



COORETEC-Werkstoffe

**Verbundvorhaben**

**Robuste Modelle zur verbesserten Werkstoff-  
ausnutzung für aktuelle Turbinenschaufelwerk-  
stoffe  
(RoMoTurb)**

**Arbeitsanteil MTU Aero Engines GmbH**

**Abschlussbericht**

Erstellt von:

G. Mokosch, Dr. G. König, Dr. A. Fischersworing-Bunk

Förderkennzeichen: 0327705N

Kassenzeichen: 810301867519

Laufzeit des Vorhabens: 05/2006 – 01/2010

München, April 2010

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
2.1	Projektstrukturplan .....	4
2.2	Zusammenfassung wesentlicher Projektergebnisse .....	4
<b>3</b>	<b>Ergebnisse aus den Arbeitspaketen</b>	<b>7</b>
3.1	AP A Hochtemperaturwerkstoffe (Daten und Mechanismen) .....	7
3.1.1	Arbeitspaket A1: Probenbeschaffung und –herstellung .....	7
3.1.1.1	Werkstoff SC2000 .....	7
3.1.1.2	Werkstoff MAR-M247 .....	12
3.1.2	Arbeitspaket A2: Versuchsplanung.....	13
3.1.3	Arbeitspaket A3: Versuchsdurchführung .....	13
3.1.4	Arbeitspaket A4: Bewertung und Auswertung der Daten .....	13
3.1.4.1	Metallographische und fraktographische Auswertungen .....	13
3.1.4.2	Larson-Miller Auswertung der Probenversuche .....	16
3.1.4.3	Richtungsabhängigkeit der mechanische Eigenschaften von SC200018	
3.2	AP B Ermüdungs- / Kriechermüdungsmodellierung.....	24
3.2.1	Arbeitspaket B1.1: Definition der Anforderungen und Versuchsplanung..	24
3.2.2	Arbeitspaket B1.2: Probenbeschaffung und –herstellung .....	25
3.2.3	Arbeitspaket B1.3: Versuchsdurchführung .....	26
3.2.4	Arbeitspaket B1.4: Modellentwicklung.....	27
3.3	AP C Innovatives Lebensdauerkonzept.....	38
3.3.1	Arbeitspaket C1.1: Definition der Anforderungen .....	39
3.3.2	Arbeitspaket C1.2: Programmierung Prototyp .....	43
3.3.3	Arbeitspaket C1.3: Befüllen und Testen des Prototyps .....	44

# 1 Einleitung

Auf dem Weg zu einer ressourcen- und umweltschonenden Energieerzeugung spielt die Effizienzsteigerung eine zentrale Rolle. Hierzu muss der Gesamtwirkungsgrad der Gasturbine erheblich gesteigert werden.

Dies soll unter anderem über eine Steigerung der Turbineneintrittstemperaturen erreicht werden. Entscheidend ist dabei die Verfügbarkeit entsprechender Werkstoffe (bei vorgegebener Lebensdauer). Im Rahmen des Projektes soll dies nicht durch die Entwicklung neuer Werkstoffe, sondern durch eine optimierte Ausnutzung des vorhandenen Potentials erreicht werden.

Um einen vorhandenen Werkstoff gemäß der o.g. Zielsetzung einsetzen zu können, ist eine Absicherung der mechanisch-technologischen Kennwerte und insbesondere der zeitabhängigen Eigenschaften erforderlich. Benötigt werden Daten zum Kriechverhalten und zum Ermüdungsverhalten sowie zur komplexen Überlagerung von Kriechen und Ermüden sowie zum Einfluss von Korrosionsschutzschichten, um Aussagen über die Wirkung der entsprechenden Schädigungsmechanismen auf die Lebensdauer zu gewinnen. Erforderlich ist insbesondere aber auch eine Absicherung der Eigenschaften in ausgewählten Kristallorientierungsrichtungen bei gerichtet erstarrten oder einkristallinen Werkstoffen, wie sie an unterschiedlichen Bauteilstellen vorliegen.

Bisher wurden die Lebensdauern von Turbinenschaufeln über die Versuche an Werkstoffproben, Versagensmodelle von Werkstoffen und der Simulation der Belastung in der Gasturbine ermittelt. Alternativ kann über die Analyse der Serviceerfahrung die Lebensdauer von Gasturbinenbauteilen statistisch ermittelt werden. Mit der Kenntnis der Belastungen im Betrieb kann damit eine Validierung der Simulationsmodelle mit der tatsächlichen Lauferfahrung durchgeführt werden. Mit dem Vergleich von Modell und Realität können vorhandene bisher selten genutzte Potentiale gezielt ermittelt und genutzt werden.

## 2 Zusammenfassung

### 2.1 Projektstrukturplan

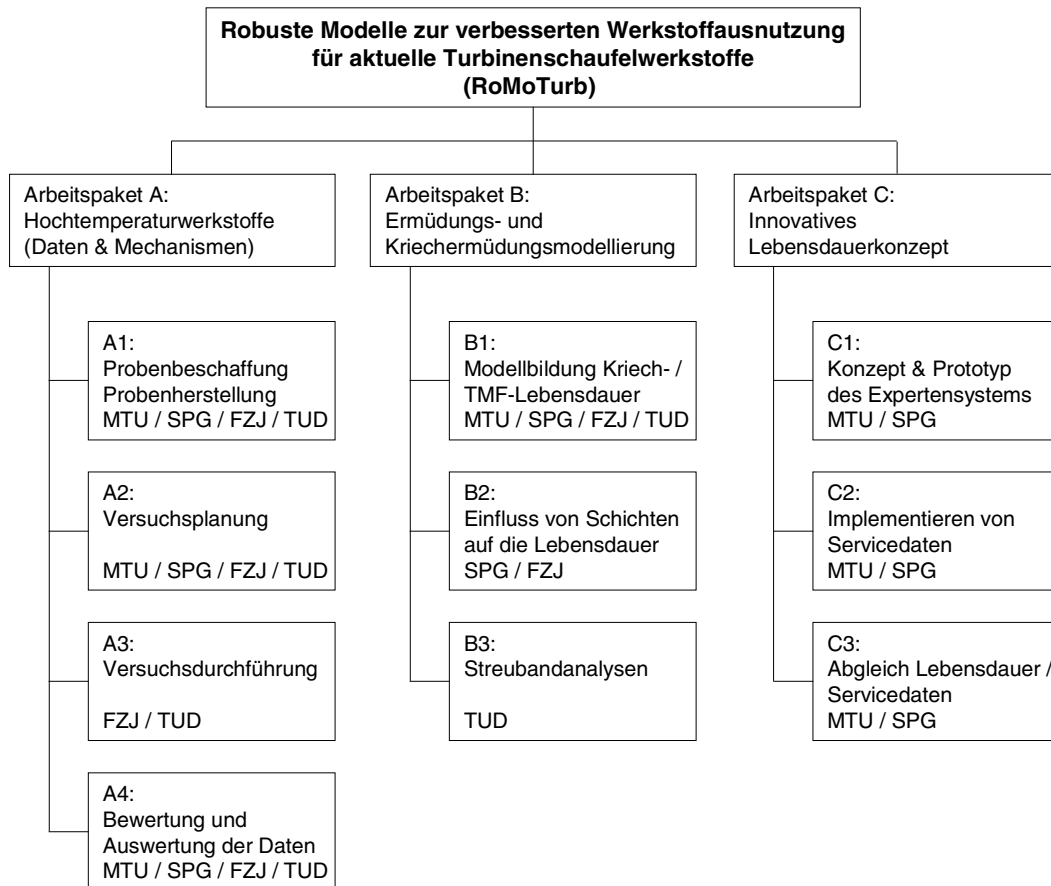


Bild 1: Projektstrukturplan

- Projektpartner:
- Siemens AG Power Generation SPG
  - MTU Aero Engines GmbH MTU
  - Forschungszentrum Jülich FZJ
  - TU Darmstadt TUD

### 2.2 Zusammenfassung wesentlicher Projektergebnisse

Im Rahmen der Arbeitspakete A und B wurden für die Datenermittlung bei den beteiligten Prüfstellen die Nickelbasislegierungen MAR-M247 (konventionelle Gußlegierung, Arbeitspaket B) und SC2000 (einkristalline Gußlegierung, Arbeitspaket A) beschafft und Proben für Warmzugversuche, Kriechversuche, sowie Ermüdungsversuche (LCF, HCF

und thermomechanische Ermüdung) hergestellt. Eine besondere Technik kam hierbei für die Fertigung der SC2000 Proben mit definierter kristallographischer Orientierung (Orientierung in  $\langle 001 \rangle$  und  $\langle 111 \rangle$  Richtung) zur Anwendung. Hierzu wurden aus speziell gegossenen Platten die Proben mit definierten Winkeln entnommen. Die anschließende röntgenographische Orientierungsbestimmung an den einzelnen Proben bestätigte, dass alle Probenorientierungen innerhalb der vorgegebenen Toleranzgrenzen lagen.

Die Versuche wurden bei TU Darmstadt, dem FZ Jülich für Arbeitspaket A, sowie beim IWM Freiburg für Arbeitspaket B in Abstimmung mit der MTU durchgeführt. Die Versuchsergebnisse wurden von MTU in folgender Hinsicht bewertet:

Durch fraktographische Auswertung ausgewählter Ermüdungsproben auf Besonderheiten bei der Risseinleitung konnte ein besseres Verständnis der Versagensmechanismen sowie der Ursachen der Streuung des Werkstoffverhaltens erreicht werden.

Die Anwendung des Larson-Miller Modells auf die Ergebnisse der Kriechversuche ergab eine gute Beschreibung der Versuchsergebnisse. Durch eine Erweiterung des Modells war es auch möglich, den Verlauf komplexer Kriechkurven gut zu modellieren.

Die Modellierung der Richtungsabhängigkeit des Einkristallwerkstoffs SC2000 mit einfachen „Ingenieuransätzen“ war bei den verschiedenen Kennwerten unterschiedlich erfolgreich:

Beim Ermüdungsverhalten gelang es mit einer Normierung der Ergebnisse mit dem E-Modul die Richtungsabhängigkeit bei LCF und TMF gut zu beschreiben, während bei HCF weniger zufriedenstellende Ergebnisse erzielt wurden.

Bei der Kriechverformung konnte wegen der Komplexität der Mechanismen kein einfaches Modell gefunden werden, das die Richtungsabhängigkeit der Versuchsergebnisse zufriedenstellend beschreibt.

Im Rahmen von Arbeitspaket B wurden, aus dem durch MTU bereitgestellten Probenmaterial (polykristalline Nickelbasisgusslegierung MAR-M-247CC) vom IWM Freiburg Zug-Druckproben gefertigt, sowie die Werkstoffprüfung, entsprechend der Versuchsplanung, durchgeführt.

Die ermittelten Werkstoffdaten aus den komplexen LCF Versuchen (CLCF), isothermen Mehrstufenversuchen und TMF Versuchen wurden zur Modellierung des Ermüdungs- und Kriechermüdungsverhaltens anhand eines Lebensdauermodells mit Kopplung der Versagensmechanismen Kriechen und Thermomechanischer Ermüdung verwendet. Dabei wird die Kriechschädigung durch den Relaxationseffekt über das viskoplastische Verformungsmodell für zyklische Plastizität (Chaboche) abgebildet. Die Thermomechanische Ermüdung wird über den  $D_{TMF}$  Schädigungsparameter abgebildet. Beide Modelle wurden am IWM Freiburg entwickelt.

Nach einer ersten Anpassung der Parameter des Verformungsmodells mit den ermittelten Versuchsdaten wurde das Ratchetingverhalten (Abfall der Mittelspan-

nung) vom Chaboche-Modell überschätzt, für die Temperatur von 1000°C jedoch unterschätzt. Mit einer zweiten Anpassung der Parameter wurde ein Kompromiss bei der Abbildung der verschiedenen Versuche erreicht, insgesamt jedoch keine deutliche Verbesserung.

Die durch das Chaboche-Modell berechneten Spannungen und Dehnungen wurden verwendet, um mit dem Schädigungsparameter  $D_{TMF}$  die Anrisslebensdauern der Werkstoffproben vorherzusagen. Die experimentell ermittelten Anrisslebensdauern lagen dabei in einem Streuband mit Faktor 2 um die rechnerische Lebensdauerlinie.

Zur Verifikation des Vorgehens wurde ein Bauteil aus dem Testbetrieb der MTU nachgerechnet. Hierbei wurde die vorhergesagte Lebensdauer zwar überschätzt, lag aber innerhalb eines Faktors 2, was im Vergleich zum gegenwärtigen Vorgehen bei der Auslegung eine deutliche Verbesserung darstellt.

Im Rahmen des Arbeitspaketes C wurde zunächst ein Konzept für ein wissenschaftliches Datenbanksystem entwickelt, womit ein Vergleich von Daten aus dem Triebwerksbetrieb in der Serie und in der Entwicklung mit analytischen Daten ermöglicht werden sollte, um damit Verbesserungen bei der Vorhersage der Bauteillebensdauern abzuleiten.

Die Umsetzung dieses Konzeptes erfolgte nicht, wie ursprünglich vorgesehen, durch Programmierung bei MTU. Es wurde, basierend auf einer Marktanalyse, auf das kommerzielle Produkt GoBench der Firma Indec zurückgegriffen, welches die definierten Anforderungen nahezu vollständig erfüllt. Ein entsprechender Änderungsantrag beim Fördergeber wurde genehmigt.

Aufgrund des schwierigen Zugangs zu Triebwerksdaten von Serientriebwerken und aus Gründen der Verfügbarkeit von Turbinendaten, welche nicht in ausreichendem Umfang zusammengetragen werden konnten, erfolgte die Erstbefüllung und das Testen des Datenbanksystems überwiegend mit analytischen Daten aus dem Bereich der Verdichterauslegung.

Insgesamt stellt das System für MTU einen Mehrwert dar, da Auslegungsdaten und Triebwerksdaten zentral und fachübergreifend verfügbar gemacht werden können. Die Erfahrungen aus dem Vorhaben zeigen, dass es mit vertretbarem Aufwand nur für zukünftige Programme sinnvoll ist, systematisch Daten aus Auslegung und Triebwerksbetrieb zu erfassen und aufzubereiten. Auf dieser Basis kann dann eine Kalibrierung und Verbesserung der Lebensdauervorhersagen, vor allem anhand von Daten aus Testtriebwerken erfolgen.

### **3 Ergebnisse aus den Arbeitspaketen**

#### **3.1 AP A Hochtemperaturwerkstoffe (Daten und Mechanismen)**

##### **3.1.1 Arbeitspaket A1: Probenbeschaffung und –herstellung**

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Werkstoffe untersucht, die bei MTU Gasturbinen eine breite Anwendung finden

- die konventionell vergossen Nickelbasislegierung MAR-M247
- die einkristalline Nickelbasislegierung SC2000

Diese Werkstoffe wurden nach einer für die industrielle Anwendung geeigneten Spezifikation beschafft. Die Probenfertigung erfolgte bei MTU. Die Prüfungen wurden bei den Prüfeinrichtungen TU Darmstadt und Forschungszentrum Jülich (beides Projektpartner) sowie beim Fraunhoferinstitut für Werkstoffmechanik in Freiburg (direkte Beauftragung von MTU) durchgeführt.

##### **3.1.1.1 Werkstoff SC2000**

###### **Werkstoffbeschaffung**

Die Beschaffung des Werkstoffs SC2000 erfolgte bei PCC Airfoils LLC, OH, USA (Probenplatten mit den Abmessungen 20 mm x 100 mm x 160 mm). Die Platten wurden mit Impfkristall abgegossen, so dass die [001]-Orientierung des Einkristalls entlang der Plattenlängsachse und die Sekundärorientierung [110] entlang der Plattenquerachse ausgerichtet ist (Bild A.1). Die Proben mit der Orientierung <001> wurden in der Richtung der Plattenlängsachse entnommen, die mit der Orientierung <111> in einem Winkel von 54,7° zur Längsachse.

