

Luftfahrtforschung und -technologie

Abschlussbericht

Niederdruckturbinen für verbrauchsreduzierte GTF-Triebwerke (GTF-Turb)

Förderkennzeichen 20T1105

Laufzeit: 01.01.2012 bis 30.06.2016

Berichtersteller: Dr. Leonhard Wald



MTU Aero Engines AG

München, September 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Zusammenfassung.....	6
2.1	Projektstrukturplan.....	6
2.2	Erreichte Ergebnisse	6
2.2.1	AP 1 Schwingungsmanagement in GTF-Turbinen.....	7
2.2.2	AP 2 Optimale Schaufelbelastung für schnelllaufende Turbinen	10
2.2.3	AP 3 Präzisere Lebensdauer- und Versagensmodellierung für Turbinenschaufeln	12
3	Technische Darstellung der Arbeitspakete.....	17
3.1.1	AP 1 Schwingungsmanagement in GTF-Turbinen.....	17
3.1.2	AP 2 Optimale Schaufelbelastung für schnelllaufende Turbinen	29
3.1.3	AP 3 Präzisere Lebensdauer- und Versagensmodellierung für Turbinenschaufeln	35
4	Literaturverzeichnis	66

1 Einleitung

Das von der MTU im Rahmen des Technologieprogramms CLAIRE (CLEan AIR Engine) und ebenso schon seit vielen Jahren gemeinsam mit Pratt & Whitney verfolgte Triebwerkskonzept des Getriebefans (Geared Turbo Fan, GTF) hat sich mittlerweile mit der Anwendung in vier Flugzeug-Programmen (Mitsubishi Regionaljet MRJ, Bombardier C-Series, Airbus A320neo und Irkut MS-21) sowie einem Re-engining der Embraer E-Jets erfolgreich etabliert. Weitere Anwendungen, wie z.B. in den Nachfolgemustern der Boeing B737 und einer A30X, erscheinen möglich.

Hierzu und für weitere zukünftige Anwendungen ist allerdings die Entwicklung einer zweiten Generation des GTF erforderlich, zu deren Vorbereitung die MTU schon vor mehreren Jahren mit der Entwicklung neuer Technologien begonnen hat, so mit dem LuFo IV/2 Fördervorhaben „Validierung von Technologien für die nächste Generation von Getriebefan-Konzepten“ (NextGen-GTF) und dem LuFo IV/3 Fördervorhaben „Schnelllaufende Niederdruckturbinen für GTF-Anwendungen der zweiten Generation“ (HiSpeeT). Mit diesem sich daran anschließenden Fördervorhaben „Niederdruckturbinen für verbrauchsreduzierte GTF-Triebwerke“ (GTF-Turb) wurde die Entwicklung dieser neuen Technologien weiter fortgesetzt. Durch die in diesem Rahmen durchgeführten neuen Entwicklungen werden die in den genannten Fördervorhaben durchgeführten Arbeiten ergänzt bzw. es wird auf den dort bereits gewonnenen Erkenntnissen aufgebaut.

Die neuen Technologien werden die MTU dazu befähigen, die GTF-Antriebe der zweiten Generation entwickeln zu können und damit einen maßgeblichen Beitrag zur Erfüllung der im MTU-CLAIRE-Programm bzw. ACARE 2020 postulierten Ziele zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes und des Fluglärms zu leisten. Damit wird die MTU nicht zuletzt auch ihren anvisierten Beitrag zur Klimaverbesserung erbringen.

Daraus abgeleitet ergeben sich folgende technische Ziele für das Vorhaben:

- Erarbeitung und Validierung neuer Technologien zur weiteren Steigerung des Wirkungsgrades der Niederdruckturbinen (NDT).
- Erarbeitung eines Schwingungsmanagements in schnelllaufenden NDT.
- Erarbeitung einer präziseren Lebensdauererfassung in schnelllaufenden NDT.

Das Verbundvorhaben besteht aus 3 Arbeitspaketen:

- **AP 1 Schwingungsmanagement in GTF-Turbinen:**

In AP 1 wurden Maßnahmen zur genaueren Erfassung und zur Reduzierung von HCF-Schwingungen adressiert. Deren genauere Erfassung und Vorhersage hat bauartbedingt bei modernen GTF-Turbinen eine erheblich zunehmende Bedeutung. Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die die Basis für eine zuverlässigere analytische Vorhersage verbessern bzw. bereitstellen. Es wurden für die Analyse von Mistuningeffekten in Deckbandbeschaufelungen spezifische Versuche durchgeführt, die zur Absicherung neu entwickelter analytischer Methoden notwendig sind. Für die Validierung der Berechnungsverfahren für aeroelastische Sachverhalte wie Forced Response wurden zeitlich hochauflösende statische Drücke und Strömungsfelder in einer Versuchsturbine vermessen.

- **AP 2 Optimale Schaufelbelastung für schnelllaufende Turbinen:**

In AP 2 wurde die optimale aerodynamische Schaufelbelastung für schnelllaufende Turbinen erarbeitet und in einem full-scale Rigtest in einer schnelllaufenden NDT überprüft. Damit wurde der Designraum schnelllaufender NDT zur Ableitung eines für den Wirkungsgrad optimalen Designs abgesichert. Zur Auswahl eines sinnvollen Designs im Rigtest wurden im Vorfeld grundlegende Untersuchungen im Windkanal und in Turbinengitterkaskaden durchgeführt.

- **AP 3 Präzisere Lebensdauer- und Versagensmodellierung für Turbinenschaufeln:**

In AP 3 wurden die für mechanisch hochbelastete GTF-NDT-Schaufeln besonders relevanten Lebensdauer- und Schaufelversagensmodelle abgesichert und durch geeignete experimentelle Daten neu- bzw. weiterentwickelt. Hierbei wurden drei Themenbereiche adressiert.

- Da Abplatzungen von Oxidschutzschichten Turbinenbeschaufelungen vorzeitig schädigen können, wurde ein Konzept zur Modellierung der Lebensdauer von Schutzschichten unter zyklischer Beanspruchung erarbeitet.
- Die im Verbundvorhaben HiSpeeT (LuFo IV/3) begonnenen Arbeiten zur Rissfortschrittsmodellierung und zu Rissfortschrittsdaten für Turbinenschaufelwerkstoffe wurden durch Hinzunahme dreier in NDT verbreitet eingesetzter Ni-Basiswerkstoffe ergänzt. Dies wurde zur genaueren analytischen Erfassung von Schädigungsmechanismen der mechanisch hochbelasteten NDT in GTF Triebwerken benötigt.
- Zur vollständigen rechnerischen Beschreibung von Schaufelverlustszenarien (Containment), die in schnelllaufenden Turbinen die Gehäusedicke entscheidend beeinflussen, wurden zusätzlich zu den im Verbundvorhaben HiSpeeT (LuFo IV/3) gelaufenen Arbeiten Modelle zur Erfassung des Schaufelversagens entwickelt. Dies ermöglicht eine komplette FEM-Simulation eines Schaufelverlusts.

2 Zusammenfassung

2.1 Projektstrukturplan

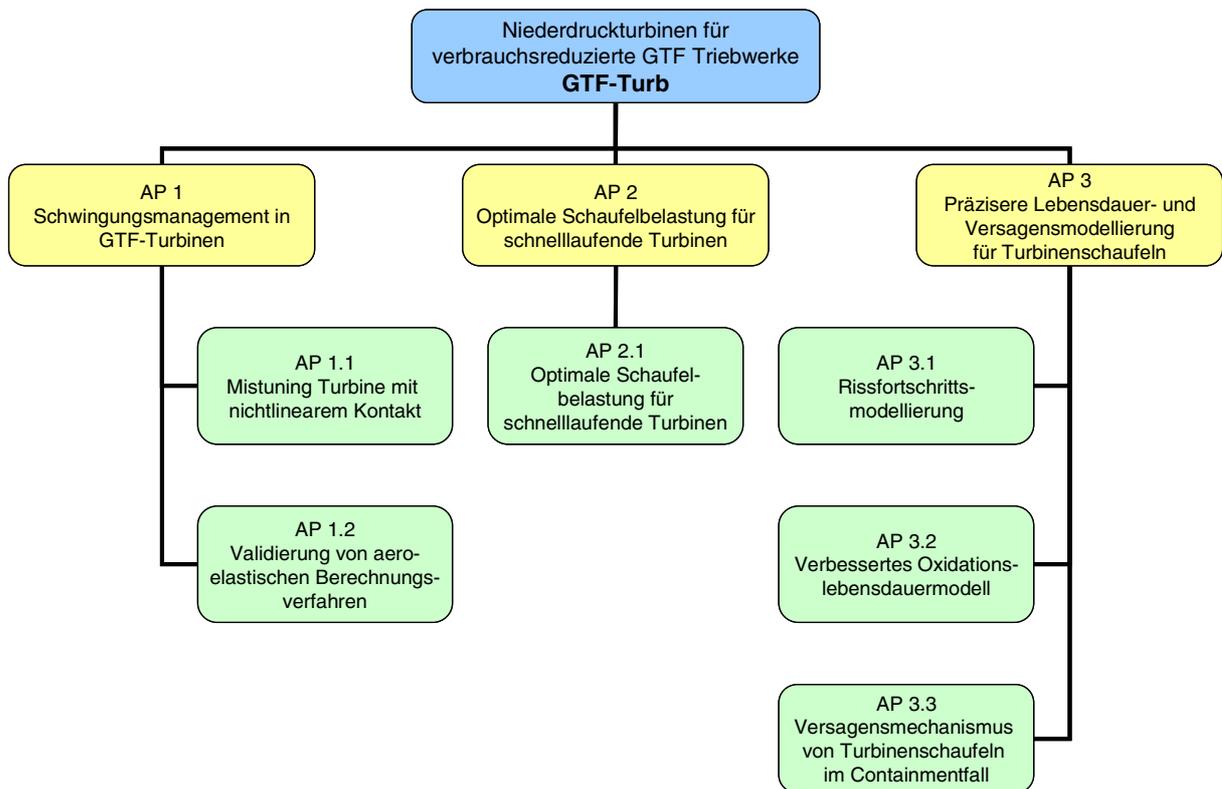


Abbildung 1: Projektstrukturplan

In Abbildung 1 ist der Strukturplan des Projekts dargestellt. Das Projekt gliedert sich in die drei Hauptarbeitspakete:

- AP 1 Schwingungsmanagement in GTF-Turbinen
- AP 2 Optimale Schaufelbelastung für schnelllaufende Turbinen
- AP 3 Präzisere Lebensdauer- und Versagensmodellierung für
Turbinenschaufeln

2.2 Erreichte Ergebnisse

In den einzelnen Arbeitspaketen wurden folgende Ergebnisse erreicht, die im Ab-

schnitt 3 detaillierter beschrieben sind.

2.2.1 AP 1 Schwingungsmanagement in GTF-Turbinen

2.2.1.1 AP 1.1 Mistuning Turbine mit nichtlinearem Kontakt

Ziel des Arbeitspakets war, das Resonanzverhalten von Turbinenlaufschaufeln unter realen Kontaktbedingungen messtechnisch und analytisch zu untersuchen. Die Amplitudenüberhöhungsfaktoren (maximal mistuned/tuned) sollten messtechnisch bestimmt und mit den Rechenverfahren verglichen werden. Die Amplitudenüberhöhung einschließlich aller Koppeleffekte sollte schon in der Auslegungsphase berücksichtigt werden können.

Der Hintergrund für dieses Arbeitspaket ist der bekannte physikalische Effekt, dass aufgrund von Unterschieden in den Eigenschaften von den einzelnen Turbinenschaufeln, auch „random mistuning“ oder Verstimmung genannt, jede Schaufel in einem Resonanzdurchgang unterschiedlich reagiert und ein unterschiedliches Belastungsniveau erfährt. Auch wenn die Unterschiede von Schaufel zu Schaufel eher klein sind (z.B. wenige Prozent bei den Einzelschaufelfrequenzen) kann dies zu erheblichen Unterschieden von maximaler zu minimaler Amplitude von bis zu einer Größenordnung nach sich ziehen. Für Verdichterblischen ist dieser Effekt relativ gut erforscht, für Turbinenlaufräder jedoch nicht, da hier aufgrund der nicht-linearen Kopplung im Fuß- und Deckbandbereich ein Resonanzdurchgang deutlich komplizierter ist. Die resultierenden Resonanzüberhöhungsfaktoren, d.h. das Verhältnis von maximaler zu idealer Resonanzamplitude, sind bisher analytisch nicht berechenbar. Das Ziel dieses Arbeitspakets war es daher, ein entsprechendes Rechenverfahren zu entwickeln und anhand eines Versuches zu validieren.

Dieses Arbeitspaket beinhaltet einen analytischen und einen experimentellen Schwerpunkt.

Im Rahmen der analytischen Entwicklungsarbeiten wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart ein neuer Reduced-Order-Code (ROCMAN) entwickelt, mit dem es möglich ist, einen kompletten Turbinenlaufkranz mit unterschiedlichen Schaufelei-

genschaften simulieren zu können. Neu ist hier die Implementierung von nicht-linearen Kontaktelementen, um die Energiedissipation und damit Dämpfungswirkung im Kontaktbereich mit zu erfassen. Wichtig war auch die Implementierung der aero-elastischen Kopplungskoeffizienten, um den Einfluss der Strömung zu erfassen.

Der erste Schritt bei der Validierung des analytischen Verfahrens beinhaltete den Vergleich mit den Resultaten verschiedener bestehender Codes oder der sehr aufwändigen 360°-Finite-Elemente-Modelle. Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist sehr gut.

Der nächste Validierungsschritt war der Vergleich eines vollen Finite-Elemente-Modells, bei dem die Eigenfrequenzvariation von Schaufel zu Schaufel über einen angepassten Elastizitätsmodul für jede Schaufel simuliert wird. In dem Reduced-Order-Code wird die Frequenzvariation direkt vorgegeben. Im Ergebnis war sehr gut zu sehen, dass der Resonanzdurchgang vom neuen Verfahren ROCMAN nahezu perfekt getroffen wird, aber nur einen Bruchteil der Rechenzeit benötigt.

Zur Bestimmung der Einzelschaufel-Frequenzverteilung wurde eine Vermessung durchgeführt. Für den experimentellen Einzelschaufeltest wurde eine Vorrichtung konstruiert, in der die Schaufel sowohl mit freiem als auch mit eingespanntem Deckband auf einem Rüttlerprüfstand aufgespannt werden kann. Über einen Frequenzsweep wurden so die Eigenfrequenzen für beide Einspannbedingungen bestimmt.

Die Validierung erfolgte anhand eines Erregerrigs. Die Schaufeln wurden im Erregerrig auf der Scheibe in der entsprechenden Einbaureihenfolge montiert. Die Anregung erfolgte mit einem Luftstrahl. Die Schaufelschwingungen wurden mit einem berührungslosen Schaufelschwingungs-Messsystem (BSSM) erfasst. Damit lässt sich die Resonanzamplitude für jede einzelne Schaufel erfassen, was für den Vergleich mit den Rechnungen wichtig ist.

Die durchgeführte Validierung zeigte im Vergleich eine gute Übereinstimmung mit der

Rechnung, so z.B. für den Amplituden-Überhöhungsfaktor. Die Rechnung liegt dabei leicht unter den Amplitudenüberhöhungen der einzelnen Versuchsläufe (ca. 10%), was in Anbetracht der komplexen Schwingungsvorgänge ein sehr gutes Ergebnis ist. Dieser Amplitudenüberhöhungsfaktor ist für die Auslegung und damit die Sicherheit der wesentliche Faktor.

Die gewonnenen Erkenntnisse eröffnen somit die Möglichkeit, numerische Vorhersagen zu überprüfen und zu verbessern. Neue Designkriterien und Berechnungsmethoden erlauben eine bessere Vorhersage und schaffen zusätzliche Freiräume bei der Schaufelauslegung.

2.2.1.2 AP 1.2 Validierung von aeroelastischen Berechnungsverfahren

Das Ziel des Vorhabens war es, die während der Auslegung verwendeten, linearen und nicht-linearen analytischen Berechnungsverfahren für Forced Response Bewertungen zu validieren, um somit auch Anregungen fundamentaler Moden durch ein stromauf liegendes Gitter im Betriebsbereich zuzulassen.

Für die geplanten Untersuchungen diene als Versuchsvehikel die 1,5-stufige LISA Turbine der ETH Zürich. Die LISA Versuchsturbine wurde messtechnisch so ausgerüstet, dass Nachläufe, instationäre Störungen im Strömungsfeld und instationäre Störungen auf der Struktur vermessen werden konnten. Diese wurden mit den Simulationsmodellen abgeglichen. Die Messungen der Nachläufe dienten dabei zur Validierung der Anregungserzeugungssimulation und die instationären Messungen im Strömungsfeld der Validierung der Simulation des Transports vom anregungserzeugenden zum angeregten Gitter.

Die Vermessung der instationären Schaufeldrücke wurde in zwei Messkampagnen durchgeführt. Für die Datenerfassung im rotierenden Referenzsystem des Rotors wurde ein Telemetrie-System entwickelt.

Instationäre Drücke aus Messungen und Rechnungen wurden bei der interessieren-

den Engine Order verglichen. Aus den durchgeführten Messkampagnen resultiert, dass die lokalen instationären Drücke in weiten Bereichen gut von den analytischen Verfahren wiedergegeben werden können. Dennoch sind in manchen Bereichen auch lokal deutliche Abweichungen detektierbar. Infolge der komplexen dreidimensionalen Strömungsphänomene innerhalb der LISA Turbine, sind die Fehlerquellen, die zu diesen Abweichungen führen, kaum separierbar und können sowohl aus der Analytik, als auch aus der verwendeten Messtechnik resultieren. Daher sind weiterführende Untersuchungen notwendig, um die noch sichtbaren Abweichungen zu plausibilisieren und deren Einflüsse zu quantifizieren.

2.2.2 AP 2 Optimale Schaufelbelastung für schnelllaufende Turbinen

2.2.2.1 AP 2.1 Optimale Schaufelbelastung für schnelllaufende Turbinen

Dieses Arbeitspaket hatte zum Ziel, das optimale Schaufelbelastungsniveau, d.h. die optimalen Schaufelzahlen je Gitter für schnelllaufende Turbinen zu bestimmen, dies in einem Rigversuch (GTF-Rig) zu überprüfen und für den Einsatz in GTF-Triebwerken zu qualifizieren. Dabei sollten, neben dem Einfluss auf den Wirkungsgrad, auch die Auswirkungen auf Gewicht, Kosten und Turbinenlärm berücksichtigt und gegeneinander abgewogen werden.

Im Rahmen von Kaskadenversuchen (ebene Gitter) wurde der Einfluss unterschiedlicher Schaufelbelastungen bei typischen Profilen schnelllaufender NDT auf das Transitionsverhalten (ermittelt mit Hitzdraht- und Oberflächenheißfilmmessungen) und der entstehende Verlust bestimmt. Diese Untersuchungen wurden am Institut für Strahlantriebe der Universität der Bundeswehr München durchgeführt und umfassen eine Reihe von Reynoldszahlen sowie unterschiedliche Einströmbedingungen (stationär und instationär, bei unterschiedlichen Turbulenzgraden und Fehlanströmung). Die Ergebnisse aus den Kaskadenversuchen dienten sowohl der Auslegung der Schaufeln des GTF-Rigs mit optimaler Schaufelbelastung als auch zur Kalibrierung und Verbesserung des bei der MTU verwendeten 3D-CFD-Codes. Ergänzt wurden diese Ergebnisse durch an einer ebenen Platte mit Gegenkonturen gewonnene Daten zum Transitionsverhalten sowie durch -untersuchungen an konturierten Seitenwänden.

Die Bestimmung der optimalen Schaufelbelastung für das GTF-Rig erfolgte basierend auf einem Trade zwischen Wirkungsgrad, Gewicht, Kosten und Turbinenlärm. Die analytischen Vorhersagen der Aeroakustik wurden durch Lärmmessungen am Rig überprüft.

Zu den Aktivitäten im Rahmen des Arbeitspakets gehörten:

- Untersuchung von linearen Kaskadengittern mit unterschiedlichen Schaufelbelastungen (Re-Variation, stationäre und instationäre Anströmung, Variation des Turbulenzgrades der Anströmung und des Anströmwinkels), Hitzdraht- und Oberflächenheißfilmmessungen zur Ermittlung des Transitionsverhaltens (UniBw München).
- Messungen zum Transitionsverhalten an einer ebenen Platte mit Gegenkonturen (TU Berlin).
- Hitzdrahtmessungen zum Transitionsverhalten an konturierten Seitenwänden (TU Braunschweig).
- Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung der CFD-Modellierung von Turbulenz und Transition.
- Design eines neuen Schaufelsatzes für das GTF-Rig (Bau 02), Trade zwischen den analytischen Vorhersagen für Wirkungsgrad und Lärm sowie Gewicht und Kosten.
- Test im GTF-Rig und Vergleich mit dem Referenzversuch (Bau 01), Analyse der Messdaten.

Die in diesem Arbeitspaket durchgeführten Arbeiten stellen einen wichtigen Entwicklungsschritt für die GTF-Niederdruckturbinen der zweiten Generation dar.

Durch die Verbesserung der Transitions- und Turbulenzmodelle im 3D-CFD-Code und durch die Validierung des Codes mit Hilfe der gewonnenen Messdaten für Platten, Kaskaden und Rig ist ein Einsatz bei unterschiedlichen Schaufelbelastungsniveaus für schnelllaufende NDT möglich.

2.2.3 AP 3 Präzisere Lebensdauer- und Versagensmodellierung für Turbinenschaufeln

2.2.3.1 AP 3.1 Rissfortschrittsmodellierung

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Bestimmung linear-elastischer Rissfortschrittsparameter für die Werkstoffe IN713 (isotrop), M-247LC DS (directionally solidified) und SC2000 (Einkristall) für einen repräsentativen Temperatur-, R-Werte- und Haltezeitbereich. Das hierbei verwendete Rissfortschrittsgesetz ist ein multiplikativer Ansatz bestehend aus dem Paris-Gesetz, modifiziert für den R-Einfluss, den Thresholdwert und den kritischen Wert.

Für die Probenversuche zu den einzelnen Materialien wurde eine Matrix mit Versuchsparametern erstellt. Die Versuche wurden bei MTU und bei der Bundesanstalt für Materialprüfung und -Forschung (BAM) durchgeführt. Die Parameter wurden im Rissfortschrittsgesetz so angepasst, dass die Versuchsdaten möglichst gut getroffen werden.

