verteilung auf der Fairing-Innenseite mit den Ergebnissen der CHT-Rechnung.

Das CHT-Modell zeigt fast identische Strömungsstrukturen zu denen der CFD-Rechnung. Lediglich bei der Temperatur einiger Bauteile weisen die beiden Methoden aufgrund der fehlenden Strahlung im CHT-Modell größere Unterschiede auf.

Trotz des passenden Ergebnisses der Bauteiltemperatur zur entsprechenden berechneten Strömung durch die konjugierte Berechnung von Strömung und Bauteiltemperatur ist derzeit der Zusatzaufwand bei Netzerstellung und Rechendauer nicht gerechtfertigt.

Damit wird die Kadermethode zukünftig als Standard für die Berechnung der komplexen Innenströmung verwendet.

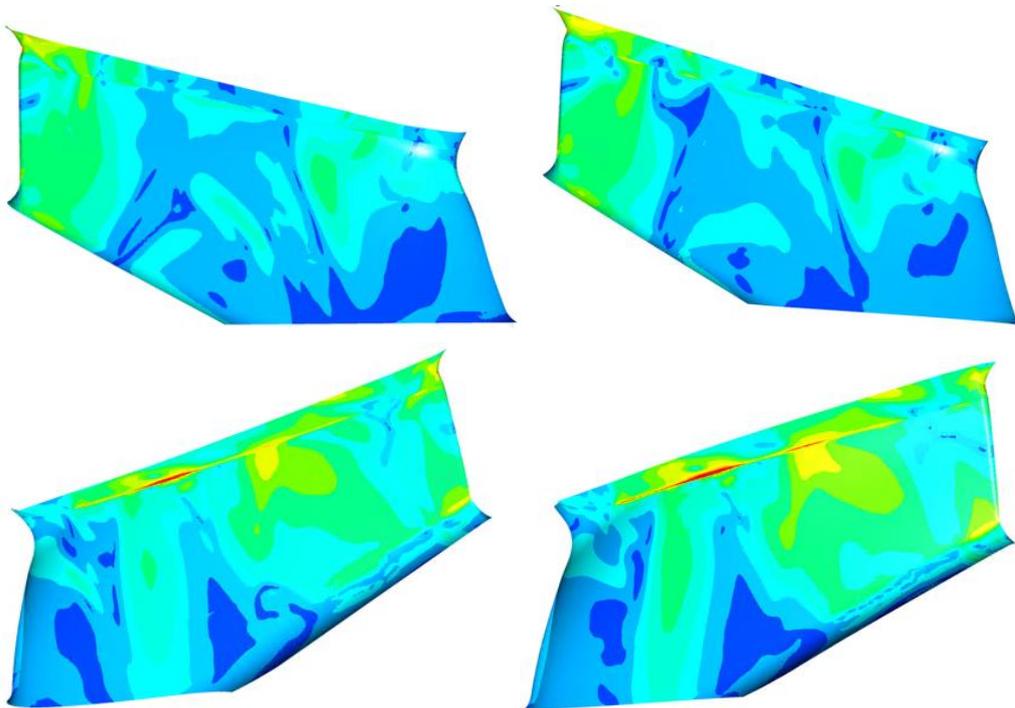


Abbildung 17: HTC-Verteilung auf der Innenseite des Fairing: (links) CFD Modell, (rechts) CHT Modell

3.2 HAP2: Neue Werkstoffe & Bauweisen für Panel, Strebe, Gehäuse

3.2.1 AP2.1 Prüfverfahren CMC-Panels

AP2.1.1. Entwicklung Prüfstrategie

Zunächst wurden bestehende statische und dynamische Prüfverfahren für CMC adaptiert. Darüber hinaus wurden aus Literaturstudien Sonderversuchstechniken identifiziert, die zur zuverlässigen und robusten Untersuchung der Versagensmechanismen in CMC notwendig sind. Ein besonderer Fokus lag dabei auf Werkstoffeigenschaften, die keramische Faserverbundwerkstoffe von klassischen metallischen Hochtemperaturmaterialien unterscheiden. Diese Techniken umfassen u.a.:

- Die Digitale Bildkorrelation (DIC, z.B. Aramis von GOM)
- die Schallemissionsanalyse
- Mikrostrukturanalysen mittels Röntgen Computertomographie

Die Computertomographie kann genutzt werden, um Risse und Defekte im Inneren der

Probe erkennen und bewerten zu können. Daneben müssen auch mikroskopische Methoden erweitert werden, weshalb die Präparationsmethode zur Herstellung von Querschliffen an CMC optimiert wurde. Die angepasste Methodik erlaubt eine zuverlässige und hoch-qualitative Auswertung von CMC Werkstoffen. Diese optimierten mikrostrukturellen Untersuchungen stellen eine wichtige Grundlage für spätere Nachuntersuchungen an versagten Proben dar.

Abschließend konnte eine Prüfstrategie entwickelt werden, mit der mikrostrukturelle Abläufe während des mechanischen Versagens von CMC Werkstoffen sowohl in-situ während der Prüfung als auch ex-situ in Nachuntersuchungen nach Abschluss der Prüfung untersucht werden können.

AP2.1.2. Aufbau der Prüfkapazitäten

Zu Beginn der Arbeiten in AP 2.1.2 wurden erste Schritte einer Standardisierung geeigneter Prüfkörper unternommen. Dazu wurden Zeichnungen unterschiedlicher normgerechter Probengeometrien für verschiedene Prüfungen erstellt, inklusive Form- und Lagetoleranzen. Für die beiden Werkstoffklassen Ox/Ox und SiC/SiC mussten dabei zwei individuelle Probengeometrien entwickelt werden. Um der generell geringeren Schubbeständigkeit von Ox/Ox- gegenüber SiC/SiC- Materialien gerecht werden zu können, wurden für die Ox/Ox Proben wesentlich flachere Übergangsradien zwischen Einspannung und Prüfbereich verwendet als für SiC/SiC Proben. Die beiden individuellen Probengeometrien konnten erfolgreich gefertigt werden und lassen sich sowohl für Zugversuche als auch für die Ermüdungs- und Kriechprüfung anwenden. Ein normgerechtes Versagen der Proben auch bei verschiedenen Prüfinstituten konnte aufgezeigt und damit die Eignung der Probengeometrien nachgewiesen werden.

Die bestehenden Prüfanlagen wurden weiterführend erfolgreich für die Versuchsdurchführung unter Hochtemperaturbedingungen angepasst und notwendige Anpassungen in der Versuchsdurchführung und –auswertung vorgenommen, so dass erfolgreiche erste Versuche möglich waren. Parallel wurde die 2-dimensionale optische Messtechnik bei Raumtemperatur mittels eines Aramis-Messsystems erfolgreich erprobt und ausgewertet. Diese Messmethode erlaubt die Bewertung lokaler anisotroper Phänomene im Werkstoff und bietet damit essentielle Informationen für eine spätere analytischen Bewertung des Werkstoffs.

Schließlich konnten an den Werkstoffen weiterführende Untersuchungen wie erste LCF Versuche erfolgreich durchgeführt werden und die Tauglichkeit der Probengeometrien nachgewiesen werden. Dabei konnte der Abfall der Steifigkeit des Materials mit zunehmender Zyklenzahl erstmals dargestellt werden, eine Eigenheit, die CMC-Werkstoffe gänzlich von metallischen Alternativen unterscheidet und erhebliche Bedeutung für eine strukturelle Auslegung von CMC Bauteilen besitzt.

AP2.1.3. Ermittlung von Werkstoff-Kennwerten

Auf Basis der in AP2.1.2 entwickelten Probengeometrien konnten gezielte Versuche an Werkstoffproben zur Ermittlung von Werkstoff-Kennwerten durchgeführt werden. Dabei wurde sich zunächst auf standardisierte Zugversuche nach ASTM Norm (C1275 und C1359) bei unterschiedlichen Prüftemperaturen konzentriert. Es wurde vorrangig bei 750°C und 980°C geprüft. Mit Hilfe der neuen Prüf- und Auswertesystematik konnten unabhängig von der Prüftemperatur Zugfestigkeiten im Bereich von 220- 250 MPa und Bruchdehnungen im Bereich 0,35 - 0,4% ermittelt werden.

Zur stabilen Bestimmung der Proportionalitätsgrenze (proportional limit, PPL) wurden Sensitivitätsstudien zu den Einflussgrößen der Bestimmung durchgeführt. Auf Basis dieser Studien konnte ein passendes Spannungsintervall für die E-Modul Ermittlung abgeleitet werden. Über den E-Modul wird das PPL ermittelt, wobei die Norm zwei verschiedene Vorgehen vorschlägt: Eine parallele Verschiebung zum linearen Bereich mit einem Offset von 0,05% oder eine Abweichung von der Linearität um 10%. Es konnten Unterschiede in den Ergebnissen aus diesen beiden Vorgehen aufgezeigt werden, wobei die Methode mittels Parallelverschiebung deutlich höhere Werte, bei deutlich geringerer relativer Streuung aufzeigt. Für eine Optimierung der Bestimmung des PPL (vgl. AP 2.1.4) wurden passende alternative Werte für den Offset bzw. die Abweichung von der Linearität abgeleitet, ein zulässiges Vorgehen nach Norm. Es konnte dadurch ein Verfahren auf Basis der Verschiebung parallel zum linearen Bereich mit einem alternativen Offset entwickelt werden, das einen konservativen Wert für das PPL mit geringer Streuung zeigt.

Die Ergebnisse der Kennwertermittlung konnten als Input für eine analytische Bewertung der Zugversuche verwendet werden. Zu diesem Zweck wurde eine FE Simulation mit der Software Abaqus aufgesetzt, wobei die beiden unterschiedlichen Geometrien

für Ox/Ox- und SiC/SiC-Proben berücksichtigt wurden (siehe Abbildung 18) .

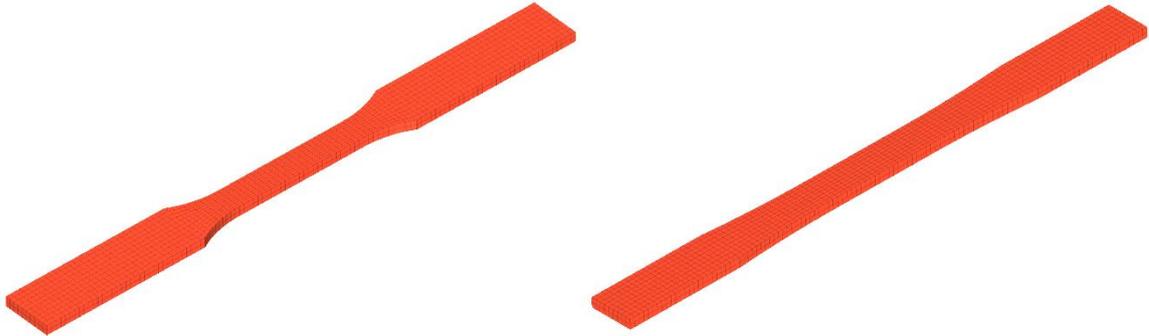


Abbildung 18: FE-Netze der in der Simulation zu verwendenden Probengeometrien: WD6430212 für SiC/SiC Proben (links), WD6430227 für Ox/Ox Proben (rechts)

Das Materialverhalten der faserverstärkten CMC-Werkstoffe wurde mittels des in Abaqus vorhandenen makromechanischen linear-elastischen Materialmodells modelliert, welches die Orthotropie der Materialeigenschaften berücksichtigt. Abbildung 19 zeigt einen Vergleich der im linear-elastischen Bereich berechneten und der gemessenen Zugkurven für je einen ausgewählten Beispielwerkstoff der Werkstoffgruppe Ox/Ox und SiC/SiC Material.

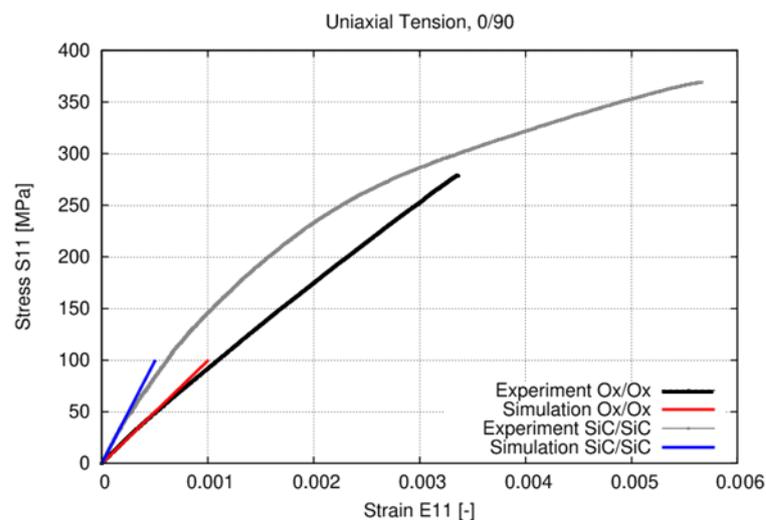


Abbildung 19: Vergleich experimenteller und numerisch generierter Spannungs-Dehnungs-Kurven im Zugversuch ($0^\circ/90^\circ$) für die Beispielwerkstoffe aus Ox/Ox und SiC/SiC. Die kraftgesteuerte FE-Simulation erfolgte mit einer vorgegebenen Zugspannung von 100 MPa.