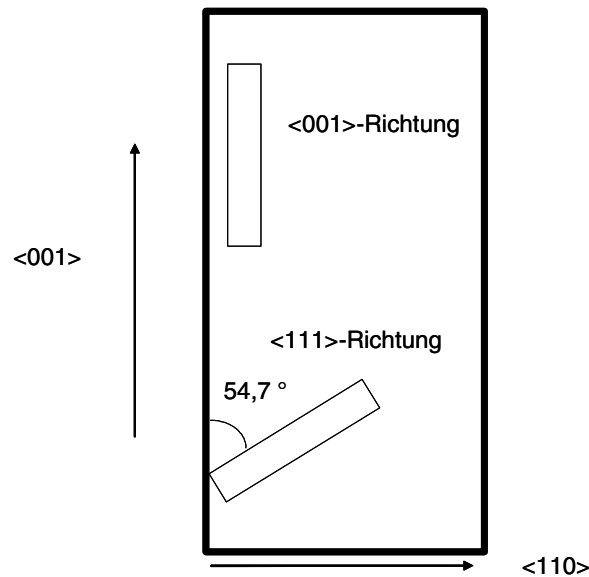


Bild A.1: Kristallographische Orientierung der SC2000 Platten und Entnahmerichtung der Proben

### Eingangsuntersuchung des Probenmaterials

Die Legierungszusammensetzung der für den Plattenabguss verwendeten Meistermelze RFH420 entspricht den in der MTU Spezifikation MTS1385-1 enthaltenen Vorgaben.

Nach Lösungsglühung und zweistufiger Auslagerung wurde das Gefüge metallkundlich untersucht. Der Werkstoff zeigt keine Anschmelzungen und nur einen geringen Anteil an ungelöstem, primärem Gamma' sowie noch Gamma/Gamma'-Resteutektikum. Die Gamma'-Mikrostruktur ist gleichmäßig ausgebildet bei einer mittleren Gamma'-Teilchengröße von ca.  $0,35 \mu\text{m}$ . Die Mikroporosität liegt bei einem Anteil von weit unter 1%. Die maximale Ausdehnung von Einzelporen beträgt  $90 \mu\text{m}$ , vereinzelt  $150 \mu\text{m}$ .

Zur Absicherung der Werkstoffqualität wurden bei MTU vier Zeitstandversuche in  $\langle 001 \rangle$ -Orientierung durchgeführt, die alle über den in der MTS1385-1 geforderten Werten lagen.

### Probenfertigung

Die Probenfertigung erfolgte bei MTU gemäß den Vorgaben der Prüfstellen. Die für die TU Darmstadt gefertigten Probentypen sind in Bild A.2 bis A.4 dargestellt und die TMF



Probe für das FZ Jülich in Bild A.5. Bild A.1 zeigt die Entnahmerichtung aus den Platten für die beiden kristallographischen Orientierungen <001> und <111>.

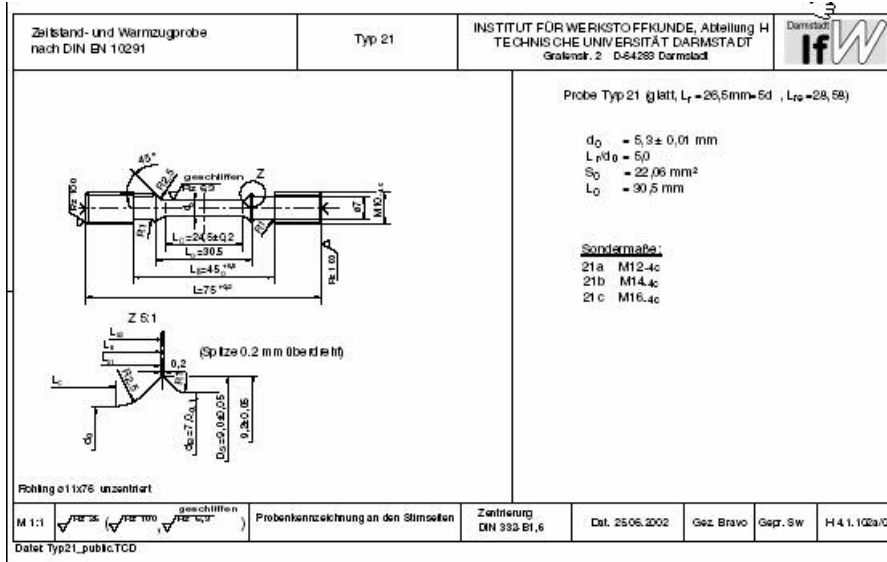


Bild A.2: Zeitstand und Warmzugprobe der TU Darmstadt (Typ 21)

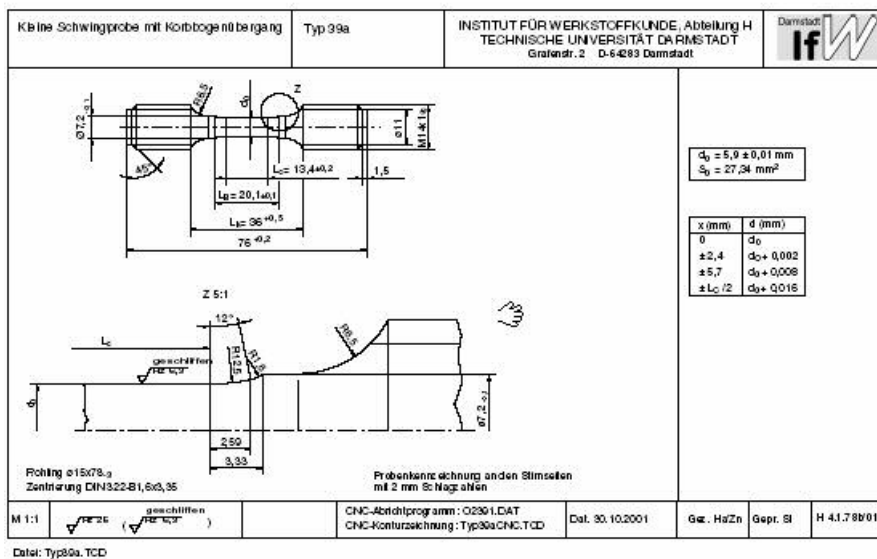


Bild A.3: LCF Probe der TU Darmstadt (Typ 39a)

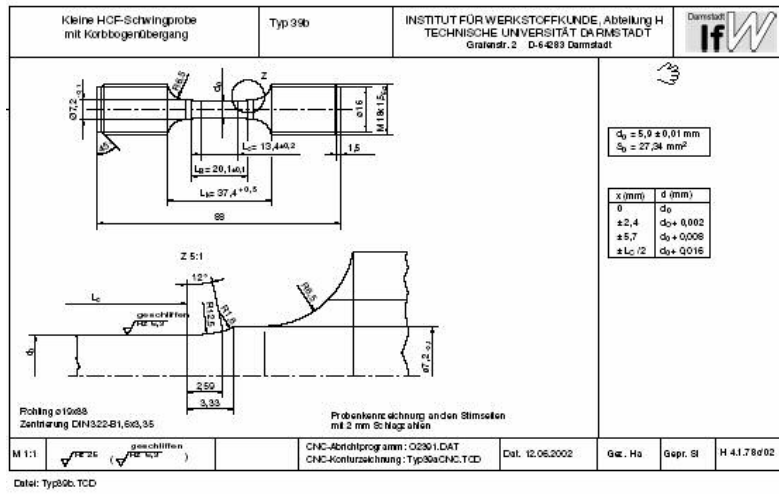


Bild A.4: HCF Proben der TU Darmstadt (Typ 39b)

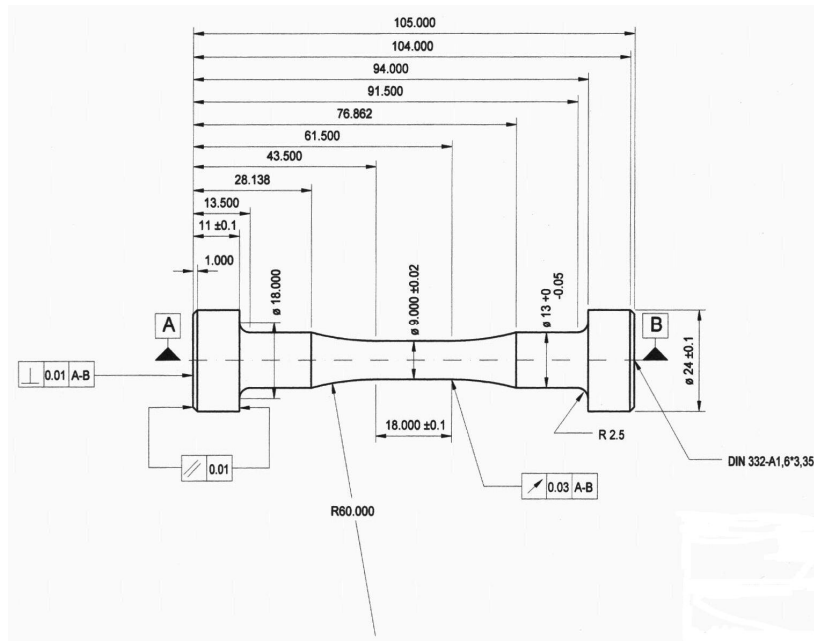


Bild A.5: TMF Probe des FZ Jülich

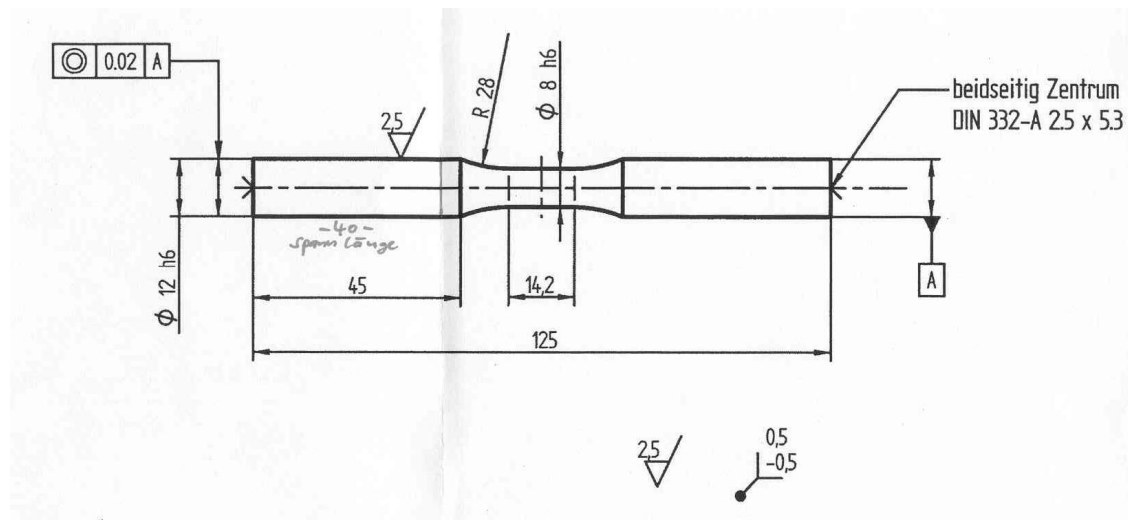


Bild A.6: LCF und TMF-Probe des IWM Freiburg

### Orientierungsbestimmung

Die Entnahme der Proben aus den Platten gemäß Bild A.1 erlaubt wegen der Fertigungstoleranzen nur eine ungefähre Bestimmung der Kristallorientierung in den Proben. Es war daher erforderlich, die Orientierung für jede einzelne Probe zu bestimmen. Hierzu wurde bei jeder Probe die Stirnfläche angeschliffen, poliert und anschließend mit einem Röntgendiffraktometer die kristallographische Orientierung in Bezug zur Belastungsrichtung der Versuchsproben bestimmt. Das Ergebnis der Orientierungsbestimmung sind drei Winkel. Mit diesen Winkeln lässt sich berechnen, wie groß die Winkelabweichungen zwischen einer vorgegebenen kristallographischen Richtung (z. B.  $\langle 001 \rangle$  oder  $\langle 111 \rangle$ ) und der Belastungsrichtung (Probenachse) ist. Bild A.7 zeigt die kumulative Häufigkeit für die Winkelabweichungen für die beiden Orientierungen  $\langle 001 \rangle$  und  $\langle 111 \rangle$ . Die maximalen Abweichung liegt bei beiden Orientierungen bei ca. 8 Grad. Dieser Wert liegt deutlich unter der Toleranz, die für Winkelabweichungen in Triebwerksschaufeln gelten.

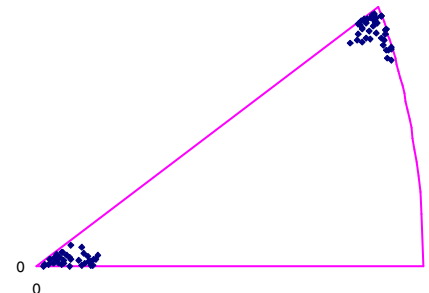
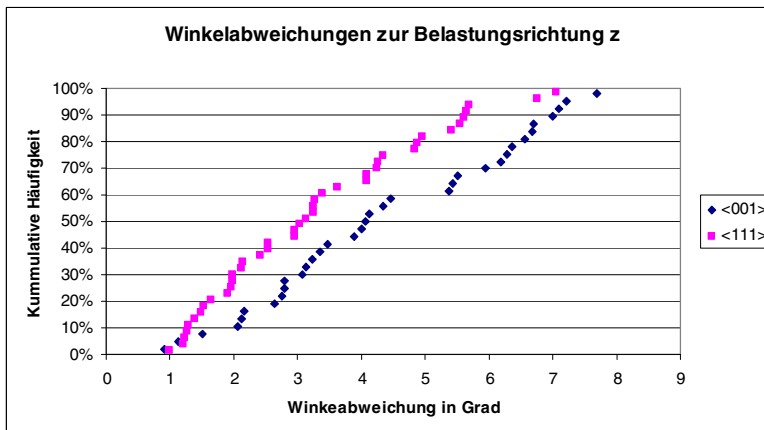


Bild A.7: Kumulative Häufigkeit der Winkelabweichungen zur den Orientierungen  $\langle 001 \rangle$  bzw.  $\langle 111 \rangle$  (links) sowie Darstellungen der Abweichungen in einer inversen Polfigur (rechts)

### 3.1.1.2 Werkstoff MAR-M247

#### Werkstoffbeschaffung

Der Werkstoff MAR-M247 wurde nach der MTU Spezifikation MTS1206-1 bei PCC Airfoils LLC, OH, USA beschafft. Die separat gegossenen Rundstäbe mit Durchmesser 16 mm und Länge 160 mm wurden durch den Gießer heißisostatisch verdichtet, um innere Porosität und Lunker zu schließen. Anschließend erfolgte eine Lösungsglühung mit schneller Abkühlung mit zweistufiger Auslagerung.

#### Eingangsuntersuchungen des Probenmaterials

Zur Untersuchung der Werkstoffqualität wurden metallographische Schlibfbilder angefertigt sowie Zeitstandsversuche durchgeführt. Der Werkstoff entspricht allen Anforderungen der Spezifikation MTS1206-1.

#### Probenherstellung

Die Probenherstellung erfolgte bei MTU nach den von der Prüfstelle IWM Freiburg gelieferten Probenzeichnung (Bild A.6).

### **3.1.2 Arbeitspaket A2: Versuchsplanung**

Die Versuchsplanung erfolgte auf der Basis von MTU Daten. Bei Projektbeginn wurden die Temperaturen von MTU festgelegt und die Belastungsniveaus abgeschätzt. Die Prüfparameter für die verschiedenen Versuchsarten wurden zusammen mit den Prüfeinrichtungen erstellt.

### **3.1.3 Arbeitspaket A3: Versuchsdurchführung**

Die Prüfung wurden bei den Prüfeinrichtungen TU Darmstadt und Forschungszentrum Jülich (beides Projektpartner) sowie beim Fraunhoferinstitut für Werkstoffmechanik in Freiburg (direkte Beauftragung von MTU) durchgeführt.

### **3.1.4 Arbeitspaket A4: Bewertung und Auswertung der Daten**

Die Bewertung der Ergebnisse von der TU Darmstadt und dem FZ Jülich schließt folgende Aufgaben ein:

- Metallographische und fraktographische Auswertungen
- Auswertung der Ergebnisse mit MTU Standardmethoden
- Bewertung der Ergebnisse zur Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften mit einfachen Ansätzen

#### **3.1.4.1 Metallographische und fraktographische Auswertungen**

Zur Bewertung der Ergebnisse und zum Verständnis der Versagensmechanismen wurden an einigen der geprüften Proben metallographische und fraktographische Untersuchungen durchgeführt. Ziel war die Bewertung von Risskeimen, die zum Versagen bei Ermüdung führen, um das Verständnis zu verbessern, durch welche Ursachen die teilweise starke Streuung der Lebensdauerwerte hervorgerufen wird.

Der Schwerpunkt der Auswertungen lag beim Werkstoff MAR-M247. Dafür gibt es folgenden Gründe:

- Bei MAR M247 ist der Zusammenhang zwischen gefügebedingten Risskeimen und Ermüdungsfestigkeit besonders ausgeprägt, da die Werkstoffdefekte wesentlich größer sein können als bei der Einkristall-Legierung SC2000.
- Die Versuchsergebnisse von MAR-M247 sind die Grundlage für die Arbeiten zur Ermüdungsmodellierung in AP B und erfordern daher ein möglichst genaues Verständnis der Versagensmechanismen.