Zum Inhalt des Arbeitspakets gehören:

- Ermitteln der Rissfortschrittseigenschaften der drei Materialien von 400°C bis zur jeweiligen maximalen Anwendungstemperatur bei Spannungsverhältnissen von $R = -1$ bis 0,8 sowie Bestimmen des Haltezeit- und Belastungsrampeinflusses auf die Rissgeschwindigkeit bis zu 300 Sekunden durch Rissfortschrittsversuche.
- Schwellwertmessung durch Laststeigerung an Corner-Crack-Proben sowie die Auswertung der daraus gewonnenen Messdaten zur Bestimmung des Langrisschwellwerts ΔK_{th} , des intrinsischen Schwellwerts $\Delta K_{th,intr}$ sowie der Risswiderstandskurve $\Delta K_{th}(\Delta a)$.
- Ermitteln der Schwellwerte in einem Temperaturbereich von 400 bis 1000°C in einem Spannungsverhältnisintervall von $R = -1$ bis 0,5.
- Erweiterung des MTU-Modells zur Beschreibung der Rissgeschwindigkeit da/dN in Abhängigkeit von der Spannung und von der Zyklenform durch ein da/dt -Modell. Dabei wurden Kriech- und Oxidationseinflüsse auf das Rissfort-

schrittsverhalten berücksichtigt.

- Ermittlung der Modellparameter für das MTU-Rissfortschrittsmodell durch Anpassung an gewonnene Versuchsergebnisse und Erstellen von Datensätzen zur Beschreibung des Rissfortschrittsverhaltens im abgeprüften Temperatur- und R-Wert-Bereich für die drei untersuchten Werkstoffe.

Ergebnis der Untersuchungen ist eine Beschreibung des linear-elastischen bruchmechanischen Verhaltens der betrachteten Werkstoffe. Dieses Arbeitspaket versetzt die MTU in die Lage, den Rissfortschritt für die genannten Materialien zu berechnen und somit die Lebensdauer der daraus gefertigten Teile zu verlängern.

2.2.3.2 AP 3.2 Verbessertes Oxidationslebensdauermodell

Aufgrund gestiegener Anforderungen an Triebwerkslaufzeiten, Treibstoffverbrauch, dünnere Wandstärken der Schaufeln etc. ist heute die Belastung der NDT-Bauteile durch Oxidation deutlich größer als früher und daher wird nunmehr ein wesentlich genaueres Bewertungstool zur Bestimmung der Bauteillebensdauer benötigt.

Das „Leben“ eines Bauteils besteht unter Oxidationsgesichtspunkten aus zwei Phasen: Protektive Phase = Phase I und Post-Breakaway Phase = Phase II. Letztere kann unterteilt werden in eine Phase, bei der eine verstärkte innere Oxidation und Nitrierung stattfindet und das Oxidwachstum gegenüber der Phase I stark beschleunigt ist, jedoch noch kein Oxid abplatzt (Phase IIa) und eine Phase IIb, bei der das Abplatzen der dicken Deckschichtoxide beginnt und anhält.

Für die Lebensdauer insbesondere von dünnwandigen Bauteilen ist die Länge der Phase I entscheidend, in der es kaum Materialabtrag gibt und der Werkstoff geschützt wird. Sie wird im Wesentlichen von der Chemie und dem Gefüge des Materials bzw. der Schicht beeinflusst. Äußere Einflussparameter sind u.a. die Betriebstemperatur, die Zykluslänge, die mechanischen Lasten und die Bauteilgeometrie. Charakterisiert wird das Ende der Phase I durch die Entstehung innerer Oxidation und die Bildung von nicht schützenden und schnellwachsenden Oxiden (z.B. Spinel-

le) bedingt durch die Verarmung von Aluminium.

Als Ergebnis des Arbeitspakets sollte ein Modell vorliegen, mit dessen Hilfe der oxidationsbedingte Verlust des tragenden Querschnitts unter Betriebs- bzw. betriebsnahen Bedingungen quantitativ auf Basis der beschriebenen Mechanismen berechnet und somit der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ermittelt werden kann. Die Entwicklung dieses neuen Modells zur Berechnung der Oxidationslebensdauer sollte anhand des Ni-Werkstoffs SC2000 - beschichtet und unbeschichtet - erfolgen und vorerst auf Einkristall-Werkstoffe begrenzt sein.

Die Aktivitäten wurden gemeinsam mit Projektpartnern FZ Jülich (FZJ) und Dechema (DFI) durchgeführt.

Zu den Resultaten der im Arbeitspaket durchgeführten Untersuchungen gehören:

- Ein neues Modellkonzept zur Abschätzung der Schichtlebensdauer, das eine Bewertung der Schichtlebensdauer unter überlagerter oxidativer und mechanischer Belastung ermöglicht, wurde entwickelt.
- Es erfolgte die Ermittlung der Oxidationskinetik in quasi-statischen und zyklischen Oxidationsversuchen.
- Das chemische Modell mit dem Einbau von Oxidationskinetik und einem CALPHAD Diffusionsmodell wurde definiert.
- Das neue Modell ermöglicht eine Beschreibung der Oxidationskinetik, die Verlustkinetik wird in dem Folgeprojekt (LuFo V/1) implementiert.
- Zur Validierung des Oxidationsmodells wurden Burner Rig Versuche durchgeführt, die Bewertung auf Basis des chemischen Modells erfolgt in LuFo V/1.
- Es erfolgte die Entwicklung eines mechanischen Modells zur Beschreibung der Gesamttragfähigkeit des Systems.
- Die Ergebnisse der mechanischen Modellierung zeigen eine Verbesserung der Tragfähigkeit des Verbundwerkstoffsystems unterhalb und eine Verminderung der Tragfähigkeit bei einer Beanspruchung oberhalb der DBTT.
- Mit dem mechanischen Modell lässt sich ein Schichtversagen (Rissbildung

durch Sprödversagen) unter TMF-Beanspruchung prinzipiell vorhersagen.

- Die für die Modellierung notwendigen mikrostrukturellen Parameter wurden bis dato aus empirisch gefitteten Daten bestimmt. Die mikrostrukturellen Alterungsparameter wie z.B. d_{zone} und $c_{Al-zone}$ werden zukünftig in dem chemischen Modell bestimmt und in das mechanische Modell eingegeben (LuFo V).

Die Resultate des Arbeitspakets erlauben, die Oxidationslebensdauer von Bauteilen im Turbinenbereich genauer berechnen zu können, vor dem Hintergrund, dass die zunehmende Dünnwandigkeit von Turbinenschaufeln zu einer verstärkten Interaktion von Oxidation und Mechanik und damit zu einer deutlichen Erhöhung der Oxidationsrate führt.

2.2.3.3 AP 3.3 Versagensmechanismus von Turbinenschaufeln im Containmentfall

Die in diesem Arbeitspaket durchgeführten Arbeiten stellen eine Ergänzung zu den Untersuchungen aus dem früheren Förderprogramm HiSpeeT dar. Darin wurde ein analytisches Werkzeug, basierend auf der finiten Elemente Methode, zur Berechnung der Gehäuseschädigung in einem Schaufelverlustszenario entwickelt. Dieses Szenario stellt einen wesentlichen Fehlerfall eines Triebwerks dar. Um Sekundärschäden der Flugzeugzelle zu vermeiden, muss das Gehäusedesign ein Durchschlagen von Schaufeln oder Schaufelfragmenten in einem solchen Fall verhindern.

Gegenüber den eindimensionalen Energiebetrachtungen, wie sie bisher zum Einsatz kamen, soll mit Hilfe des neuen Simulationstools eine weitaus bessere Vorhersagegenauigkeit erzielt werden. Im Ergebnis wird damit die Realisierung von dünnwandigen Gehäusen mit einer signifikanten Gewichtsreduzierung ermöglicht.

Ziel des hier beschriebenen Arbeitspaketes ist die realistische analytische Abbildung der im Fall eines Schaufelverlustes relevanten Schaufelversagensmechanismen. Dazu gehört die Kinematik der Schaufel nach dem Ablösen sowie das Abbruchverhalten der Schaufel.

Das Arbeitspaket wurde in drei wesentlichen Schritten abgearbeitet. In einem ersten

Schritt wurden analytische Voruntersuchungen durchgeführt, um ein analytisches Versagenkriterium zu entwickeln. Danach erfolgte die experimentelle Bestimmung der relevanten Materialparameter, bevor im letzten Schritt das analytische Modell im Versuch validiert wurde. Bei diesem Versuch wurde jeweils eine einzelne Schaufel von einem Rotor abgeschleudert. Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera wurden die Bewegungen der Schaufel sowie ihr Abbruchverhalten dokumentiert. Ebenso fand nach jedem Test eine photometrische Vermessung der plastischen Gehäuseverformungen im Einschlagbereich statt. Die Testreihen wurden sowohl mit Turbinenschaufeln aus IN100 als auch aus TiAl durchgeführt.

Die Ergebnisse wurden mit den Berechnungen der Simulationsmethodik verglichen. Im Wesentlichen konnte dabei eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Es wurde bestätigt, dass die größte Gehäuseschädigung in der Regel durch den schweren Schaufelfußkasten verursacht wird. Das Abbruchverhalten des Schaufelblattes und die damit verbundene Dissipation kinetischer Energie wurde durch die Simulationsmethodik mit zufriedenstellender Genauigkeit vorhergesagt, ebenso die Bewegung der Schaufel. Lediglich die Gehäuseschädigung, verursacht durch IN100 Schaufeln, stellte sich im Test stärker dar als in der Berechnung. Allerdings konnte das Simulationstool mit Hilfe dieser Ergebnisse nachkalibriert werden und liefert jetzt auch in diesem Fall gute Vorhersagen.

Dieses Arbeitspaket ist damit erfolgreich abgeschlossen. Zusammen mit den Ergebnissen aus dem Förderprogramm HiSpeeT konnte ein einsatzreifes Werkzeug zur Auslegung von Gehäusestrukturen in Bezug auf Containment entwickelt werden.

3 Technische Darstellung der Arbeitspakete

3.1.1 AP 1 Schwingungsmanagement in GTF-Turbinen

3.1.1.1 AP 1.1 Mistuning Turbine mit nichtlinearem Kontakt

Dieses Arbeitspaket besteht aus zwei Unterarbeitspaketen, einem analytischen und einem experimentellen.

Analytik

Bisher ist es aufgrund des Rechenaufwands nur möglich, auf der Basis der Annahme von zyklischer Symmetrie eine Forced-Response-Vorhersage zu machen. D.h. man geht davon aus, dass alle Schaufeln exakt identisch sind und die oben beschriebenen Effekte vernachlässigt werden. Um den Rechenaufwand deutlich zu reduzieren, wird auf der Seite der Strukturmechanik ein Reduced-Order-Code benötigt, um so einen kompletten Turbinenlaufkranz mit unterschiedlichen Schaufeleigenschaften simulieren zu können. Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart ein neuer Reduced-Order-Code (ROCMAN) entwickelt, mit dem es möglich ist, diese Art von Berechnungen durchzuführen.

Neu ist hier die Implementierung von nicht-linearen Kontaktelementen, um die Energiedissipation und damit Dämpfungswirkung im Kontaktbereich mit zu erfassen. Wichtig war auch die Implementierung der aeroelastischen Kopplungskoeffizienten, um den Einfluss der Strömung zu erfassen.

Anhand von verschiedenen analytischen Vergleichen mit anderen Codes oder sehr aufwändigen 360°-Finite-Elemente-Modellen erfolgte eine Validierung des Codes.

Abbildung 2 zeigt die Validierung der aeroelastischen Eigenwerte von ROCMAN mit einem Quervergleich mit zwei anderen Rechenverfahren. Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist sehr gut.

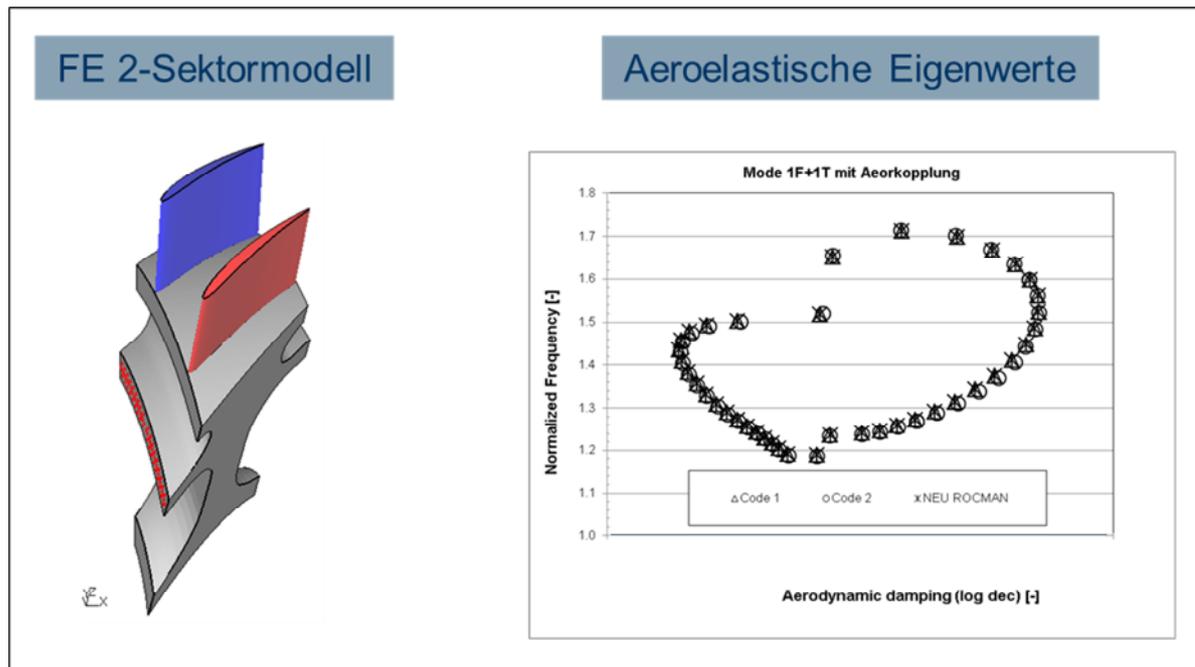


Abbildung 2: Validierung Aerokopplung

Der nächste Validierungsschritt war der Vergleich eines vollen Finite-Elemente Modells, bei dem die Eigenfrequenzvariation von Schaufel zu Schaufel über einen angepassten Elastizitätsmodul für jede Schaufel simuliert wird. In dem Reduced-Order-Code wird die Frequenzvariation direkt vorgegeben. Es handelt sich um eine Turbinenkonfiguration mit Deckbandkontakt aber noch ohne nicht-lineare Effekte.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse eines Resonanzdurchgangs. Die Amplitude ist logarithmisch dargestellt. Die dicke schwarze Linie ist der Resonanzdurchgang der idealen Beschauflung, bei dem alle Schaufeln identisch sind. Die farbigen Linien sind die Amplituden jeder einzelnen Schaufel. Es ist sehr gut zu sehen, dass der Resonanzdurchgang vom ROCMAN nahezu perfekt getroffen wird, wobei nur ein Bruchteil der Rechenzeit des FE-Codes benötigt wird.

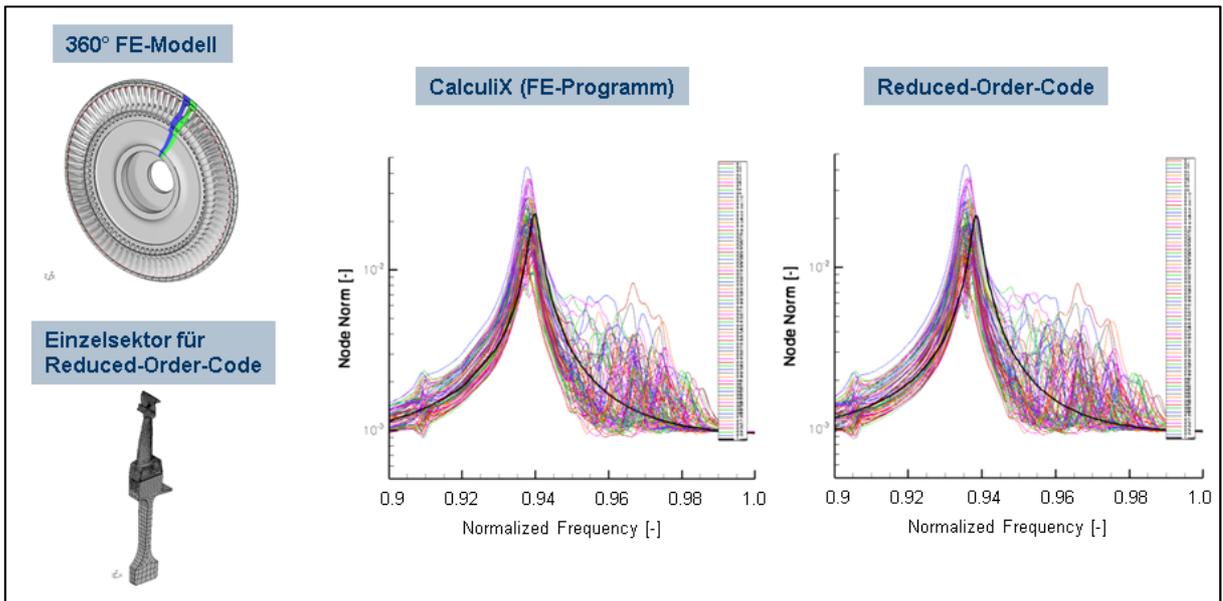


Abbildung 3: Validierung Mistuning

Basierend auf diesem Status des ROCMAN-Codes wurden die nicht-linearen Module eingebaut. In Abbildung 4 ist ein einfaches Modell zu sehen, bei dem es sich um ein 1D-Jenkins-Element handelt, das mit einer Harmonischen läuft.

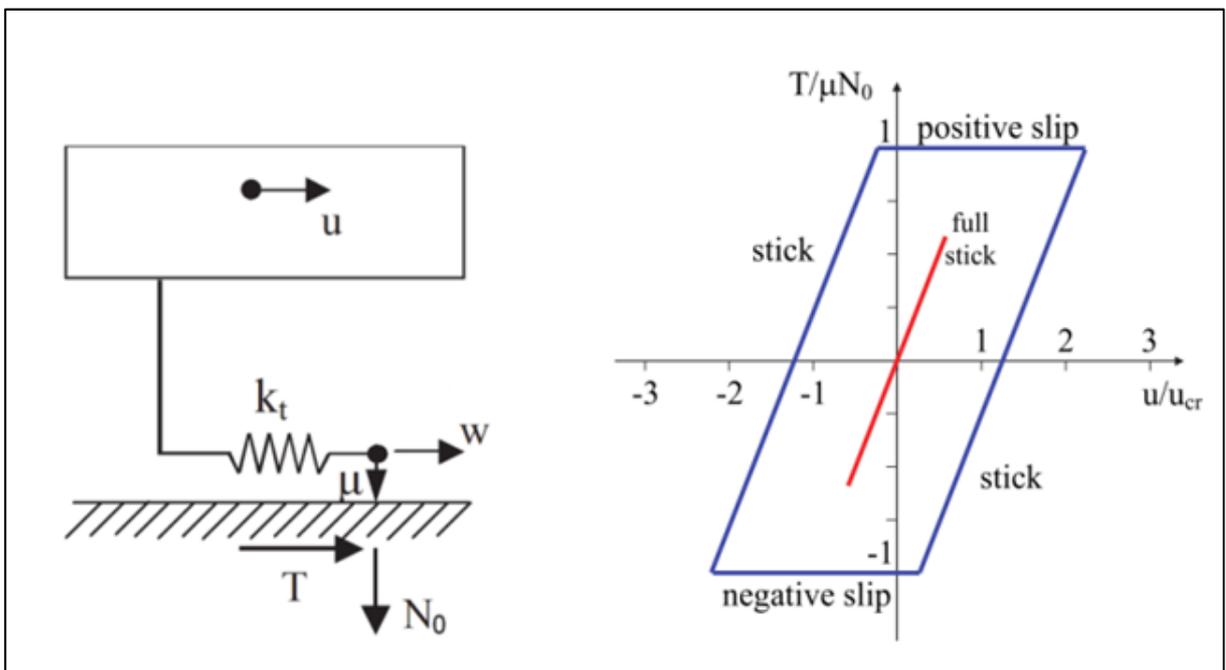


Abbildung 4: 1D-Jenkins-Element für nicht-lineare Kopplung

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse einer nicht-linearen Berechnung über einer Schwingungsperiode dargestellt. Das obere Bild zeigt die nicht-lineare, berechnete Kraft über der Relativverschiebung der beiden Körper.

Im mittleren Bild ist in dünner schwarzer Farbe die echte nicht-lineare Kraft über einer Schwingungsperiode dargestellt und die blauen Punkte stellen den mit einer Harmonischen approximierten Zeitverlauf dar. Im darunterliegenden Bild ist der Kontaktzustand zu sehen. Blau bedeutet „Stick“, also Haftung der Körper aufeinander, Grün negativer „Slip“ und Rot positiver „Slip“.

Über die Vorgabe der Normalkraft und der Kontaktsteifigkeiten ist es damit möglich, Deckbandkontakt zu simulieren.

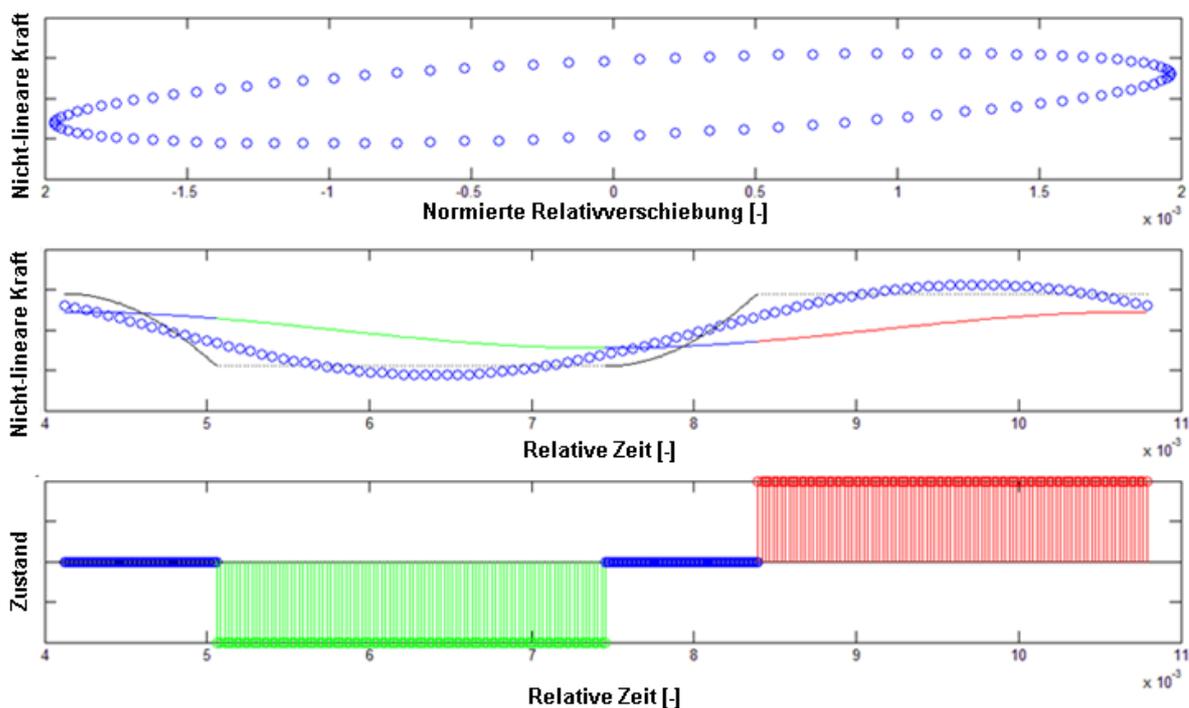


Abbildung 5: Ergebnisse 1D-Element über eine Schwingungsperiode

Experimentelle Ergebnisse

Eine Validierung erfolgte anhand eines Versuchs auf einem Erregerrig. In diesem Versuchsaufbau können Zentrifugal- und Schwingungskräfte simultan simuliert wer-

den. Luftstrahlen mit bestimmter Anzahl, abhängig von der gewünschten Erregerordnung, erzeugen hierbei die Anregungsimpulse für das rotierende System. Durch Variation der Luftstrahlen lässt sich das resultierende Anregungsniveau einstellen.