Im linear elastischen Bereich lässt sich dabei eine zufriedenstellende Übereinstimmung erkennen und das jeweilige Materialverhalten kann gut voneinander unterschieden werden.

Abbildung 20 zeigt eine Finite-Elemente Analyse der beiden Probengeometrien für das ausgewählte Ox/Ox Material. Dabei wird die Verteilung der Normalspannung bei 100MPa angelegter Zugspannung untersucht. Für die Probengeometrie WD6430212 kann man eine Spannungsakkumulation im Radiusbereich erkennen. Diese ist wesentlich weniger stark ausgeprägt für die Probengeometrie WD6430227.

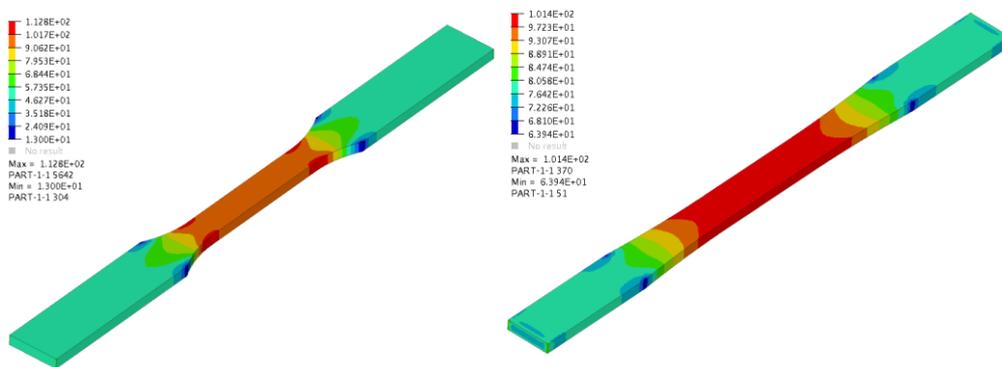


Abbildung 20: Finite Element Analyse des lastgesteuerten Zugversuchs (100MPa), Normalspannung in Längsrichtung σ_{11} . für Ox/Ox Beispielmateriale. Links: Probengeometrie WD6430212, rechts: Probengeometrie WD6430227

Abbildung 21 zeigt die Verläufe der Normalspannungen entlang der Probenstirnfläche. Man kann erkennen, dass für beide Geometrien und Materialtypen im Prüfbereich eine homogene Spannungsverteilung erreicht wird. Für die Geometrie WD6430212 ergibt sich aber im Übergangsbereich zur Einspannung eine Spannungsüberhöhung, die für das ausgewählte Ox/Ox Material leicht höher ausfällt. Die Kombination aus lokalisierten Normal- und Schubspannungen im Übergang zum Befestigungsbereich, gekoppelt mit der durch hohe Matrixporosität bedingten deutlich kleineren Schubfestigkeit oxidischer (im Gegensatz zu SiC/SiC) CMC-Werkstoffe, führt offensichtlich dazu, dass Ox/Ox-Proben der WD6430212-Geometrie oder auch vergleichbarer Probengeometrien mit gleichem Radius am Übergang zu den Befestigungsbereichen versagen. Für SiC/SiC-Materialien, die durch dichte Matrixzusammensetzungen mit höherer Schubfestigkeit gekennzeichnet sind, ist die WD6430212-Probengeometrie anscheinend nicht kritisch. Das Verhältnis zwischen

Schub- und Elastizitätsmodul ist offensichtlich ein wichtiger Parameter, der bei der Beurteilung der Robustheit der Probengeometrie herangezogen werden kann. Durch diese Berechnungen konnte gezeigt werden, dass die durchgeführten Messungen wertvollen Input für die analytische Bewertung liefern.

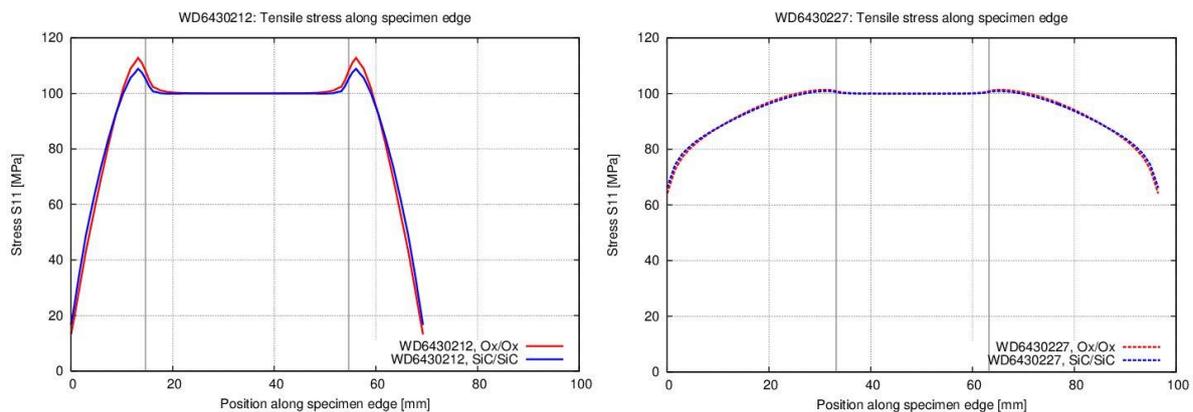


Abbildung 21: Normalspannung σ_{11} in Längsrichtung, entlang der Probenkante (zwischen den Befestigungsbereichen), links: Probe WD6430212, rechts: Probe WD6430227. Der Messbereich ist zwischen den grauen Linien gekennzeichnet.

AP 2.1.4 Schallemission bei Zugversuchen

In der ersten Phase des Arbeitspakets wurde eine Vorstudie zur Anwendbarkeit der Schallemissionsanalyse auf CMC durchgeführt. Mit dieser Methode werden Schädigungen in Phasengrenzflächenbereichen bei z.B. faserverstärkten Kunststoffen oder Rissbildungs- und Rissfortschrittsprozesse detektiert, welche als Schallquellen wirken und aus einer mechanischen (Über)Beanspruchung resultieren. Dazu wurde ein Messaufbau, der bisher zur Schallemissionsanalyse an carbonfaserverstärkten Kunststoffen genutzt wurde, erfolgreich auf das Prüfen von CMC angepasst. Die Schallemissionsanalyse konnte in der Folge erfolgreich auf CMC angewendet werden und fundamentale Einflussfaktoren, wie etwa die Ankopplung der Sensoren und die Prüfgeschwindigkeit identifiziert und für die Prüfung von CMC optimiert werden.

In der zweiten Phase des Arbeitspakets wurde die Schallemissionsanalyse erweitert und auf vorher bei Hochtemperaturbedingungen (Burner Rig, Furnace Cycle Test) aus-

gelagerte Proben erweitert. Mit Hilfe dieser Studie konnte eindeutig eine Materialveränderung in den CMC Proben nachgewiesen werden, die mit den rein mechanischen Ergebnissen der Messungen nicht nachweisbar ist. Damit wurde erfolgreich das Potential der Schallemissionsanalyse in der Bewertung von Alterungseffekten in CMC nachgewiesen.

In der dritten Phase des Arbeitspakets wurde die Statistik um weitere Ox/Ox Proben erweitert und erste Versuche an SiC/SiC durchgeführt. Dabei konnten Unterschiede in der Prüfung der beiden Materialklassen erkannt werden. Dies ist auf die unterschiedliche Anbindung der Fasern an die Matrix bzw. dem Porositätsunterschied und dem damit einhergehenden unterschiedlichen Versagensmechanismus zurückzuführen. Mit diesen Versuchen konnten notwendige Weiterentwicklungen für die zukünftige erfolgreiche Prüfung an SiC/SiC aufgezeigt werden.

Schließlich wurde in all den bereits vorgestellten Prüfvarianten der signifikante Onset der Schallemission und damit der Matrix cracking stress, ermittelt und mit verschiedenen Variationen der Bestimmung des Proportional Limits verglichen (siehe AP 2.1.3). Es konnte aufgezeigt werden, dass keine Variation der PPL in allen betrachteten Fällen erfolgreich den Onset der Schallemission abbilden kann (siehe Abbildung 22). Der Vergleich zur Schallemissionsanalyse erlaubt aber für zukünftige Bewertung des PPL eine Auswahl einer konservativen Variante, die den matrix cracking stress möglichst gut beschreibt bzw. nicht überschätzt. Schließlich liefert der Onset der Schallemissionsanalyse damit aber auch einen wertvollen weiteren Kennwert, der so auch nicht rein über eine Auswertung des mechanischen Verhaltens erlangt werden kann.

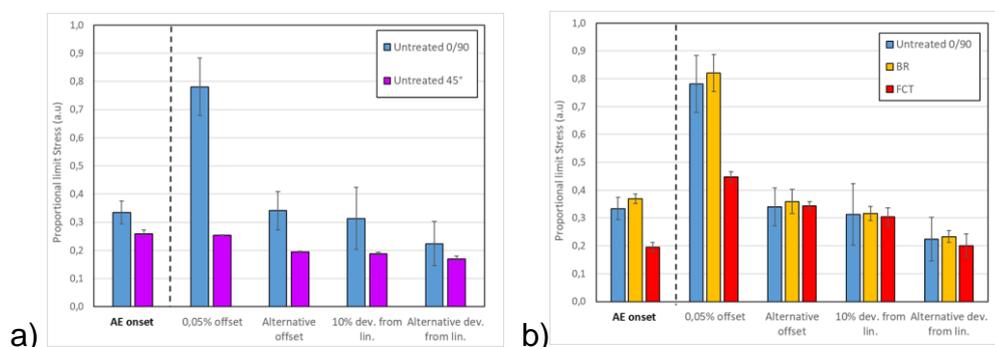


Abbildung 22: Vergleich des AE Onsets mit verschiedenen Varianten der PPL Bestimmung a) in Abhängigkeit der Probenorientierung, b) in Abhängigkeit der Vorbehandlung

3.2.2 AP2.2 MAR M247-Panels Simulation Porosität

AP2.2.1 Materialbeschaffung und Probenversuche

Poren:

Die beschafften Proben enthalten Karbide und Poren in der gewünschten Größe und mit ausreichender Häufigkeit.

Aus dem Probenmaterial lassen sich die bei MTU üblicherweise verwendeten Proben herstellen. Die durchgeführten LCF- und HCF finden unter Standardprüfbedingungen statt.

Kornstrukturfehler:

Kornstrukturfehler in gerichtet erstarrten Gusslegierungen lassen sich übergeordnet als Abweichungen von der idealen stängelkristallinen Gefügestruktur beschreiben (vgl. Abbildung 23 links). Die Fehler treten in verschiedenen Ausprägungen auf, z.B. als Querkorngrenzen mit Winkeln $> 80^\circ$ zur Erstarrungsrichtung und High Angle Boundaries (HAB, Abbildung 23 rechts) mit Winkeln $> 20^\circ$.

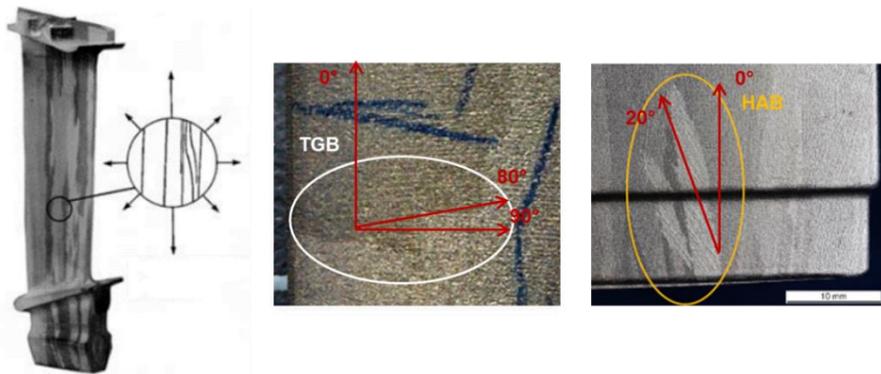


Abbildung 23: Ideale stängelkristalline Gefügestruktur eines gerichtet erstarrten Bauteils, links, und Abweichungen in Form von Querkorngrenzen (TGB), Mitte, und High Angle Boundaries (HAB), rechts.

Um Kornstrukturfehler durch Probestests adäquat zu beschreiben, wurden Proben aus bikristallin gegossenen Platten hergestellt, so dass die Proben eine Korngrenze im

Zentrum aufwiesen. Probenlage und kristallographische Orientierung illustriert Abbildung 24. Eine photographische Abbildung der Gussplatten und daraus entnommener Proben ist Abbildung 25 zu sehen.