Die metallographischen und fraktographischen Auswertungen wurden beim IWM Freiburg (Lichtmikroskopie) und bei der MTU durchgeführt (Rasterelektronenmikroskopie). Tabelle A.1 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Probe	T in °C	Labor	Befund
P24	20	MTU	Kein klassischer Schwingbruchanteil sichtbar. Viele Lunker und Karbide (Ta, W, Hf) sichtbar, ansonsten duktile Gewaltbruchwaben.
P36	20	MTU	Ähnlich Probe P24, ebenfalls viel Karbide aber weniger Poren gefunden.
P20	200		
P45	200		
P10	400	IWM	Probe zeigt einen nichtmetallischen Einschluss auf der Ermüdungsbruchfläche (Hafniumoxid)
P41	400	IWM	Keine Auffälligkeiten in Form von Einschlüssen oder Poren
P38	600	IWM	Probe zeigt nichtmetallischen Einschluss auf der Ermüdungsbruchfläche
P16	600		
P30	750	IWM	Probe zeigt nichtmetallischen Einschluss auf der Ermüdungsbruchfläche
P50	750		
P08	900		
P43	900		
P39	1000		
P33	1000	MTU	Klassischer Schwingbruch. Bruchausgang direkt von der Oberfläche ohne erkennbare Besonderheiten aber evtl Porenfeld am Anfang (oxidiert). Keine Karbidanhäufung am Bruchausgang sichtbar (evtl. durch Poren Oxidation verdeckt)

Tabelle A.1: Zusammenfassung der fraktographischen Auswertungen der beim IWM Freiburg geprüften LCF-Proben aus MAR-M247

Bei vielen der Proben konnten gefügebedingte Risskeime wie z. B. Lunker, Karbide, nichtmetallische Einschlüsse (siehe Bild A.8) identifiziert werden. Bei anderen Proben, insbesondere die mit längerer Lebensdauer, waren keine Risskeime erkennbar (Beispiel Bild A.9). Aufgrund der Untersuchungen war es möglich, eine Erklärung zu finden, warum die Lebensdauerwerte der Proben P10, P30 und P38 am unteren Ende des Streubands liegen.

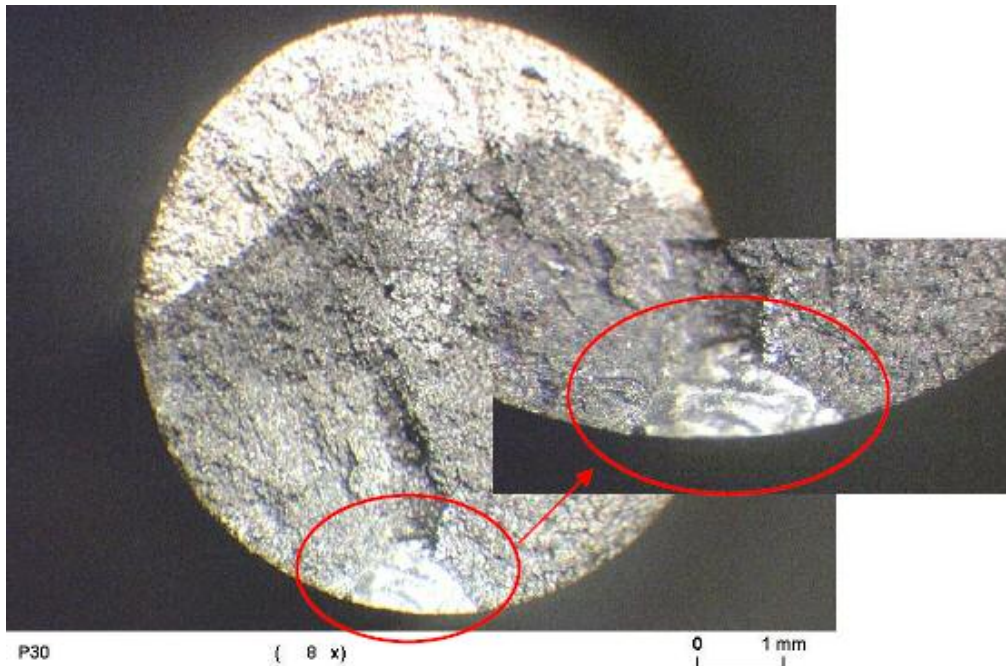


Bild A.8: Beispiel für einen nichtmetallischen Einschluss als Risskeim eines LCF Bruches (lichtmikroskopische Aufnahme)

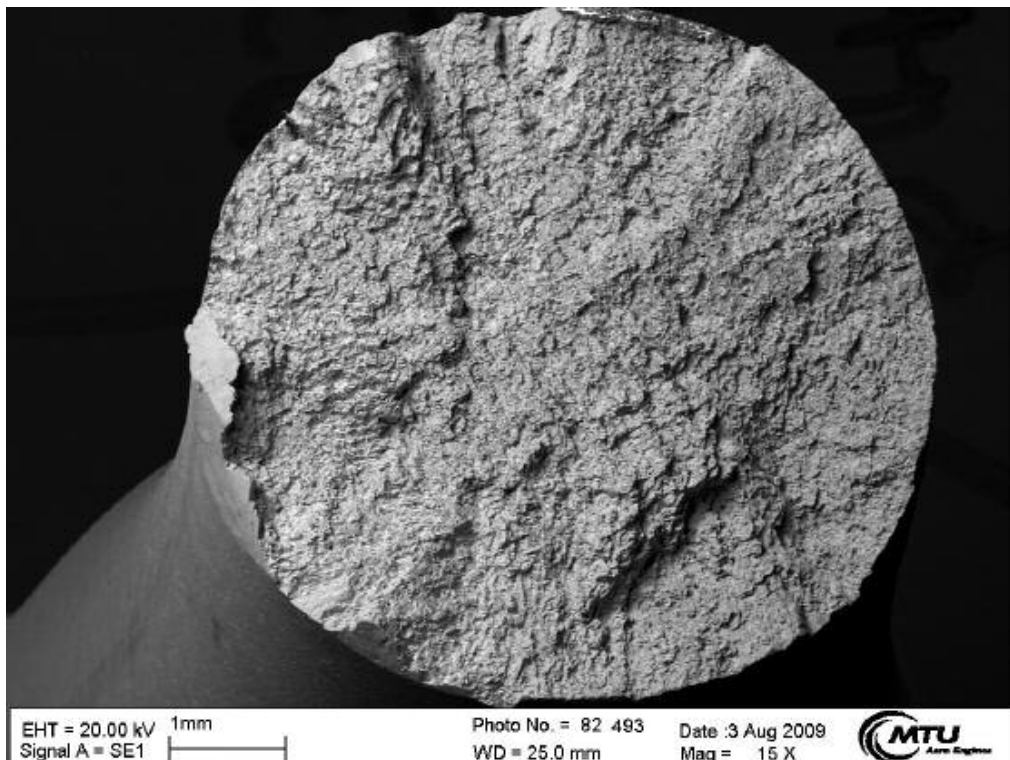


Bild A.9: Beispiel für einen LCF-Bruch ohne erkennbaren Risskeim (rasterelektronenmikroskopische Aufnahme)

### 3.1.4.2 Larson-Miller Auswertung der Probenversuche

Der klassische Ansatz zur Beschreibung des Kriechverhaltens ist das Modell von Larson-Miller.

$$P = (T + 273) \cdot (C + \log_{10}(t)) / 1000$$

Hierbei ist P der Larson-Miller Parameter, T die Temperatur, t die Zeit und C eine Konstante.

P ist eine Funktion der Spannung S:

$$P = \text{Polynom}(\log(S))$$

Der Zeit t können verschiedenen Kriterien zugeordnet werden. Im vorliegenden Fall sind es die Zeiten bis 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 und 5,0% Kriechdehnung.

Die Bilder A.10 und A.11 zeigen die Larson-Miller Kurven für die beiden Kristallorientierungen <001> bzw. <111> des Werkstoffs SC2000. In beiden Fällen ergeben sich konsistente Kurvenscharen, die es erlauben das Kriechverhalten gut zu beschreiben.

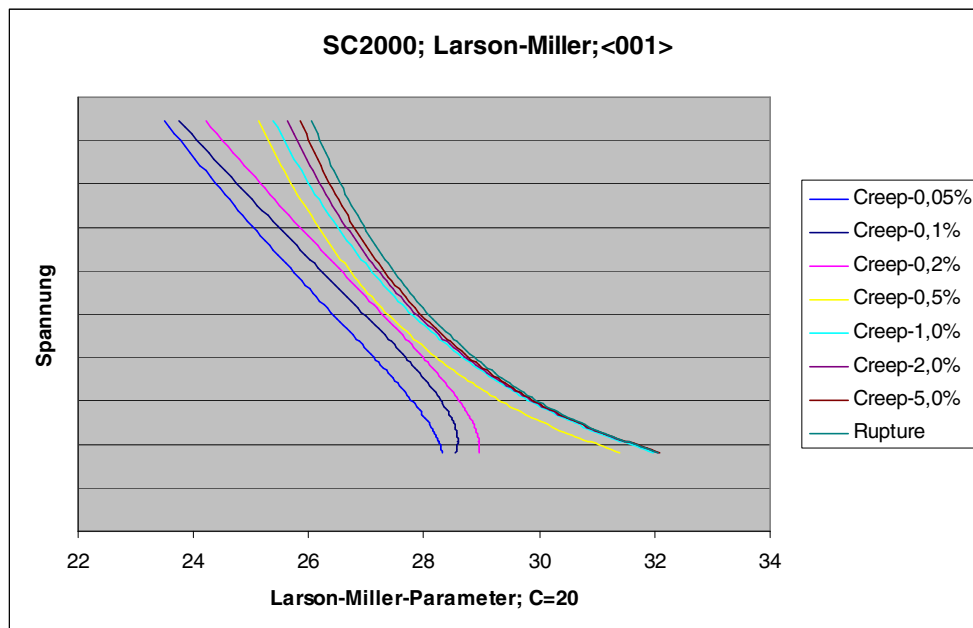


Bild A.10: Larson-Miller Darstellung für die Kristallorientierungen <001>



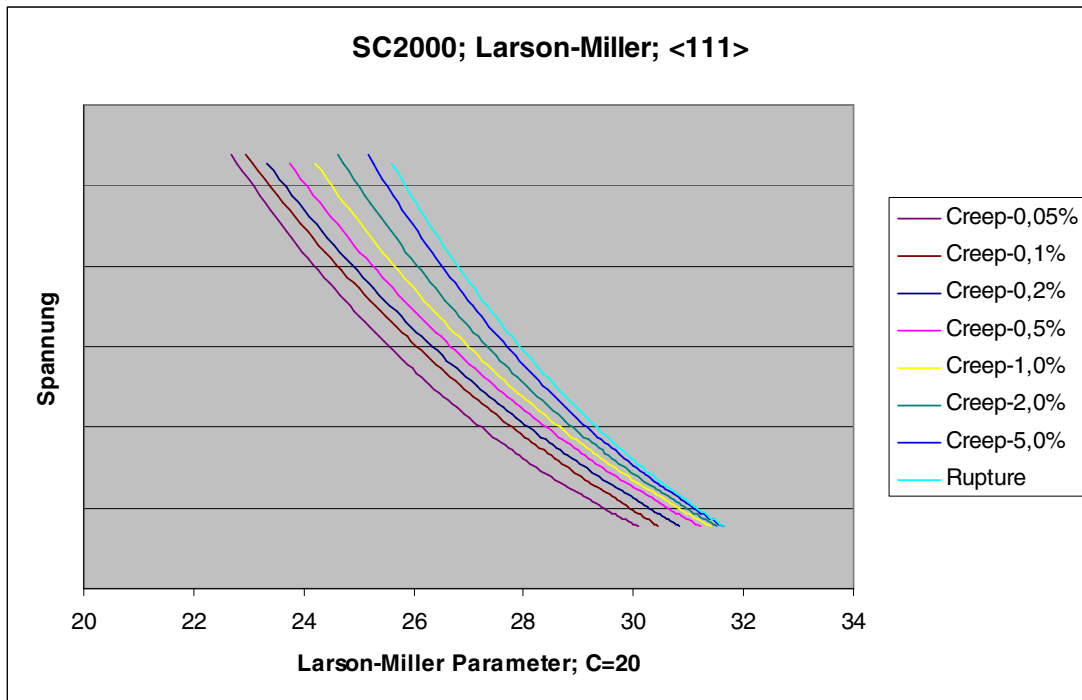


Bild A.11: Larson-Miller Darstellung für die Kristallorientierungen <111>

Aus den Larson-Miller Kurven (Bild A.10 und A.11) lassen sich Kriechkurven (Kriechdehnung vs. Zeit) generieren. Der Vergleich mit den Messwerten aus Kriechversuchen ergab durchwegs zufriedenstellende Ergebnisse. Dies gilt selbst für komplexe Kriechkurven mit Plateau (siehe Bild A.12), die bei vielen anderen Kriechmodellen nicht darstellbar sind.

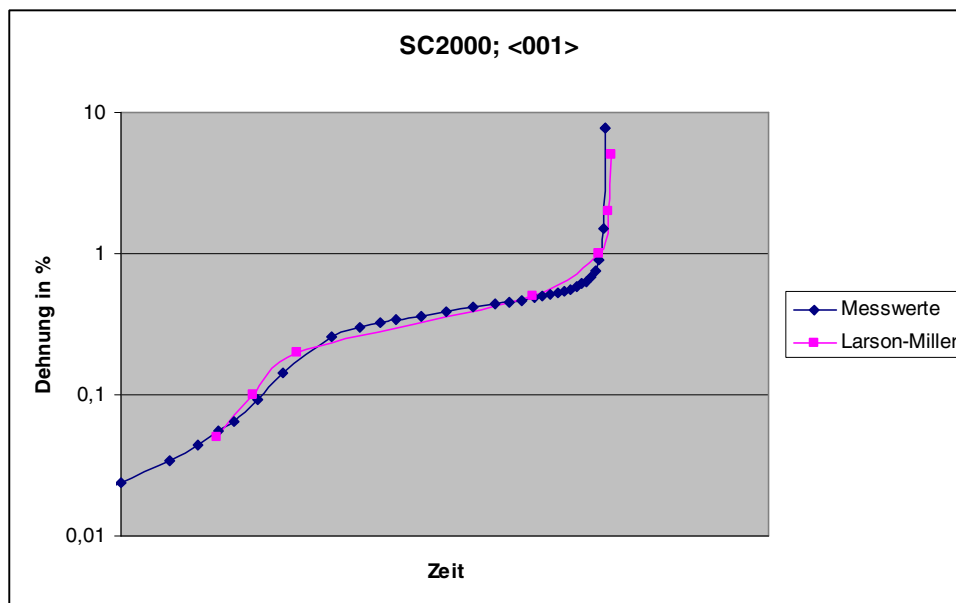


Bild A.12: Vergleich zwischen gemessener Kriechkurve und Modellierung mit Larson-Miller Modell

### 3.1.4.3 Richtungsabhängigkeit der mechanische Eigenschaften von SC2000

Einkristalle werden in Gasturbinen wegen ihrer großen Hochtemperaturfestigkeit eingesetzt. Diesem Vorteil steht jedoch der Nachteil gegenüber, dass die Werkstoffeigenschaften richtungsabhängig sind und dadurch die Beschreibung des Werkstoffverhaltens erheblich komplexer wird. Im folgende werden die Versuchsergebnisse von SC2000 hinsichtlich der Richtungsabhängigkeit bewertet.

#### LCF und TMF (thermomechanische Ermüdung)

Sowohl LCF- als auch TMF-Versuche wurden dehnungskontrolliert durchgeführt. Trägt man die zyklische Lebensdauer gegen die (mechanische) Dehnungsamplitude auf, so ergibt sich ein sehr ausgeprägter Unterschied zwischen der Kristallorientierung <001> und <111> (Bild A.13 und A.15). Es ist jedoch bekannt, dass die Unterschiede weitgehend verschwinden, wenn die Auftragung über die pseudoelastische Spannungsamplitude erfolgt, die folgendermaßen definiert ist:

Pseudoelastische Spannungsamplitude = mechanische Dehnungsamplitude \* E.Modul

Die Ergebnisse bestätigen die Richtigkeit dieses Ansatzes (Bild A.14 und A.16), der weite Verbreitung bei der Auslegung für anisotrope Nickellegierungen hat. Wichtig ist

auch das Ergebnis, dass die Schwingfestigkeit in  $\langle 111 \rangle$ -Richtung zu etwas höheren Werten tendiert als in  $\langle 001 \rangle$ -Richtung. Da in vielen Fällen in der Praxis nur Daten in  $\langle 001 \rangle$ -Richtung vorliegen, ist eine Abschätzung der Schwingfestigkeit in andere Richtungen nach diesem Ansatz somit konservativ.