Da eine genaue Kenntnis der Einzelschaufel-Frequenzverteilung für die Berechnung notwendig ist, wurde im Vorfeld eine solche Vermessung durchgeführt. Abbildung 6 zeigt den Versuchsaufbau. Es wurde eine Vorrichtung konstruiert, in der die Schaufel sowohl mit freiem als auch mit eingespanntem Deckband auf einem Rüttlerprüfstand aufgespannt werden kann. Über einen Frequenzsweep können so die Eigenfrequenzen für beide Einspannbedingungen bestimmt werden.

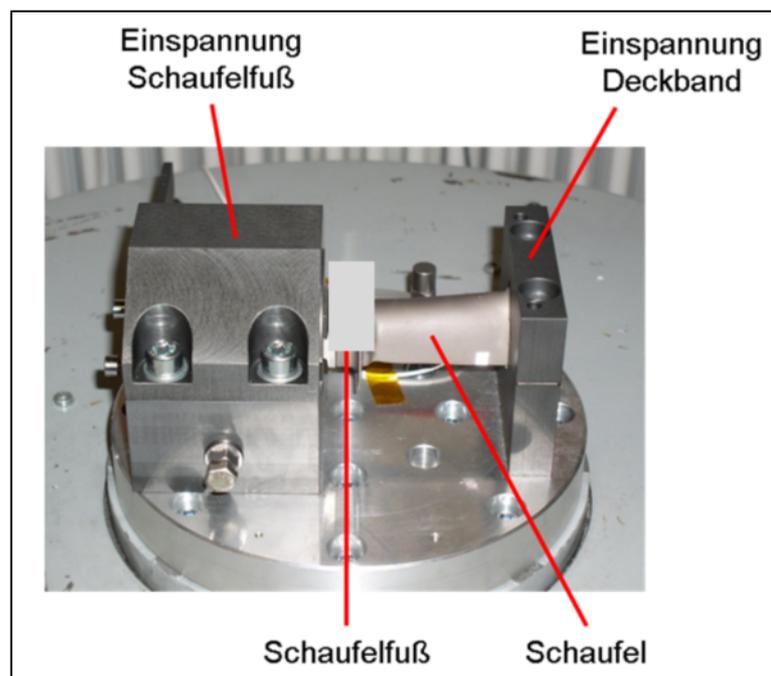


Abbildung 6: Versuchsaufbau Einzelschaufeltest

Abbildung 7 zeigt beispielhaft den Resonanzdurchgang für eine Schaufel für niedrige und hohe Anregungsamplituden. Die entsprechende Schwingungsform aus einer Finite-Elemente-Rechnung ist ebenfalls abgebildet. Während für niedrige Anregungsamplituden das System noch linear schwingt, treten für hohe Anregungsamplituden aufgrund von Fußreibung bereits nicht-lineare Effekte auf. Die Resonanzfrequenz ist aber noch gleich.

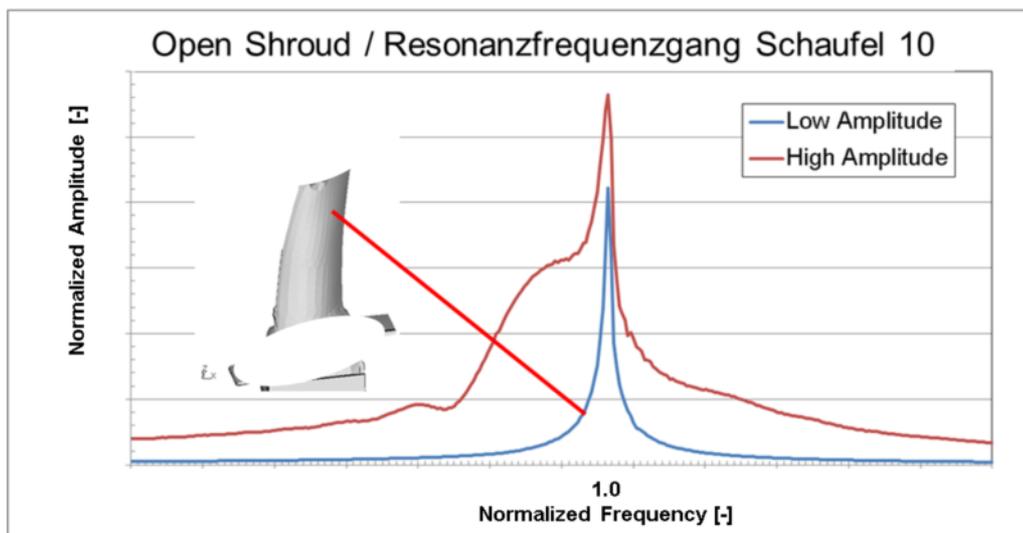


Abbildung 7: Ergebnisse Einzelschaufeltest freies Deckband

In einer weiteren Versuchsserie wurden zusätzlich die Deckbänder in die Vorrichtung eingespannt und die Schaufeln im Fuß mit einem bestimmten Verdrehwinkel versehen, so dass sich eine Vorspannung am Deckband wie bei einer realen Fliehkraftbelastung einstellt. Erneut wurden die Resonanzfrequenzgänge für alle Schaufeln mit niedriger und hoher Anregungsamplitude vermessen. Abbildung 8 zeigt exemplarisch die Resonanzdurchgänge für Schaufel 10 für beide Anregungsniveaus mit dem entsprechenden Schwingungsmodus. Auch hier zeigen die Ergebnisse mit hoher Anregungsamplitude deutlich mehr nicht-lineare Effekte.

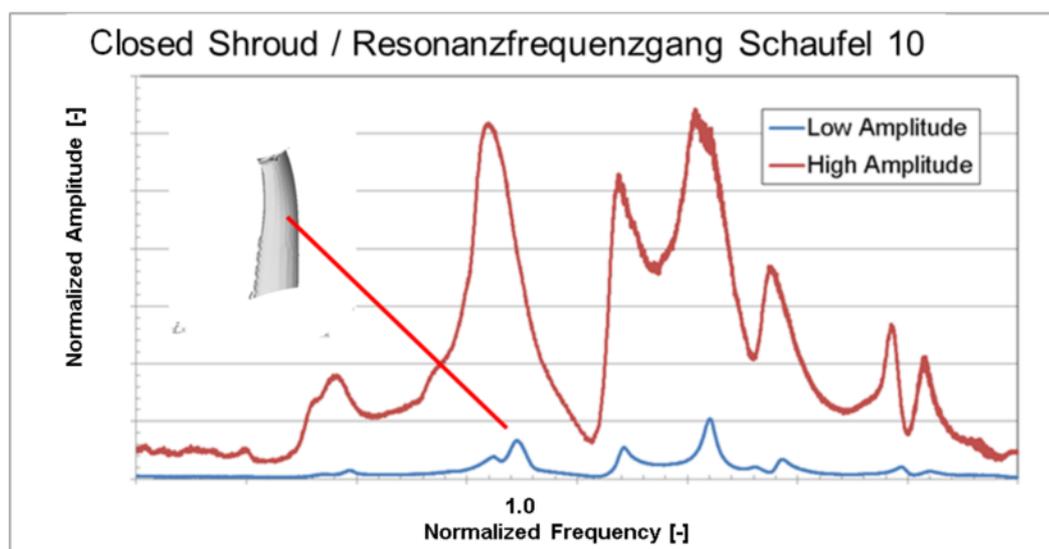


Abbildung 8: Ergebnisse Einzelschaufeltest Deckband verspannt

Abbildung 9 zeigt schließlich die resultierende Verteilung der Eigenfrequenzabweichungen, die dann in den Reduced-Order-Code eingegeben wird. Die Frequenzabweichung liegt meist unter 1%, nur wenige Schaufeln haben eine größere Abweichung.

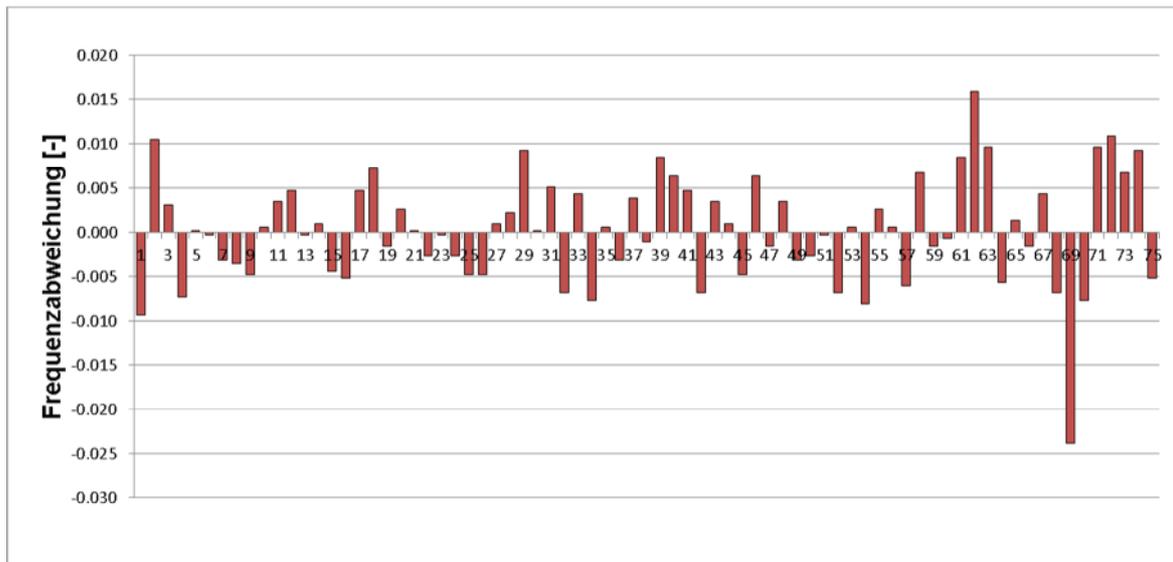


Abbildung 9: Frequenzabweichung

Die Schaufeln wurden anschließend auf der Scheibe in der entsprechenden Einbau-reihenfolge montiert. In Abbildung 10 ist der fertige, montierte Versuchsträger zu sehen. Die Anregung erfolgt mit einem Luftstrahl, der von innen nach vorne durchströmt.

Es wurden Hoch- und Runterfahrten durchgeführt. Die Schaufelschwingungen wurden mit einem berührungslosen Schaufelschwingungs-Messsystem (BSSM) erfasst. Damit lässt sich die Resonanzamplitude für jede einzelne Schaufel erfassen, was für den Vergleich mit den Rechnungen wichtig ist. Abbildung 11 zeigt die maximale Amplitude über den kompletten Resonanzdurchgang für alle 75 Schaufeln. Die schwarze Linie ist eine entsprechende Rechnung, die farbigen Kurven sind zwei verschiedene Versuchsläufe, jeweils Beschleunigung und Verzögerung. Der globale Trend, besonders zwischen Schaufel Nr. 35 und 45, wird relativ gut getroffen. Im Detail gibt es aber einige, z.T. auch größere Abweichungen, wie z.B. bei Schaufel 58.

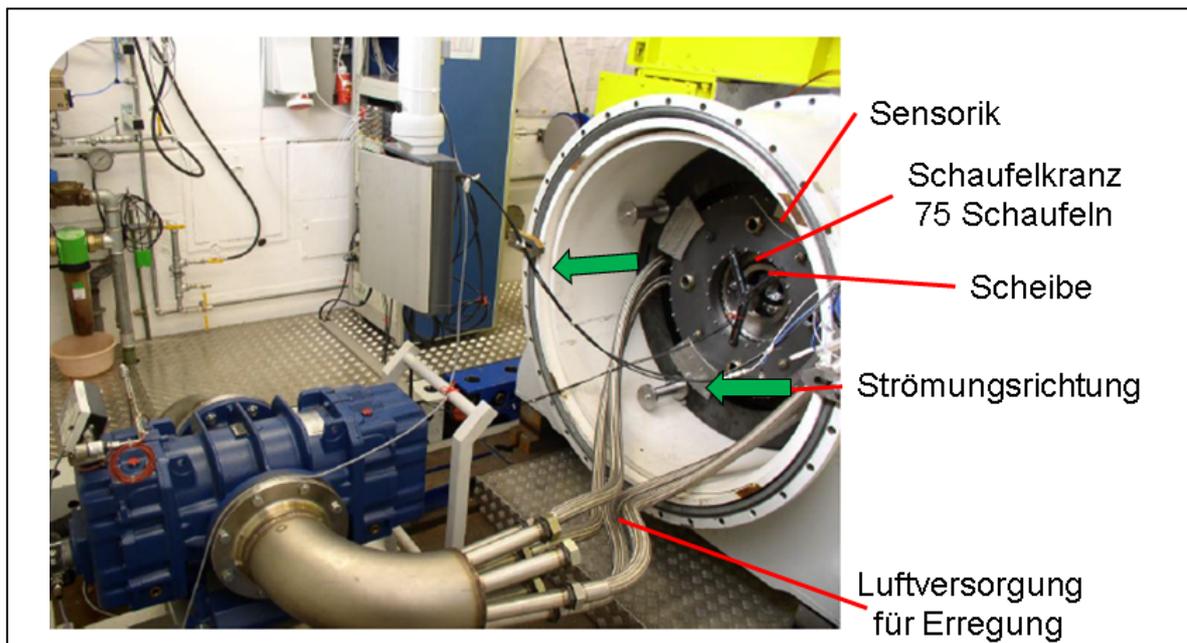


Abbildung 10: Erregerrig

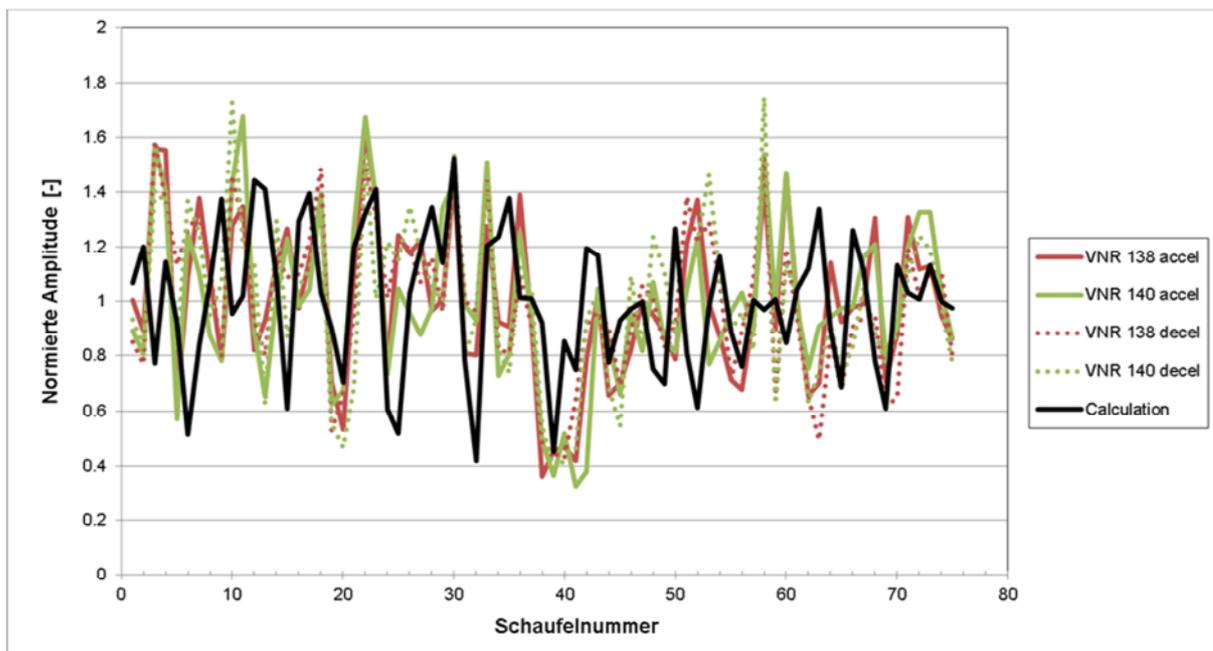


Abbildung 11: Gemessene Resonanzamplituden

Abbildung 12 zeigt den Amplituden-Überhöhungsfaktor, der sich aus der maximalen Schaufel geteilt durch den Mittelwert der einzelnen Schaufelantworten berechnet, für die vier Fälle und die Rechnung. Die Rechnung liegt dabei leicht unter den Amplitudenüberhöhungen der einzelnen Versuchsläufe (ca. 10%), was in Anbetracht der

komplexen Schwingungsvorgänge ein sehr gutes Ergebnis ist. Dieser Amplitudenüberhöhungsfaktor ist für die Auslegung und damit die Sicherheit der wesentliche Faktor.

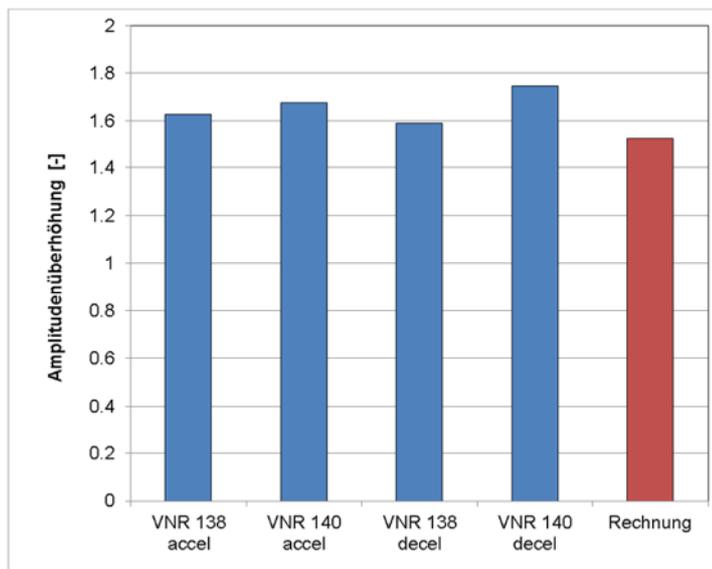


Abbildung 12: Vergleich Rechnung – Messung

3.1.1.2 AP 1.2 Validierung von aeroelastischen Berechnungsverfahren

Als Versuchsvehikel für die Validierung diente die 1.5-stufige LISA Turbine der ETH Zürich (Abbildung 13).

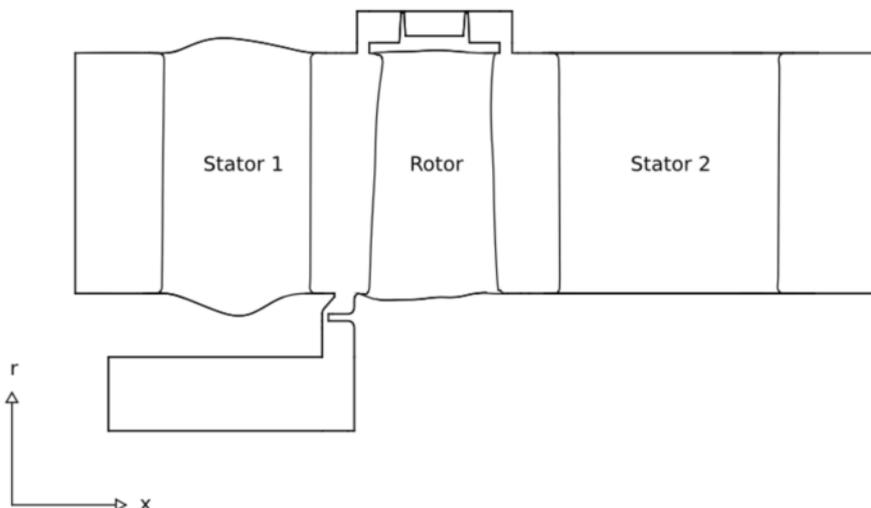


Abbildung 13: Schnittansicht der LISA Ringraum- und Schaufelgeometrie im numerischen Modell

Die Vermessung der instationären Schaufeldrücke wurde in zwei Messkampagnen durchgeführt. In der ersten Messkampagne (I) wurde der zweite Stator auf 60% und auf 85% Kanalhöhe mit zeitgenauen Druckaufnehmern der ETH Zürich instrumentiert. In der zweiten Messkampagne (II) wurde der Rotor auf 20% und auf 85% Kanalhöhe instrumentiert. Die Sensoren wurden so in die Schaufeloberfläche integriert, dass keine merklichen (fühlbaren) Unebenheiten entstehen, welche die Aerodynamik der Schaufel beeinflussen (Abbildung 14). Für die Datenerfassung im rotierenden Referenzsystem des Rotors wurde ein Telemetrie-System entwickelt (Abbildung 15). Vor Beginn der Messkampagne (II), der instationären Druckmessungen auf der Schaufeloberfläche des Rotors, wurde eine Sensitivitätsstudie der im Rig auftretenden Fliehkräfte auf die Messqualität der eingebauten Druckmessgeber durchgeführt. Dazu wurden in kontrollierten Umgebungsbedingungen unterschiedliche Drehzahlen bei verschiedenen Umgebungsdrücken eingestellt und die Fliehkrafteinflüsse auf die Membran der Druckmessgeber aus dem resultierenden Sensordruck bestimmt (Abbildung 16). Durch diese Kalibrierung ließ sich der Fliehkrafteinfluss auf den Sensordruck während der Messkampagne entsprechend des eingestellten Betriebspunktes korrigieren.