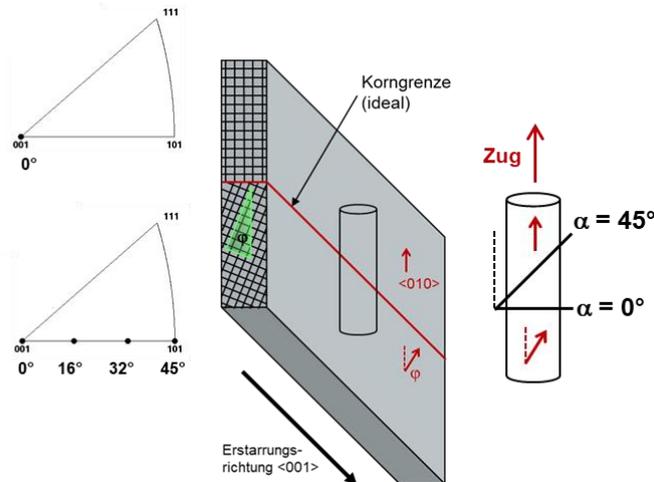


Abbildung 24: Probenentnahme aus Bikristall-Platten der Legierung M-247LC SX

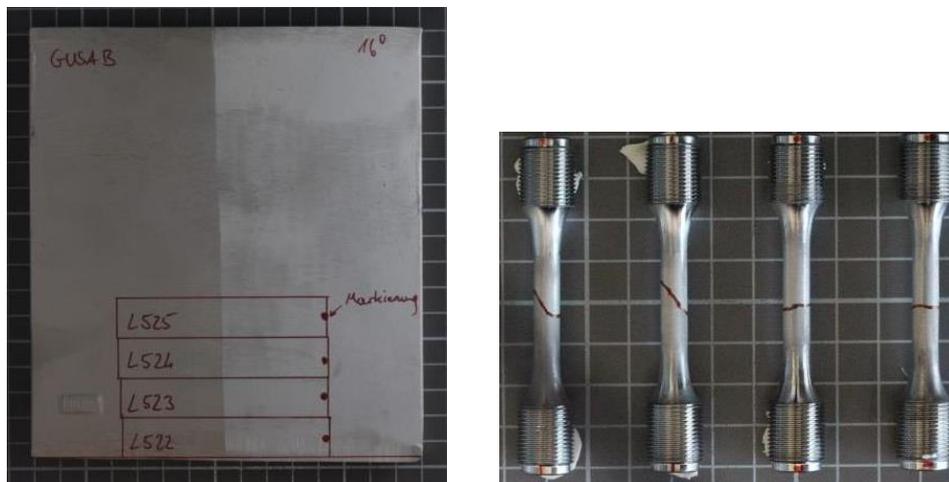


Abbildung 25: Bikristall-Platte mit Skizze des Probenentnahmeortes (links) und Probenrohlinge mit nachgezeichneter Korngrenze (rechts).

Die dehnungsgesteuerten LCF-Testergebnisse bei 600°C zeigen, dass bei vergleichbarer Dehnung die Bikristall-Proben mit waagrechter Korngrenze (0°) eine deutlich geringere Lebensdauer aufweisen im Vergleich zu einkristallinen oder gerichtet erstarrten Proben. Zudem verkürzt sich die Lebensdauer tendenziell, wenn der Orientierungsunterschied zwischen den beiden Körnern größer wird.

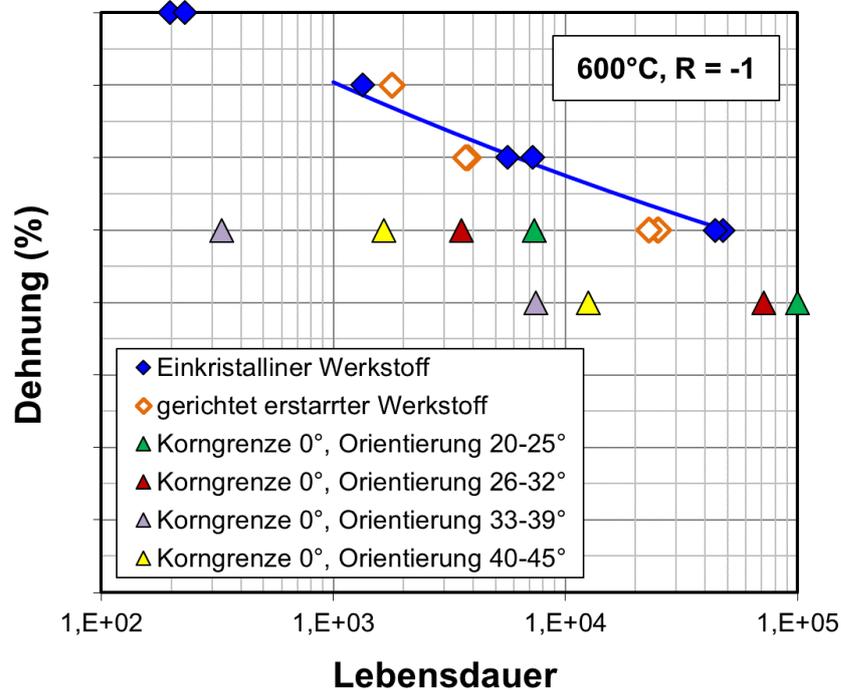


Abbildung 26: Ergebnisse der dehnungsgesteuerten LCF-Versuche bei 600°C, R=-1.

AP2.2.2 Bewertung und Modellierung

Poren:

Zur Berechnung der Lebensdauer dienen die auf der Bruchfläche bestimmte Fehlergrößen. Diese umfassen z. B. den maximalen oder minimalen Durchmesser des umschreibenden Kreises, maxFeret bzw. minFeret, oder den Durchmesser eines flächenäquivalenten Kreises. Die beste Übereinstimmung ergibt sich bei Verwendung des maximalen Durchmessers des umschreibenden Kreises, siehe Abbildung 27. Die Verwendung kleinerer Werte wie z. B. der Radius des flächenäquivalenten Kreises führt häufig dazu, dass die Rechnung eine unendliche Lebensdauer liefert, siehe Abbildung 27, Punkte am oberen Rand des Diagramms.

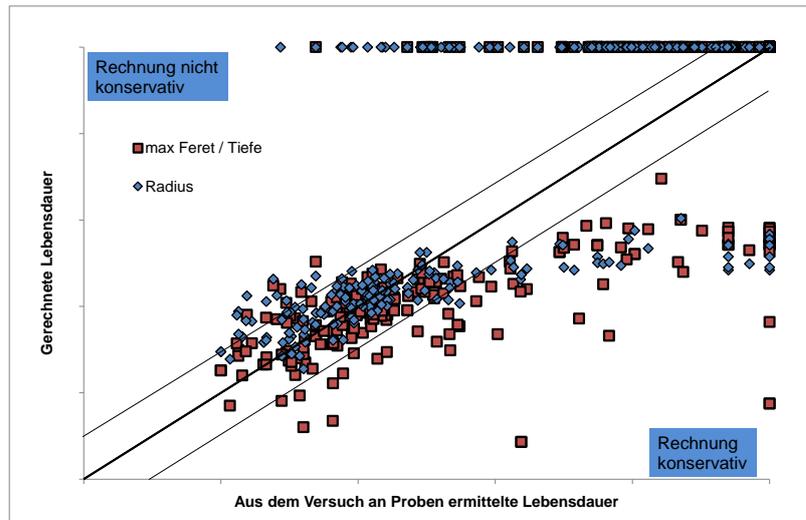


Abbildung 27: Unterschiedliche Fehlergrößen.

Als Rissfortschrittsmodell wird das oben genannte Modell verwendet, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen.

Den Vergleich zwischen gemessener und gerechneter Lebensdauer zeigt Abbildung 28. Mit zunehmender Lebensdauer nimmt die Rissinitiierung zu. Eine Methode, wie aus Ergebnissen von Rissfortschrittsversuchen und Schwellwertversuchen die Rissinitiierungslebensdauer bestimmt werden kann, ist derzeit nicht bekannt. Alternativ wird die Rissinitiierungslebensdauer indirekt z. B. unter Verwendung der experimentell ermittelten Dauerfestigkeit in ein Lebensdauermodell implementiert.

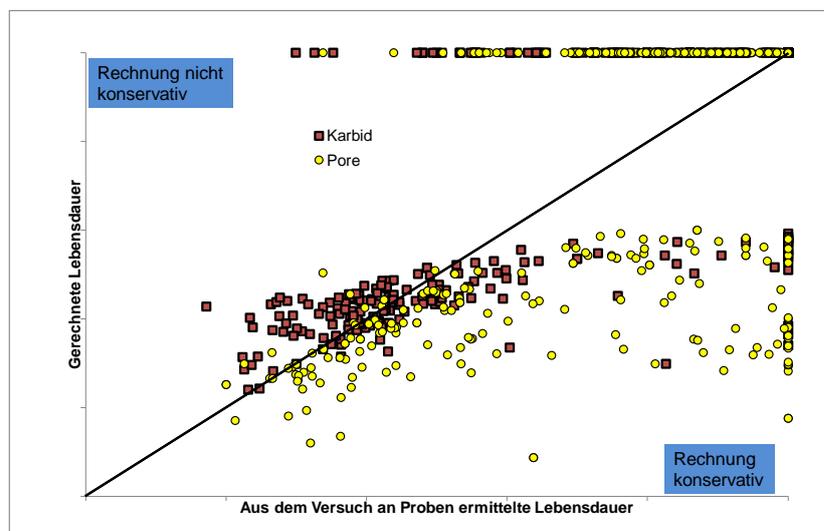


Abbildung 28: Gemessene Lebensdauer verglichen mit der gerechneten Lebensdauer.

Aus diesen, in Abbildung 28 dargestellten Daten, kann ein Diagramm „Rissinitiierung“ generiert werden, siehe Abbildung 29. Die Rissinitiierung ergibt sich aus der Differenz zwischen gerechneter und gemessener Lebensdauer.

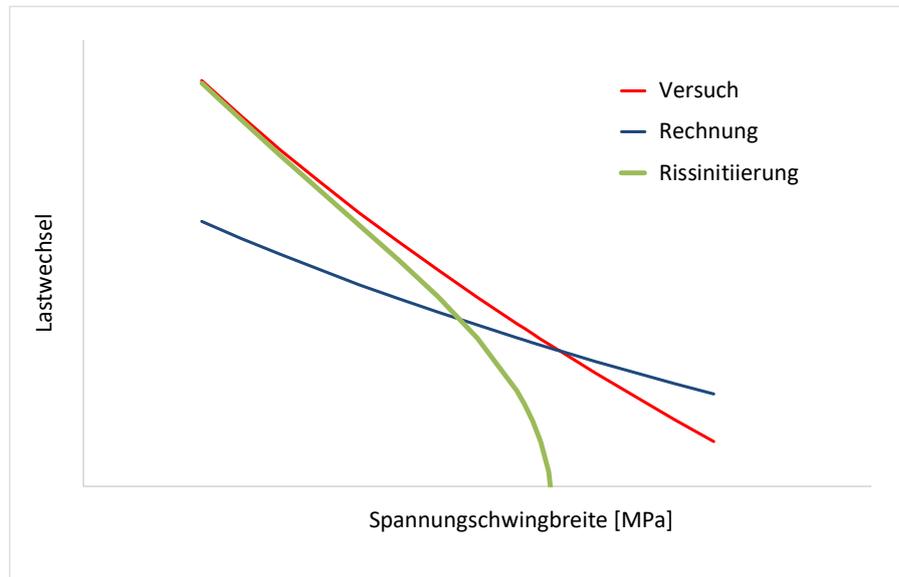


Abbildung 29: Rissinitiierungslebensdauer.

Um über den gesamten Bereich der Lebensdauer, LCF bis HCF, eine Lebensdauer berechnen zu können, gibt es mehrere Ansätze:

- Verwendung der experimentell bestimmten Lebensdauer für kleine Fehler mit anschließender Rissfortschrittsrechnung. In diesem Fall ist die Rissinitiierung in der Lebensdauerkurve enthalten.
- Bestimmung der Lebensdauerkurve aus einer Rissfortschrittsrechnung für kurze Lebensdauern und Bestimmung der Dauerfestigkeit aus Schwellwertversuchen
- Ermittlung einer Kurve „Rissinitiierung“ als Funktion der Spannung. Die Rissinitiierung wird zu der analytisch bestimmte Lebensdauer addiert.

Kornstrukturfehler:

Zur Berechnung der Lebensdauer der Bikristall-Proben wurde ein FEM-Modell erstellt, das die Geometrie der Probe, die Lage der Korngrenze und die Kornorientierungen abbildet (Abbildung 30). Aus der maximalen lokalen Spannung wurde mittels eines

Lebensdauermodells die Lebensdauer der Probe vorhergesagt. Wie Abbildung 31 zeigt, liegt die berechnete Lebensdauer innerhalb eines Streubands Faktor 3 um die gemessene Lebensdauer oder darunter.