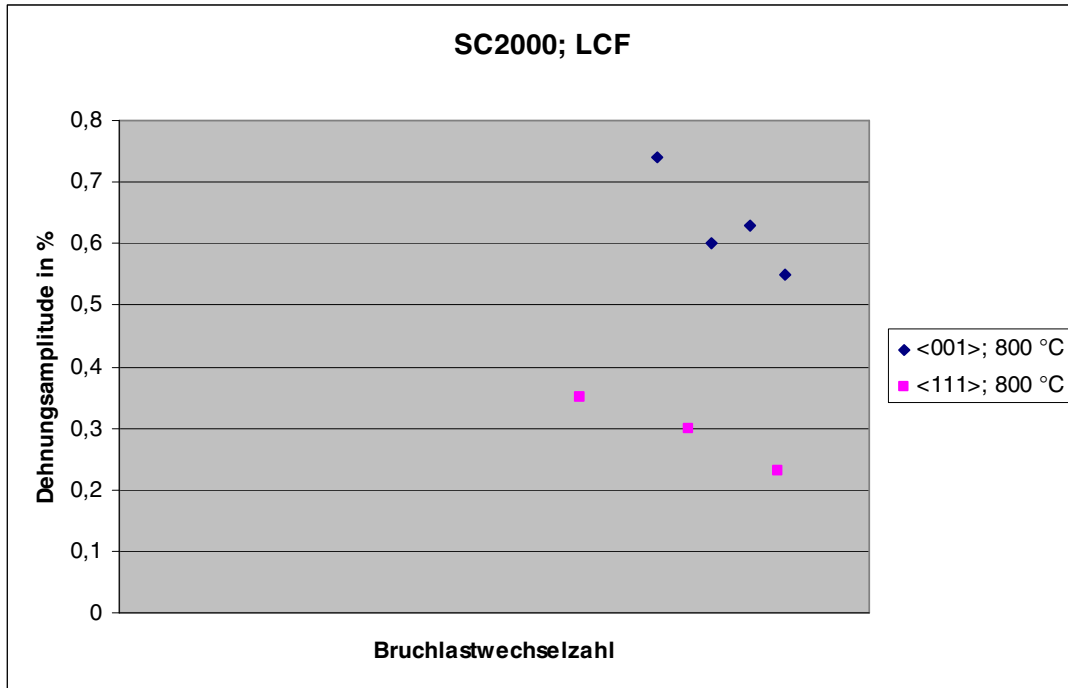


Bild A.13: Richtungsabhängigkeit der LCF Lebensdauer, Auftragung über die Dehnungsamplitude

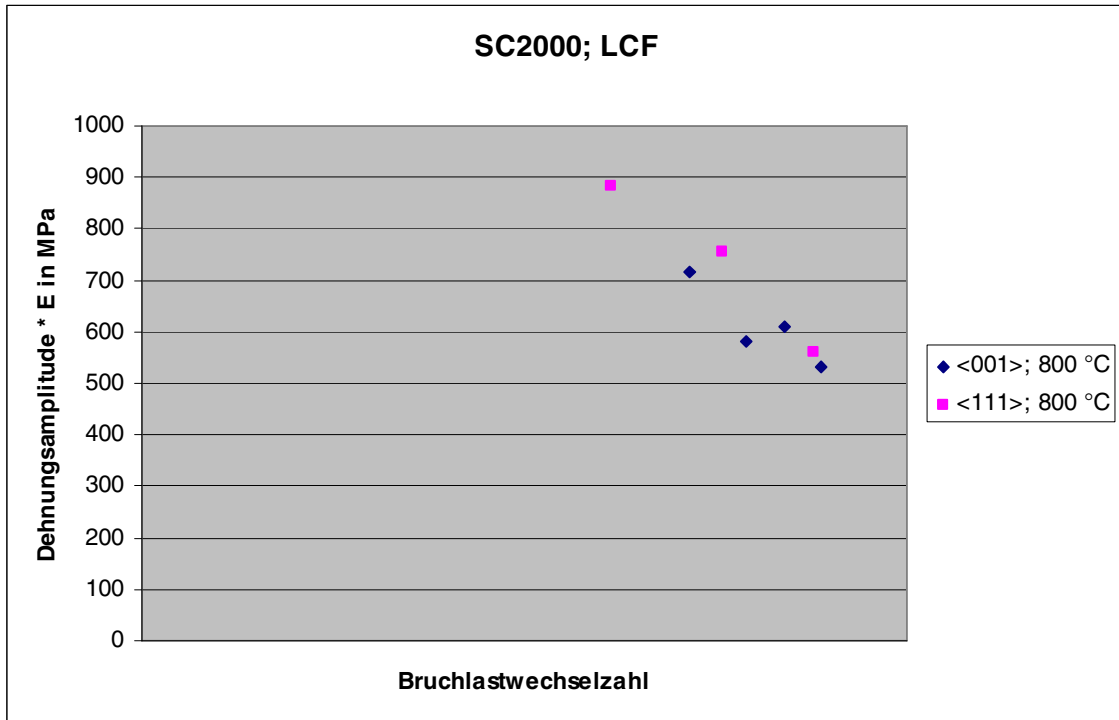


Bild A.14: Richtungsabhängigkeit der LCF Lebensdauer, wie Bild A.14 jedoch Auftragung über die pseudoelastische Spannungsamplitude

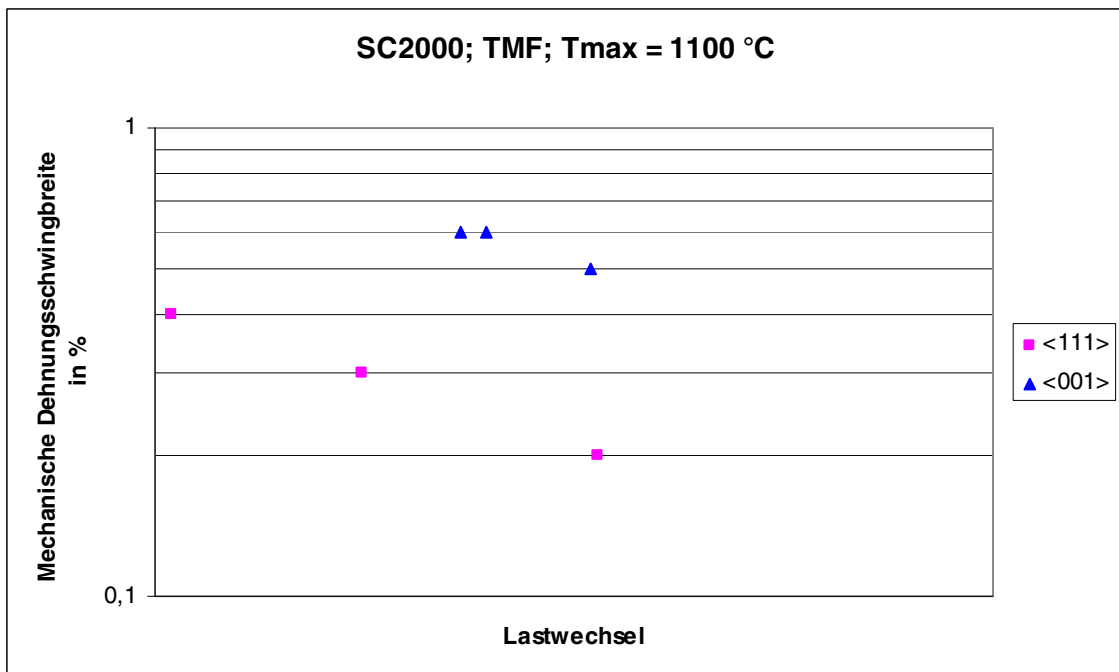


Bild A.15: Richtungsabhängigkeit der TMF Lebensdauer, Auftragung über die Dehnungsschwingbreite

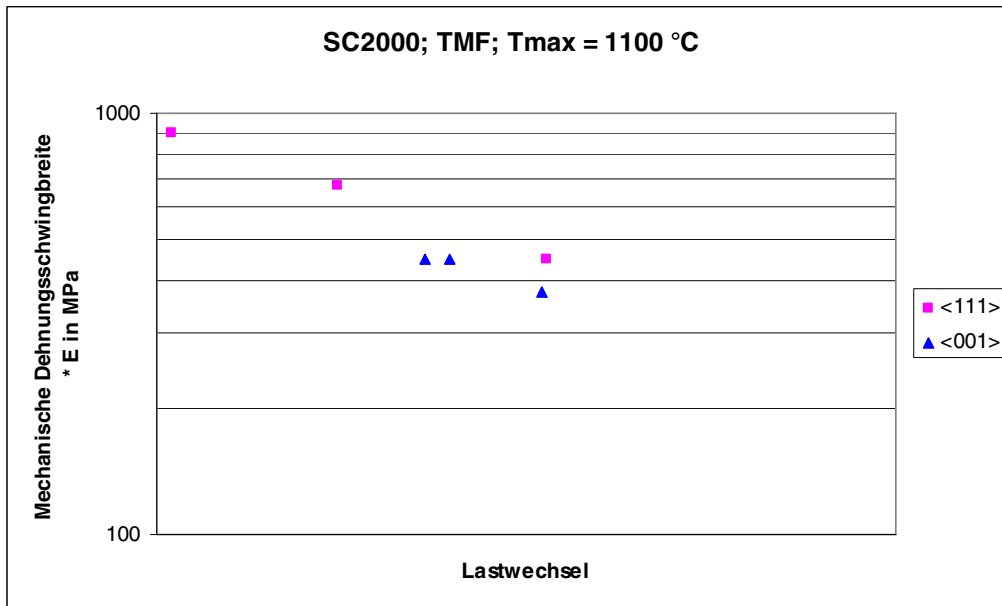


Bild A.16: Richtungsabhängigkeit der TMF Lebensdauer, wie Bild A.15 jedoch Auftragung über die pseudoelastische Spannungsschwingbreite

### HCF

HCF Versuche wurden nur in sehr geringer Anzahl durchgeführt. Üblicherweise sind ca. 10 Versuche erforderlich, um einen zuverlässigen Wert für die Dauerfestigkeit ableiten zu können, im vorliegenden Fall waren es jedoch nur 4 bis 5. Die im Wöhlerdiagramm (Bild A.17) dargestellten Messwerte deuten an, dass die Schwingfestigkeit für die Kristallorientierung <111> deutlich höher ist als für <001>. Dieser Effekt scheint ausgeprägter zu sein als im LCF Bereich. Insgesamt lassen sich jedoch wegen der geringen statistischen Absicherung keine sicheren Aussagen treffen. Auch fehlen Untersuchungen zum Einfluss des R-Verhältnisses (R ist das Verhältnis Unterspannung/Oberspannung bei einem Ermüdungslastwechsel), so dass sich kein Goodman-Diagramm erstellen lässt, das Grundlage für die Auslegung gegen HCF Versagen ist.

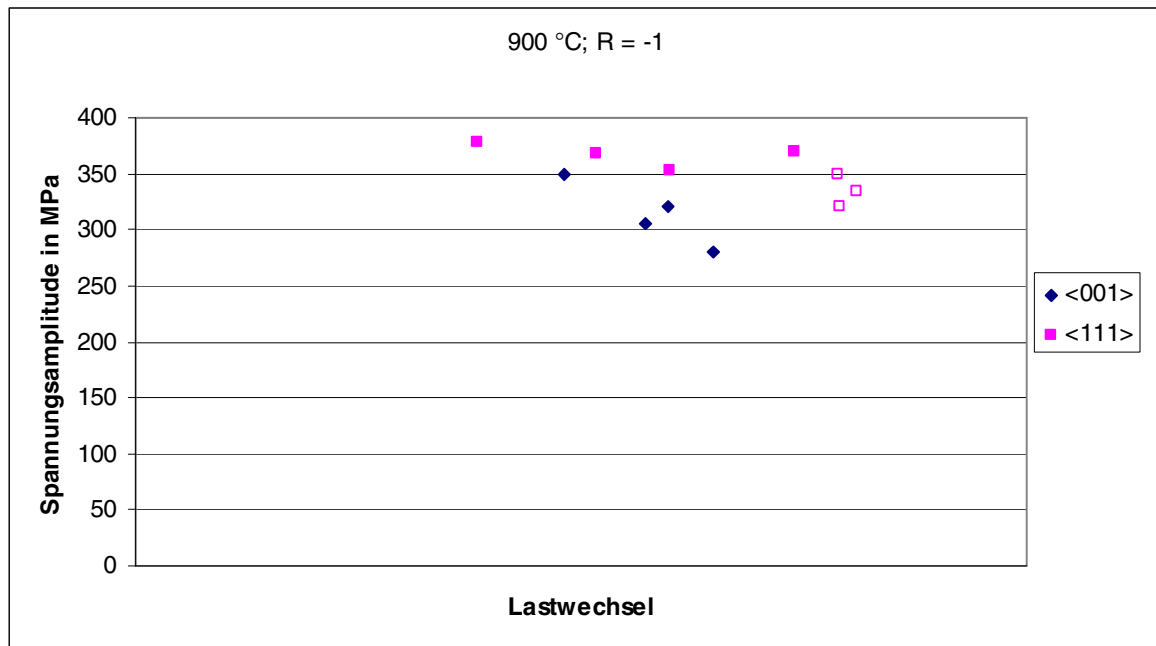


Bild A.17: Richtungsabhängigkeit der HCF Lebensdauer

### Kriechen

Wie im Abschnitt 3.2.1 beschrieben, wurde ein Larson-Miller Ansatz zur Darstellung der Kriechkurven für die Richtungen  $\langle 001 \rangle$  und  $\langle 111 \rangle$  verwendet. Die Bilder A.18 und A.19 zeigen zwei Beispiele für den Vergleich von Modellkurven der beiden kristallographischen Orientierungen. Wie zu erkennen ist, ist die Richtungsabhängigkeit ziemlich komplex. Je nach gewählter Temperatur und Dehnungskriterium kann die eine oder andere Richtung günstiger sein und es bestehen qualitativ unterschiedliche Zusammenhänge. Die Komplexität der Kurven macht es unmöglich, das Werkstoffverhalten durch einfache Ansätze zu beschreiben. Hierfür sind konstitutive Materialmodelle erforderlich, bei denen das Verfestigungsverhalten und die Kriechbeiträge verschiedener Gleitebenen berücksichtigt werden. Der Aufwand für derartige Modelle geht über die Möglichkeiten dieses Projekts hinaus.