Abbildung 14: Sensoren auf der Saugseite des Rotors auf 20% Kanalhöhe

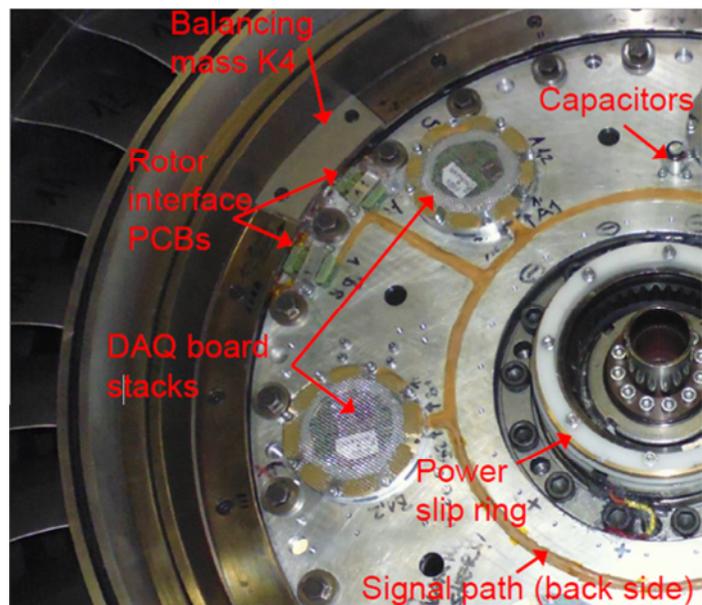


Abbildung 15: Telemetrie-System für instationäre Druckmessung auf dem Rotor

Die Messsignale der zeitgenauen Drucksensoren sowohl auf dem Stator als auch auf dem Rotor weisen eine gute Qualität mit einem geringen Rauschen auf, wie exemplarisch in Abbildung 17 für ein Sensor auf der Rotorsaugseite auf 20% Kanalhöhe dargestellt ist.

Zu Beginn des Projekts hatten die Statoren 1 und 2 die gleiche Schaufelzahl. Bei der MTU wurde zu Projektbeginn die Schaufelzahl des Stators 2 geändert – und die Schaufel umgestaffelt, um die Anregungen durch Stator 1 und Stator 2 auf den Rotor messtechnisch trennen zu können.

Die gewonnenen Daten zeigen, dass diese Maßnahme erfolgreich war. Im Frequenzbereich sind die Anregungen durch die beiden Statoren klar getrennt erkennbar (Abbildung 18).

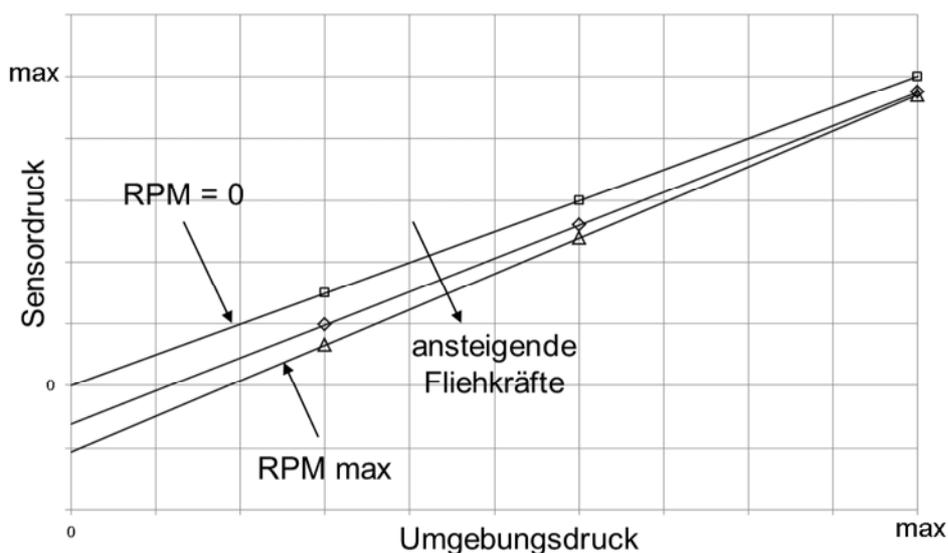


Abbildung 16: Einfluss der Fliehkräfte auf den Sensordruck bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken

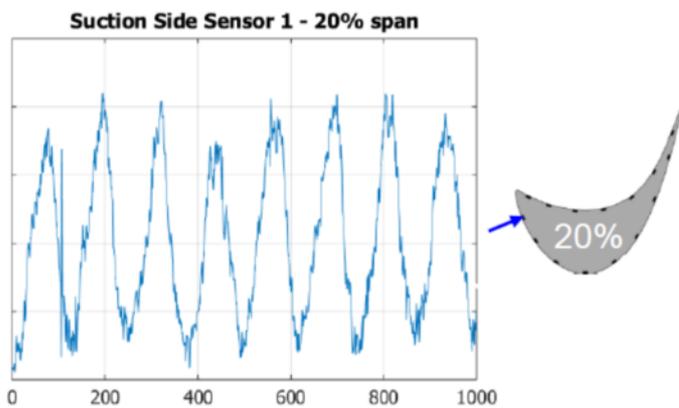


Abbildung 17: Gemessenes instationäres Drucksignal im Zeitbereich eines Sensors auf der Saugseite des Rotors nahe der Vorderkante auf 20% Kanalhöhe

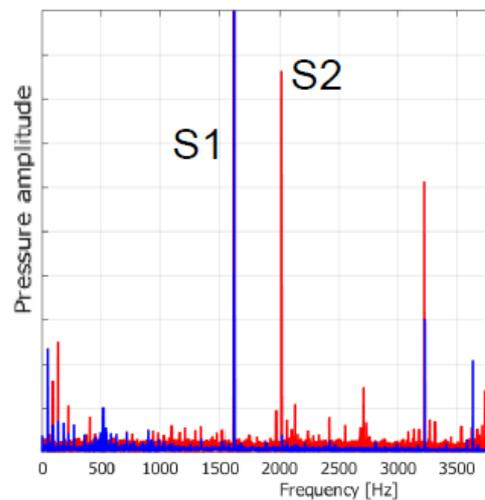


Abbildung 18: Gemessenes instationäres Rotordrucksignal im Frequenzbereich – Anregung durch Stator1 (S1) und Stator2 (S2) klar separierbar

Instationäre Drücke aus Messungen und Rechnungen wurden bei der interessierenden Engine Order verglichen. Exemplarisch ist in Abbildung 19 der Vergleich der numerischen Ergebnisse für zwei unterschiedliche Transitionsmodelle mit den Messdaten der Messkampagne (I) dargestellt.

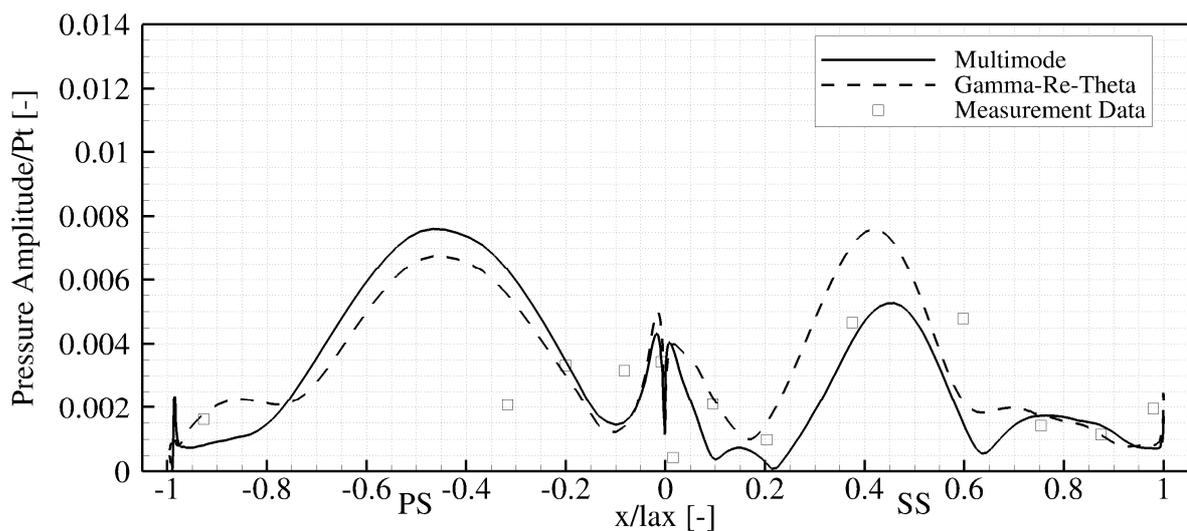


Abbildung 19: Vergleich Messung/Rechnung der instationären Druckverteilung aus Messkampagne (I) bei 20% Kanalhöhe

Ein Vergleich zwischen Messung und Rechnung für die Messkampagne (II) ist in

Abbildung 20 gezeigt.

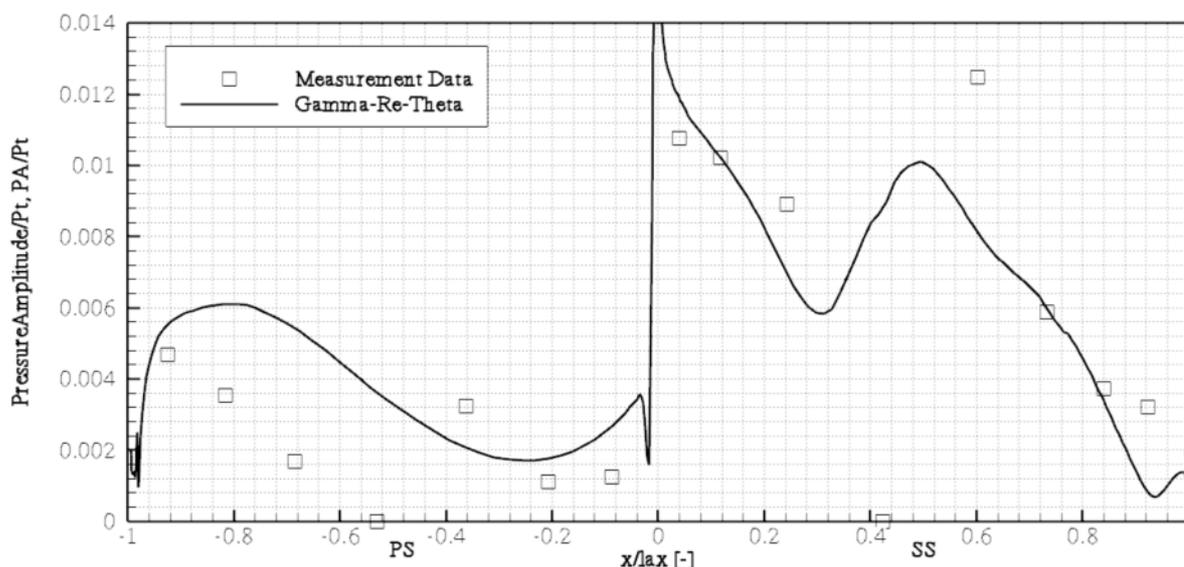


Abbildung 20: Vergleich Messung/Rechnung der instationären Druckverteilung aus Messkampagne (II) bei 20% Kanalhöhe

3.1.2 AP 2 Optimale Schaufelbelastung für schnelllaufende Turbinen

3.1.2.1 AP 2.1 Optimale Schaufelbelastung für schnelllaufende Turbinen

Ziel des Arbeitspaketes war es, das optimale Schaufelbelastungsniveau für schnelllaufende Turbinen zu bestimmen, in einem Rigversuch zu überprüfen und für den Einsatz in GTF-Triebwerken zu qualifizieren. Dabei sollten neben dem Einfluss auf den Wirkungsgrad auch die Auswirkungen auf Gewicht, Kosten und Turbinenlärm berücksichtigt werden.

Kaskadenversuche

Im Rahmen von ebenen Gitterversuchen wurde zunächst der Einfluss unterschiedlicher Schaufelbelastungen für typische Schaufelprofile schnelllaufender Niederdruckturbinen auf Transitionsverhalten und Verluste bestimmt. Untersuchungen am Institut für Strahlantriebe der Universität der Bundeswehr München beinhalteten eine Variation der Reynoldszahl und der Einströmbedingungen, und zwar:

- stationär und instationär

- unterschiedliche Turbulenzgrade
- Zuströmwinkelvariation.

Dabei wurde das Transitionsverhalten der Grenzschicht auf den Schaufelprofilen mit Oberflächenheißfilmgebern und Hitzdrahtsonden gemessen. Das für die Untersuchungen zur optimalen Schaufelbelastung neu ausgelegte High-Speed-Turbinengitter ist ein zweidimensionales Gitter mit geraden Seitenwänden.

Abbildung 21 zeigt exemplarisch eine gefertigte Kaskade mit Gitterkasten und die gemessenen Totaldruckverlustkonturen im Nachlauf der Beschauflung.

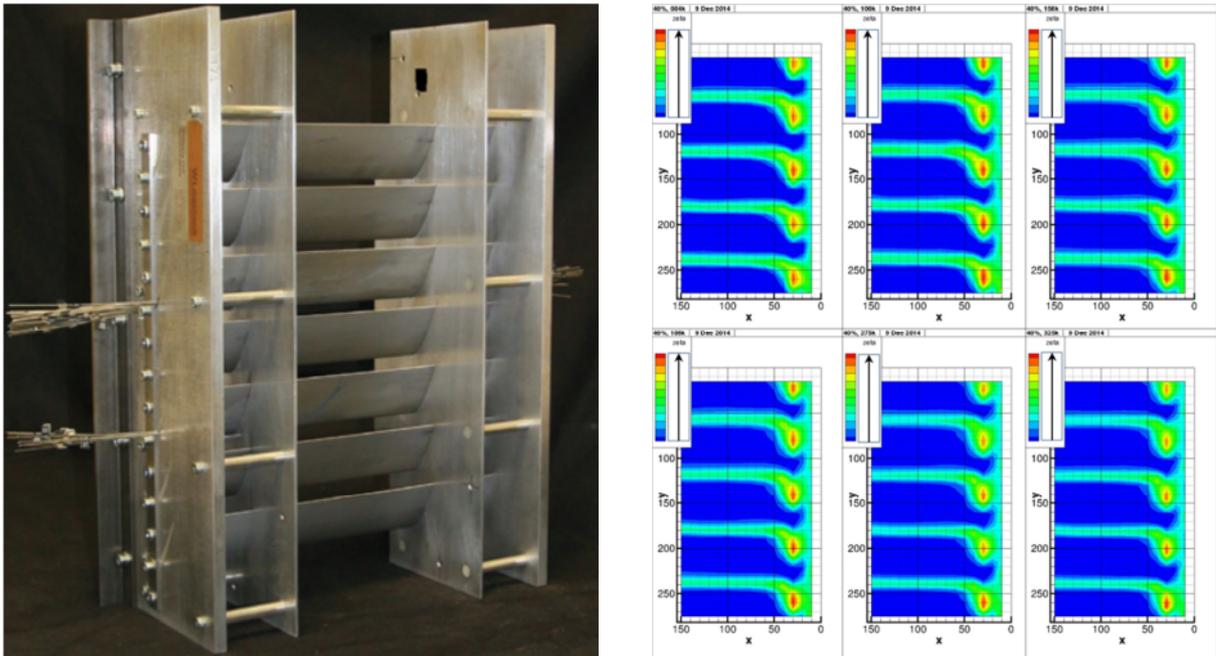


Abbildung 21: Turbinengitterträger und Totaldruckverlustkontur im Nachlauf

Grundlagenuntersuchungen zu Transition und Turbulenz

Ergänzt wurden die Ergebnisse der Gitterversuche im Hochgeschwindigkeitskanal der UniBW durch Transitionsuntersuchungen der TU Braunschweig an konturierten Seitenwänden sowie durch Untersuchungen der TU Berlin zum Transitionsverhalten an einer ebenen Platte mit Gegenkonturen.

Für den Niedergeschwindigkeitskanal der TU Berlin wurde dazu eine neue Messstrecke ausgelegt und die Bedingungen zur Übertragbarkeit eines High-Speed-Schaufelprofils für Low-Speed Anwendungen festgelegt. Der Zugang der Hitzdrahtmesstechnik zur Messstrecke erfordert es, dass die Kontur zur Aufprägung der saugseitigen Druckverteilung an der Unterseite des Messraumes platziert wird. So sind Hitzdrahtmessungen über die gesamte Länge der Plattenunterseite (Saugseite) und zusätzlich mehr als eine Plattenlänge im Nachlauf möglich. Die Konstruktion der neuen Messstrecke mit einer druck- und einer saugseitigen Kontur ist in Abbildung 22 gezeigt.

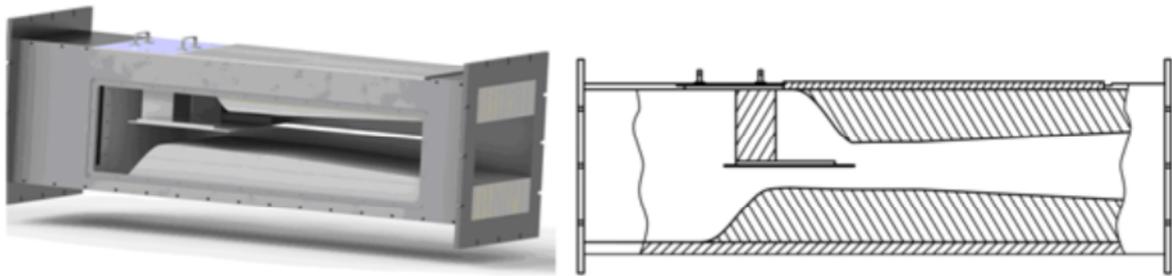


Abbildung 22: CAD-Modell der neu ausgelegten Messstrecke

Weitere grundlegende experimentelle Untersuchungen wurden am großen Gitterwindkanal der TU Braunschweig zur Überprüfung der Qualität der Zuströmung durchgeführt. Hierbei wurden die Homogenität der Zuströmgeschwindigkeit, der Zuströmwinkel und der Turbulenzgrad der Zuströmung für den gesamten Geschwindigkeitsbereich ermittelt. Insbesondere wurde die Höhe des Turbulenzgrades der Zuströmung in Abhängigkeit von der Entfernung zum Turbulenzerzeuger untersucht (Abbildung 23).

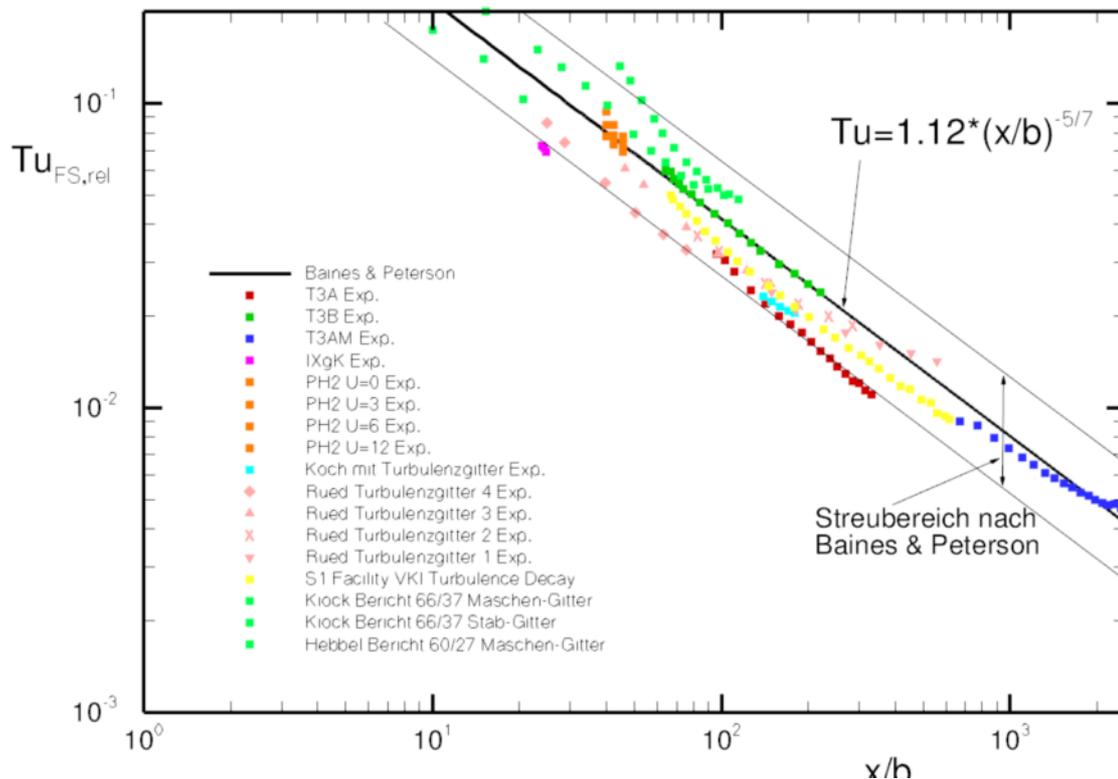


Abbildung 23: Turbulenzgrad in Abhängigkeit von der dimensionslosen Entfernung vom Turbulenzerzeuger

CFD-Modellierung

Die Ergebnisse aus den verschiedenen Grundlagenversuchen wurden anschließend mit den Ergebnissen verschiedener numerischer Berechnungen verglichen. Hierbei konnten die Resultate der Totaldruckverlustbeiwerte sowie Messdaten zum Transitionsverhalten für die Kalibrierung und Verbesserung der Modellierung mit dem 3D-CFD-Code TRACE verwendet werden.

Außerdem wurde eine numerische Modellerweiterung umgesetzt und getestet, um eine höhere Vorhersagegenauigkeit speziell bei hohen Turbulenzgraden zu gewährleisten. Es wurde gezeigt, dass TRACE mit den neuen Erweiterungen in der Lage ist, die experimentellen Verlustbeiwerte und den Abfall des Turbulenzgrades korrekt wiederzugeben (Abbildung 24).

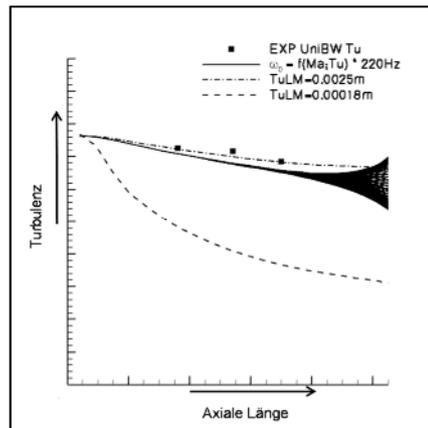


Abbildung 24: Turbulenz

Rig456 Bau B02

Nachdem im Vorgängervorhaben LuFo IV-3 HiSpeeT mit dem Bau B01 des Rig456 die Basisauslegung erfolgreich getestet worden ist, diente der zweite Aufbau dem Nachweis der Verbesserung durch die eingesetzten Technologien, die jeweils in Parallelprojekten entwickelt wurden. Im Hinblick auf die Umsetzbarkeit der Technologien in einer GTF-Engine wurde das Design exemplarisch auch unter Triebwerks-Randbedingungen untersucht.