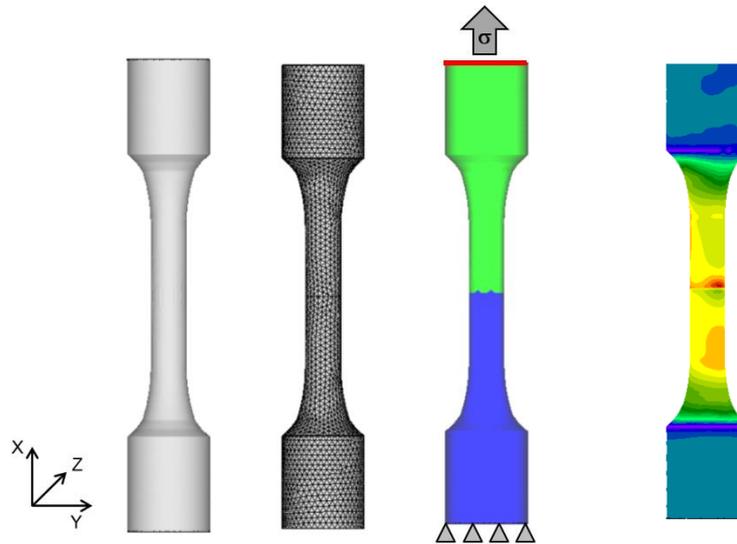


Abbildung 30: FEM-Modell der Bikristall-Probe (links) und Spannungsverteilung mit maximaler Spannung in der Nähe der Korngrenze (rechts).

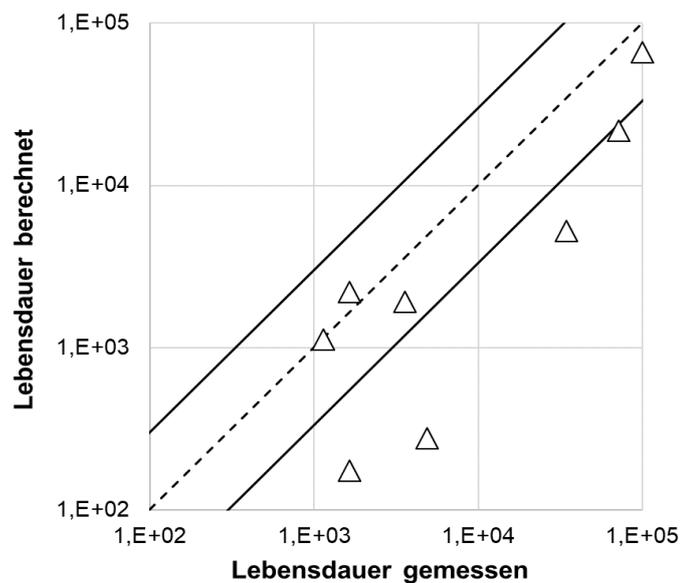


Abbildung 31: Vergleich gemessene und berechnete Lebensdauer der Bikristall-Proben.

AP2.2.3 Übertragung auf Bauteilbewertung

Poren:

Die erarbeiteten Ansätze wurden erfolgreich im Prozess der Bauteilbewertung angewendet. Es wurde gezeigt, dass diese Ansätze für die Bauteilbewertung funktionieren. Aktuell werden die Ansätze parallel zum klassischen Ansatz angewendet, um weitere Erfahrung für die Bauteilbewertung zu erhalten.

Kornstrukturfehler:

Wie der Vergleich zwischen Berechnung und Experiment im vorherigen Kapitel gezeigt hat, lässt sich mit Hilfe des verwendeten Modells die Lebensdauer konservativ vorher-sagen. Aus den experimentellen und simulativen Daten lassen sich daher Lebensdauer-erkurven ableiten, mit denen die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen abhängig von der lokalen Spannung bewertet werden kann (Abbildung 32). Dieser Prozess ist exemplarisch an einem bauteilähnlichen Modell erfolgreich getestet worden.

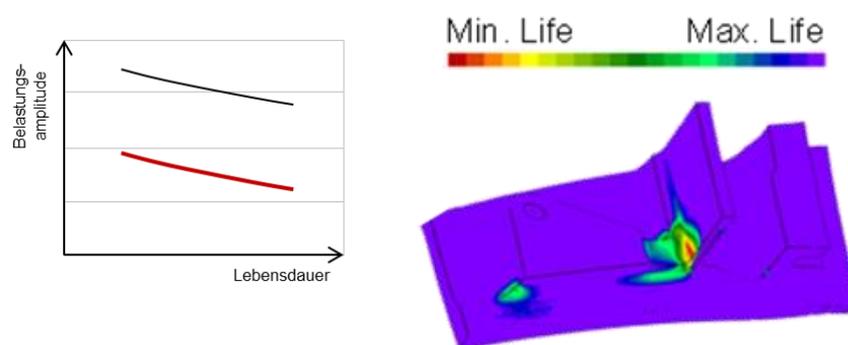


Abbildung 32: Lebensdauerbewertung von Bauteilen.

3.2.3 AP 2.3 TCF-Strebe: Hochtemperaturbelastetes Strukturbauteil in SLM

AP2.3.1 Datenermittlung

In diesem Arbeitspaket wurden die notwendigen Voraussetzungen geschaffen, um die Lebensdauervorhersage des Werkstoffs IN718 SLM bei hohen Anwendungstemperaturen unter Last zu verbessern.

Die Lebensdauervorhersage der zeit- und temperaturabhängigen plastischen Verformung wurde für unterschiedliche Lastniveaus an 44 Kriech- & Zeitstandversuchen ermittelt. Die Untersuchungen dokumentieren die Dehnungen von 0,1% bis zum Bruch. Insgesamt erfolgte die Ermittlung auf 3 unterschiedlichen Lastniveaus mit einer Laufzeit von bis zu 600h. Sämtliche Proben wurden im Anschluss fraktografisch untersucht und Ihre Gültigkeit bewertet.

Zeitstandfestigkeit:

Die Lebensdauervorhersage der zeit- und temperaturabhängigen plastischen Verformung für unterschiedliche Lastniveaus wurde in Zeitstandversuchen für den Werkstoff IN718 SLM ermittelt. Die Versuche erfolgten auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus unter ruhender Last. Die daraus bedingte irreversible plastische Verformung führt zu einer Werkstoffschädigung bis hin zum Bruch. Diese als Zeitstandfestigkeit definierte Größe beschreibt neben der Kriechfestigkeit, bedingt durch die unterschiedlichen Verformungsmechanismen, auch die Schädigungsmechanismen bis zum Bruch. Eine Übertragbarkeit der Kennwerte von Guss- oder Schmiedematerial ist aufgrund der unterschiedlichen Gefügeausprägungen jedoch nur bedingt möglich.

Abbildung 33 zeigt einen qualitativen Vergleich der Zeitstandversuche für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 50% bei einer Belastungsdauer von 23h. Die Datenermittlung für unterschiedliche Lasten und Temperaturen basiert auf 24 Zeitstandproben. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden die ermittelten Daten für den IN718 SLM mit Schmiede- und Gussmaterial verglichen (Abbildung 33).

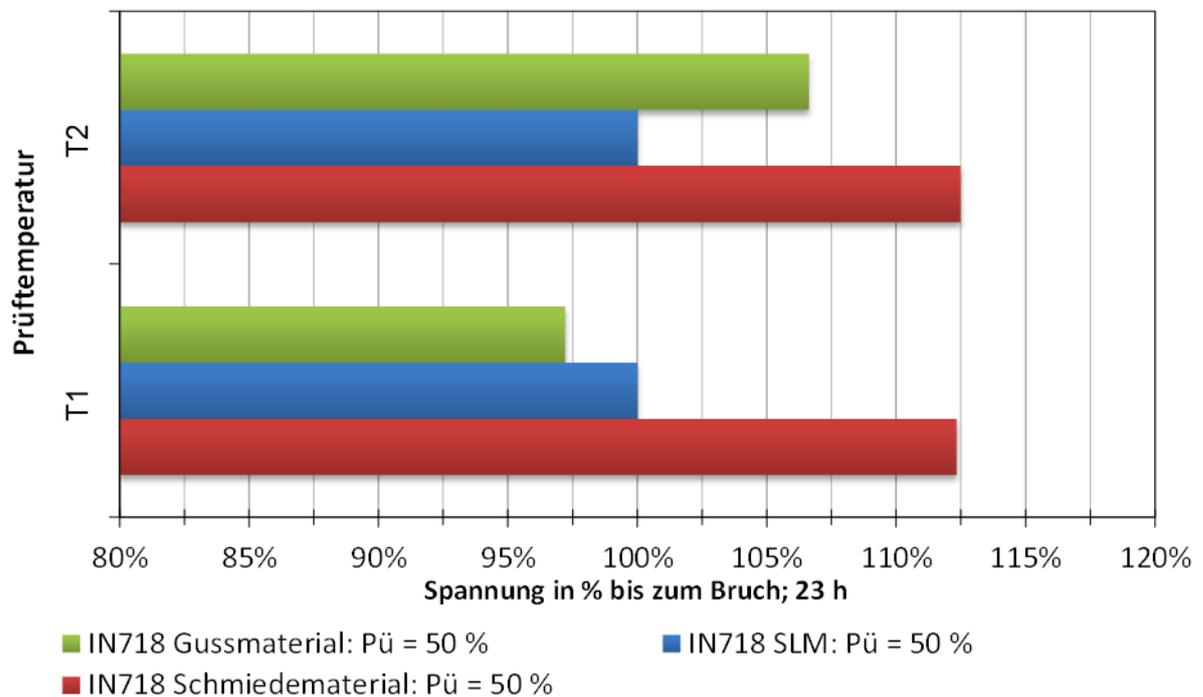


Abbildung 33: Qualitativer Vergleich der Zeitstanddaten für IN718 SLM-, Guss- und Schmiedematerial (23 h) für zwei hohe Temperaturen ($T_1 < T_2$)

Kriechen:

Auf Basis der Zeitstandversuche wurden die Parameter für die Kriechuntersuchung festgelegt.

Abbildung 34 zeigt einen qualitativen Vergleich für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 50%, bei einer Belastungsdauer von 50h. Die gewählte Belastungsdauer entspricht dem Bereich mit der höchsten statistischen Absicherung. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden die ermittelten Daten für den IN718 SLM mit Schmiede- und Gussmaterial verglichen.

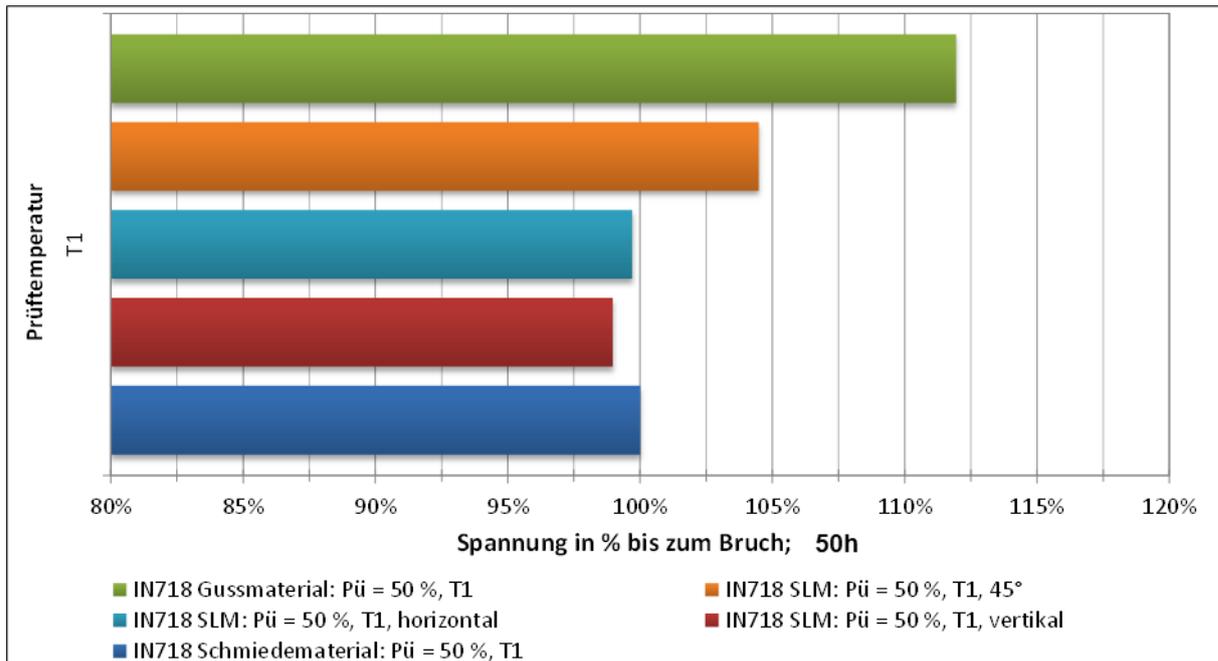


Abbildung 34: Qualitativer Vergleich der Zeitstanddaten für IN718 SLM in vertikaler, horizontaler und 45° Richtung zur Bauplattform im Vergleich zu Guss- und Schmiedematerial (50 h)

Die Ergebnisse zeigen die bereits erwartete Anisotropie des additiv gefertigten Materials. Die ertragbaren Spannungen bis zu Bruch in Abhängigkeit der Richtung liegen hierbei je nach Aufbaurichtung oberhalb oder unterhalb von Schmiedematerial.