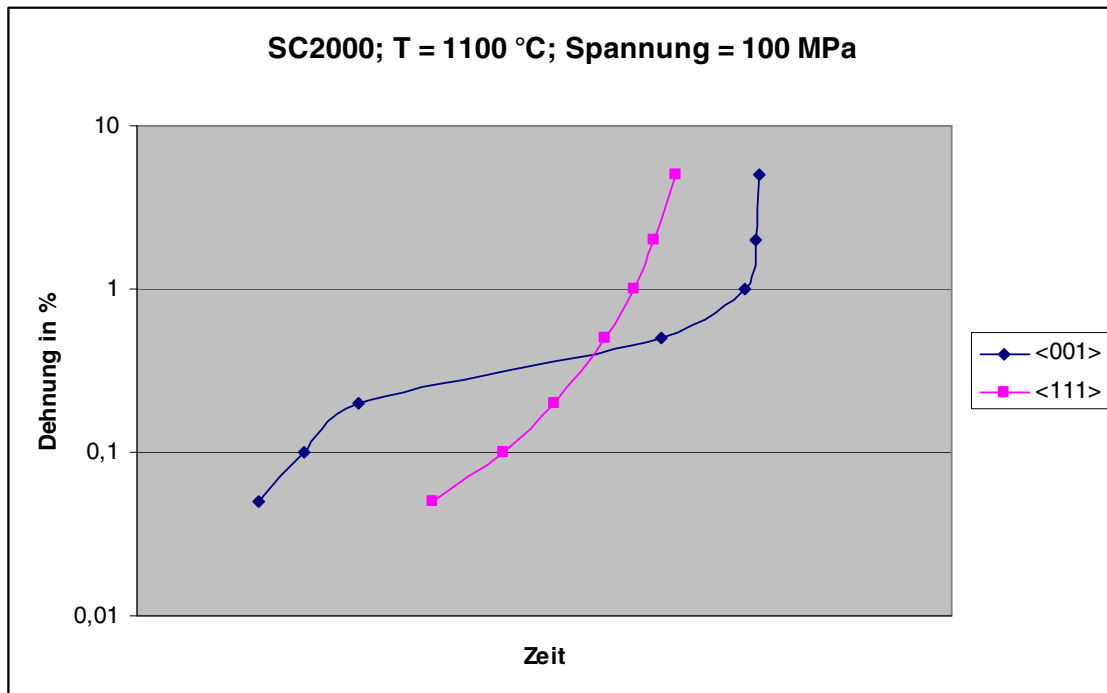


Bild A.18: Vergleich der Kriechkurven (Larson-Miller Modell) zwischen den kristallographischen Richtungen <001> und <111>  
T = 1100 °C; Spannung = 100 MPa

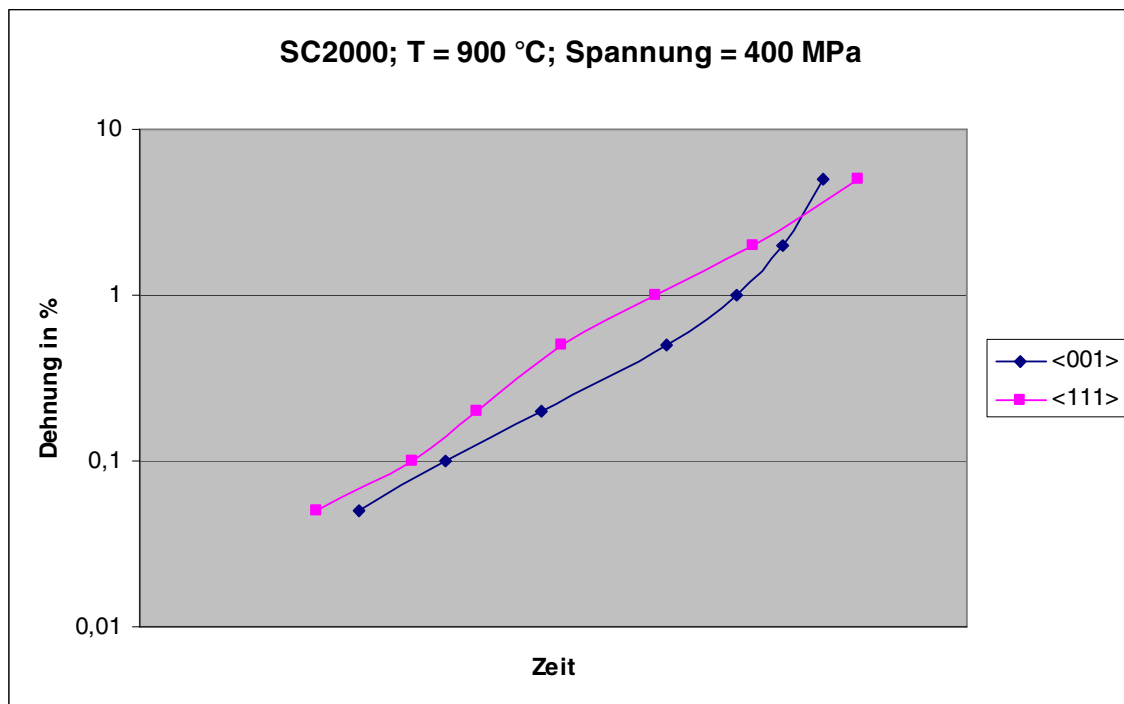


Bild A.19: Vergleich der Kriechkurven (Larson-Miller Modell) zwischen den kristallographischen Richtungen <001> und <111>  
T = 900 °C; Spannung = 400 MPa

## 3.2 AP B Ermüdungs- / Kriechermüdungsmodellierung

Ziel des Arbeitspaketes war es, Werkzeuge für die numerische Simulation des Verformungs- und Lebensdauerhaltens von Gasturbinenkomponenten aus dem Nickelbasis-Gusswerkstoff MAR-M-247CC unter thermomechanischer Belastung zu entwickeln. Die Arbeiten zur TMF-Ermüdungsmodellierung einschließlich der erforderlichen Versuche wurden im Unterauftrag durch das Fraunhofer IWM in Freiburg ausgeführt. Eine ausführliche Beschreibung mit Darstellung von Einzelergebnissen ist in /1/ gegeben.

### 3.2.1 Arbeitspaket B1.1: Definition der Anforderungen und Versuchsplanung

Die Tabelle B.1 gibt eine Übersicht über die Aufteilung der insgesamt 32 Proben für den Werkstoff MAR-M247 auf die einzelnen Versuchsarten (CLCF-, TMF- und Zugversuche). Die CLCF Versuche sind komplexe LCF Versuche, bei denen die LCF Versu-



che durch ein vorgeschaltetes komplexes Dehnungsprogramm für die Verformungsmodellierung erweitert wurden und entspricht dem Standardvorgehen am IWM.

Versuch	Bedingungen	Anzahl
Zugversuche	Raumtemperatur	1
	Erhöhte Temperatur	5
CLCF-Versuche	Raumtemperatur	2
	Erhöhte Temperatur	12
TMF-Versuche	Einstufig	4
	Mehrstufig	4
Vorversuche		4

Tabelle B.1: Übersicht der Werkstoffversuche für MAR-M247

### 3.2.2 Arbeitspaket B1.2: Probenbeschaffung und –herstellung

Als Versuchswerkstoff wurde die polykristalline Nickelbasisgusslegierung MAR-M-247CC in speziell abgegossenen Rundstäben von der MTU Aero Engines bereit gestellt. Die Zug-Druckproben gemäß Bild B.1 wurden am IWM gefertigt.

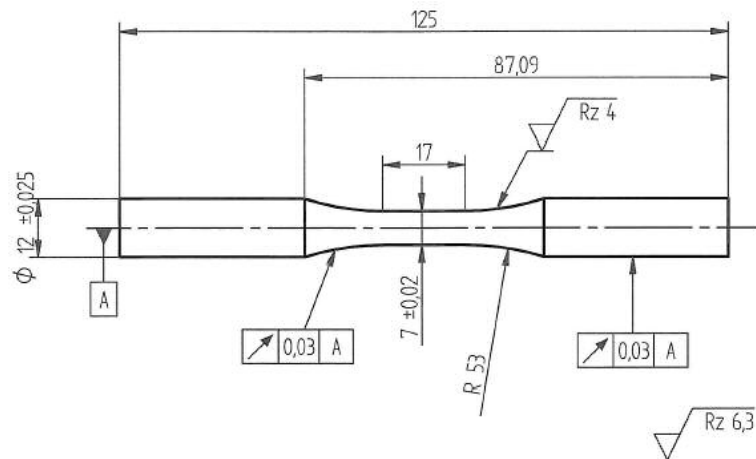


Bild B.1: Zug-Druck Probengeometrie

### 3.2.3 Arbeitspaket B1.3: Versuchsdurchführung

Für die Werkstoffprüfung stand am IWM eine servohydraulische Prüfmaschine zur Verfügung. Die Proben wurden durch ein hydraulisches Spannsystem eingespannt, wobei die Proben zu Versuchsbeginn kraftfrei bis auf die Versuchstemperatur aufgeheizt wurden. Es erfolgten jeweils zwei isotherme CLCF-Versuche je Laststufe und ein dehnungsgeregelter Zugversuch an sieben in Rücksprache mit der MTU Aero Engines festgelegten Temperaturen von 20, 200, 400, 600, 750, 900 und 1000°C. In den CLCF-Versuchen wurde zunächst ein komplexes Dehnungsprogramm durchlaufen, das unterschiedliche Dehnamplituden, Dehnraten sowie Haltezeiten enthielt. Im Anschluss daran folgte eine zyklische Belastung mit konstanter Dehnrates von  $10^{-3}$  1/s bis zum Anriss. Die Zugversuche wurden mit einer Dehnrates von  $10^{-4}$  1/s und einer Dehnung bis 10% gefahren. Des Weiteren wurden vier thermomechanische Ermüdungsversuche durchgeführt. Davon wurde einer mit einem von MTU Aero Engines erhaltenen Temperatur-Zeit-Profil ohne Dehnungsnachgiebigkeit ( $\epsilon_{\text{mech}} = -\epsilon_{\text{th}}$ ) gefahren, ein anderer wurde im Temperaturbereich zwischen 200°C und 1000°C mit einer Dehnungsnachgiebigkeit von 50% ( $\epsilon_{\text{mech}} = -0,5\epsilon_{\text{th}}$ ) gefahren und ein weiterer TMF-Versuch wurde im Temperaturbereich 500-1000 °C durchgeführt. Die Dehnungsnachgiebigkeit betrug dabei 30% (Out-of-Phase TMF-Versuch). Bei einem vierten TMF-Versuch erfolgte ein vorzeitiges Versagen nach nur 20 Zyklen an einem nichtmetallischen Einschluss, weswegen dieser Versuch als ungültig zu werten ist. In Tabelle B.2 sind alle durchgeführten isothermen und thermomechanischen Ermüdungsversuche zusammenfassend dargestellt. Sämtliche Versuche erfolgten auf einer servohydraulischen Prüfmaschine. Die gewünschte Probentemperatur wurde über eine Induktionsanlage aufgebracht und über NiCr-Ni-Thermoelemente geregelt. Für die Dehnungsmessung wurde ein Hochtemperatur-Extensometer mit keramischen Taststäben verwendet.

Probe Nr.	Temp.[ °C ]	$\epsilon_a$ (LCF) [%]/ Nachgiebigkeit (TMF) [%]	Zyklus-zeit [ s ]
P24	20	0,5	20
P36	20	0,6	24
P20	200	0,5	20
P45	200	0,6	24
P10	400	0,5	20
P41	400	0,4	16

P38	600	0,4	16
P16	600	0,35	14
P30	750	0,4	16
P50	750	0,35	14
P08	900	0,5	20
P43	900	0,4	16
P39	1000	0,4	16
P33	1000	0,3	12
P35	200-1000	50	585
P09	635-912	0	155
P58	500-1000	30	312

Tabelle B.2: Durchgeführte CLCF-/TMF Versuche

Darüber hinaus wurden auch noch isotherme dehnungsgeregelte Mehrstufenversuche mit variablen R-Verhältnissen durchgeführt, um zu beurteilen, inwieweit das Verformungsmodell in der Lage ist, Versuche mit Mitteldehnung ungleich Null zu beschreiben.

### 3.2.4 Arbeitspaket B1.4: Modellentwicklung

Die wesentlichen Phänomene der in einachsigen Versuchen gemessenen Wechselplastizität und Hochtemperaturverformung von Metallen können in guter Genauigkeit mit einem zeit- und temperaturabhängig formulierten Modell wie dem Chaboche-Modell beschrieben werden, d.h. Zugversuche, Ermüdungsversuche mit zyklischer Ver- oder Entfestigung, Kriechversuche mit primärem und sekundärem Kriechbereich und Spannungsrelaxation. Das Chaboche-Modell zur Beschreibung der Verformung beinhaltet eine Anzahl an Parametern, die auf Basis von komplexen isothermen LCF-Versuchen bestimmt werden. Die verwendeten konstitutiven Gleichungen sind im Folgenden in der eindimensionalen Formulierung angegeben:

Totale Dehnrate:  $\dot{\epsilon} = \dot{\sigma} / E + \dot{\epsilon}^{vp} + \dot{\epsilon}^{th}$

Inelastische Dehnrate:  $\dot{\epsilon}^{vp} = \dot{p} \operatorname{sign}(\sigma - \alpha)$  mit  $\dot{p} = \left\langle \frac{|\sigma - \alpha| - R}{K} \right\rangle^n$

Thermische Dehnrate:  $\dot{\epsilon}^{th} = \alpha^{th}_{dif} \dot{\theta}$

Isotrope Verfestigung:  $R = \sigma_y + Q_\infty [1 - \exp(-bp)]$

Kinematische Verfestigung:  $\alpha = \sum_{a=1}^2 \alpha^a$

mit  $\dot{\alpha}^a = C^a \dot{\epsilon}^{vp} - \gamma^a \Phi^a \alpha^a \dot{p} - R^a \alpha^a + \frac{1}{C^a} \frac{\partial C^a}{\partial \theta} \alpha^a \dot{\theta}$

Ver-/Entfestigungsfunktionen:  $\Phi^1 = \varphi^1_\infty + (1 - \varphi^1_\infty) \exp(-\omega^1 |\epsilon^{vp}|)$

$\Phi^2 = \varphi^2_\infty + (1 - \varphi^2_\infty) \exp(-\omega^2 |\epsilon^{vp}|)$

Die anpassbaren Modellparameter sind:

- K      Viskositätsreferenzspannung
- n      Dehnratenexponent
- $\sigma_y$     Fließgrenze
- $Q_\infty$     Grenzwert der isotropen Verfestigung
- b      Aufklingskonstante
- $C^a/\gamma^a$     Grenzwert der kinematischen Verfestigung
- $\gamma^a$     Aufklingskonstante der dynamischen Erholung
- $R^a$     Abklingskonstante der statischen Erholung
- $\varphi^a$     Sättigungswert der zyklischen Ver-/Entfestigung
- $\omega^a$     Aufklingskonstante der zyklischen Ver-/Entfestigung

Die in dem Modell enthaltenen Parameter sind temperaturabhängig und werden für nichtisotherme Belastungen linear in der Temperatur interpoliert.

Die Anpassung des Verformungsmodells wurde mit der am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik entwickelten Software Fitit durchgeführt. Fitit erlaubt die automatische Bestimmung der Parameter von nichtlinearen Werkstoffmodellen unter Berücksichtigung von umfangreichen Datensätzen, die sich aus beliebig vielen Versuchen und Versuchstypen zusammensetzen können.

Die folgenden Bilder zeigen beispielhaft Ergebnisse aus der Modellanpassung. In Bild B.2 ist der Spannungs-Zeit-Verlauf für einen CLCF-Versuch bei 900°C (P43) zu sehen, wobei die schwarzen Symbole die Messwerte aus dem Experiment und die rote Kurve den mit dem angepassten Modell berechneten Verlauf darstellen.

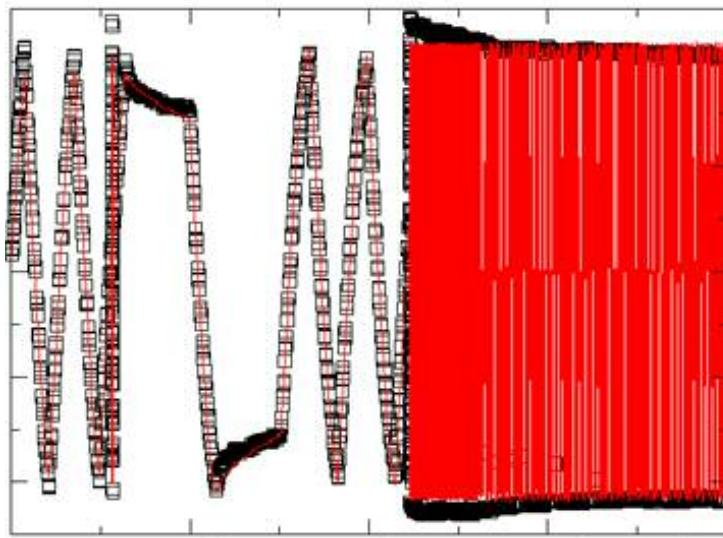


Bild B.2: CLCF P43—Modell, □Versuch

Die Anpassung des Verformungsmodells erfolgte ausschließlich an die komplexen isothermen CLCF-Versuche. Mit den so angepassten Parametern wurde sowohl für die TMF-Versuche wie auch für die isothermen Mehrstufenversuche mit variablen Dehnungsverhältnissen das Verformungsverhalten vorhergesagt.

Für die Berechnung der TMF-Versuche wurden die Parameter des Verformungsmodells linear in der Temperatur interpoliert, exemplarisch ist für den TMF-Versuch P09 mit 635°C-912°C mit 0% Dehnungsnachgiebigkeit der Spannungs-Temperaturverlauf in Bild B.3 dargestellt.