Dazu wurden in B02 sowohl Schaufelformen als auch Seitenwandkonturierungen mit einem automatischen Optimierungsverfahren unter Einhaltung von Nebenbedingungen ausgelegt. Bei der Optimierung der Seitenwände wurden die Kavitäten (Nebenstromgeometrien) berücksichtigt. Abbildung 25 zeigt ein derartiges Optimierungsmodell.

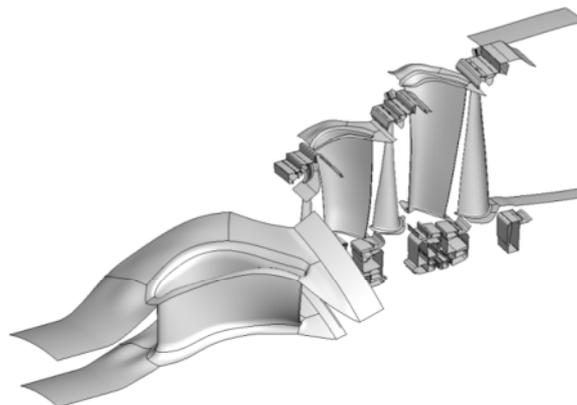


Abbildung 25: Kavitätenmodell des Rigs, wie zur Seitenwand-Optimierung verwendet

Die umfangreichen Untersuchungen des Rig456 B02 am Höhenprüfstand des Instituts für Luftfahrtantriebe in Stuttgart wurden erfolgreich durchgeführt.

Analog zu B01 wurden mit dem Rig456 folgende Teilversuche durchgeführt:

- Leistungsvermessung bei Auslegungsbedingung ohne Turbulenzgitter
- Kennfeldmessung mit eingebautem Turbulenzgitter
 - Kennfeld bei Auslegungs-Reynolds-Zahl
 - Reynoldszahl-Lapse-Rate bei Auslegungsdrehzahl
 - Leistungsvermessung bei den für die Aeroakustik und Aeroelastik wichtigen Lastpunkten
- Akustikmessungen
- Umfangreiche Traversierungen (Aero- und Tu-Sonden) im Rig-Eintritt, am TMTF-Austritt und im Austritt der Niederdruckturbine als Basis für Aero- und Akustikauswertungen.

Die gewonnenen Daten wurden überprüft und für weitere Analysen bereitgestellt. Exemplarisch für die im Rigversuch gewonnenen Ergebnisse sind in Abbildung 26 die Messungen der Kennfelder für Wirkungsgrad und reduzierten Massenstrom dargestellt. Die Resultate der Messung entsprechen den im Rahmen des Designs definierten Werten.

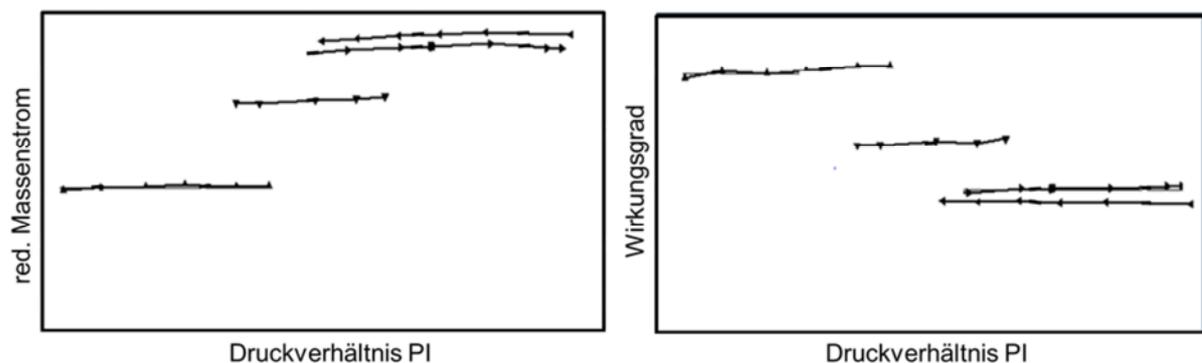


Abbildung 26: Kennfeld B02, Verlauf des red. Massenstroms (links) und des Wirkungsgrads (rechts) über dem Druckverhältnis PI

Resultate zu Akustikmessungen sind am Beispiel der Radialmodenanalyse in Abbildung 27 gezeigt, wobei ein Vergleich für die drei wichtigen Betriebspunkte dargestellt

ist.

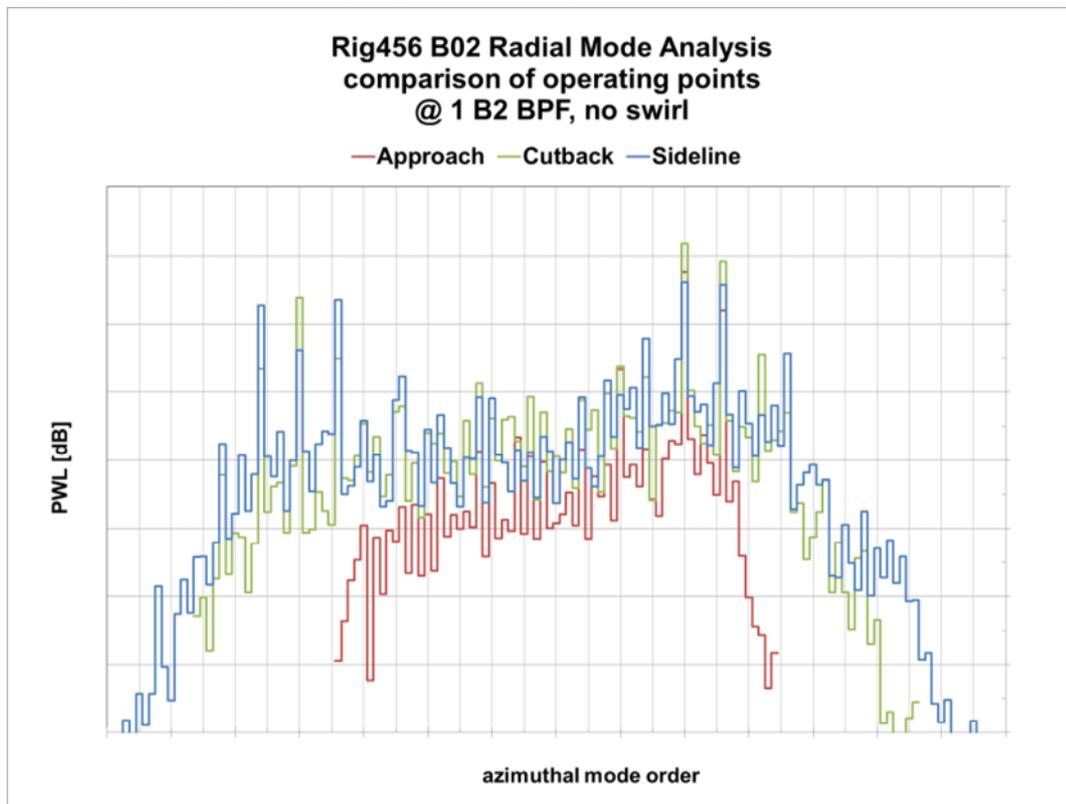


Abbildung 27: Darstellung der Akustikmessdaten am Beispiel der Radialmodenanalyse

3.1.3 AP 3 Präzisere Lebensdauer- und Versagensmodellierung für Turbinenschaufeln

3.1.3.1 AP 3.1 Rissfortschrittsmodellierung

In diesem Arbeitspaket wurden die Rissfortschrittseigenschaften des polykristallinen Gussmaterials Inconel 713, der gerichtet erstarrten Legierung M-247LC DS sowie der einkristallinen Nickelbasislegierung SC2000 umfassend durch Rissfortschritts- und Schwellwertmessungen ermittelt. Dafür wurden an Corner-Crack-Proben (CC-Proben) in einem Temperaturbereich von 400°C bis zur maximalen Einsatztemperatur des jeweiligen Werkstoffs, innerhalb eines Spannungsverhältnisintervalls von $R = -1$ bis $R = +0,8$ Rissfortschrittsversuche durchgeführt. Als Zyklusform für die Rissfortschrittstests wurde ein Trapezsignal mit 0,25 Hz verwendet. Zusätzlich wurden bei allen drei Werkstoffen bei 800°C und 900°C Versuche durchgeführt, in denen sowohl die Anstiegsrampe des Belastungssignals als auch die Haltezeit bei Maximal-

spannung bis zu 300 Sekunden variiert wurde, um den Zeiteinfluss auf die Rissfortschrittsgeschwindigkeit ermitteln zu können und modellhaft abzubilden.

Die Versuche wurden in gleichen Anteilen bei MTU Aero Engines AG in München und der BAM in Berlin durchgeführt.

Eine Übersicht über die Anzahl der geprüften Proben für die einzelnen Werkstoffe zur Untersuchung der jeweiligen Einflussgrößen auf das Rissfortschrittsverhalten ist in Tabelle 1 wiedergegeben.

	Inconel 713	M-247LC DS	SC2000
T-Einfluss	15	11	10
R-Einfluss	11	24	26
t-Einfluss	36	24	20
Schwellwert	33	19	16

Tabelle 1: Übersicht über die Anzahl der durchgeführten Versuche für unterschiedliche Einflussgrößen.

Die verwendeten Corner-Crack-Proben wurden mittels eines Laserbearbeitungsprozesses gekerbt. Die Kerbtiefen betragen für das polykristalline Material 0,8mm und für den gerichtet erstarrten Werkstoff und das einkristalline Material 0,5mm.

Durch die Verwendung einer Potentialsonde am Kerb konnten nach einer Kalibrierung des Potentialsignals mit definierten Markierungen auf der Bruchfläche die Risslängen bestimmt werden. Somit konnten aus den ermittelten Risslängen a , die Schwingbreiten des Spannungsintensitätsfaktors ΔK sowie die Rissgeschwindigkeiten da/dN berechnet werden. In Abbildung 28 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

Bei allen drei untersuchten Materialien konnte beobachtet werden, dass mit steigender Temperatur und konstantem Spannungsverhältnis $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, die Rissgeschwindigkeiten bei konstantem ΔK ansteigen. Ebenso verhält es sich, wenn die

Prüf­temperatur konstant gehalten wird und das R-Verhältnis vergrößert wird. Dabei fällt auf, dass unabhängig von Werkstoff und Temperatur das Verhältnis von $DK(R=0)/DK(R)$ für negative Spannungsverhältnisse nur vom R-Wert abhängt.

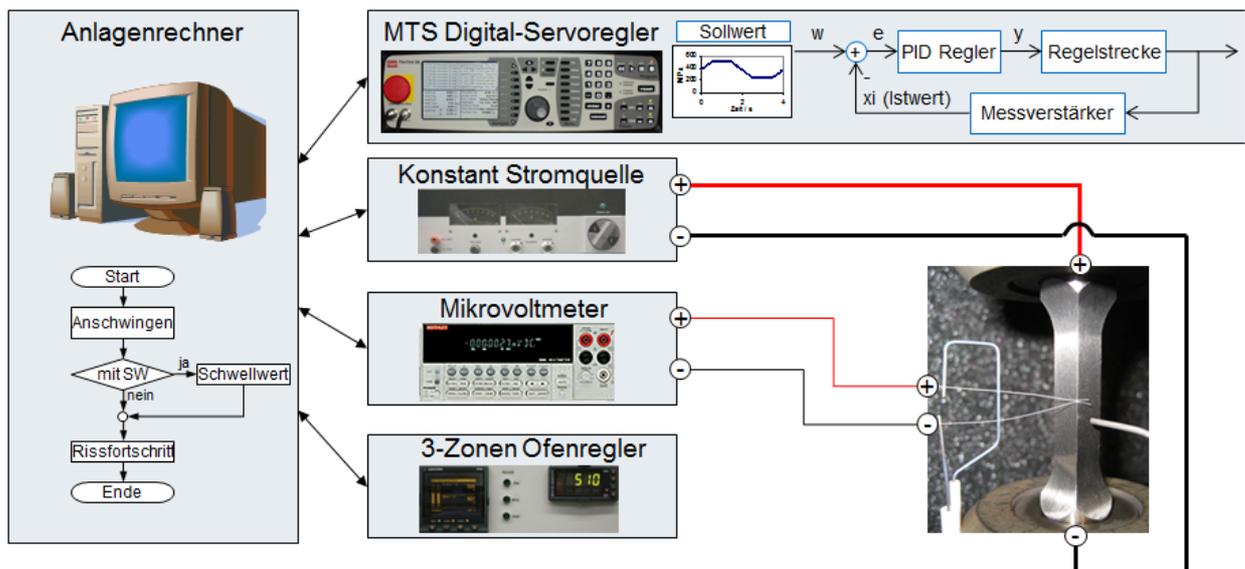


Abbildung 28: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für Rissfortschritts- und Schwellwertprüfung an Corner-Crack-Proben.

Die Rissgeschwindigkeiten für positive R-Verhältnisse steigen mit zunehmender Temperatur immer stärker an, was darauf schließen lässt, dass Kriecheffekte an der Riss­spitze bei erhöhten Mittelspannungen mit steigender Temperatur immer größeren Einfluss auf das Rissfortschrittsverhalten haben.

Dieses Verhalten konnte auch modellhaft beschrieben werden. Ein weiteres Ziel dieses Projektes war es, den durch Kriechen bedingten Zeit- und Spannungseinfluss auf das Rissfortschrittsverhalten bei den oben genannten Materialien zu testen und modellhaft zu beschreiben. Dazu wurden bei 800°C und 900°C Rissfortschrittsversuche durchgeführt, an welchen die Zeitabhängigkeit ermittelt werden sollte. Im Gegensatz zu den Tests mit einem Trapezsignal von 0,25 Hz, bei denen die Abhängigkeit der Rissfortschritts­geschwindigkeit von der Temperatur und dem R-Verhältnis geprüft wurde, wurden bei diesen Versuchen Haltezeiten bei Maximalspannung und Rampenzeiten bis zu 300s geprüft.

Man erkennt aus den Ergebnissen deutlich, dass die Rissgeschwindigkeiten mit steigenden Zykluszeiten für konstante DKs ansteigen, bei den Haltezeitversuchen mehr als bei den Versuchen mit entsprechenden Rampenzeiten. Dieser Effekt wird mit steigender Temperatur ausgeprägter wegen des zunehmenden Kriecheinflusses bei höheren Temperaturen.

Solange sich das Kriechen nur auf die plastische Zone vor der Riss Spitze beschränkt, kann das Verhalten sehr gut mit folgendem da/dt -Modell beschrieben werden

$$\frac{da}{dN} = \frac{da}{dN_{cyc}} + \int_{t_0}^{t_1} \frac{da}{dt} dt$$

mit $t_0 = 0s$ (Beginn eines Zyklus) und t_1 der Zeit zum Ende eines Zyklus, und

$$\frac{da}{dt} = \alpha_0 t^{\alpha_1} K^n \exp\left(\frac{Q_{creep}}{RT}\right) + \omega_0 t^{\omega_1} \exp\left(\frac{Q_{ox}}{RT}\right)$$

Darin beschreibt der erste Summand den Einfluss des Kriechens auf den Rissfortschritt im Paris-Bereich, der zweite den Einfluss von Riss Spitzenoxidation, wobei dieser Term bei den untersuchten Materialien und Bedingungen vernachlässigbar ist.

Die gesamte Rissfortschrittsgeschwindigkeit da/dN ist somit die Summe aus einem rein zyklischen Teil, der durch ein modifiziertes Paris- und Walkergesetz berechnet wurde [1], und einem zeitabhängigen Term, in dem die Risslängenänderung da über das ganze Zyklusintervall von $t = t_0$ bis $t = t_1$ auf integriert wird.

Darin sind α_0 , α_1 und n materialabhängige Konstanten, welche den Kriecheinfluss beschreiben, Q_{creep} die Aktivierungsenergie für Kriechen an der Riss Spitze, T die absolute Temperatur und R die Allgemeine Gaskonstante. Entsprechendes gilt für den Term, welcher den oxidativen Einfluss beschreibt, mit ω_0 und ω_1 als materialabhängige Konstanten und Q_{ox} als Aktivierungsenergie für die Oxidation.

In der Abbildung 29 und in der Abbildung 30 sind beispielhaft die R-Abhängigkeit bei 900°C sowie die Zeitabhängigkeit für Inconel 713 dargestellt. Durch die Berücksichtigung des Kriecheinflusses auf die Rissgeschwindigkeiten bleiben die Parameter, durch die der zyklische R-Einfluss beschrieben wird, also der Einfluss des Riss-schließens, über den gesamten Temperaturbereich für jedes Material konstant.

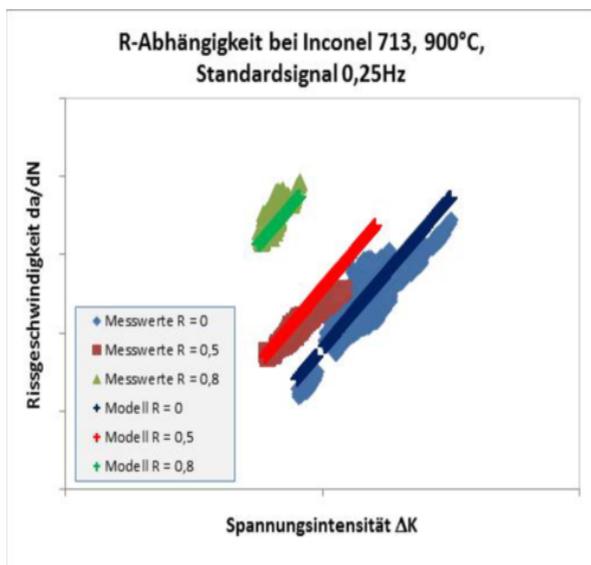


Abbildung 29: R-Abhängigkeit der Rissgeschwindigkeit bei Inconel 713, 900°C. Vergleich von Mess- und Modellwerten

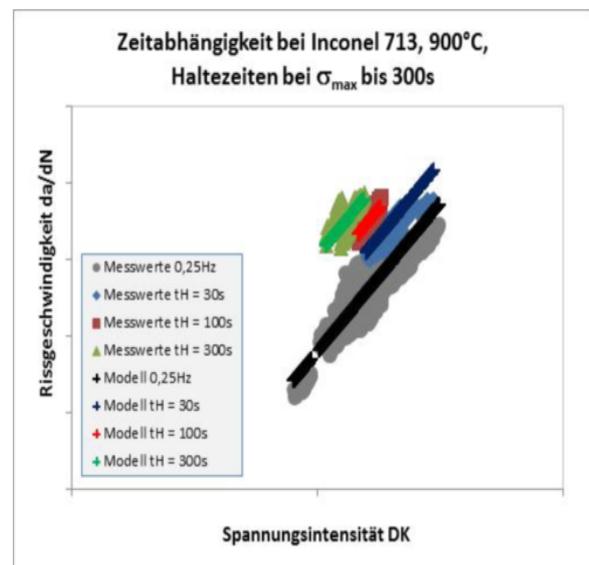


Abbildung 30: Zeitabhängigkeit der Rissgeschwindigkeit bei Inconel 713, 900°C. Vergleich von Mess- und Modellwerten bei Haltezeiten bis zu 300s

Der einkristalline Werkstoff SC2000 zeigte eine sehr ausgeprägte Neigung zu Gleitbandrissen bis zu einer Temperatur von 800°C. Die Berechnung der effektiven DK-Werte für diese „Mixed-Mode-Brüche“ erfolgte mit Hilfe der K-Lösung nach Pickard für Gleitbandbrüche in Einkristallen [2]. Des weiteren reagiert dieser Werkstoff sehr empfindlich auf innere Fehler wie Fremdkörner, Poren oder Einschlüsse. Das Einbringen eines wachstumsfähigen Risses benötigt vor Allem bei Temperaturen um 800°C relativ hohe DK-Werte, und somit hohe Spannungen. Dies resultiert daraus, dass das oxidativ bedingte Riss-schließverhalten von SC2000 sehr ausgeprägt ist. Ein wachstumsfähiger Riss oxidiert sehr schnell an der Riss-spitze und schließt sich dadurch wieder. Risskeime im Werkstoffinneren, die keinem Luftsauerstoff ausgesetzt sind und damit kein oxidatives Riss-schließen aufweisen, können dadurch unge-

hindert wachsen. Der Ermüdungsbruch in der Probe erfolgt folglich unkontrolliert.

Das Abknicken der Risse auf kristallographischen Ebenen (Gleitbandrisse) im Einkristall bei 400°C wurde bei der BAM näher untersucht. Dies wird im Folgenden näher ausgeführt.

Vier bei 400 °C und unter unterschiedlichen Lasten geprüfte Proben wurden ausgewählt. Die Abbildung 31 zeigt exemplarisch die Bruchfläche einer der geprüften Proben.

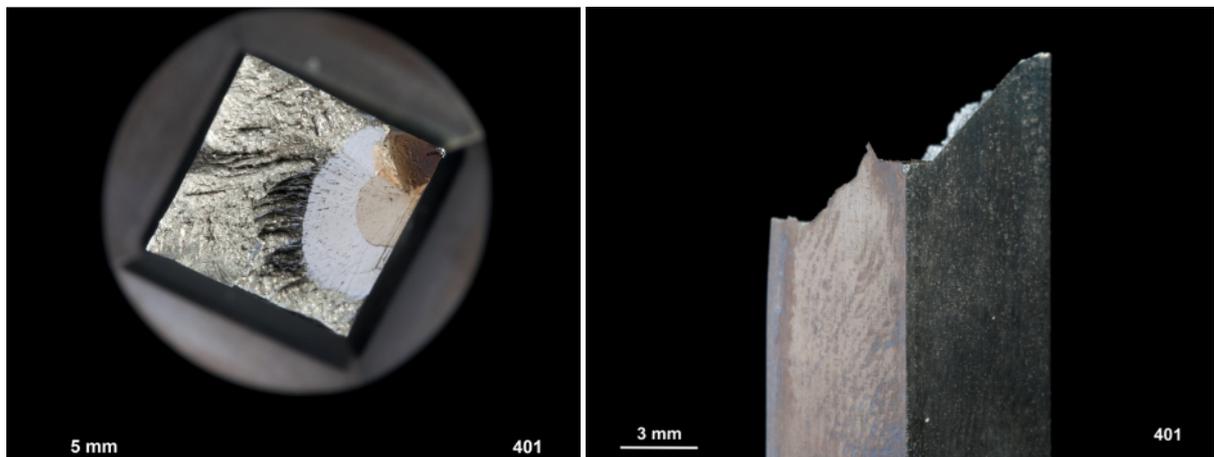


Abbildung 31: Bruchfläche der Probe

Im ersten Schritt wurden diese Bruchflächen unter einem Lichtmikroskop vermessen und anschließend im Programm Mathematica vernetzt, wobei jede Bruchfläche mehrere Beachmarks enthielt, die separat vernetzt wurden (Abbildung 32). Dadurch sind für jede Probe verschiedene Oberflächenvernetzungen entstanden, die die Risskonfiguration zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreiben.