Die Daten wurden in die Werkstoffdatenbank übernommen und stehen der Strukturmechanik für weitere Rechnungen zur Verfügung.

AP2.3.2 Fertigungsgerechtes Design

Ausgangspunkt für das fertigungsgerechte Design der Strebe war die Originalgeometrie, die im Gießverfahren hergestellt wird.

In enger Abstimmung mit der Strukturmechanik und dem Herstellungsprozess wurden iterativ verschiedene Designs erstellt und bewertet. Das optimierte Design ist in Abbildung 35 dargestellt. Die Details der Modifikationen sind in Arbeitspaketen AP2.3.3 und 2.3.4 näher beschrieben. Neben der Optimierung der Aufbaurichtung konnten auch die Anforderungen bezüglich der Überhänge berücksichtigt werden. Die Strebe wurde in einer Mischung aus Roh- und Fertigteil konstruiert und in AP2.3.4 erfolgreich aufgebaut.

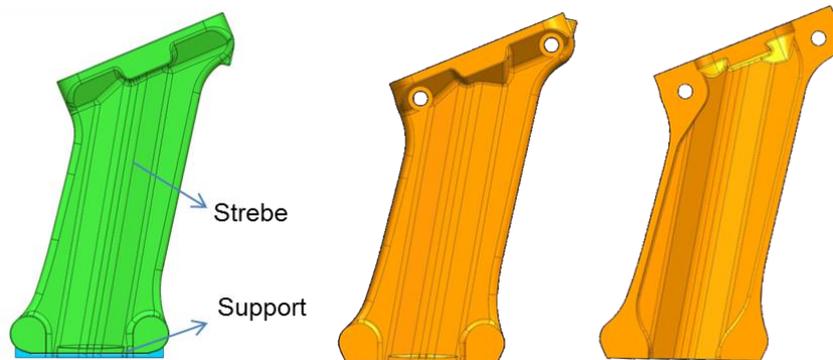


Abbildung 35: Originalmodell (grüne Strebe), SLM optimierter Aufbau (Orangene Strebe).

AP2.3.3 Strukturmechanische Bewertung

Auf Basis des in AP2.3.2 entwickelten optimierten Designs wurde ein strukturmechanisches Modell erstellt. Dieses wurde für die analytische Ermittlung der Lebensdauer unter Betriebslast herangezogen. Zunächst wurden Werkstoffkennwerte für unbearbeitete SLM-Oberflächen für die Berechnung verwendet, um das Festigkeitspotential für die kostengünstigste Variante zu ermitteln. Wie in Abbildung 36 zu erkennen ist, wurden in der Simulation große Bereiche identifiziert (Grün bis Rot eingefärbt), die die Mindestanzahl der Betriebszyklen teilweise deutlich unterschreiten.

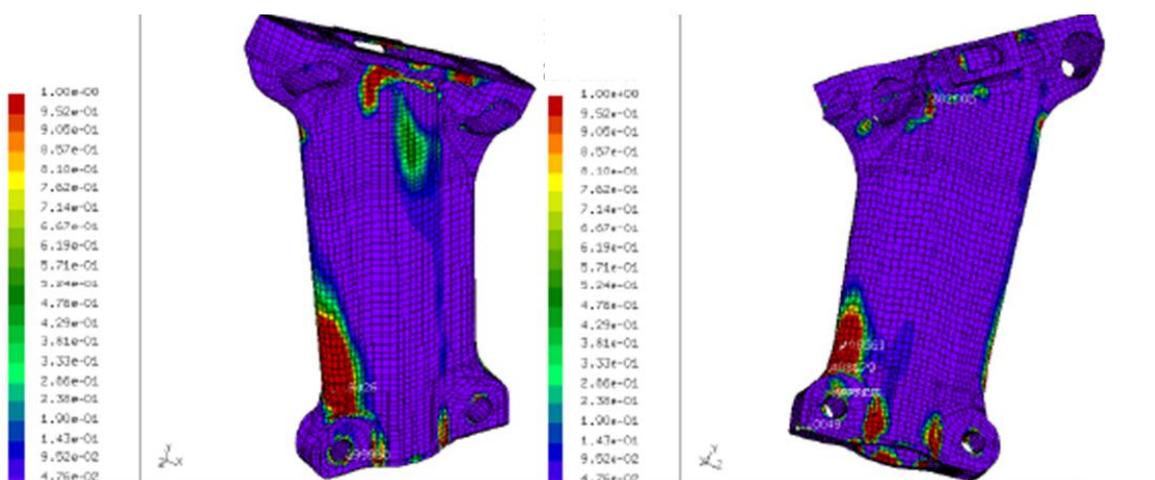


Abbildung 36: Darstellung der simulierten Lebensdauer einer Strebe mit unbearbeiteter Oberfläche. Ausschließlich die violetten Bereiche erreichen die Mindestanforderungen.

Da die großflächigen Bereiche designtechnisch nicht weiter zu optimieren waren, musste hier durch eine geeignete Oberflächenbearbeitung durch Nacharbeit wie z.B. Schleifen oder Fräsen die Oberflächengüte und damit die strukturmechanischen Eigenschaften verbessert werden.

In einem weiteren Schritt wurden somit Kennwerte von geschliffenem SLM-Werkstoff für die Simulation verwendet. Das Ergebnis in Abbildung 37 offenbart eine deutliche Steigerung der Lebensdauer der zuvor in Abbildung 36 identifizierten kritischen Bereiche. Jedoch sind auch hier lokale, hochbelastete Bereiche an den Bohrungen zu erkennen, die als kritisch einzustufen sind.

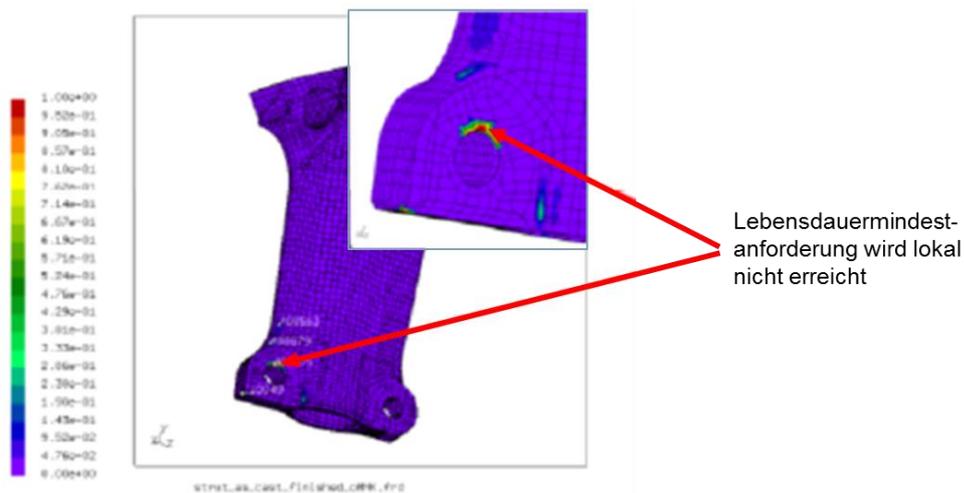


Abbildung 37: Darstellung der simulierten Lebensdauer einer Strebe mit geschliffener Oberfläche. Ausschließlich die violetten Bereiche überschreiten die Mindestanforderungen.

Für diese Bereiche wurde eine weitere Anpassung der Geometrie notwendig. Hierbei wurde versucht, durch Modifikation von Radien und geringfügiger lokaler Materialaufdickung diese kritischen Bereiche zu entschärfen. Das so entstandene Modell wurde in einer weiteren Simulation analytisch bewertet. Die in Abbildung 38 dargestellten Ergebnisse dieser Simulation zeigen keine kritischen Bereiche bezüglich der Lebensdauer mehr.

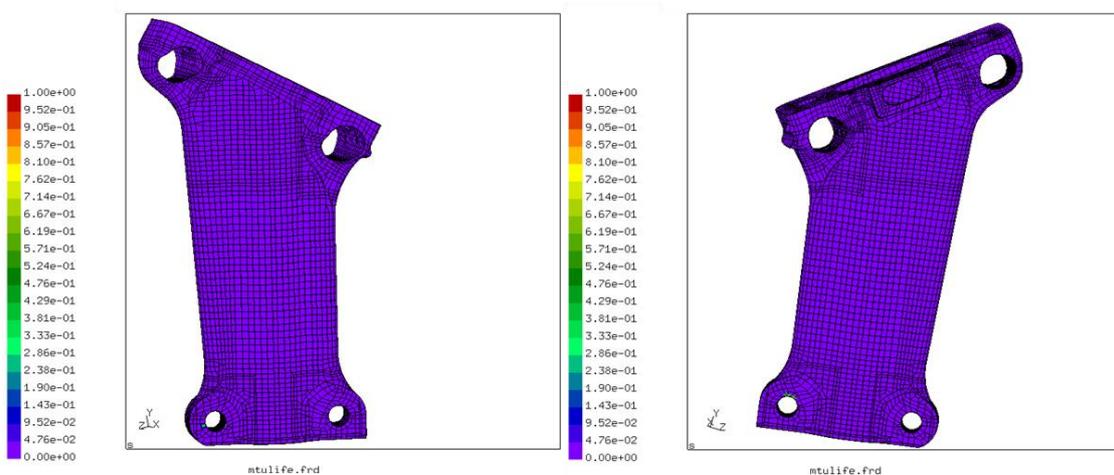


Abbildung 38: Darstellung der simulierten Lebensdauer einer Strebe mit geschliffener Oberfläche und lokal angepasster Geometrie. Ausschließlich die violetten Bereiche überschreiten die Mindestanforderungen.

Das Festigkeitspotential für eine Anwendung des Bauteils ist gegeben, sofern die Oberfläche mit einem geeigneten Verfahren nachbearbeitet wird.

AP2.3.4 Herstellung Demo-Bauteil einer Strebe mittels SLM

In enger Zusammenarbeit mit den Arbeitspaketen AP2.3.2 und AP2.3.3, wurde an der Umsetzung der Strebe in SLM iterativ gearbeitet.

Hierbei wurden neben der Aufbaurichtung der Strebe weitere Designelemente zur besseren Herstellbarkeit durch den Additiven Herstellungs (AM)-Prozess optimiert. So war es bei der gewählten „stehenden“ Aufbauausrichtung wichtig, an diversen Stellen die sog. Überhangwinkel so gering wie möglich zu gestalten. Hierzu wurden die für die Nachbearbeitungsprozesse nötige Ausrichtmarkierung versetzt, sowie Übergänge und Radien angepasst (siehe Abbildung 39 bis Abbildung 41).

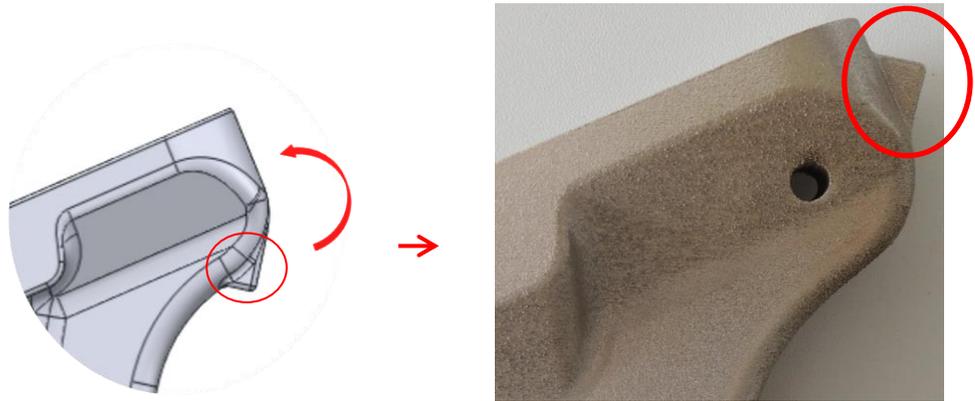


Abbildung 39: Beispiel zur notwendigen Versetzung der Ausrichtmarkierung: links: ursprüngliches CAD-Modell; rechts: modifizierter Ort wegen Veränderung der Aufbauausrichtung.



Abbildung 40: Beispiel zur Reduzierung des Überhangs: links: ursprüngliches CAD-Modell mit 90°-Überhang; rechts: Umsetzung mit 45°-Überhang.



Abbildung 41: Beispiel zur Reduzierung des Überhangs: links: ursprüngliches CAD-Modell mit 75°-Überhang; rechts: Umsetzung mit 15°-Überhang.

Um außerdem den Nachbearbeitungsaufwand des Bauteils zu verringern wurden im oberen Bereich der Strebe bereits zwei Bohrungen beim Aufbau der Strebe integriert, wie in Abbildung 42 zu sehen ist. Diese sind mit einem Übermaß konstruiert, damit nur noch eine Nachbearbeitung der inneren Oberfläche der Bohrung notwendig ist.