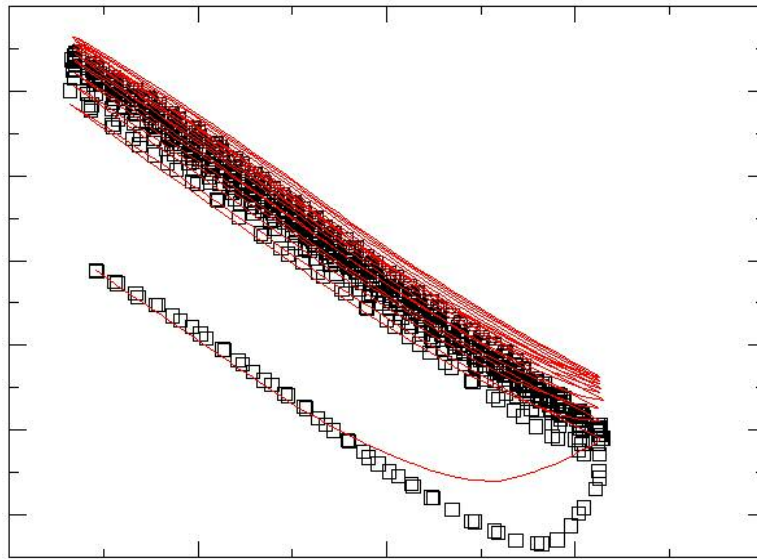


Bild B.3:  $\sigma$  vs.  $\theta$  -TMF-Versuch P09 mit 635°C-912°C mit 0% Dehnungsnachgiebigkeit, —Modell, □ Versuch

Allgemein lässt sich festhalten, dass eine gute Vorhersage des Spannungs-Temperaturverlaufes im Vergleich zum Versuch gegeben ist, wobei die unteren Spannungsumkehrpunkte in allen TMF-Versuche nicht ganz erreicht wurden.

Das Chaboche-Modell wurde auch auf die isothermen Stufenversuche mit der in Bild B.4a/b gezeigten Dehnungszeitgeschichte mit unterschiedlichen  $R\epsilon$ -Verhältnissen angewendet. Das Ratcheting-Verhalten (Abfall der Mittelspannung) wird erwartungsgemäß vom Chaboche-Modell überschätzt, bei der hohen Temperatur von 1000°C hingegen mit den Anpassungsparametern der Ausgangsanpassung unterschätzt.

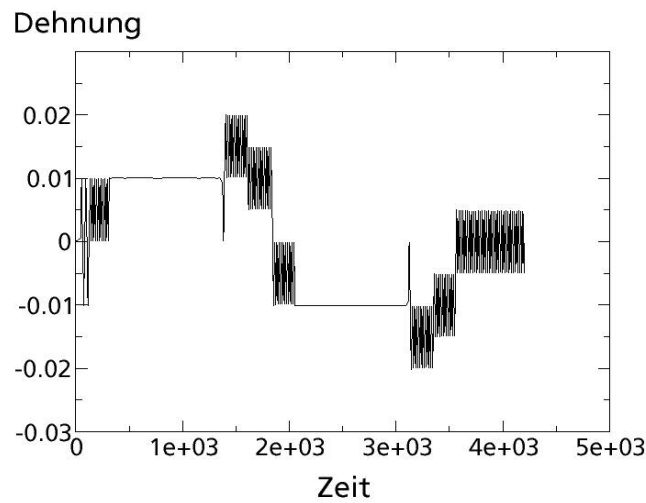


Bild B.4a: Dehnung über der Zeit beim isothermen Mehrstufenversuch

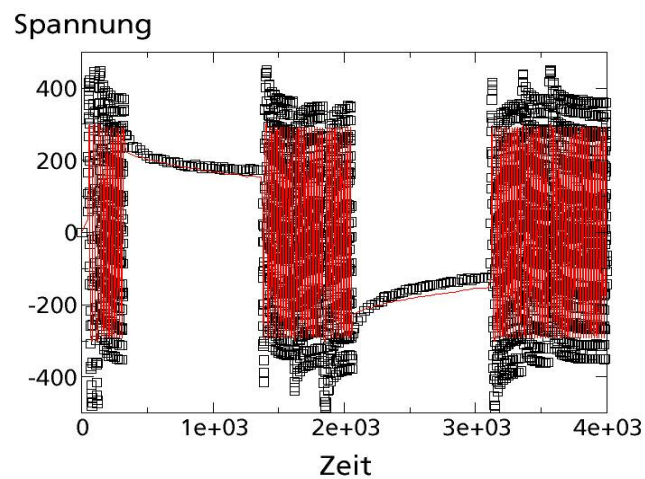


Bild B.4b: Mehrstufiger Versuch P55 bei 1000°C. — Modell, □ Versuch

Um zu einer Verbesserung der Vorhersage zu gelangen, wurde in einer zweiten Modellanpassung der 1000°C-Stufenversuch stärker berücksichtigt. Hierfür wurde der 1000°C-Parametersatz unter Einbeziehung des Mehrstufenversuches modifiziert. Die Spannungen der komplexen LCF-Versuche werden im Vergleich zur Ausgangsanpassung jetzt überschätzt. Im Mehrstufenversuch hingegen liegen die berechneten Spannungen im Vergleich zur Ausgangsanpassung näher bei den Versuchen, Bild B.5 zeigt

den komplexen LCF-Versuch bei 1000°C und das Modell mit den veränderten Parametern.

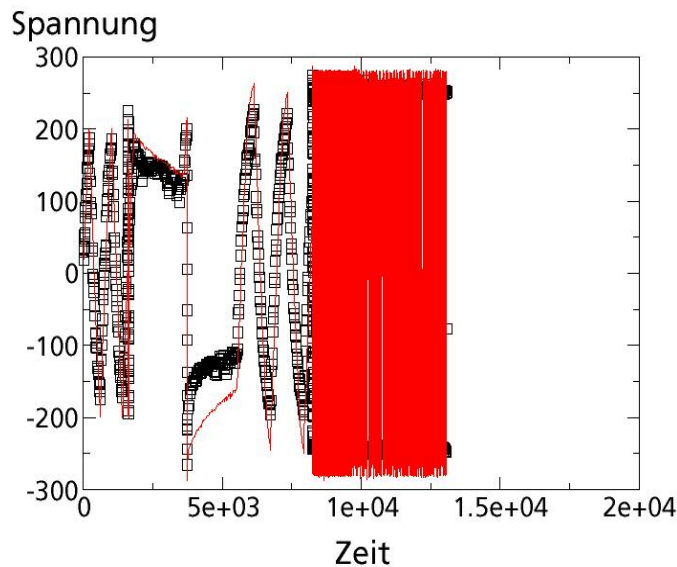


Bild B.5: Komplexer LCF-Versuch P33 bei 1000°C,  $\epsilon_{a,t} = 0,2 \%, 0,3 \%$ . (neuer Parametersatz), — Modell, □ Versuch

Mit diesen Parametern wurde ein Kompromiss hergestellt, der sowohl LCF- als auch den Mehrstufenversuch befriedigend abbildet. Insgesamt kann jedoch nicht von einer deutlichen Verbesserung der Anpassung gesprochen werden. Eine weitere Verbesserung in der Beschreibung der Mehrstufenversuche kann nur mit einer deutlichen Verschlechterung in der Beschreibung der LCF-Versuche und TMF-Versuche erreicht werden.

Die modifizierten Modellparameter des Verformungsmodells haben auf die Lebensdauervorhersage nur einen geringfügigen Einfluss. Die Sensitivität der Lebensdauervorhersage in Bezug auf die Spannungs- und Dehnungswerte ist relativ gering: bei Verwendung der geänderten Parameter ergeben sich bei der Auswertung des  $D_{TMF}$ -Parameters Änderungen von unter 12 Prozent in der Lebensdauervorhersage. Besonders die TMF-Versuche verschieben sich damit weiter in den nichtkonservativen Bereich. Diese Änderungen sind im Vergleich zum angesetzten Streuband mit Faktor zwei allerdings gering.



Die mit dem Chaboche-Modell berechneten Spannungen und Dehnungen werden zur Voraussage der Lebensdauer mit einem mechanismusbasierten Modell benutzt. Unter LCF- und TMF Belastung ist die Lebensdauer in erster Linie durch das Risswachstum kurzer Risse bestimmt. Das am IWM entwickelte Ermüdungsrisswachstumsmodell geht davon aus, dass die Rissverlängerung in einem Belastungszyklus annähernd gleich der zyklischen Rissöffnung ist. Eine analytische Betrachtung der zyklischen Rissöffnung führt als Annäherung auf den am IWM entwickelten Schädigungsparameter  $D_{TMF}/2/$  und wird an die in den LCF- und TMF Versuchen gemessenen Lebensdauer angepasst. Der Schädigungsparameter  $D_{TMF}$  ist zyklusbezogen definiert als

$$D_{TMF} = \left( 1,45 \frac{\Delta\sigma_{I,eff}^2}{\sigma_{cyc} E} + \frac{2,4}{\sqrt{1+3N}} \frac{\Delta\sigma_{I}^2}{\sigma_{cyc} \Delta\sigma_e} \Delta\epsilon^{vp_e} \right) F$$

mit effektiver Schwingbreite

$$\Delta\sigma_{I,eff} = \frac{3,72}{(3-R)^{1,74}} \Delta\sigma_I$$

$\sigma_{cyc}$  stellt die zyklische Streckgrenze dar, N den Ramberg-Osgood Verfestigungsexponenten der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve, R das Verhältnis zwischen Unter- und Oberspannung und E den Elastizitätsmodul. Der Faktor F im Ausdruck für den  $D_{TMF}$  berücksichtigt den Einfluss der Zeit auf das Risswachstum. Zusätzlich geht hier der Norton Kriechexponent m, die Aktivierungsenergie für Kriechen Q und ein weiterer Anpassungsparameter ein. Bei zeitunabhängigem Materialverhalten wird F zu eins. Die rechnerische Lebensdauer  $N_f$  und  $D_{TMF}$  stehen über ein Potenzgesetz in Zusammenhang,

$$N_f = A(D_{TMF})^{-B}$$

wobei A und B an die Messwerte angepasst werden.

Trägt man die für die einzelnen Versuche berechneten  $D_{TMF}$ -Werte über die experimentellen Anrisszyklenzahlen auf, so liegen diese in einem Streuband mit Faktor 2 um die rechnerische Lebensdauerlinie (Bild B.6).

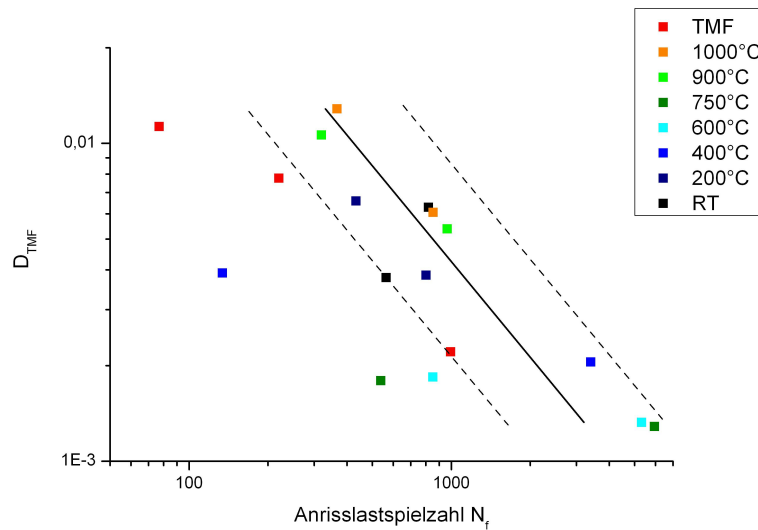


Bild B.6: Verifikation des DTMF-Schädigungsparameters. Die experimentellen Anrisslebensdauern liegen in einem Streuband um die rechnerische Lebensdauerlinie

Zur Verifikation des gesamten Vorgehens war eine anwendungsnahe Musterbauteilsimulation unter TMF Belastung vorgesehen. Hierfür wurde ein geeignetes Bauteil, welches im Testbetrieb der MTU Aero Engines TMF-Ermüdungsrisse gezeigt hatte, identifiziert. Es handelt sich hier um einen Turbinenleitschaufeldrilling. Neben der FE Modellerstellung wurden auch die Temperaturfeldrechnungen und Gaslastrandbedingungen entsprechend der Betriebspunktparameter des Triebwerksversuches durch die MTU Aero Engines für das IWM bereit gestellt. Bild B.7 zeigt das FE-Modell mit einer exemplarischen Bauteiltemperaturverteilung für einen stationären Betriebspunkt.

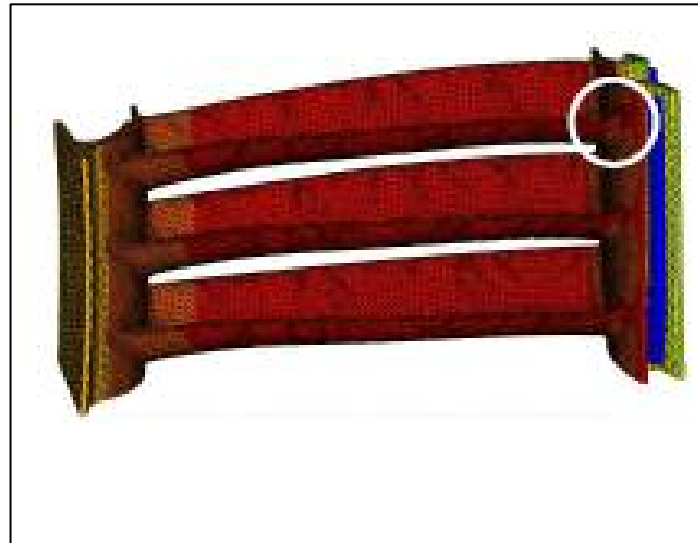


Bild B.7: Turbinenleitschaufeldrilling - stationäre Bauteiltemperaturverteilung

Das Belastungsprofil ist in Bild B.8 dargestellt, es handelt sich um eine Kombination von zwei Blocktestbedingungen mit relativ langen Haltezeiten und einer nachgeschalteten zyklischen TMF Belastung – für die FE Analyse wurden 3 TMF Zyklen gerechnet. Da die langen Blockzeiten eine deutliche Extrapolation der Haltezeitbedingungen der CLCF-Versuche darstellen, wurde das Chaboche-Modell ohne statische Erholung (Parameter  $R=0$ ) für die Verformungsrechnung angewendet. Auf Basis der Verformungsinformation im dritten Zyklus wurde der  $D_{TMF}$  Schadensparameter berechnet und eine Lebensdauervorhersage durchgeführt. Eine vergleichende Rechnung ohne die Blockvorbelastung führen in den TMF-Zyklen zu höheren Spannungs- und plastischen Dehnungsamplituden und somit zu geringeren Lebensdauern.

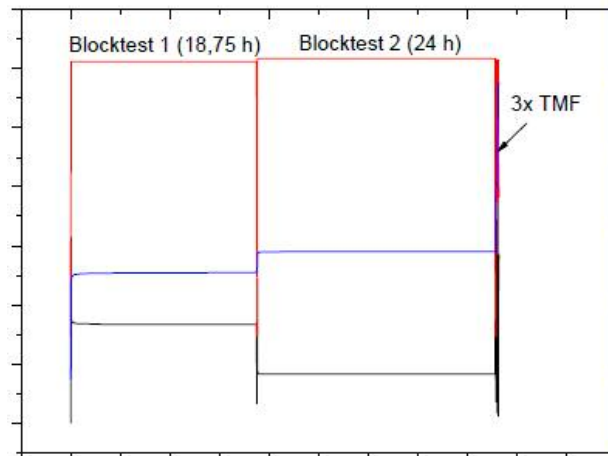


Bild B.8: Belastungsverlauf – Blocktest und TMF-Zyklus Kombination

Die Verteilung der Lebensdauervorhersage auf der Struktur ist in Bild B.9 gezeigt. Die Anrissbildung ist in Ort (Eintrittskante unterhalb des oberen Deckbandes) und Reihenfolge (druckseitige und mittlere Leitschaufel der Drillingskonfiguration) in der Lebensdauerprognose gut wiedergegeben, in dem Triebwerksversuch wurden auf 47 von 49 Drillingen Anrisse nach Abschluss des Triebwerkstest ( $> 400$  hrs,  $> 10^3$  LW) beobachtet. Diese Anrisse wurden teilweise ausgewertet, über die Schwingbruchlinienanzählung wurde in etwa die Anrisslebensdauer bestimmt, die einer Anrisslänge von ca. 1mm entspricht. Die vorhergesagte Lebensdauer liegt in Streuband Faktor 2, wobei die rechnerische Lebensdauervorhersage im Vergleich zum Versuch die Lebensdauer überschätzt.