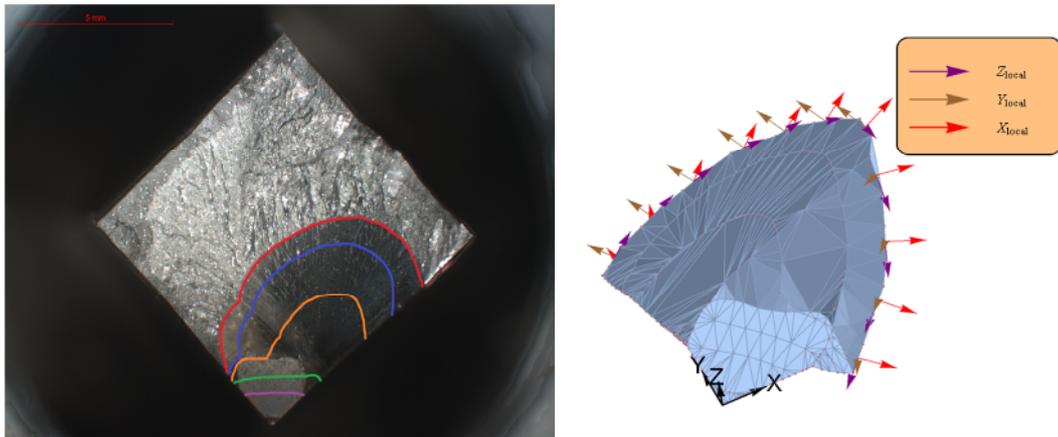


Abbildung 32: Vermessung und Vernetzung der Bruchfläche der Probe

Basierend auf diese triangulierten Bruchflächen wurden von MTU dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle (FE) der gerissenen Proben für Abaqus erstellt. Die Abbildung 33 zeigt beispielhaft ein solches FE-Modell mit den Randbedingungen. Mit diesen Modellen wurden die Spannungsintensitätsfaktoren K_I, K_{II}, K_{III} der linearen Bruchmechanik entlang der unebenen Rissfront ermittelt.

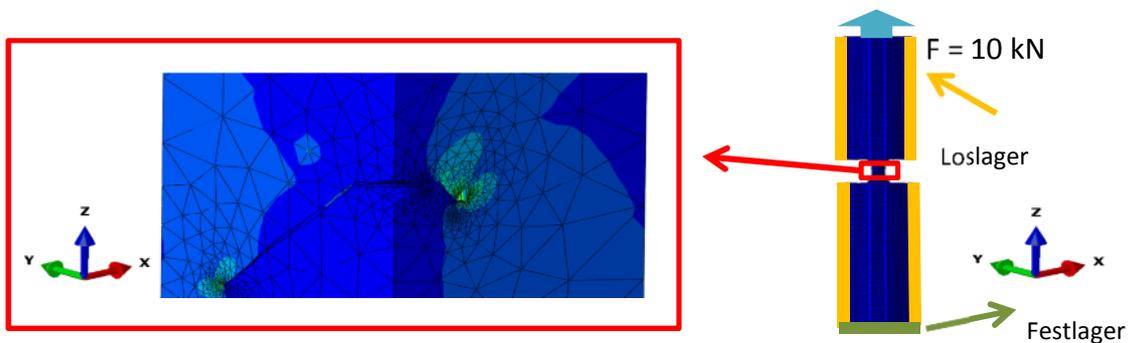


Abbildung 33: FE-Modell einer gerissenen Probe

Die lokalen kristallographischen Verhältnisse entlang der Rissfront werden am besten mit Hilfe der lokalen Intensität der Schmidspannungen der jeweiligen Gleitsysteme g

$$\Delta K_{rss,g}^{eff} = \lim_{r \rightarrow 0} [\sqrt{2\pi r} (\mathbf{n}_g \cdot \Delta \boldsymbol{\sigma}^{eff}(r, \theta_g) \cdot \mathbf{t}_g)], \quad g = 1, \dots, 12$$

berücksichtigt (siehe [3], u.a. in der Referenz [4] zitiert). Dabei bedeutet $\Delta \boldsymbol{\sigma}^{eff}$ die effektive Spannungsamplitude (d.h. unter Berücksichtigung des Risschließens) und

θ_g der Winkel zwischen der Rissausbreitungsrichtung und der Gleitebene.

Zusammenfassend zeigte sich: Das Abknicken auf kristallographische Ebene beginnt grundsätzlich an einer freien Oberfläche und setzt sich ins Probeninnere fort. Die Bruchebene nach Abknicken ist identisch mit der Gleitebene des Gleitsystems, die das Maximum von $\Delta K_{rss,g}^{eff}$ über alle Gleitsysteme realisiert. Dies ist exemplarisch in der Abbildung 34 erkennbar, wo oben die Werte $\Delta K_{rss,g}^{eff}$ entlang der Rissfront für alle Gleitsysteme und unten das Vektorprodukt zwischen den Normalvektoren der jeweiligen Gleitebenen und dem Normalvektor zur Bruchfläche gezeigt werden. Ein Wert von eins bedeutet eine Übereinstimmung der Ebenen. In der Mitte hat noch kein Abknicken stattgefunden.

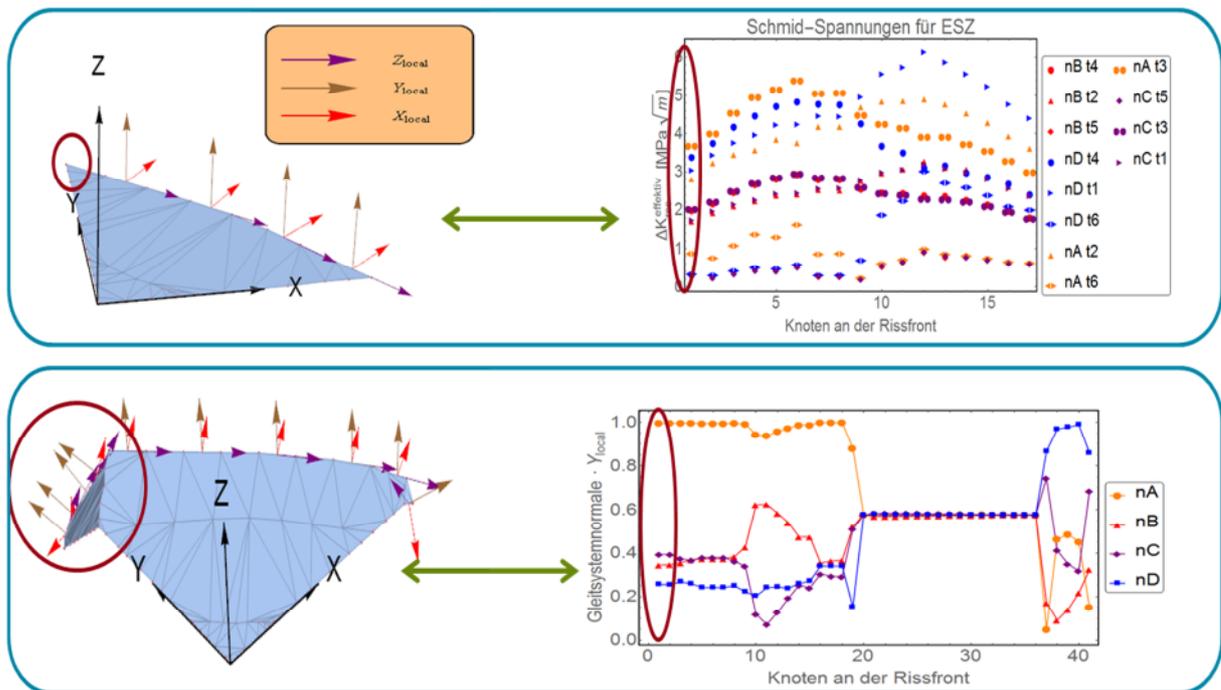


Abbildung 34: Oben: Werte von $\Delta K_{rss,g}^{eff}$ entlang der Rissfront für alle Gleitsysteme.

Unten: Vergleich zwischen Gleitebene und Bruchfläche.

Schließlich wurde die Korrelation zwischen $\text{Max } \Delta K_{rss,g}^{eff}$ und der gemessenen Rissfortschrittsrate $\frac{da}{dN}$ untersucht. Dabei soll zwischen den ebenen Abschnitten (Mode I) der jeweiligen Rissfronten und den kristallographischen Abschnitten unterschieden

werden. Bei den Werten auf den kristallographischen Abschnitten ist ein klarer Trend erkennbar, wenngleich mit einer großen Streuung verbunden. Es konnte gezeigt werden, dass diese Streuung zum großen Teil auf Unregelmäßigkeiten der Vernetzung der zugrundeliegenden FE-Modelle zurückgeführt werden kann.

Die Schwellwertversuche wurden durch ein Laststeigerungsverfahren realisiert. Dafür wurden die gekerbten Proben bei Raumtemperatur unter einer zyklischen Druckbelastung angeschwungen. Anschließend wurde bei der Prüftemperatur beginnend mit einer Spannung, die eine Spannungsintensität hervorruft, die kleiner ist als der intrinsische Schwellwert, die Probe zyklisch belastet und nach definierten Zyklenzahlen die Last gesteigert. Bei jeder Laststufe verlangsamt sich das Risswachstum, hervorgerufen durch die sich aufbauenden Rissschließeffekte und der Riss kommt schließlich zum Stehen. Die Laststeigerung wird solange wiederholt, bis schließlich ein stabiles Risswachstum einsetzt. Daraus lässt sich die zyklische Risswiderstandskurve ermitteln und aus ihr sowohl der R-abhängige Schwellwert für lange Risse, bei denen sich die Rissschließeffekte voll ausgebildet haben, als auch der intrinsische, von Rissschließeffekten unbeeinflusste Schwellwert.

Durch Auswertung der gemessenen Risswiderstandskurve kann auf den Rissgrößenabhängigen Schwellwert geschlossen und durch das El-Haddad-Modell beschrieben werden:

$$\Delta K_{th}(a) = \Delta K_{th,0} \sqrt{\frac{a}{a + a_c}}$$

mit $\Delta K_{th}(a)$ als Risslängenabhängiger Schwellwert, Langrisschwellwert $\Delta K_{th,0}$, Risslänge a und a_c als Korrekturrisslänge, die eine temperaturabhängige Materialkonstante ist. Unterschreitet der berechnete Wert den vorher bestimmten intrinsischen Schwellwert, so wird $\Delta K_{th}(a)$ gleich $\Delta K_{th,intr}$ gesetzt.

3.1.3.2 AP 3.2 Verbessertes Oxidationslebensdauermodell

Im Projektzeitraum wurde das Modellkonzept für beschichtete einkristalline Werkstoff-

fe definiert. Zur Vereinfachung der Problembeschreibung wurde das neu zu entwickelnde Modell in ein chemisches und mechanisches Modell unterteilt, wobei sich das chemische Modell in weitere Teilmodelle gliedert.

Das chemische Modell setzt sich aus der Beschreibung der Oxidationskinetik und einem Diffusionsmodell zusammen. Das Modell berechnet die Al-Konzentration, die Phasenanteile in den verschiedenen Zonen und die Zonendicke bei verschiedenen Temperaturen (T), Dauer (t), Haltezeiten in einem Zyklus (Δt) quantitativ.

Das mechanische Modell beschreibt das mechanische Versagen der Oxidschicht und berechnet die Gesamttragfähigkeit des Systems.

Für die Modellentwicklung wurden folgende Kennwerte ermittelt:

- Massenänderung während isothermer, quasi-statischer und thermozyklischer Auslagerung im Ofen.
- Al-Verteilungen, die Breite und die Phasenanteile der verschiedenen Zonen Outer Coating (OC), Interdiffusionszone (IDZ) und Sekundärreaktionszone (SRZ) sowie die Oxiddicke in Abhängigkeit der Auslagerung und der Probengeometrie.
- Umwandlungszeit des Al_2O_3 Oxids bei verschiedenen Auslagerungstemperaturen.
- Bestimmung des kritischen Al-Gehalts der OC Zone als Versagens-Kriterium für die Schichtlebensdauer.

Basierend auf den Modellierungsansatz wurden Tools und Berechnungsalgorithmen entwickelt und getestet. Ferner wurde das Konzept zur Validierung festgelegt. Dieses beinhaltete unter anderem Burner-Rig (BR) Versuche und die Durchführung von TMF-Versuchen mit Haltezeit sowie mit und ohne mechanischer Dehnungskomponente.

Die für die Versuche erforderlichen Proben wurden von MTU bereitgestellt. Es wur-

den 3 Chargen mit unterschiedlichen Schichten an das Forschungszentrum Jülich (FZJ) und an das DECHEMA-Forschungsinstitut (DFI) geliefert.

Die Modellentwicklung wurde anhand der Untersuchungsergebnisse der Proben aus Charge 1 und 2 durchgeführt. Die Parameterermittlung für das Fitmodell wurde für den gesamten Datensatz durchgeführt, wodurch der Einfluss des Beschichtungsprozesses (Labor, Serienprozess) und die Variation der Schichtdicke mitberücksichtigt wurde.

Oxidationskinetik

Mit einem einzigen kinetischen Modell lässt sich die Temperatur- und Zeitabhängigkeit der Oxidationskinetik nicht über den gesamten Temperatur- und Zeitbereich beschreiben. Daher wurde die Oxidationskinetik nach Oxidationsdauer und Temperaturbereich getrennt und in 3 Gleichungen aufgeteilt. Die gesamte Massenänderung setzt sich dabei aus der Wachstumskinetik und der Verlustkinetik zusammen (Abbildung 35). Die Wachstumskinetik besteht aus zwei Zeitzonen. Unterhalb von t_{trans} wird die Wachstumskinetik mit Gl. [1] und oberhalb mit Gl. [2] beschrieben. Beide Gleichungen stellen lediglich die Wachstumskinetik des Oxids dar, der kinetische Massenverlust wird im nächsten Schritt berücksichtigt. Hierbei wird die Zeit zur Umwandlung der Oxide von θ zur α - Al_2O_3 als t_{trans} bezeichnet. Die Verlustkinetik wird im Rahmen des Folgeprojektes LuFo V/1 in das Modell implementiert.

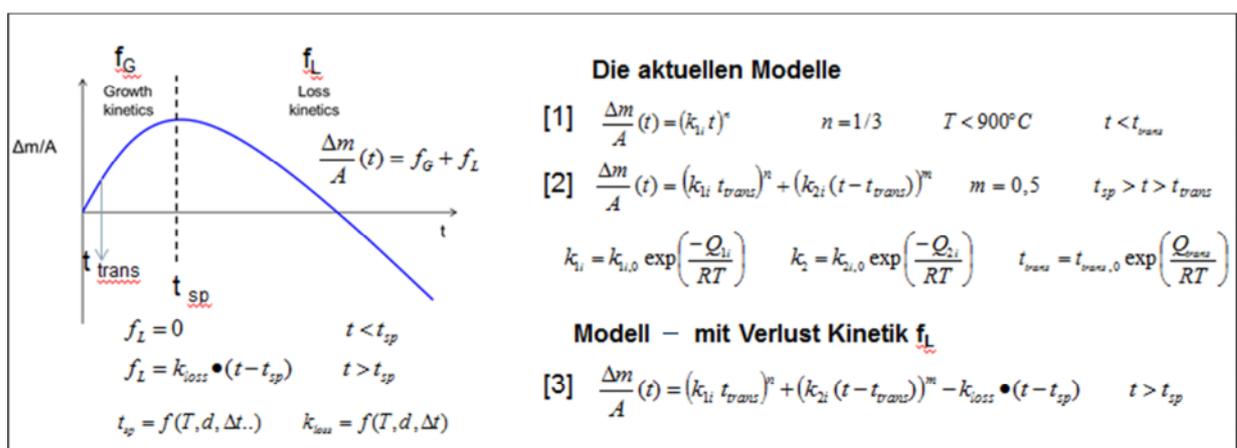


Abbildung 35: Schematische Darstellung der Oxidationskinetik

Fitmodell

Um die Oxidationseigenschaften schnell und mit geringem Aufwand berechnen zu können, wurde das empirische Fitmodell auf Basis physikalischer Modelle entwickelt und in eine Excel-Datei als Berechnungswerkzeug eingebaut. Die Parameter werden dabei vorab mit dem CALPHAD-Modell und Testdaten gefittet. Die Modellparameter für die optimierten Beschreibungen wurden aus den thermozyklischen Versuchsdaten mittels eines Fitverfahrens bestimmt. Dabei wurden die Funktionen für einen Temperaturbereich bis 1100 °C angepasst.

Bei der Entwicklung wurde eine wichtige Änderung in der Fitfunktion zur Berechnung der mittleren Al-Konzentration vorgenommen (Abbildung 36). Dabei wird der Al-Verlust durch Oxidation (Gleichung [4]) aus den Massenänderungsdaten bestimmt. So können die einzelnen Anteile für Oxidation und Interdiffusion des gesamten Al-Verlustes (Gleichung [5]) genau beschrieben werden. Die Genauigkeit der Fitfunktionen für die Phasenanteile (β und γ') in der äußeren Schicht und IDZ wurden damit wesentlich verbessert.

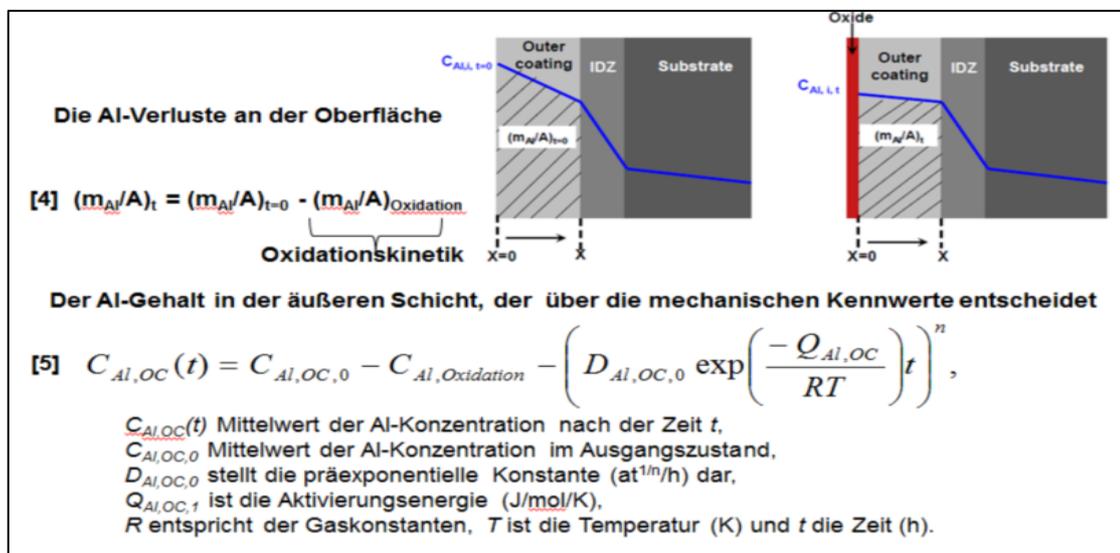


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Änderung des Al-Gehalts in der OC Zone

Oxidationsversuche im Burner Rig

Zur Bewertung des Oxidationsverhaltens (Einfluss der Schichtdicke, Zyklusdauer,

Einfluss der Krümmung) wurden im Burner Rig (BR) Versuche durchgeführt. Die Bewertung der Versuche bildet die Basis für die Modellentwicklung und zeigt, welche Einflussfaktoren bei der Modellierung berücksichtigt werden müssen.

So liegen die Oxidationsdaten bei Schichtdicken von 65 und 115 μm im gleichen Streuband. Weiter wurde festgestellt, dass die Zyklusdauer im BR Versuch nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Schichtlebensdauer hat. Die Radiusänderung zeigt für beide betrachteten Zyklusdauern einen vergleichbaren Verlauf bis zur „Inkubation“ (negative Radiusänderung). Danach nimmt der Massenverlust bei kürzeren Zykluszeiten stark zu. Die Beobachtungen bestätigen die Aussage, dass die Oxidationskinetik von der Zyklusdauer im Anfangsbereich der Oxidation kaum beeinflusst wird. Aus diesem Grund wird derzeit nur die Abhängigkeit von der Zeit (t) und der Temperatur (T) und nicht die Zyklusdauer berücksichtigt.

Die BR Versuche zeigen, dass sich der integrale Al-Gehalt annähernd linear auf Oxidationslebensdauer auswirkt. Je höher der integrale Al-Gehalt der Schicht, umso höher ist die Oxidationslebensdauer. Weiter wurde festgestellt, dass die Innenschicht eine längere Lebensdauer als die Außenschicht hat. BR Versuche an unbeschichtetem SC2000 zeigen einen deutlichen Einfluss der Krümmung auf die Abtragsrate und Oxidationslebensdauer. Die negative Krümmung hat eine niedrigere Abtragsrate und längere Lebensdauer zur Folge. Daraus leitet sich ab, dass die Krümmung auch bei beschichteten Proben einen entscheidenden Einfluss auf die Oxidationskinetik haben könnte. Der Krümmungseinfluss wurde in diesem Projekt nicht systematisch untersucht, soll aber in einem Folgevorhaben mit speziellen Krümmungsproben erfasst werden. Triebwerkserfahrungen zeigen, dass die im BR experimentell ermittelten Oxidationslebensdauern im Triebwerk nicht erreicht werden. Ausfallursachen von Schaufeln sind eher Sulfidation und überlagerte thermomechanische Beanspruchungen, die im BR Versuch nicht erfasst werden können.

Validierung des Oxidationsmodells

Nach der maximalen Auslagerungszeit (18000 Zyklen) wurden am FZJ Nachuntersu-

chungen für die SC2000 BR-Proben durchgeführt. Die ausgelagerten Proben wurden nach der metallographischen Präparation hinsichtlich der Schichtdegradation bewertet. Dabei wurde eine Stelle mit dem geringsten Angriff und eine Stelle mit dem stärksten Angriff (Schichtverarmung) für alle Temperaturen und Werkstoffe ausgewertet. Bei der SC2000 Probe war nach 900h noch ein signifikanter β -NiAl Anteil in der Schicht festzustellen. Bei 1050°C und 1100°C wies die SC2000 Probe an einigen Stellen noch β -NiAl auf, an anderen Stellen war die Schicht ebenfalls vollständig verarmt.