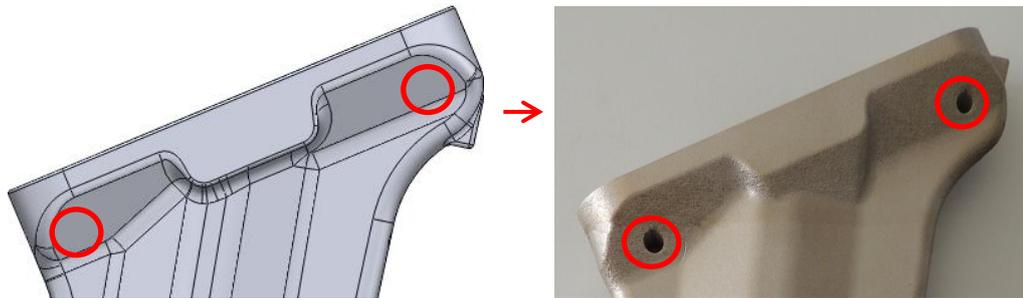


Abbildung 42: Aufbau der Strebe mit integrierter Bohrung.



Abbildung 43: Demo-Rohteil, hergestellt mittels SLM

Auf diese Weise konnte ein komplettes Demo-Rohteil der Strebe aufgebaut werden, vergleiche Abbildung 43.

Um die notwendige Festigkeit des Bauteils zu erhalten, wurde, wie in AP2.3.3 beschrieben, mit Werkstoffkenngrößen für glatte Oberflächen gerechnet.

Um die Rauigkeitsanforderungen des Bauteiles (Innen- und Außengeometrie) zu erfüllen, muss ein zusätzlicher Arbeitsschritt eingeplant werden. Dieser Prozess wurde

außerhalb des Arbeitspaketes in einem parallel laufenden Projekt entwickelt. In diesem Projekt wurde ein Gleitschleifverfahren entwickelt, das auch für den inneren Bereich der Sterbe angewandt werden kann. Somit konnte eine ausreichende Oberflächengüte erzielt werden.

Auf Basis dieser Ergebnisse konnte jetzt ein AM Demobauteil der Strebe in einer seriennahen Umgebung die komplette Prozesskette von der AM Herstellung bis zur Roh-teilfertigbearbeitung durchlaufen.

Im Abbildung 44 sieht man die Gegenüberstellung der hergestellten Oberfläche aus der AM Anlage direkt nach der Herstellung (oben), und nach der Oberflächenbehandlung (unten).

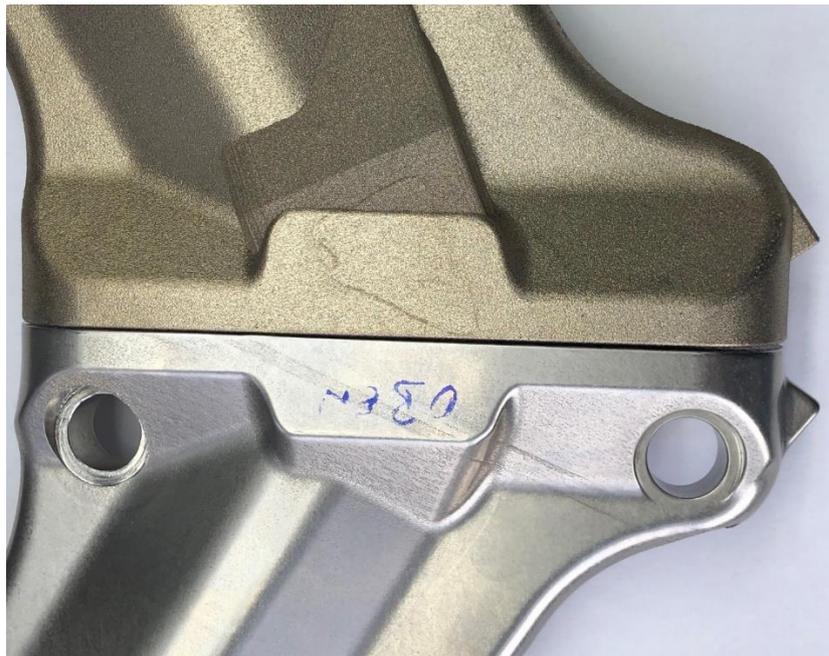


Abbildung 44: Gegenüberstellung AM Rohteil zu bearbeitetem Rohteil.

Damit konnte ein Demobauteil der Strebe in einer seriennahen Umgebung die komplette Prozesskette von der AM Herstellung bis zur Roh-teilfertigbearbeitung durchlaufen und liegt in entsprechend guter Qualität vor.

AP2.3.5 Einfluss Pulveralterung auf Materialqualität

Zunächst wurde das Ausgangspulver für die ersten Baujobs untersucht. Mit diesem Pulver wurden erste Proben für eine Analyse der Qualität hinsichtlich Werkstoffkenngrößen und Fehlern hergestellt.

Aus dem Restpulver wurden mehrere Baujobs durchgeführt, wobei das nicht verschweißte Pulver mehrfach, ohne Beimischung von Neumaterial, gesiebt, analysiert und wiederverwendet wurde. Die Versuche wurden jeweils mit hoher (25%) und niedriger (5%) Packungsdichte durchgeführt. Der Prozessablauf für die Pulverwiederverwendung wurde dabei gemäß Abbildung 45 durchgeführt.

Experimentelle Vorgehensweise

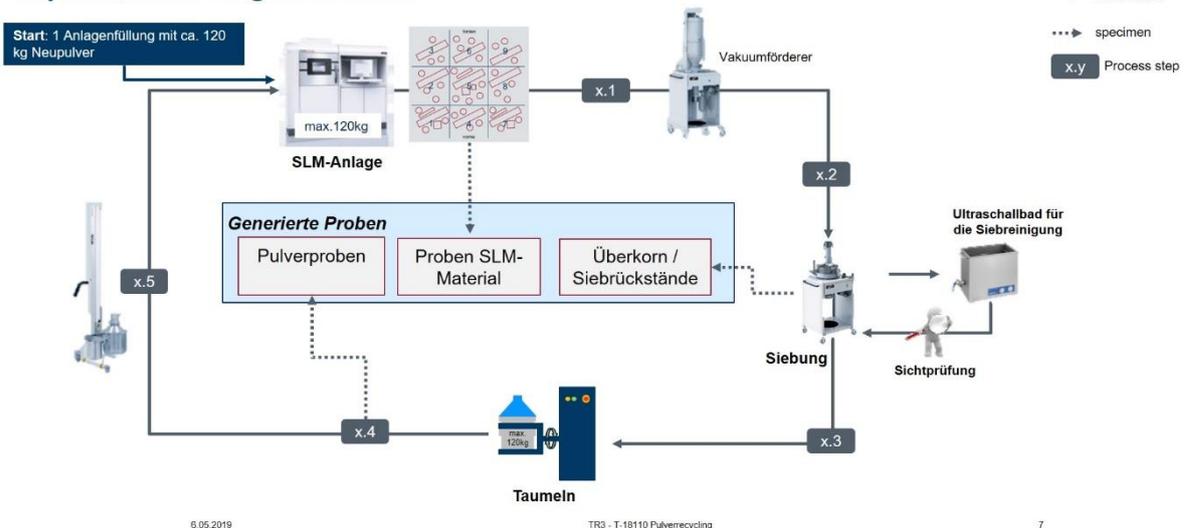


Abbildung 45: Prozessablauf Pulver-Wiederverwendung

Bei der Analyse des Pulvers wurden folgende Eigenschaften überprüft: Partikelgröße und deren Verteilung, Pulvermorphologie sowie chemische Veränderungen.

Bei den Analysen konnten über 11 Iterationen weder bei der Korngrößenverteilung, noch bei der Partikelgeometrie Veränderungen festgestellt werden, wie in Abbildung 46 dargestellt.

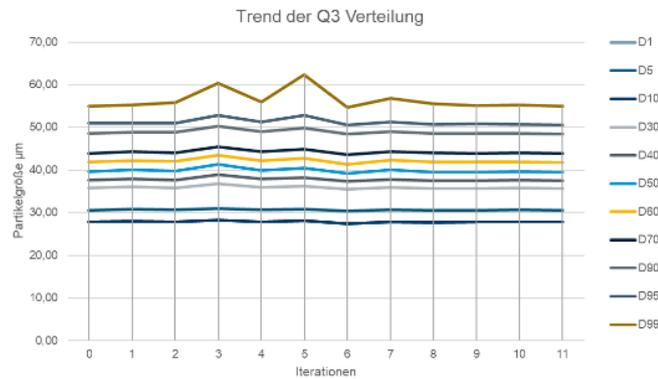


Abbildung 46: Veränderung der Partikelgrößenverteilung über mehrere Iterationen

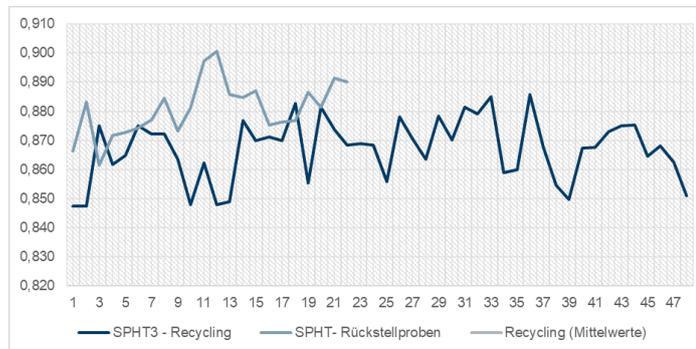


Abbildung 47: Veränderung der Partikelmorphologie über mehrere Iterationen

Ein signifikanter Trend wurde lediglich bei der Sauerstoffaufnahme sichtbar, die sowohl im Pulver, als auch im verbauten Material ermittelt wurde. Dies ist in Abbildung 47 dargestellt.

Eine Analyse des Prozessergebnisses an den hergestellten Bauteilen wurde über mehrere Zyklen hinweg hinsichtlich chemischer Veränderungen, Einfluss auf die Oberflächenrauheit sowie einer Zunahme von Defekten auf Basis metallografischer Untersuchungen durchgeführt. Die Analyse der Bauteileigenschaften erfolgte mittels statischer mechanischer Kennwerte.

Abgesehen vom Sauerstoffgehalt konnte weder im Pulver, noch im aufgebauten Material eine Veränderung festgestellt werden. Auffällig war lediglich, in Abhängigkeit von der Packungsdichte, die Zunahme des Sauerstoffgehalts bei zunehmenden Recyclingzyklen, wobei der Sauerstoffanteil im aufgebauten Material unterhalb dessen im Pulver lag (siehe Abbildung 48).

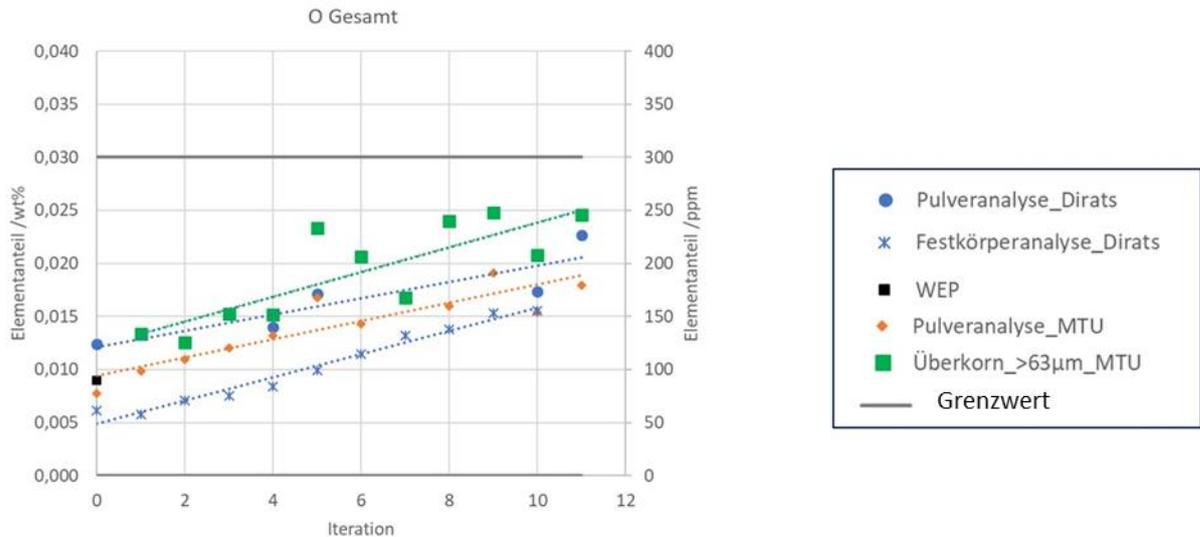


Abbildung 48: Veränderung des Sauerstoffanteils über mehrere Iterationen

Bei Sicherstellung eines stabilen Prozessablaufes und Überwachung des Sauerstoffanteils im Pulver kann aufgrund der gezeigten Ergebnisse das IN718 Pulver im AM-Prozess mehrfach wiederverwendet werden.