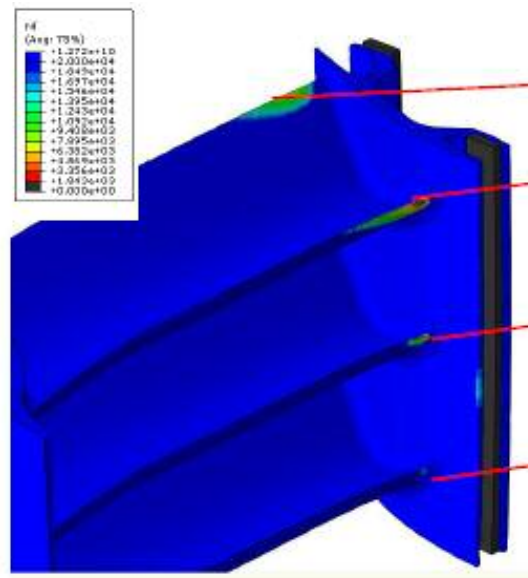


Bild B.9: Lebensdauerverteilung

Eine erste Einschätzung zur Prognosefähigkeit des  $D_{TMF}$  Schadensparameters kann über das Verhältnis der aktuellen zur vorhergesagten Lebensdauer erreicht werden. Zunächst wurde das Verhältnis zwischen vorhergesagter und aktueller Lebensdauer der LCF Anpassungsversuche in einem Wahrscheinlichkeitsnetz auf Basis der empirischen Verteilungsfunktion dargestellt. Das in Bild B.10 dargestellte Wahrscheinlichkeitsdiagramm enthält die LCF-, TMF-Versuche und den Triebwerksversuch als einen zusätzlichen Punkt. Zusätzlich ist noch die Gerade dargestellt, die einer Normalverteilung auf Basis von Mittelwert und Standardabweichung der A/P-Verhältnisse entspricht. Allen TMF-Belastungsbedingungen gemeinsam ist jedoch eine nichtkonservative Vorherhersage, d.h. das Lebensdauerpotential wurde rechnerisch gegenüber dem Versuch, aber innerhalb des Faktors 2, überschätzt. Gegenüber den gängigen Auslegungspraxis unter Verwendung von elastischen FE Rechnungen stellt diese Vorhersage eine deutliche Verbesserung dar.

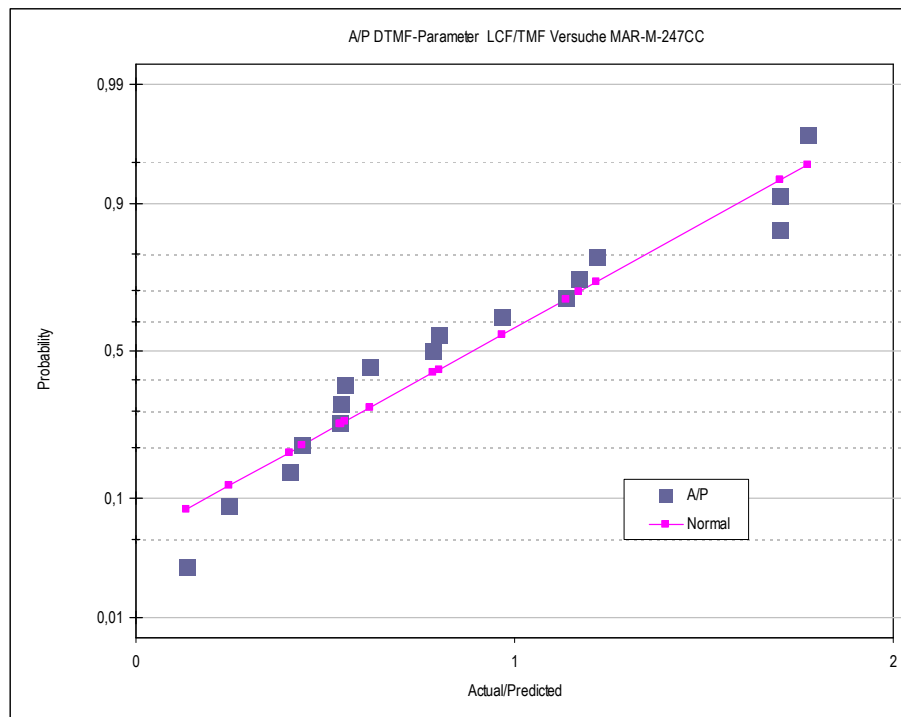


Bild B.10: A/P- Wahrscheinlichkeitsdiagramm für den DTMF-Parameter

Die ABAQUS IWM ThoMat ist bei MTU für zukünftige FEM Strukturberechnungen implementiert.

/1/ Tandler, M., Schlesinger, M., Seifert, T. ,Thermomechanische Ermüdung von Gasturbinenkomponenten aus MAR-M-247', FhG IWM, März 2010, V390/2008

/2/ Schmitt, W., Mohrmann, R., Riedel, H., Dietsche, A., Fischersworing-Bunk, A. „Modelling of the Fatigue Life of Automobile Exhaust Components“, Fatigue 2002, A.F. Blom (ed.), EAMS LDT., U.K. , 787-788, 2002

### 3.3 AP C Innovatives Lebensdauerkonzept

Zielsetzung im Arbeitspaket C war es, über einen Abgleich von analytisch ermittelten Lebensdauern und Schädigungen mit Servicedaten den Grad der Abweichung zwischen Analyse und Serviceerfahrung zu ermitteln. Darauf aufbauend soll durch Anpassung der Lebensdauermodelle die Vorhersagegüte verbessert werden. Hierzu sollte eine Architektur aufgebaut werden, in der sowohl analytische Daten, als auch Triebwerksdaten in einem wissensbasierten Datenbanksystem zusammengeführt sind und entsprechend ausgewertet werden können.

### 3.3.1 Arbeitspaket C1.1: Definition der Anforderungen

Bei der Konzepterstellung für das wissensbasierte Datenbanksystem wurden in einem ersten Schritt die relevanten Attribute, welche in das System Eingang finden sollen, ermittelt. Diese Attribute umfassen sowohl ‚Design-Daten‘, als auch ‚Serien-Daten‘. ‚Design-Daten‘ sind Daten, welche für die Auslegung und Lebensdaueranalysen von Triebwerksschaufeln benötigt werden, aber in der Hauptsache wiederum aus Modellrechnungen und analytischen Simulationen hervorgehen, sowie die aus den Auslegungsanalysen resultierenden Ergebnisdaten.

Unter ‚Serien-Daten‘ sind die Daten zu verstehen, die zum einen die Einsatzbedingungen der Triebwerke reflektieren, zum anderen aber auch die Schädigungsmechanismen und Schädigungsgrade von ‚gelaufenen‘ Bauteilen beschreiben.

Die einzelnen Attribute aus diesen Datengruppen wurden schließlich hinsichtlich ihrer Notwendigkeit bezüglich der Lebensdauerbestimmung und ihrer Verfügbarkeit aus dem Triebwerksbetrieb bewertet. Es stellte sich heraus, dass vor allem bei Serientriebwerken, sowohl die Einsatzbedingungen, als auch Daten zu Bauteilschädigungen nur sehr schwierig, d.h. entweder nicht eindeutig nachvollziehbar oder nur lückenhaft, beschafft werden können. Dies gilt auch für gelaufene Bauteile, die wie die Betriebsdaten meist Eigentum der Airlines sind und nur in Einzelfällen durch Sondermaßnahmen beschafft werden können.

Die beste Zugänglichkeit zu diesen Daten bieten Entwicklungstriebwerke, da diese zum einen bessere Möglichkeiten bieten, während des Betriebes Daten aufzuzeichnen, zum anderen diese aufgezeichneten Daten und die Bauteile aus den Testtriebwerken Firmeneigentum darstellen und frei zugänglich sind.

Davon ausgehend wurde der Ansatz abgeleitet, die Daten aus den Entwicklungstriebwerken zur Kalibrierung, bzw. Weiterentwicklung der vorhandenen Lebensdauermodelle und –ansätze zu nutzen und die Daten aus den Serientriebwerken zum systematischen Aufbau von Betriebserfahrung u.a. auch für Langzeiteffekte zu nutzen.

In einem zweiten Schritt wurden, nach dem Erfassen der relevanten Daten, die Anforderungen an das System erarbeitet. Hierbei wurde das wissensbasierte Datenbanksystem in Bezug auf Datenstruktur, Organisation, Dateneingabe, Daten-Handling, graphische Oberfläche, Datenaufbereitung, bzw. -bearbeitung, sowie hinsichtlich seiner Schnittstellen zu anderen Systemen festgelegt. Die Grobstruktur des wissensbasierten Datensystems ist in Bild C.1 dargestellt.

Auf der Basis der so definierten Anforderungen an das System, wurde ein Lastenheft erstellt als Grundlage für die Programmierarbeiten.

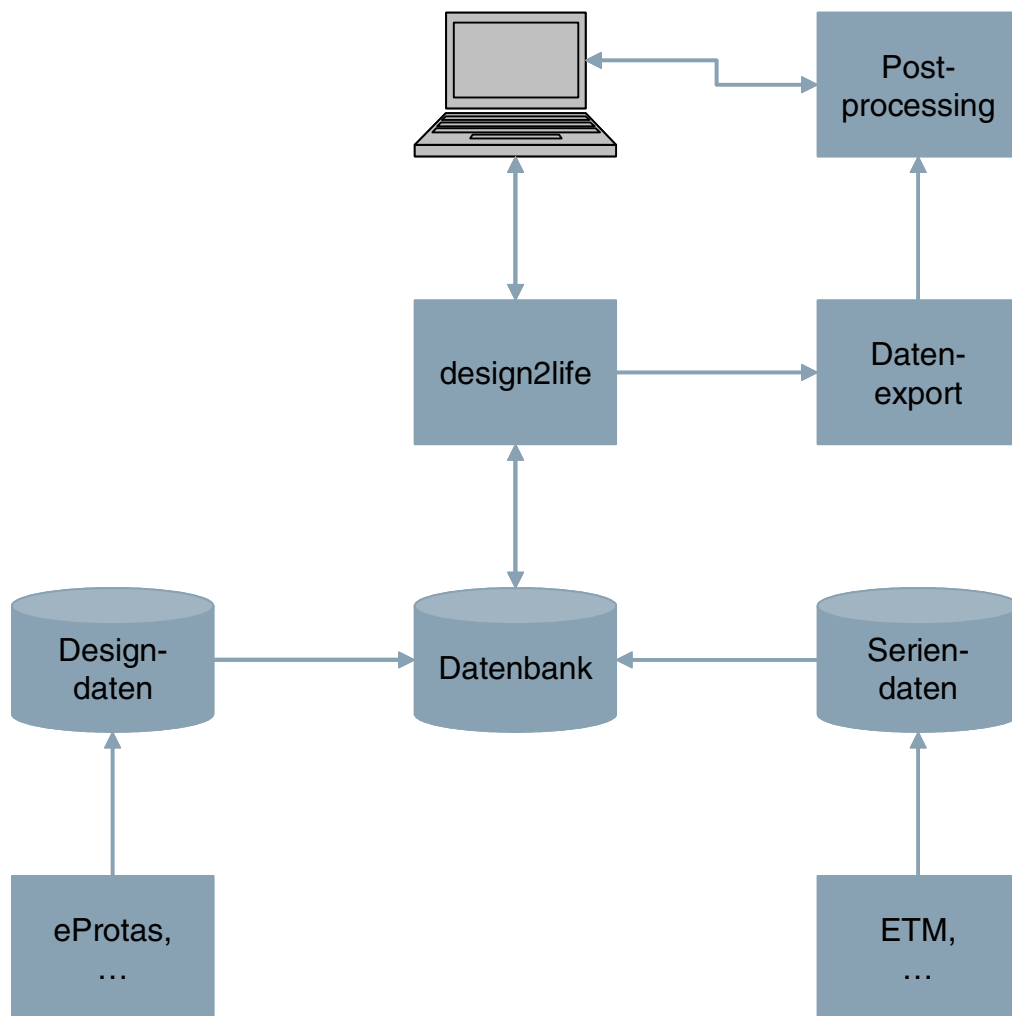


Bild C.1: Grobstruktur des wissensbasierten Datensystems.

Einen wesentlichen Teil der Arbeiten zur Definition der Anforderungen bildete die Festlegung der Datenstruktur und die Erstellung eines Datenmodells.

Im Rahmen der Definition der Datenstruktur wurden die Hierarchieebenen festgelegt. Die oberste Ebene bildete dabei die Triebwerksfamilie, 'Engine family', in der meist mehrere Triebwerke zusammengefasst sind, die einen gewissen Schubbereich (z.B. 84000 lbs – 98000 lbs) abdecken. Darunter befinden sich die verschiedenen Triebwerke ('Engine') der Triebwerksfamilie, welche für einen bestimmten Maximalschub zugelassen sind (z.B. 84000 lbs). In der nächsten Ebene wurde die Datenquelle festgelegt, wo die Herkunft der Daten dokumentiert ist, z.B. Analytik, Serientriebwerksdaten, Entwicklungstriebwerksdaten, etc. In der Ebene 'Operator' kann z.B. ein Triebwerk einer bestimmten Airline, oder ein bestimmtes Entwicklungstriebwerk abgelegt werden, unter 'Mission' finden sich Flug- bzw. Testzyklen und zugehörige Attribute der



Performance und Thermodynamik für das Gesamttriebwerk. Die nächste Ebene in der Hierarchie bezeichnet das jeweilige Modul (z.B. Verdichter oder Turbine usw.) mit den zugehörigen Attributen, welche die Betriebszustände bzw. Lauferfahrungen auf Modulebene beschreiben. Darunter findet sich die Bauteilebene ('Part'), wo Attribute für Schaufeln, Gehäuse, Rotoren und andere Bauteilgruppen abgelegt werden sollen. Diese Datenstruktur von der Triebwerksebene hinunter auf die Bauteilebene ist kompatibel mit den Strukturen von anderen zur Auslegung verwendeten Systemen bei der MTU. Die letzten Ebenen bildeten die unterschiedlichen Schädigungsmechanismen, wie Kriechen und Sulfidation, wofür exemplarisch Attribute definiert wurden, um damit die Programmierung des wissensbasierten Datenbanksystems starten zu können. Die anderen Schädigungsmechanismen wie LCF, TMF und Oxidation sollten zu einem späteren Zeitpunkt ergänzt werden.

Bei der Erstellung des Datenmodells wurden die Details zur Beschreibung jedes einzelnen Attributes in den verschiedenen Hierarchieebenen erarbeitet. Hierbei wurden festgelegt, der Name, die Beschreibung ('Value', z.B. Spannung), der Datentyp (z.B. Zahl, Zahlenfeld, Text, usw.), die Einheit, der Ursprung, sowie der Nutzer. Darüber hinaus wurde eine Klassifizierung der Attribute bezüglich ihrer Ausprägung vorgenommen, d.h. es wurde geprüft, ob sie ausschliesslich in der Auslegung (Analytik) oder im Triebwerksbetrieb, oder in beiden Bereichen angesiedelt sind.

Tabelle C.1 zeigt eine Übersicht der Hierarchieebenen mit den zugehörigen Attributen und deren Beschreibungen bzw. Klassifizierungen.