Die Berechnungsergebnisse des FZJ Excel Tools wurden mit den experimentellen Ergebnissen der BR-Proben von SC2000 bezüglich der Al-Konzentration in der äußeren Schicht und der IDZ, dem β -NiAl Anteil in der äußeren Schicht und in der IDZ, dem γ -Anteil in der äußeren Schicht und der Breite der SRZ verglichen. Bis auf 1100°C liegen die Modellergebnisse zwischen den minimalen und maximalen Messwerten, d.h. die Modellierung liefert eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten. Bei 1100°C überschätzt das Modell die Verarmung und die SRZ Tiefe. Dafür sind folgende Gründe denkbar:

- Unterschiede in den Beschichtungsparametern und möglicher Einfluss der kürzeren Zyklusdauer im BR
- Die SRZ wird nach vollständiger Verarmung der Schicht nicht weiter wachsen. Dieser Effekt wird in dem Modell bisher nicht berücksichtigt. U. U. führt eine Berücksichtigung des Effektes zu einer besseren Übereinstimmung der modellierten und der experimentellen Werte.
- Die Maximaltemperatur an der entnommenen Position im BR wurde vermutlich überschätzt, da der maximale Oxidationsangriff an einer anderen Position der BR Probe liegt.

AP 3.2.2 Thermodynamik, Diffusionskinetik, Mikrostrukturanalyse, Modellierung (FZJ),
Identifizierung Modellparameter, Versuchsplanung

Die Diffusion mehrerer Elemente in verschiedenen Phasen und die Änderung der

Mikrostruktur infolge von Al-Verarmung wurde durch ein beim Forschungszentrum Jülich entwickeltes Berechnungstool bestimmt. Das dem Tool zugrunde liegende Modell stützt sich auf die Calphad (Phase Calculation Diagram) Methode, nach der die Anteile aller im Gleichgewicht befindlichen Phasen systematisch berechnet werden. Die Oxidation bzw. Diffusion von relevanten Elementen (Al) wird in den sich im Gleichgewicht befindenden Phasen berechnet. Die Vorgehensweise weist gegenüber dem klassischen Calphad Konzept einige neue Features auf. Dazu gehört z.B. Moving Boundary Interface für die Grenze von Metall-Oxid.

Experimentellen Arbeiten

Das Versuchsprogramm beinhaltete eine isotherme und eine thermozyklische Auslagerung. Die thermozyklische Auslagerung führt zu einer verstärkten Verarmung der β -NiAl Phase in der äußeren Schicht ab etwa 300h bei 1050°C und ab etwa 100h bei 1100°C und 1150°C im Vergleich zu quasi-isothermer Auslagerung. Ein vollständiger Verbrauch der β -NiAl Phase in der äußeren Schicht wurde nach 1000h bei 1100°C und 192h bei 1150°C beobachtet. Generell tritt im Vergleich zu quasi-isothermer Auslagerung bei thermozyklischer Auslagerung und 1150°C eine verstärkte Al-Verarmung in der äußeren Schicht auf. Dies wird auf die Bildung von Mischoxiden zurückgeführt, die bei 1150°C und thermozyklischer Oxidation nach 320h beobachtet wurden. Dadurch ist die Schutzwirkung durch Bildung einer reinen Aluminiumoxid-schicht ab dem Zeitpunkt nicht mehr gewährleistet.

Mikrostrukturelle Charakterisierung

Für die Charakterisierung der bei hohen Temperaturen (ausgelagerten) Schichtsysteme zur Aufklärung der Diffusionsmechanismen, zur Charakterisierung der Phasen und zur Quantifizierung der Oxidations- und Ausbreitungskinetik der verschiedenen Zonen wurden lichtoptische Metallographie (LOM), Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM), energie- und wellenlängen-dispersive Röntgenanalyse (EDX/WDX), und Röntgenfeinstrukturanalyse (XRD) eingesetzt. Für eine quantitative Ermittlung der Verarmungsvorgänge in den etwa 70 μ m dicken Schutzschichten und in den Interdiffusionszonen wurde neben REM/EDX/WDX zusätzlich Glimmentladungsspektroskopie (GDOES) benutzt.

Die äußere Schicht enthält hauptsächlich Ni und Al und besteht aus der β -NiAl Phase. In der Interdiffusionszone sind hauptsächlich zwei Arten von Ausscheidungen zu sehen: Kohlenstoffhaltige und intermetallische Ausscheidungen. Es konnten die Hauptkomponenten der kohlenstoffhaltigen Ausscheidungen als Ta, W, Cr und Mo identifiziert werden. Die intermetallischen Phasen enthalten Co, Cr, Mo, W und Re.

Zur genaueren Identifizierung der Phasenverteilung in den Proben wurde die Röntgenfeinstrukturanalyse (XRD) eingesetzt. Die Proben wurden von der Beschichtungsoberfläche bis zum Grundwerkstoff schrittweise poliert und mittels XRD analysiert. Dabei wurden die gemessenen Intensitäten mit den in einer Datenbank verfügbaren Intensitäten der Zielphase verglichen. Neben der β -NiAl Phase wurden Karbide vom Typ M_6C ($M = Cr, Co, Ta$) und intermetallische Phasen sowohl in der äußeren Schicht als auch in der IDZ identifiziert. Unter den intermetallischen Phasen konnte zwischen der intermetallischen Verbindung $M_{3/13}Re_7$ ($M=Cr, W$) und der μ -Phase $(Ni,Co)_6(W,Mo)_7$ unterschieden werden. Die XRD-Untersuchungen der NWD-Proben ergaben ähnliche Ergebnisse.

Die Ergebnisse der XRD-Messungen konnten mit den Ergebnissen der Elektronenrückstreuung (Electron Backscatter Diffraction EBSD) bestätigt werden. Da zu einer eindeutigen Identifizierung der Phasen mittels EBSD eine minimale Ausscheidungsgröße erforderlich ist, wurde eine bei 1150°C für 100h ausgelagerte Probe gewählt, in der die Ausscheidungen am stärksten vergrößert waren. In dieser Probe konnten alle Ausscheidungen in einem vorgewählten Bereich entweder dem Karbidtyp M_6C oder der μ -Phase zugeordnet werden.

Modellierung

Zur Modellierung der oxidations- und diffusionsbedingten Gefügeänderungen wurde das 1D-Homogenisierungsmodell eingesetzt. Zur Berechnung der gleichzeitig stattfindenden Oxidations- und Diffusionsvorgänge in der alitierten Superlegierung SC2000 wurde ein von DICTRA unabhängiger FORTRAN-basierter Berechnungscode entwickelt. Für die Berechnungen benötigte Daten werden aus der thermodynamischen Datenbank TCNi5 und der kinetischen Datenbank MobNi2 abgerufen.

Im Rahmen der Modellierung der Oxidations- und Diffusionsvorgänge wurden folgende Resultate erzielt:

- Es wurde eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Anteilen an der β -NiAl, γ , γ' und μ -Phasen erzielt. Weiter kann das Modell die Wanderung der Ausscheidungen der μ -Phase in den Grundwerkstoff mit zunehmender Auslagerungszeit vorhersagen. Die Abweichungen sind in der IDZ am größten, da das Modell die Al-Konzentrationen in der IDZ überschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Karbide in den Berechnungen nicht berücksichtigt wurden.
- Das Modell kann die Al-Verarmung und Interdiffusion zufriedenstellend berechnen, dies ermöglicht eine gute Beschreibung der mittleren Al-Konzentration und des β -Phasenanteils in der OC Zone.
- Das Wachstumsverhalten der SRZ Zone kann bei der Berechnung gut abgebildet werden, jedoch wird die Dicke der SRZ Zone etwas überschätzt.

Die ermittelten Parameter dienen als Eingabedaten für das bei DFI entwickelte mechanische Modell. Zum Austausch der Daten und zur Kopplung des chemischen Modells (FZJ) und des mechanischen Modells (DFI) wurde ein Modellkonzept entwickelt (Abbildung 37). Nach diesem Konzept werden zur Durchführung der Berechnungen mit dem mechanischen Modell die Phasenanteile, die Al-Konzentrationsprofile (GDOES) und die Breite der unterschiedlichen Zonen (äußere Schicht, IDZ und SRZ) bei vorgewählter Temperatur und nach festgelegten Zeitintervallen als Output geliefert. Entsprechende Daten wurden vom FZJ dem Projektpartner DFI zur Verfügung gestellt.

Eine Rückkopplung mit dem chemischen Modell wird aus dem mechanischen Modell in Form eines beschleunigten Al-Verlusts zur Oxidation wegen der mechanischen Beanspruchungen ermöglicht.

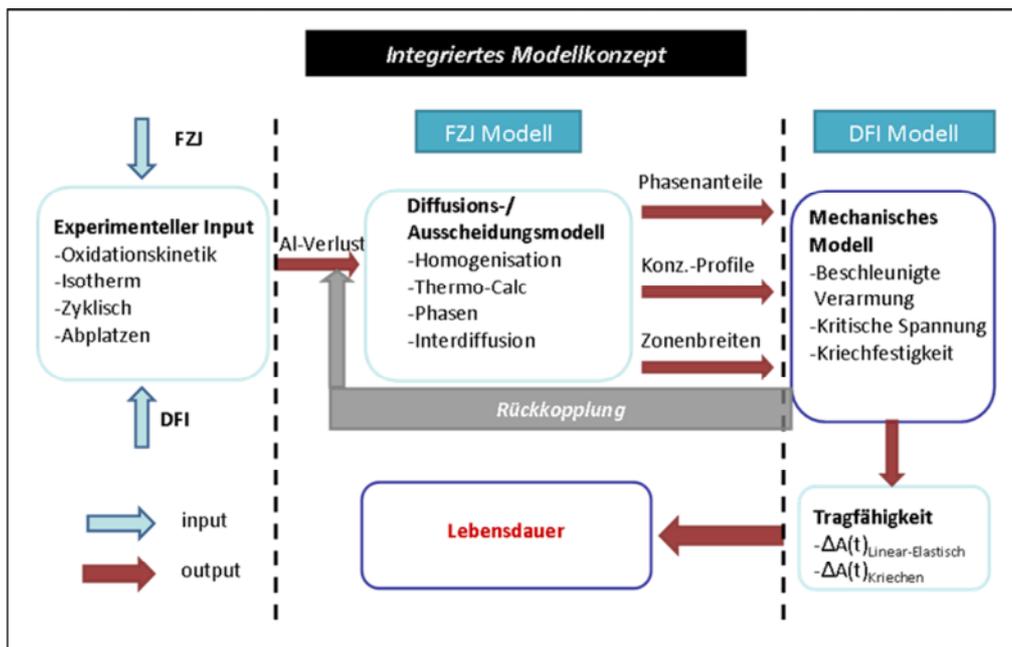


Abbildung 37: Modulares Modellkonzept. Schnittstelle zwischen mechanischem und chemischem Modell ist die Änderung der Mikrostruktur/Phasenumwandlungen.

AP 3.2.3 Wechselwirkung Thermo-Mechanik und Oxidation, Mikrostrukturanalyse, Modellierung (Dechema).

Unter Oxidationsbedingungen liefern Al-Diffusionsschichten genügend Al, das für die Bildung einer langsam wachsenden Oxidschicht notwendig ist und so den Grundwerkstoff schützt. Nach der Beschichtung und während der Temperaturbelastung bildet sich ein Verbundwerkstoffsystem, in dem die mechanische und chemische Stabilität der jeweiligen Bestandteile die Lebensdauer beeinflusst. Schichtbestandteile sind die äußere Beschichtung (OC=Outer Coating), Interdiffusionszone (IDZ) und Sekundärreaktionszone (SRZ). Aufgrund der Auswärtsdiffusion von Al und der Interdiffusion mit dem Substrat, ändert sich die Al-Konzentration durchgehend in den Schichtbestandteilen. Die mechanischen Eigenschaften und daraus resultierend der Beitrag der Schichtbestandteile zur Bauteiltragfähigkeit sind von der Mikrostruktur, der Al-Konzentration und der Schichtdicke abhängig. Aufgabe des mechanischen Modells ist es, den Beitrag der einzelnen Zonen mit deren charakteristischen mechanischen Eigenschaften und Schichtdicken zur Gesamt-Tragfähigkeit zu beschreiben.

Mechanisches Modellkonzept

Das Modellkonzept unterteilt die Bestimmung der Tragfähigkeit der einzelnen Be-

schichtungszonen in die Bereiche unterhalb und oberhalb der duktil/spröden Übergangstemperatur (DBTT). Die Veränderung der Schichtdicke und der mechanischen Eigenschaften kommt in einer Zielgröße d_{eff} zum Ausdruck, d.h. einer effektiven Schichtdicke, die der Tragfähigkeit bei unveränderten Eigenschaften entspricht. Die Tragfähigkeit LBC (Load-Bearing Capacity) der Schichten hängt im Wesentlichen von der Al-Konzentration ($f(T,t)$), deren Auswirkung auf die Eigenschaften und der realen Schichtdicke (d_{zone}) ab.

Unterhalb der DBTT wird ein linear-elastischer Ansatz benutzt. Die Tragfähigkeit entspricht der tolerierbaren Spannung der jeweiligen Zonen ($\sigma_{\text{tolerable}}$). Oberhalb der DBTT wird die Tragfähigkeit durch die Kriechwiderstände der jeweiligen Zonen charakterisiert. Die Temperatureinteilung wurde gewählt, da die Beschichtung unterhalb der DBTT spröde versagt. Zur Ermittlung der tolerierbaren Spannungen werden die von außen wirkenden (mechanischen) Spannungen um die intrinsischen Spannungen reduziert. Die induzierten Spannungen ergeben sich aus den Differenzen der Wärmeausdehnungskoeffizienten, Phasenumwandlungen und Relaxation bei vorherigen thermischen Belastungen oberhalb DBTT. Die tolerierbaren Spannungen dürfen nicht zur Überschreitung des kritischen Dehnungswerts (ϵ_c) für die jeweilige Schicht führen. Dieser wird im 4-Punkt-Biegeversuchen mit in-situ Schallemissionsmessung unter Zugbeanspruchung bei RT ermittelt. Zusätzlich wird der E-Modul der jeweiligen Zonen (E_{zone}) mittels Nanoindentation gemessen. Die mechanischen Kennwerte werden für jede Zone als eine Funktion der Al-Konzentration dargestellt. Die intrinsischen Spannungen in den Zonen können mittels eines MATLAB Codes berechnet werden.

Oberhalb der DBTT werden die induzierten Spannungen durch Kriechvorgänge abgebaut. Die Kriechdehnungsrate der Zone wird mittels des Norton'schen Kriechgesetzes berechnet. Das Maß des Widerstands ist der Kriechwiderstand ($\sigma_{\text{nominal-1\%creep}}$) gegen 1% Kriechdehnung in 100h.

Aus mechanischen Gesichtspunkten ist der Beitrag der TGO auf die Gesamtmecha-

nik deutlich geringer als die der anderen Zonen. Für die Vereinfachung des Konzepts wurde die Tragfähigkeit der TGO vernachlässigt. Nachdem die Tragfähigkeit der einzelnen Zonen unterhalb und oberhalb der DBTT bestimmt ist, können die mechanischen Beiträge der Zonen betrachtet werden. Die Tragfähigkeit der Beschichtung wird durch die Tragfähigkeit des Grundwerkstoffs normalisiert, um das Konzept unabhängig von Bauteildicken implementieren zu können. So wie bereits erwähnt wurde, tragen die Zonen mit deren entsprechenden Schichtdickenverhältnissen zur Tragfähigkeit bei. Dieser Beitrag und somit die Zielgröße d_{eff} kann berechnet werden.

Um d_{eff} für TF- und TMF-Auslegungsfälle für eine beliebige Zeit und Temperatur bestimmen zu können, müssen Experimente durchgeführt werden. So wird die experimentelle Datenbasis der benötigten Parameter erstellt und nachfolgend in die MATLAB Berechnung einbezogen.

Experimentelle Methodik und Ergebnisse

Es wurde eine Datenbasis etabliert, die die mechanischen Eigenschaften der Bauteile als eine Funktion der vorhandenen Al-Konzentration darstellt. Die mathematischen Gleichungen für die Temperatur- und Zeitabhängigkeit der Parameter wurden mittels experimenteller Fits erstellt und dadurch eine rein-analytische Modelldatenbank erzeugt. Die Methodik zur Ermittlung der für die Modellierung notwendigen Datenbasis stellt sich wie folgt dar:

- i. Thermozyklische Oxidationsversuche der Biegeproben
- ii. 4-Punkt-Biegeversuche mit in-situ Schallemissionsmessung
- iii. Metallographische Untersuchung mit ESMA und Nanoindentation
- iv. Literaturstudie zur Bestimmung notwendiger Parameter.

Die durchschnittliche Al-Konzentration in den jeweiligen Zonen wurde mittels ESMA Line Scans bestimmt. Die kritische Dehnung der thermozyklisch ausgelagerten Flachproben (1h Haltezeit auf Temperatur) unter Zugbeanspruchung wurde mittels 4-Punkt-Biegeversuchen mit in-situ akustischer Schallemissionsmessung bei RT gemessen.

Die Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeversuche wurden ausgewertet. Die kritische Dehnung der Schichten steigt annähernd linear mit abnehmendem Al-Anteil bis zu einem Maximalwert von ca. 1,1% Dehnung. Der E-Modul der jeweiligen Zonen wurde mittels Nanoindentierung nach der Oliver&Pharr Methode bestimmt.

Modellierung

Die Modellberechnung wurde mittels MATLAB durchgeführt. Die durch experimentelle Methodik etablierte Modell-Datenbank wird in der Modell-Berechnung genutzt, um die Änderung des d_{eff} unterhalb und oberhalb der DBTT unter Einfluss von Zeit, Auslagerungstemperatur und externer Beanspruchung (TMF) bestimmen zu können. Bis dato wurden die Parameter, die unter der mikrostrukturellen Änderung dargestellt sind, aus der Modelldatenbank des Dechema-Forschungsinstituts bestimmt. In der nächsten Projektphase (LuFo V/1) werden diese aus dem chemischen Lebensdauermodell des Forschungszentrums Jülich in das mechanische Modell eingegeben.

Die Ergebnisse der mechanischen Modellierung zeigen eine Verbesserung der Tragfähigkeit des Verbundwerkstoffsystems unterhalb der DBTT und eine Verminderung der Tragfähigkeit oberhalb der DBTT. Die Duktilität der OC Zone nimmt durch die Al-Verarmung bei zyklischer Auslagerung zu, so dass die maximal belastbare Spannung und somit $d_{\text{eff-elastic}}$ bei thermozyklischer Auslagerung ansteigt. Bei einer reinen Belastung von $T > \text{DBTT}$, z.B. bei einer Kriechbeanspruchung, nimmt die Tragfähigkeit und somit $d_{\text{eff-creep}}$ ab. Dies ist im Wesentlichen auf das Wachstum und die geringere Kriechfestigkeit der SRZ Zone zurückzuführen.

Um die Anwendbarkeit des mechanischen Modells zu überprüfen, wurden TMF-Versuche mit und ohne Haltezeit sowie mit und ohne mechanische Dehnungskomponente durchgeführt und die beobachtete Schichtschädigung mit den Berechnungsergebnissen verglichen. Inwieweit die mechanische Dehnungskomponente einen Einfluss auf die mikrostrukturellen Änderungen hat, wird im Folgeprojekt (LuFo V/1) im Detail untersucht.

Über den Vergleich der berechneten Spannung in der OC bei T_{min} lässt sich ein

Sprödversagen des alitierten SC2000 unter OP TMF-Bedingungen vorhersagen. Innerhalb der Messlänge ($T_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$) liegt die berechnete Spannung in OC bei T_{\min} unterhalb der kritische Spannung, außerhalb der Messlänge ($T_{\max} = \text{ca. } 950^{\circ}\text{C}$) liegt die berechnete Spannung in OC im Bereich bis ca. 200 Zyklen oberhalb der kritischen Spannung. Die Haltezeit von 1h bei 1100°C im 1. Zyklus hat mehrere Effekte: Zum einen kommt es durch die Al-Verarmung zu einer Reduzierung des E-Moduls in der OC und somit zu einer geringeren Schichtspannung bei T_{\min} , zum anderen nimmt die kritische Dehnung der OC und somit die kritische Spannung der OC zu. Zusätzlich führt die Haltezeit zu einer Relaxation der Schichtspannungen. Dadurch liegt die Spannung im Schichtsystem unterhalb der kritischen Spannung. Bei 950°C ist die Al-Verarmung und die Spannungsrelaxation im ersten Zyklus deutlich geringer, so dass die Schichtspannungen nach dem Abkühlen bei T_{\min} höher liegen und die kritische Spannung bis ca. 200 Zyklen überschritten wird, so dass es zu einer Rissbildung kommt.

Bei den TMF-Versuchen ohne Haltezeit findet eine deutlich langsamere Al-Verarmung statt, folglich steigt die kritische Spannung der OC Zone langsamer an und die OC Zone ist weniger duktil. Bei einer mechanischen Dehnungsamplitude von 0,2% liegt die Schichtspannung unterhalb der kritischen Spannung der OC, bei 0,3% liegt die Schichtspannung in den ersten Zyklen oberhalb der kritischen Spannungen der OC. Dies korreliert sehr gut mit der beobachteten Schichtschädigung.

Um das Zwischenergebnis der Berechnung unterhalb der DBTT validieren zu können, wurden erste XRD-Eigen Spannungsmessungen an ausgelagerten Proben durchgeführt. Zuerst wurden passende Reflexe der existierenden Phasen gesucht. Die Eigen Spannungsmessungen zeigen noch nicht erklärbare Phänomene, daher sind weitere Untersuchungen und eine Bewertung der Ergebnisse der Eigen Spannungsmessungen erforderlich. Geplant ist z.B. den Spannungsbeitrag der beobachteten martensitischen Umwandlung in der OC mit in Betrachtung einzubeziehen. Der Einfluss der externen Beanspruchung auf die Mikrostruktur konnte bisher noch nicht berücksichtigt werden, deshalb ist zukünftig eine intensive Charakterisierung der TMF beanspruchten Proben geplant. Weiter sollen Substratkrümmungsversuche

durchgeführt werden, um den Eigenspannungszustand des Systems in Abhängigkeit von der Temperatur mit den Berechnungen zu vergleichen.

3.1.3.3 AP 3.3 Versagensmechanismus von Turbinenschaufeln im Containmentfall

Im vorliegenden Arbeitspaket geht es um die Entwicklung eines analytischen Werkzeuges zur Berechnung der Gehäuseschädigung in einem Schaufelverlustszenario. Basis für das Simulationstool ist das Programm LS-Dyna, eine kommerziell verfügbare Software, die nach der finiten Elemente Methode numerische Strukturauslegungen ermöglicht. LS-Dyna ist in der Automobilindustrie bereits ein etabliertes Hilfsmittel bei der Crash-Simulation.