3.2.4 AP 2.4 TCF-Gehäuse: additive Herstellung Laserauftragsschweißen (LAS)

AP2.4.1 Verfahren

Im Förderzeitraum wurden drei unterschiedliche Verfahren zum Auftragschweißen von einzelnen Features auf Gehäusebauteile untersucht. Diese sind in Abbildung 49 dargestellt.

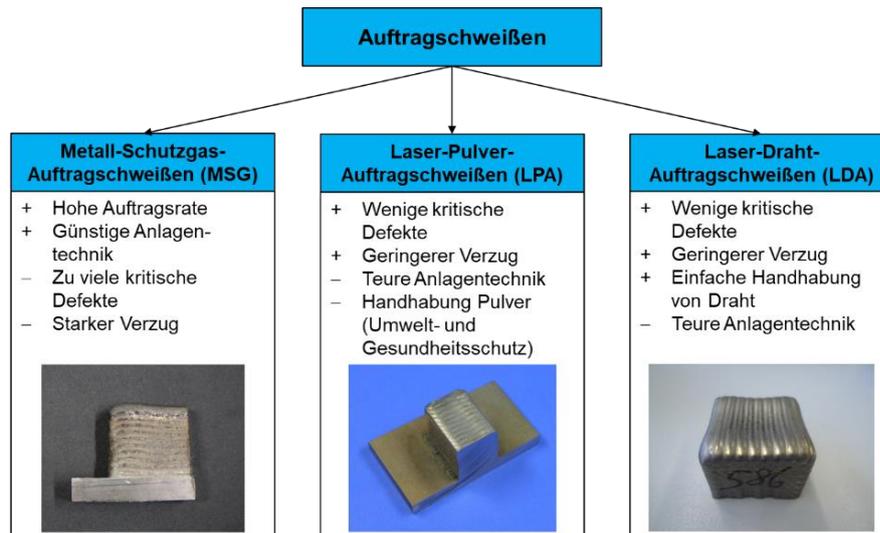


Abbildung 49: Darstellung der untersuchten Verfahren zum Auftragschweißen von Features auf Gehäusebauteile

Beim MSG kam es häufig zu kritischen Defekten mit einer Länge größer 200 µm. Typischerweise bestanden diese Defekte aus Poren, Bindefehlern und Heißrissen. Zudem kam es zu einem starken Verzug der Grundplatte, welcher beim Aufschweißen auf spätere Bauteile zu Schwierigkeiten führen könnte. Positiv zu erwähnen sind jedoch die hohe Auftragsrate sowie die günstige Anlagentechnik im Vergleich zu den Laserverfahren. Das MSG wurde zwar für das Auftragschweißen an hoch belasteten Gehäusebauteilen nicht weiterverfolgt, ist jedoch mit Sicherheit bei anderen Anwendungen ein vielversprechendes Verfahren.

Bei LPA und LDA sind Materialqualität als auch Wirtschaftlichkeit ähnlich. Auch der Verzug unterscheidet sich bei diesen beiden Verfahren kaum. Das LDA birgt jedoch aus Sicht der MTU Aero Engines AG einige Vorteile gegenüber LPA. Hier ist zum einen die geringe Porosität infolge des Drahtes als Rohmaterial innerhalb der Proben zu nennen. Des Weiteren bietet das LDA einige Vorteile hinsichtlich Arbeits- und Umweltschutz. Das beim LPA verwendete Pulver ist lungengängig, wodurch ein Schutz der Mitarbeiter notwendig wird. Zudem ist bei Pulver mehr Aufwand hinsichtlich Lagerung und Entsorgung zu betreiben. Aus diesen Gründen wurde in weiteren Versuchen das LDA optimiert.

Hierbei wurden in mehreren Versuchsplänen Quader mit den Maßen 50 mm x 50 mm x 20 mm hergestellt. Dabei wurden zu Beginn die Parameter Laserleistung, Drahtvorschub, Vorschub, Höhenversatz sowie Lagenversatz variiert. Zum Ende der Variation

wurden für Vorschub, Höhenversatz und Lagenversatz Werte ermittelt und festgelegt. Anschließend wurde ein Parameterfenster ermittelt, mit dem Proben ohne kritische Fehlstellen hergestellt wurden (Abbildung 50).

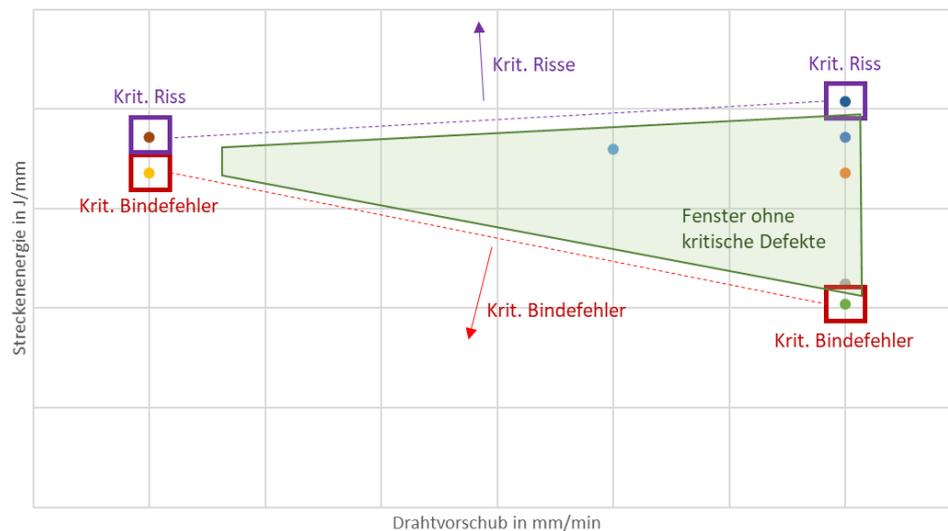


Abbildung 50: Darstellung von einem Parameterfenster ohne kritische Defekte in Abhängigkeit von Streckenenergie und Drahtvorschub

Wie in Abbildung 50 zu erkennen, bildet sich in Abhängigkeit von Streckenenergie und Drahtvorschub ein Fenster mit Proben, die keine kritischen Fehlstellen aufwiesen. Im Anschluss wurden diese Parameter auf umlaufende Schweißungen übertragen. In Abbildung 51 sind Proben für umlaufende Schweißungen zu erkennen.



Abbildung 51: Probeschweißungen für umlaufende Features

AP2.4.2 Werkstoff/Festigkeit

In AP2.4.2 wurden die in AP2.4.1 hergestellten Proben metallografisch auf kritische Defekte untersucht. Als kritische Fehlstellen wurden hierbei Bindefehler, Risse, Lunker und Poren mit einer Ausdehnung größer 200 µm definiert.

Zudem wurden sowohl statische als auch dynamische Festigkeitsproben untersucht. Um auch die Übergangszone zwischen Schmiedematerial und aufgeschweißtem Material zu prüfen, wurden Hybridproben hergestellt (Abbildung 52). Diese bestehen zur Hälfte aus Schmiedematerial und zur anderen Hälfte aus aufgeschweißtem Material. Anschließend wurden die einzelnen Proben aus den Blöcken herausgetrennt.



Abbildung 52: Festigkeitsproben aus Schmiedematerial (unten) und mittels LPA aufgeschweißtem Material (oben)

Alle geprüften Proben (sowohl LPA als auch LDA) rissen im aufgeschweißten Bereich, was für eine gute Materialqualität in der Anbindungszone spricht. Bei den statischen Festigkeitsproben wurden Warmzugversuche bei 650°C sowie Zugversuche bei Raumtemperatur durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden nahezu die Abnahme- werte für das Schmiedematerial erreicht.

Bei den dynamischen Versuchen wurden LCF sowie HCF-Versuche durchgeführt. Hier schnitten sowohl die LDA- als auch die LPA-Proben erheblich schlechter ab als das Schmiedematerial (Abbildung 53).

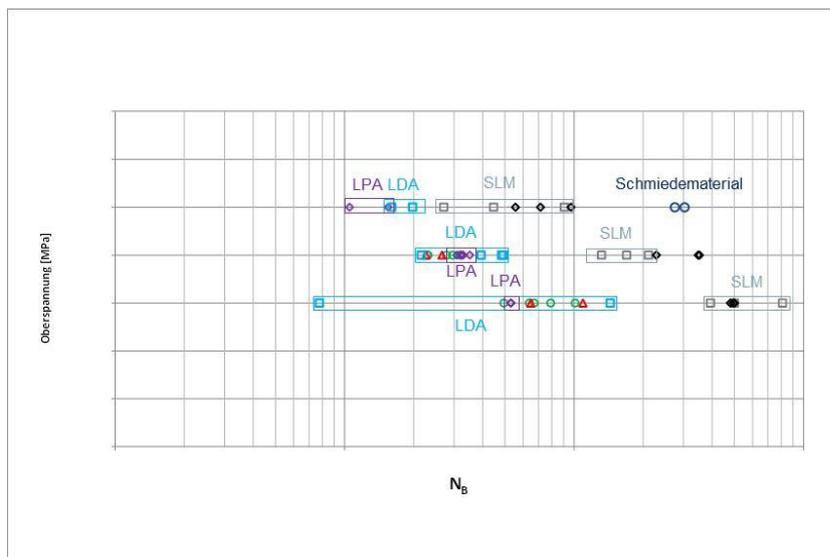


Abbildung 53: Ergebnisse der LCF-Tests

In Abbildung 53 ist zu erkennen, dass die LCF-Werte beim LDA eine deutlich höhere Streuung aufweisen als beim LPA. Die schlechten Werte wurden durch große Defekte,

wie beispielsweise Heißrisse, verursacht. Dennoch ist die Tendenz zu erkennen, dass LDA höhere Festigkeitswerte als LPA erreichen kann. Hierfür müssen jedoch die einzelnen kritischen Defekte über eine weitere Optimierung der Parameter vermieden werden.

Im Projektverlauf zeigte sich, dass das Gehäuse in vielen Bereichen sehr stark LCF-belastet ist. Um das Auftragschweißen sicher einsetzen zu können, ist eine weitere Optimierung der Parameter mit dem Ziel einer Erhöhung der Festigkeitseigenschaften notwendig. Weitere notwendige Anpassung können zukünftig auch über Designänderungen (z.B. Querschnittsanpassungen, Änderung der Radien) umgesetzt werden, um reduzierte Werkstoffeigenschaften zu kompensieren.

AP2.4.3 Entwicklung, Optimierung Prozesskette

Die Prozesskette umfasst einige relevante Schritte, die im Einzelnen untersucht wurden. Abbildung 54 gibt eine vereinfachte Prozesskette wider.



Abbildung 54: Prozesskette beim Laser-Auftragschweißen auf Gehäusebauteile

Nachdem auf das Gehäuse Features aufgeschweißt wurden, werden diese einer Sichtprüfung zu unterziehen. Anschließend erfolgt eine Wärmebehandlung, um die Eigenspannungen in dem Bauteil zu reduzieren. Für IN718 Schmiedematerial wurde eine typische Wärmebehandlung festgelegt. Diese setzt sich aus Lösungsglühen und Auslagern zusammen.

Im Anschluss an die Wärmebehandlung findet eine zerspanende Bearbeitung auf Endkontur statt. Hierfür wurden Zerspanungsversuche an Proben aus LDA-Material durchgeführt. Beim Drehen mit Hartmetallschneiden zeigten sich keine Auffälligkeiten und das Material verhielt sich ähnlich wie IN718 Gussmaterial. Beim Drehen mit Keramikschneiden kam es jedoch zu einem erhöhten Verschleiß. Dieser resultiert vermutlich aus der unebenen Oberfläche und dem dadurch unterbrochenen Schneideneingriff. Auch die Versuche zum Fräsen zeigten positive Ergebnisse. In Abbildung 55 ist ein Boss dargestellt, der aus LDA-Material herausgefräst wurde.

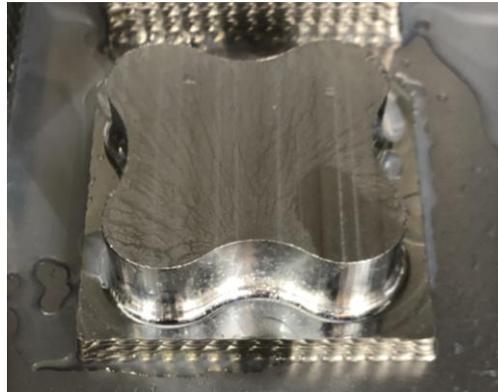


Abbildung 55: Mittels LDA und Fräsen hergestellter Boss

Auch zum zerstörungsfreien Prüfen wurden Versuche durchgeführt. Hierbei wurden unter anderem die Verfahren Ultraschall, Computertomografie (CT) und analoges sowie digitales Röntgen getestet.