Bereits sehr früh im Programm wurde ersichtlich, dass die Kinematik, sowie das Abbruchverhalten der Schaufel einen wesentlichen Einfluss auf die Gehäuseschädigung haben. Ziel ist die realistische analytische Abbildung der im Fall eines Schaufelverlustes relevanten Schaufelversagensmechanismen. Dazu wurden in einem ersten Schritt analytische Voruntersuchungen durchgeführt, um ein Versagenkriterium zu entwickeln. Danach erfolgte die experimentelle Bestimmung der relevanten Materialparameter, bevor im letzten Schritt das analytische Modell im Versuch validiert wurde.

Arbeitsschritt 1: Analytische Voruntersuchungen

Zu Anfang wurden erste Modellierungsversuche unternommen und theoretische Voruntersuchungen angestellt. Ziel war die Bestimmung der zu beachtenden Randbedingungen sowie des notwendigen Modellierungsumfangs. Dabei konnte die Schaufelkinematik im Moment des Abreißen bereits als wesentliche Einflussgröße für eine aussagekräftige Simulation identifiziert werden.

Dies lässt sich wie folgt erklären. Die einzelne Turbinenschaufel ist im Wesentlichen aus drei Elementen aufgebaut: Einem massereichen und kompakten Schaufelfußkasten als Basis für das Schaufelblatt und Verbindung zur Scheibe. Darüber folgt das dünne und lange Schaufelblatt und an der Spitze das obere Deckband. Im Falle

eines Schaufelverlustes schlagen zuerst Deckband und Schaufelblatt in die Gehäusestruktur ein. Wie in der Simulation sowie später auch im Versuch gezeigt werden konnte, kommt es dabei zuerst zu einem Zersplittern des Deckbandes sowie des Schaufelblattes. Dabei wird ein Teil des Einschlagimpulses bereits dissipiert. Ist nur noch ein Teil des Schaufelblattes übrig, kommt es zu einem Umkippen der Schaufel und damit zu einem Einschlag des Schaufelfußkastens in das Gehäuse. Da dieser eine sehr kompakte und große Masseneinheit darstellt, fragmentiert er nicht, sondern gibt seinen Impuls direkt an das Gehäuse weiter (Abbildung 38). Der Schaufelkasten verursacht dadurch die größte Schädigung. Entscheidend ist dabei auch die räumliche Lage des Kastens beim Einschlag und damit die Größe der Kontaktfläche.

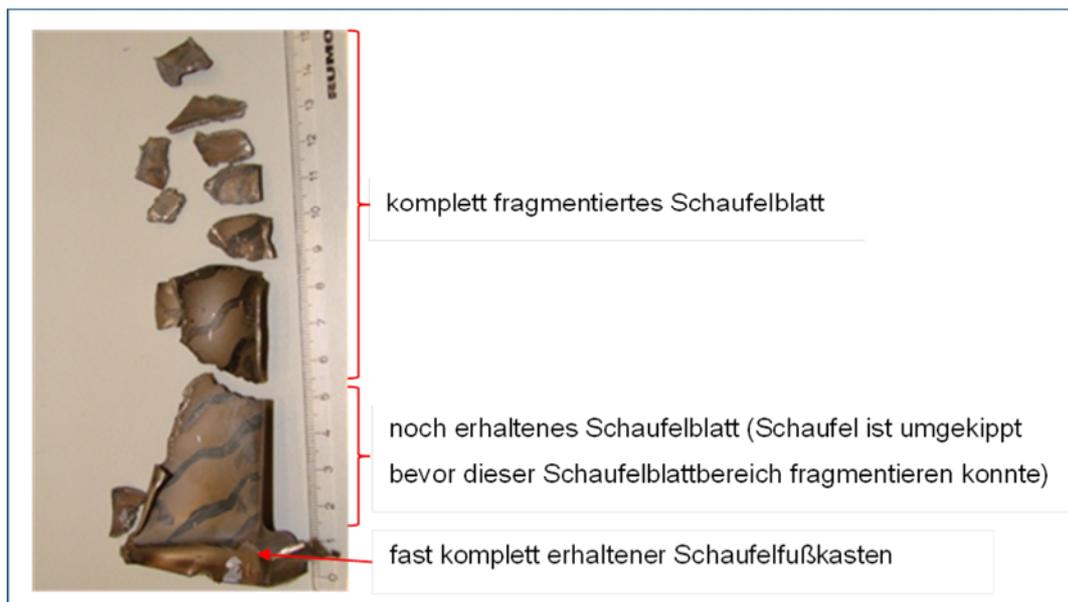


Abbildung 38: Schaufelfragmente nach Einschlag

Aus dem oben skizzierten Abbruchscenario wird klar, dass die Bewegungen der Schaufel nach dem Ablösen korrekt simuliert werden müssen. Ebenso das Abbruchverhalten des Schaufelblattes und die damit einhergehende Energiedissipation vor dem Einschlag des schweren Schaufelfußkastens.

Basierend auf diesen Erfahrungen wurde ein entsprechendes analytisches Modell entwickelt.

Arbeitsschritt 2: Experimentelle Ermittlung der Materialkennwerte

Für die Entwicklung des Simulationsmodells wurden die Schaufelwerkstoffe IN100 und TiAl berücksichtigt. Für diese Werkstoffe mussten sehr spezifische Kennwerte ermittelt werden. Denn, wenn im Falle eines Schaufelverlustes die betroffene Schaufel auf das Gehäuse trifft, so wird sie einem starken Stoßimpuls ausgesetzt. Um das Verhalten des Schaufelmaterials in diesem Fall zu verstehen, muss auf eine Versuchsanordnung zurückgegriffen werden, die dieses Belastungsszenario realistisch simuliert. Herkömmliche standardisierte Verfahren zur Bestimmung der Streck- und Dehngrenze sind für diesen Zweck nicht geeignet.

Im Versuch kamen Probenkörper mit zylindrischem Grundkörper zur Anwendung, wie in Abbildung 39 dargestellt. Zur Krafteinleitung wurden die Proben über Gewinde an beiden Enden in die zweiteilige Versuchsanordnung eingespannt. Die Last wurde über ein massereiches Projektil aufgebracht, das mit Hilfe einer Druckluftkanone mit hoher Geschwindigkeit auf ein Ende der Probeneinspannung geschossen wurde. Dadurch wird ein starker kurzzeitiger Lastimpuls in der Materialprobe ausgelöst.



Abbildung 39: IN100 Probenkörper

Die Tests wurden sowohl bei Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturniveaus durchgeführt. Eine induktive Heizanlage kam zur Anwendung, um die Probenkörper bis auf 1000°C zu erhitzen.

Die Probenkörper wurden mit Dehnmessstreifen ausgestattet, um die Materialverformung in Abhängigkeit von der Zeit zu bestimmen.

Die folgenden Parameter wurden für die Tests variiert: Probengeometrie (Durchmesser, Kerbungen), Temperatur sowie Stärke und Länge des eingebrachten Lastimpulses. Tests wurden mehrfach unter den gleichen Bedingungen wiederholt, um eine statistische Datenbasis zu schaffen. Messtechnisch wurde die Verformung in Abhän-

gigkeit von der Zeit ermittelt. Bruchflächengeometrie sowie Bruchort der Proben wurden ebenfalls dokumentiert.

Arbeitsschritt 3: Abschließende Validierung

Die Validierung des analytischen Modells und der experimentell ermittelten Materialkennwerte wurde im Rahmen eines Abschleuderversuchs durchgeführt. In diesem Versuch wurden einzelne Schaufeln aus einer rotierenden Scheibe abgeschleudert. Bei den verwendeten Schaufeln handelte es sich um NDT-Schaufeln wie sie auch in schnelllaufenden Turbinen angewandt werden. Die Ablösung der Schaufeln aus dem Rotor wurde durch ein Kerben des Schaufelfußes an seiner dünnsten Stelle erreicht. Über die Tiefe der Kerbe konnte die gewünschte Abschleuderdrehzahl eingestellt werden.

Die Schaufeln wurden mithilfe einer induktiven Heizanlage auf Betriebstemperatur erhitzt. Als Wand kam ein zylindrischer Blechkörper zur Anwendung, der nach jedem Test ausgewechselt werden konnte. Die Versuche wurden sowohl mit TiAl als auch mit IN100 Schaufeln durchgeführt. Mit beiden Schaufelmaterialien wurden mehrere Testreihen durchgeführt unter Variation der folgenden Testparameter: Abschleuderdrehzahl, Schaufeltemperatur sowie Dicke der Containmentwandung.

Der genaue Versagensvorgang wurde mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera (20000 Bilder pro Sekunde) aufgezeichnet. Zusätzlich wurde nach dem Test die plastische Verformung der Containmentwandung im Bereich des Schaufeleinschlags photometrisch vermessen. Außerdem wurden Größe und Gewicht der Schaufelbruchstücke dokumentiert.

Mit diesen Ergebnissen konnte die Schaufelkinematik beim Abriss bzw. Einschlag sowie das Abbruchverhalten der Schaufel untersucht werden. Außerdem konnte die Kinematik bzw. Schaufelschädigung mit der zugehörigen Gehäuseschädigung in Relation gesetzt werden. Nicht geeignet war dieser Versuchsaufbau, um die Interaktion der abgelösten Schaufel mit den anderen Schaufeln in einem Schaufelkranz zu

untersuchen. Dieser Effekt wurde im Förderprogramm HiSpeeT eingehender bewertet.

Ergebnisse aus Abschleuderversuchen mit TiAl Schaufeln

Für die Versuche mit TiAl Schaufeln konnte eine gute Übereinstimmung von Test- und Simulationsergebnissen festgestellt werden. Das Abbruchszenario sowie die Kinematik der Schaufel beim Einschlag ins Gehäuse konnte realistisch dargestellt werden, dies wird in Abbildung 40 verdeutlicht.

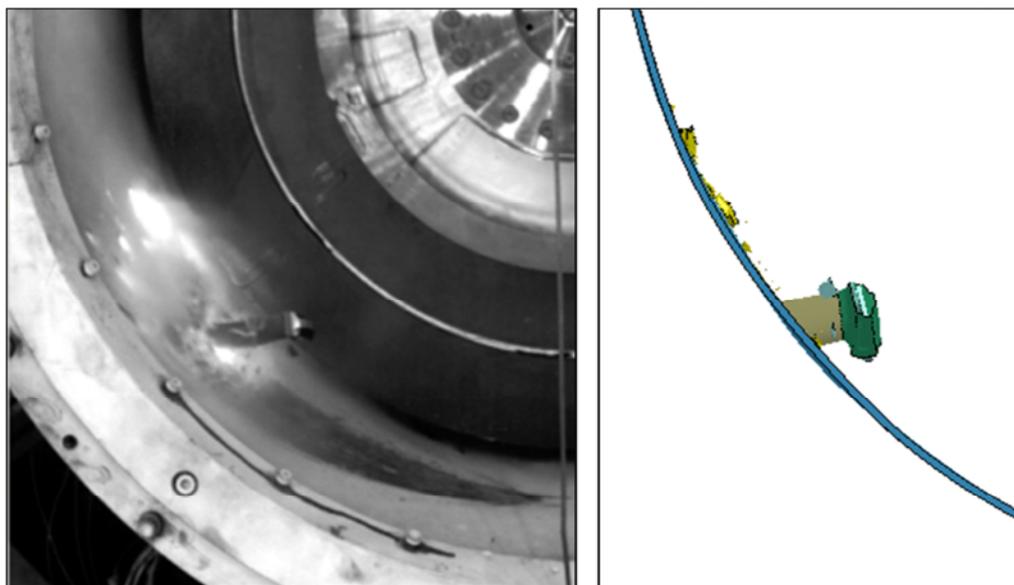


Abbildung 40: Vergleich Versuch mit Simulation

Die linke Ansicht zeigt eine Aufnahme der Hochgeschwindigkeitskamera während des Abschleuderversuchs. Zu sehen ist die Schaufel beim Einschlag ins Gehäuse. Rechts ist das zugehörige Bild aus der LS-Dyna Simulation zu sehen. Schaufelausrichtung beim Einschlag und Verteilung der Bruchstücke zeigen eine sehr gute Übereinstimmung.

Tendenziell ist die berechnete Gehäuseschädigung etwas größer als die tatsächlich im Versuch erzielte. Die Abweichung liegt aber innerhalb der akzeptablen Zieltoleranzen und wird darüber hinaus im Hinblick auf Containment-Kapazität zu einer konservativen Auslegung der Gehäuse führen. Dies ist eine wichtige Erkenntnis im Hin-

blick auf spätere Turbinenentwicklungen und Nachweisführung gegenüber den Zulassungsbehörden.

Ergebnisse aus Abschleuderversuchen mit IN100 Schaufeln

Auch in den Versuchen mit IN100 Schaufeln war der Schadensverlauf im Wesentlichen in allen Einzelversuchen ähnlich. Nach dem Ablösen der Schaufel schlägt die Schaufelspitze in das Gehäuse ein. Schrittweise kommt es jetzt zu einem Zerschneiden des Schaufelblattes in kleine Fragmente. Durch die Rotationsbewegung der Schaufel vor dem Ablösen des Schaufelfußes kommt es schließlich im weiteren Schadensverlauf zu einem Kippen des bis dahin noch nicht zerbrochenen Schaufelblattes und zu einem Einschlag des Schaufelfußkastens auf das Gehäuse.

Die beschriebene Schaufelkinematik wurde durch die LS-Dyna Simulationen gut abgebildet. Das ist in Abbildung 41 gezeigt. Rechts zu sehen ist die berechnete Darstellung der Schaufel kurz vor dem Einschlag. Das linke Bild zeigt den gleichen Zeitpunkt aufgenommen mit der Hochgeschwindigkeitskamera während des Versuchs. Die Kippbewegung der Schaufel und das seitliche Einschlagen des Schaufelkastens ins Gehäuse ist sowohl bei der Simulation als auch auf den Bildern aus dem Versuch in sehr ähnlicher Form zu sehen.

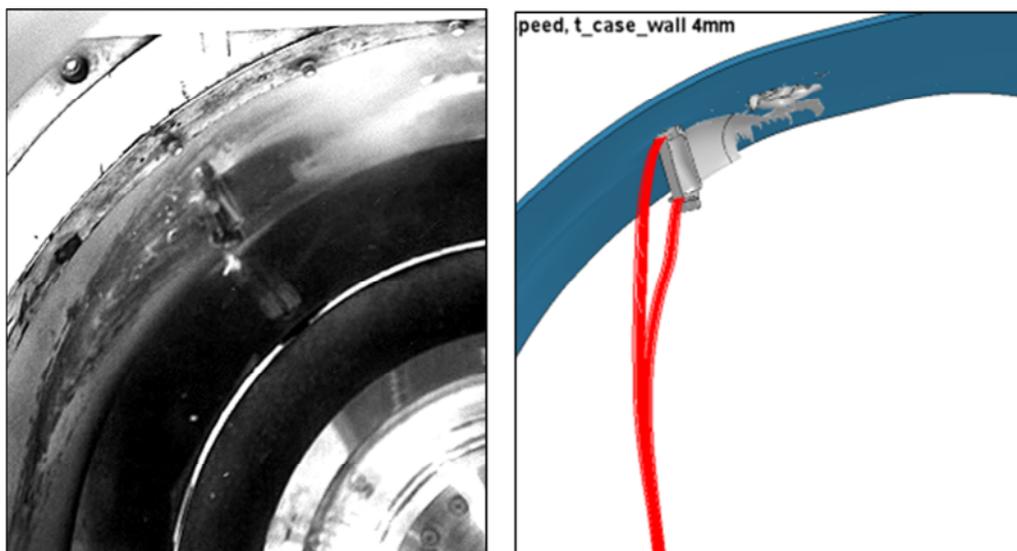


Abbildung 41: Vergleich Schaufelkinematik Versuch und Simulation

Mit der Wiedergabe der realistischen Schaufelkinematik erfüllt die LS-Dyna Simulationsmethodik ein wesentliches Ziel. Die damit verbundene exakte Vorhersage der Lage von Schaufelblatt bzw. Schaufelfußkasten im Moment des Einschlags ist Voraussetzung für eine korrekte Simulation des resultierenden Gehäuseschadens.

Ebenfalls gute Übereinstimmungen wurden beim Vergleich des berechneten bzw. im Versuch ermittelten Schaufelschadens erzielt. Das ist in Abbildung 42 zu sehen. Links wieder ein Bild des Schaufelfußes nach dem Test mit den Schaufelfragmenten soweit sie noch zuordenbar waren. Rechts die Simulation des Schaufelschadens durch LS-Dyna.

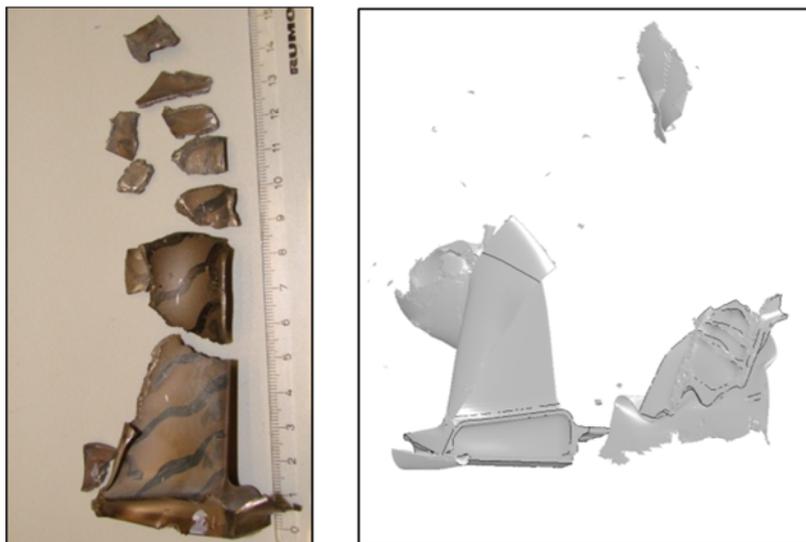


Abbildung 42: Vergleich des Schaufelschadens aus Simulation und Versuch

Es ist gut zu erkennen, dass das äußere Schaufelblatt fragmentiert, während der Schaufelfußkasten und das untere Drittel des Schaufelblattes im Wesentlichen erhalten bleibt. Dieses Verhalten wird von der Simulation korrekt wiedergegeben. Durch die Fragmentierung des Schaufelblattes wird ein Teil der Bewegungsenergie der Schaufel dissipiert. Durch die exakte Simulation des Schaufelabbruchs wird auch eine korrekte Berechnung des Schaufelfußkastenimpulses beim Einschlag sichergestellt. Auch dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die spätere korrekte Simulation des Gehäuseschadens.

Als letztes wurde auch die berechnete Gehäuseschädigung mit der tatsächlichen im

Versuch ermittelten Schädigung verglichen. In Abbildung 43 ist zuerst das Ergebnis der Berechnung zu sehen, dargestellt als Größe der Gehäuseschädigung. Auffällig ist ein kleiner, sehr lokaler Schädigungsbereich (Zone A). Hier tritt die größte Schädigung auf, verursacht durch den Einschlag des Schaufelkastens. Laut Berechnung kommt es aber auch hier nur zu einer Verformung des Gehäuses, ohne einen Riss oder gar ein Loch in der Containmentwand zu verursachen. Das langgezogene Gebiet (Zone B) wird durch den Einschlag des Schaufelblattes verursacht. Hier ist die Verformung und Schädigung des Gehäuses kleiner als in Zone A.

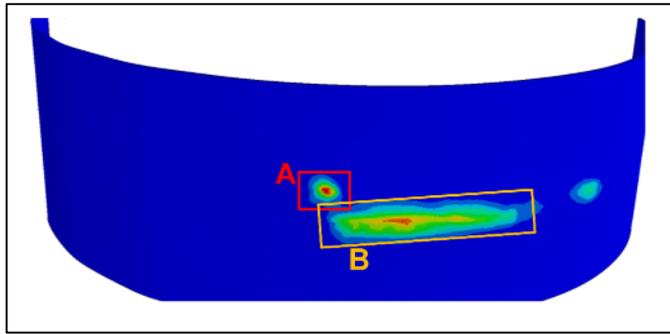


Abbildung 43: Berechnete Gehäuseschädigung

Als nächstes (Abbildung 44) ist nun ein Bild des im Versuch genutzten Gehäuses dargestellt. Der langgezogene Bereich großer Verformung (Zone B), verursacht durch den Einschlag des Schaufelblattes, ist gut zu sehen. Allerdings hat das Schaufelblatt im Versuch ein nicht unerhebliches Loch in der Containmentwand verursacht.

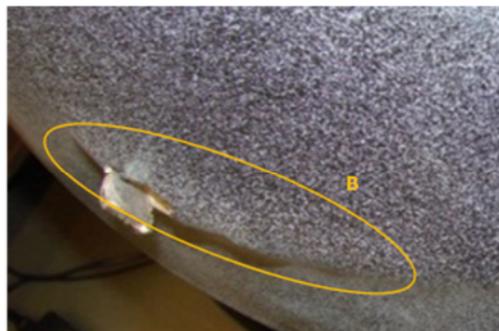


Abbildung 44: Tatsächliche Schädigung

Tatsächlich wird also die größte Schädigung durch das Schaufelblatt verursacht und führt darüber hinaus auch zu einer größeren Schädigung als durch das Simulationstool berechnet.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die Simulationsmethodik entsprechend kalibriert und die Konservativität in der Berechnung der Gehäuseschädigung erhöht. Damit ist nun auch eine verlässliche Vorhersage für den Einsatz von IN100 Schaufeln möglich.

Abschließende Bewertung:

Wie oben gezeigt, konnte die Simulationsmethodik, mit Hinblick auf das Versagensmodell der Schaufel, auf Basis der Versuchsergebnisse kalibriert und validiert werden. Dieses Arbeitspaket ist damit erfolgreich abgeschlossen. Zusammen mit den Ergebnissen aus dem Förderprogramm HiSpeeT konnte ein einsatzreifes Werkzeug zur Auslegung von Gehäusestrukturen in Bezug auf Containment entwickelt werden.

4 Literaturverzeichnis

- [1] G. Dhondt, M. Rupp, H.-P. Hackenberg; A modified cyclic crack propagation description; Engineering Fracture Mechanics; September 2015; Vol. 146; 21 – 30
- [2] A. C. Pickard; The Application of 3-Dimensional Finite Element Methods to Fracture Mechanics and Fatigue Life Prediction; Rolls-Royce Ltd.; 1986
- [3] Chen, Qi, and Hao Wen Liu. "Resolved shear stress intensity coefficient and fatigue crack growth in large crystals." Theoretical and applied fracture mechanics 10.2 (1988): 111-122.
- [4] Reed, P. A. S., I. Sinclair, and X. D. Wu. "Fatigue crack path prediction in UDIMET 720 nickel-based alloy single crystals." Metallurgical and Materials Transactions A 31.1 (2000): 109-123.