Die Versuche zeigten, dass Ultraschall nur bedingt für die Prüfung von LDA-Material geeignet ist. Bei den Versuchen konnte nur ein schwaches Rückwandecho erzielt werden, was vermutlich durch die relativ große Korngröße im Vergleich zu z.B. SLM verursacht wird. Infolgedessen können Fehlstellen nicht sicher erkannt werden.

Beim CT dagegen konnten auch kleine Defekte detektiert werden, jedoch lassen sich mit diesem Verfahren nur kleine Proben untersuchen. Somit kommt für ein komplettes Gehäuse nur Röntgen in Frage. Hier können in Abhängigkeit der Wandstärke Volumenfehler bis zu einer hinreichenden Auflösungsgrenze detektiert werden.

AP2.4.4 Konstruktion/Bauteil

Es wurden unterschiedliche Rohteile mit aufgeschweißten Features entworfen und wirtschaftlich bewertet. In Abbildung 56 ist ein Rohteil mit mehreren aufgeschweißten Bereichen zu erkennen.

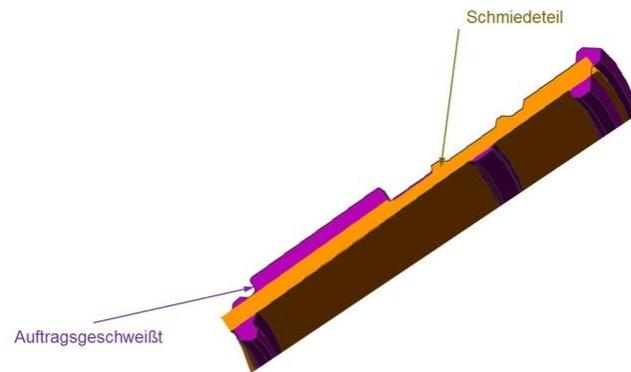


Abbildung 56: Entwurf für ein Rohteil mit aufgeschweißten Features

In diesem Fall wurde angenommen, dass alle Bereiche mittels Auftragschweißen hergestellt werden können. Dies hätte eine erhebliche Vereinfachung des Rohteils sowie Verringerung des Einsatzmaterials zur Folge. Zudem wurden anhand des CAD-Modells die Volumina der aufgeschweißten Bereiche ermittelt und dienten als Input für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit (Abbildung 57).

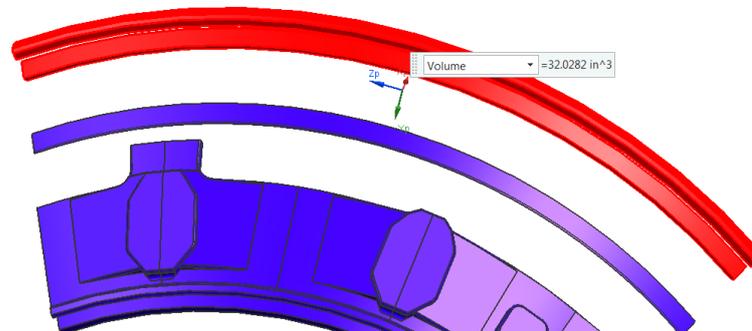


Abbildung 57: Ermittlung des aufgeschweißten Volumens mittels CAD-Modell

Weiterhin wurde im Rahmen des Projektes ein Flansch auf ein Gehäuse aufgeschweißt. Hierbei wurden erste Erfahrungen zum Schweißen auf ein Bauteil gesammelt. Um das notwendige Aufmaß bei Rohteilen abschätzen zu können, wurde der Verzug infolge des Auftragschweißens sowie infolge der Wärmebehandlung mittels dreidimensionaler, optischer Vermessung ermittelt. In Abbildung 58 ist ein Bild des Demobauteils zu erkennen.

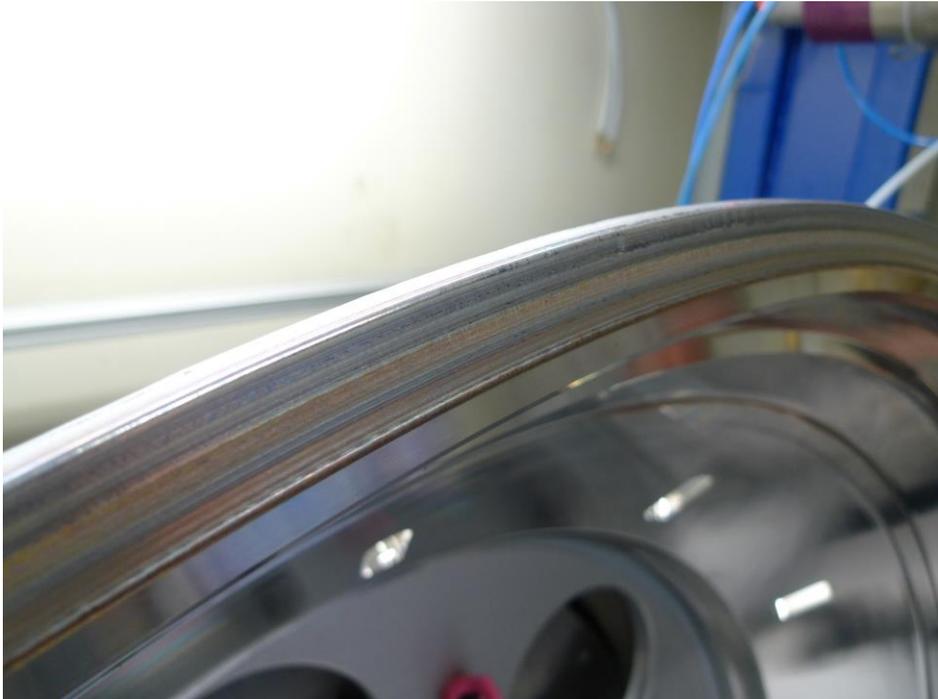


Abbildung 58: Schweißversuch auf Demobauteil

Der Versuch auf dem Demobauteil zeigten keine Probleme bei der Handhabung des Bauteils sowie bei der Schweißung darauf. Die Ergebnisse der Verzugsmessung zeigten, dass sich der Schrumpfung an dem Gehäuse gleichmäßig über den Radius ausbreitet. Zudem liegt er in einer beherrschbaren Größenordnung. Somit ist der Versuch an dem Demobauteil als Erfolg zu betrachten.

4 Literaturverzeichnis

[1] Mimic, Dajan (2017) Lufo V Call 1: Transition von Seitenwandgrenzschichten schnelldrehender Niederdruckturbinen, Abschlussbericht

[2] Bode C, Aufderheide T, Friedrichs J, Kožulović D. Improved Turbulence and Transition Prediction for Turbomachinery Flows. ASME. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 1: Advances in Aerospace Technology ():V001T01A067. doi:10.1115/IMECE2014-36866.

[3] Müller, C. und Herbst, F. (2014): Modelling of Crossflow-Induced Transition Based on Local Variables. In: 11th World Congress on Computational Mechanics, 5th European Conference on Computational Mechanics, 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics, 20-25 July 2014, Barcelona, Spain.

[4] Herbst F, Kožulović D, Seume JR. Transition Modelling for Vortex Generating Jets on low-Pressure Turbine Profiles. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 7: Turbomachinery, Parts A, B, and C ():1197-1208. doi:10.1115/GT2011-45621.

[5] Kožulović D, Röber T. Modelling the Streamline Curvature Effects in Turbomachinery Flows. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 6: Turbomachinery, Parts A and B ():1239-1248. doi:10.1115/GT2006-90265.

5 Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamic
CFX	CFD Simulationssoftware von Ansys, Inc
CHT	Conjugate Heat Transfer
CMC	Ceramic Matrix Composite
CT	Computertomografie
EBSD	electron backscatter diffraction
EXP	Experiment
GO	Ground Overlap
FEM	Finite Element Methode

FPH	Flow Path Hardware
HAB	High Angle Boundaries
HCF	High Cycle Fatigue
HDT	Hochdruckturbine
HTC	Heat Transfer Coef. (Wärmeübergangskoeffizient)
IGV	Inlet Guide Vane
LAS	Laser Auftrag-Schweißen
LCF	Low Cycle Fatigue
LDA	Laser-Draht-Auftragsschweißen
LPA	Laser-Pulver-Auftragschweißen
MSG	Metall-Schutzgas-Auftragsschweißen
PPL	Proportional Limit (Proportionalitätsgrenze)
REM	Rasterelektronenmikroskopie
SLM	Selective Laser Melting
SW	Spokewheel (Speichenrad)
TCF	Turbine Center Frame
TGB	Querkorngrenze

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht		
3. Titel Advanced Turbine Center Frame mit neuen Bauweisen (Adv-TCF)			
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Heller, Lothar	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2019	6. Veröffentlichungsdatum Juli 2020	
	7. Form der Publikation		
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) MTU Aero Engines AG Postfach 50 06 40 D-80976 München		
9. Ber. Nr. Durchführende Institution		10. Förderkennzeichen 20T1502	
		11. Seitenzahl 74	
		12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	
13. Literaturangaben 5		14. Tabellen 2	
		15. Abbildungen 58	
		16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)			
18. Kurzfassung In diesem Fördervorhaben wurden neue Technologien für ein Turbine Center Frame (TCF), dem Verbindungs- und Versorgungselement zwischen Hochdruckwellenlagerung und Gehäuse, entwickelt um weiter die ambitionierte Gewichtsvorgabe und Effizienzsteigerung im Bereich des Moduls zu erreichen. Das Vorhaben gliederte sich in zwei Hauptarbeitspakete HAP1 „Advanced Auslegung“ Hier wurden zum einen die Aussagegenauigkeit der CFD Modellierung hinsichtlich der Modellierung der drallbehafteten Nachlaufeffekte aus der Hochdruck-turbine (HDT) verbessert. Zum anderen konnten alternative Designs die Masse des TCF deutlich reduzieren. Diese Arbeiten sind durch die Erweiterung der Simulation der komplexen Innenströmung auf 3D-CFD mit unstrukturierter Vernetzung eng verknüpft, um zusätzlich Kühl- und Sperrlufterinsparung zu realisieren. HAP2 „Neue Werkstoffe und Bauweisen für Panel, Strebe und Gehäuse“ In diesem Hauptarbeitspaket wurden geeignete Prüfverfahren bewertet, um Schadensstrukturen an CMC als Basis für eine verbesserte Lebensdauerbewertung strukturiert zu bewerten. Die LCF-Lebensdauer vorhersage für MAR M247 wurde durch die erweiterte Simulation von Porositätseffekten im Legierungsaufbau verbessert und konnte um ein FEM basiertes Rissentstehungsmodell erweitert werden. Für die SLM basierte Herstellung von statischen Triebwerksbauteilen aus IN718 wurde bei gleicher Werkstoffqualität die Aufbaurate gesteigert und die Einsatzreife mit dem Referenzbauteil TCF erreicht. Durch Laserauftragsschweißen konnte ein Weg aufgezeigt werden, Wertschöpfung von der Herstellung des Schmiederohlings hin zur Fertigbearbeitung zu verlagern und damit das Gewicht des Schmiederohlings zu reduzieren			
19. Schlagwörter Turbine Center Frame, TCF, CMC, Aerodynamik, Design, Laserauftragsschweißen, Additive Fertigung, Porosität, Fremdkörner			
20. Verlag	21. Preis		

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Advanced Turbine Center Frame mit neuen Bauweisen (Adv-TCF)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Heller, Lothar	5. end of project 31.12.2019
	6. publication date July 2020
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) MTU Aero Engines AG Postfach 50 06 40 D-80976 München	9. originator's report no.
	10. reference no. 20T1502
	11. no. of pages 74
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 5
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 58
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract This project concentrated on new technologies for the turbine center frame (TCF). This module connects the High-Pressure bearing with the casing. The project focused on reducing weight and increasing efficiency of this module. On two main subjects was worked on: HAP1 „Advanced Design“ For CFD models the pre-test prediction including the special effects of vortex flow effects in the wake of the high pressure turbine (HPT) was studied experimental and validated the CFD tools. Improved design concepts, considering reduction in weight, have been investigated. An analytical study by 3D CFD of the inner flow of the TCF was started. The focus here was on an optimized CFD process. Therefore a variation of different boundary conditions as number of elements, unstructured grid etc. was looked at. With this investigation a reduction of secondary air can be proved. HAP2 „New materials and manufacturing of panels caing and support“ New testing procedures for CMC materials has been looked at to establish a reliable material characteristic database. For MAR M247 LCF-lifing prediction, taking porosity and foreign grain into account, was tested and used for increased lifing prediction. Additive manufacturing of the static parts out of IN718 has been investigated, focusing on material quality and increased build-up. This was shown for the support part of the TCF. First steps on Laser cladding were done to show the ability to change the design of forged raw parts. This can be sued for reduced weight of such parts and reducing manufacturing processes.	
19. keywords Turbine Center Frame, TCF, CMC, Aerodynamic, Design, laser cladding, Additive manufacturing, Porodsity, foreign grains	
20. publisher	21. price