Name: Engine family Value: V2500 Type: Character	Name: Engine class Value: V2533 Type: Character	Name: Datenquelle Value: EVP Type: Character	Name: Engine Value: Seriennummer Type: Character	Name: Mission Value: Dauerlauf; Typ: tbd Type: Character	Name: Modul Value: LPT Type: Character	Name: Part Value: Stufe 4 Type: Character	Name: Schädigungs-Mechanismus Value: Kriechen (Unwilverhalten) Type: Character	Name: Schädigungs-Mechanismus Value: Sulfidation Type: Character
Name: Laufzeit (since new, since overhaul) Value: Cycle / Hour Unit: [h] Type: integer Origin: Requirement (SOW), EVP, Serie User: struct	Name: T2 Value: Temperatur Unit: [K] Type: array of real numbers Origin: performance table, EVP, Passoff, ETM ? User: aero, sas, thermo	Name: Radiales totale Temperaturprofil (Moduleintritt) Value: x-y-Kurve Unit: [mm; K] Type: array(2,N) of real numbers Origin: Analytisch, Erfahrung, Messung User: aero, struct, thermo	Name: Werkstoff und Zustand Value: MTS1083-1 (A) Unit: -n/a- Type: Character, Hyperlink Origin: Normen User: struct, thermo	Name: Messgenauigkeit Value: Messgenauigkeit Unit: [mm] Type: real number Origin: Messverfahren User: struct	Name: Salzmenge Value: Unit: [mg/cm <sup>2</sup> h] Type: real number Origin: Overhaul shop User: Werkstofftechnik			
Name: T3 (SAS) Value: Temperatur Unit: [K] Type: array of real numbers Origin: performance table, EVP, Passoff, ETM ? User: aero, sas, thermo	Name: Spaltdurchsatz Value: Massenstrom Unit: [%; Wkg] Type: array of real numbers Origin: Analytisch, Erfahrung, Messung User: thermo	Name: Schaufelstandard Value: Teilenummer Unit: -n/a- Type: Character Origin: design, Zeichnung User: aero, sas, struct, thermo Bem.: -> Geometrie, Prehast, Werkstoff, Coatings User: struct	Name: Kennwertmodell Value: Larson-Miller, Sigma, E-Modul, Wärmeausdehnung Unit: -n/a- Type: Tabelle (Character - Links auf WDB oder Searchstring ablegen) Origin: Normen User: struct	Name: Salt-Zusammensetzung Value: Chem. Elemente Unit: -n/a- Type: Character Origin: Overhaul shop User: Werkstofftechnik				
Name: P3 (SAS) Value: Druck Unit: [MPa] Type: array of real numbers Origin: performance table, EVP, Passoff, ETM ? User: aero, sas, thermo	Name: Kammdrucke Value: Druck Unit: [bar] Type: array of real numbers Origin: Analytisch, Erfahrung, Messung User: struct, thermo	Name: Materialetemperatur Value: radiale Verteilung Unit: [K] Type: real number, arrays of real numbers Origin: thermo User: struct	Name: Kriechlebensdauer Value: Zyklen / Stunden Unit: [h] Type: integer Origin: struct User: struct, Project	Name: Gasatmosphäre Value: Chem. Elemente Unit: -n/a- Type: Character Origin: Werkstofftechnik				
Name: W25 Value: Kriechdruckverfälscher-Ausrichterdurchsatz Unit: [kg/s] Type: array of real numbers Origin: performance table, EVP, Passoff, ETM ? User: sas, thermo	Name: radiales totale Druckprofil (Moduleintritt) Value: x-y-Kurve Unit: [mm; bar] Type: array(2,N) of real numbers Origin: Analytisch, Erfahrung, Messung User: aero	Name: Gaslast Value: Linearlast Unit: [N/mm] Type: array of real numbers Origin: aero User: struct, Project	Name: Kriechdehnungen Value: Dehnung Unit: [mm] Type: real number Origin: struct User: struct, Project	Name: Dauer der Schwefelbelastung Value: Stunden Unit: [h] Type: integer Origin: User: Werkstofftechnik				
Name: FARBS Value: Fuel air ratio Unit: - n/a - Type: array of real numbers Origin: performance table, EVP, Passoff, ETM ? User: aero	Name: radiales Drallprofil (Moduleintritt) Value: x-y-Kurve Unit: [mm; deg] Type: array(2,N) of real numbers Origin: Analytisch, Erfahrung, Messung User: aero	Name: Strömungsgeschwindigkeit Value: Geschwindigkeit Unit: [m/s] Type: array of real numbers Origin: aero User: thermo	Name: Spannungen (von Mises) Value: Spannung Unit: [MPa] Type: real number Origin: struct User: struct, Project	Name: Magnetoskopwerte Value: Unit: [T] Type: real number Origin: Overhaul shop, Schadensanalyse User: Werkstofftechnik				
Name: T45 Value: Temperatur Unit: [K] Type: array of real numbers Origin: performance table, Performance Modell User: aero, sas, struct, thermo	Name: Flowpath Value: Heisser idealer Ringraum Unit: [mm] Type: x-y-Kurve, array(2,N) of real numbers Origin: aero User: aero	Name: Zwangsverformungen Value: Winkel, Längen Unit: [deg; [mm] Type: real number Origin: struct User: struct	Name: Bleibende Verformungen Value: Verformung, Winkel Unit: [deg] Type: real number Origin: struct User: struct, Project	Name: Angriffsiefe Value: Unit: [µm] Type: real number Origin: Overhaul shop, Schadensanalyse User: Werkstofftechnik				
Name: P45 Value: Druck Unit: [MPa] Type: real number Origin: performance table, Performance Modell User: aero, sas, struct, thermo	Name: Rotortemperaturen Value: Temperatur Unit: [K] Type: array of real numbers Origin: Analytisch, Messung User: thermo	Name: radiales Temperaturprofil (Gas) Value: x-y-Kurve Unit: [mm; K] Type: array(2,N) of real numbers Origin: aero, thermo User: struct, thermo	Name: Triebwerksreinigung Häufigkeit Value: Häufigkeit Unit: [1/year] Type: integer Origin: Operator User: Werkstofftechnik					
Name: T49 Value: Totaltemperatur Unit: [K] Type: array of real numbers Origin: Messung User: aero, sas, struct, thermo	Name: Gehäusetemperaturen Value: Temperatur Unit: [K] Type: array of real numbers Origin: Analytisch, Messung User: thermo	Name: Heisse Schaufel (Ringraum Auslenkung airfoil) Value: array(N) of real numbers Unit: [mm] Type: x-y-Punkte Origin: aero User: aero	Name: Triebwerksreinigung Wasserzusammensetzung Value: chem. Zusammensetzung Unit: -n/a- Type: Character Origin: Operator User: Werkstofftechnik					
Name: P49 Value: Totdruck -- total pressure Unit: [MPa] Type: array of real numbers Origin: performance table, Performance Modell User: aero, sas, struct, thermo	Name: Laufzeit (since new, since overhaul) Value: Cycle / Hour Unit: [h] Type: integer Origin: Requirement (SOW), EVP, Serie User: struct	Name: Statische Ringraumdrücke Value: Druck Unit: [bar] Type: array of real numbers Origin: aero User: sas	Name: Triebwerksreinigung Typ Value: online / offline Unit: -n/a- Type: Character Origin: Operator User: Werkstofftechnik					
Name: Drehzahl Value: Umdrehungen pro min Unit: [1/min] Type: array of real numbers Origin: Messung User: aero, sas, struct, thermo	Name: Totaltemperaturen Value: Temperaturen Unit: [K] Type: array of real numbers Origin: aero User: sas	Name: Statische Profildruckverteilung Value: Unit: Type: Origin: aero User: struct, thermo						
Name: W45 Value: Eintrittsdurchsatz Unit: [kg/s] Type: array of real numbers Origin: performance table, Performance Modell, Messung User: aero	Name: Spaltgeometrie design Value: Flächen Unit: [mm <sup>2</sup> ] Type: Hyperlink auf CAD-Zeichnung Origin: Konstruktion User: sas	Name: Laufzeit (since new, since overhaul) Value: Cycle / Hour Unit: [h] Type: integer Origin: Requirement (SOW), EVP, Serie User: struct						
Name: W49 Value: Austrittsdurchsatz Unit: [kg/s] Type: array of real numbers Origin: performance table, Performance Modell, Messung User: aero	Name: Spaltgeometrie effektiv Value: Flächen Unit: [mm <sup>2</sup> ] Type: real number Origin: sas, DMBG User: sas	Name: Fliehkraft Value: Kraft Unit: [N] Type: real number Origin: struct User: struct, Project						
Name: Teilsentzen Value: Drehzahl, Temperatur vs. Zeit Unit: [RPM; [K; [s] Type: array(M,N) of real numbers Origin: Messungen User: thermo	Name: Achsschub Value: Kraft Unit: [N] Type: real number Origin: sas User: Konstruktion	Name: Bauteilabweichung Value: Unit: Type: Origin: Lieferant User: Lieferant / Qualitätssicherung, Fachabteilung bewertet						
Name: Inkrementabelle Value: Unit: Type: array of real numbers Origin: Partner, performance, Erfahrungswerte User: thermo		Name: Schaufelzahl Value: Unit: Type: integer Origin: User:						
Name: Performancetable Value: Unit: -n/a- Type: Character Origin: Performance User: thermo		Name: Repair Value: Unit: - Type: Dokument Origin: Overhaul shop User: Fachabteilungen						
		Name: Einspannbedingung Blades Value: DMBG-Regelnummer Unit: -n/a- Type: Character Origin: Analytisch, Erfahrung User: struct	Origin: Serie und Auslegung (2 Ausprägungen)					
		Name: Einspannbedingung Vanes Value: DMBG-Regelnummer Unit: -n/a- Type: Character Origin: Analytisch, Erfahrung User: struct	Origin: nur Serie, EVP					
		Name: Sonstige Ausprägungen Value: Unit: -n/a- Type: Character Origin: Analytisch, Erfahrung User: struct	Origin: nur Auslegung					

Tabelle C.1: Datenstruktur mit Datenmodell des wissensbasierten Datenbanksystems

### 3.3.2 Arbeitspaket C1.2: Programmierung Prototyp

Vor Beginn der Programmierarbeiten zum Prototyp des wissensbasierten Datenbanksystems wurde im Rahmen von Marktanalysen zu Datenbanken mit den unterschiedlichsten Anforderungsprofilen festgestellt, dass kommerzielle Produkte vorhanden sind, welche den bereits definierten Anforderungen im vorliegenden Fall zum größten Teil entsprechen.

In einer detaillierten Bewertung, in der u.a. Datenstrukturkonzepte, Datensicherheit, Dateneingabe und –ausgabe, Datenaufbereitung und –bearbeitung, sowie Schnittstellen zu anderen, bei MTU eingesetzten, Systemen geprüft wurden, stellte sich heraus, dass das System 'GoBench' der Firma Indec die definierten Anforderungen nahezu vollständig erfüllt. Aufgrund des Ergebnisses dieser Bewertung erschien die Neuentwicklung und Programmierung eines eigenen Datenbank- bzw. Expertensystems, wie im Projektantrag vorgesehen, nicht mehr sinnvoll.

Daher wurde beim Fördergeber ein Änderungsantrag eingereicht mit dem die Entwicklung des wissensbasierten Datenbanksystems auf der Grundlage des kommerziellen Systems 'GoBench' beantragt wurde. Dieser Änderungsantrag wurde Anfang 2009 genehmigt und entsprechend umgesetzt.

Die Ergebnisse aus Arbeitspaket C1.1 wurden mit der Firma Indec diskutiert und die Struktur, sowie das Datenmodell wurden in ein Lastenheft umgesetzt, das die Grundlage für die Programmierarbeiten bildete. Es stellte sich dabei heraus, dass es sinnvoll und zweckmässig ist verschiedene Hierarchieebenen, wie sie für die Definition der Anforderungen erarbeitet wurden, zusammenzufassen. Im Einzelnen ergab sich daraus die folgende Struktur.

In der Datenbank GoBench wurde ein Datenpool angelegt, in dem sich die verschiedenen Triebwerke aus einer Triebwerksklasse befinden. In jedem dieser Triebwerke finden sich zwei Bereiche, die Triebwerksebene und die Modulebene. In der Triebwerksebene ist das Gesamttriebwerk unterteilt in die Ebenen 'allgemeine Triebwerksdaten', sowie 'Mission', wobei für die zuerst genannte die Hierarchieebenen 'Engine Family', 'Engine Class', 'Datenquelle', sowie 'Engine' aus Tabelle C.1 zusammengefasst wurden. Der Bereich der Modulebene umfasst einzelne Module eines Triebwerkes. Hier sind zunächst vier verschiedene Module realisiert, der Niederdruckverdichter (NDV), der Hochdruckverdichter (HDV), die Niederdruckturbine (NDT) und die Hochdruckturbine (HDT). Diese Module sind diejenigen Komponenten, welche aufgrund der Datenlage hauptsächlich in das System Eingang finden sollen, die Struktur kann jedoch aufgrund der Flexibilität von GoBench sehr einfach um zusätzliche Module erweitert werden.

In der Ebene unter den Triebwerksmodulen sind die Hierarchieebenen 'Modul' und 'Part' abgelegt, wobei 'Part' allgemein zu verstehen ist und stellvertretend für die Bauteile bzw. Bauteilgruppen eines Moduls steht. Im realisierten Prototyp sind Ebenen für

die Laufbeschaufelung (Blade) und die Leitbeschaufelung (Vane) angelegt. Auch hier kann das System jederzeit sehr einfach um andere Bauteile erweitert werden.

In Tabelle C.1 sind für die Attribute der einzelnen Schädigungsmechanismen eigene Hierarchieebenen vorgesehen. Hierfür hat es sich, ähnlich wie bei den allgemeinen Triebwerksdaten als zweckmäßig erwiesen, diese zusammen zu fassen und bei den Attributen der Bauteile mit abzulegen.

In jeder dieser oben genannten Hierarchieebenen wurden sogenannte FDF's (Freie Daten-Formate) konfiguriert, welche die Detailinformationen bzw. die Attribute aus Tabelle C.1 enthalten. Diese waren im nächsten Schritt zu befüllen.

Bild C.2 stellt eine schematische Darstellung der Struktur in 'GoBench' dar.

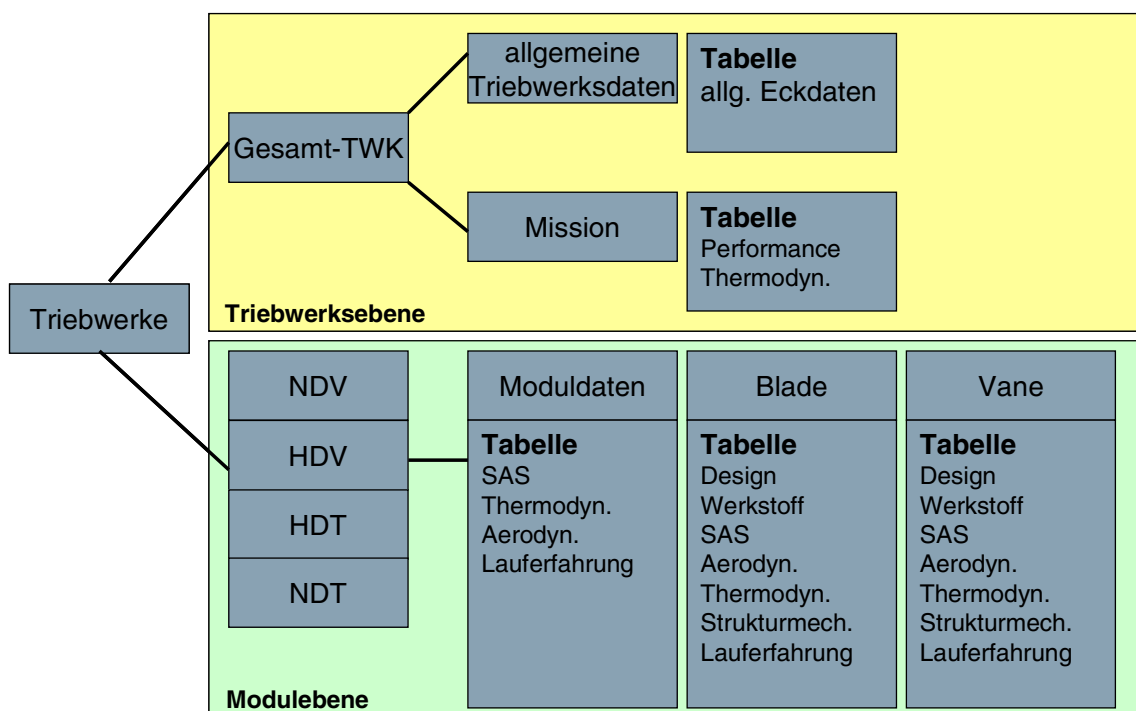


Bild C.2: Schematische Darstellung der Datenstruktur

### 3.3.3 Arbeitspaket C1.3: Befüllen und Testen des Prototyps

Nach Abschluss der Programmierung und nach Installation des Datenbanksystems sollte dieses für bestimmte Triebwerksprogramme mit den festgelegten Attributen befüllt und anschließend getestet werden. Hierfür wurde mit den einzelnen Fachdisziplinen eine Datenerhebung durchgeführt, um festzustellen in welcher Form die Daten vorliegen. Ziel war es möglichst Daten zu verwenden, welche in Exceltabellen abgelegt sind oder schnell und einfach in Exceltabellen übergeführt werden können, da hiermit

das Befüllen durch die Excelexport und –importfunktion des Systems fehlerfrei und mit einem vertretbaren Aufwand durchgeführt werden kann.

Es stellte sich jedoch heraus, dass die Datenmenge, die auf diese Weise zusammengetragen werden konnte, zu gering war, um einen einen Befüllungsgrad zu erreichen, der für ein sinnvolles Testen des System ausreichend war.

Die ursprünglich geplante Befüllung mit Daten einer Turbinenlaufschaufel aus dem Testbetrieb und analytisch ermittelten Daten zum Vergleich der Kriechschädigung durch Verlust der Deckbandvorspannung erschien ebenso nicht sinnvoll, da die Laufhistorie der Schaufeln nicht lückenlos verfügbar war. Damit waren die Unsicherheiten beim Vergleich zwischen Analyse und Schädigung aus dem Triebwerksbetrieb zu groß.

Des weiteren wurde festgestellt, dass teilweise Optimierungsbedarf hinsichtlich der Auswahl der Attribute oder der gewählten Datenformate besteht. Aufgrund der großen Flexibilität des Systems lassen sich die Attribute jedoch relativ einfach anpassen.

Nachdem mit den Daten aus dem Bereich der Turbinenauslegung der Befüllungsgrad zu gering war, konnten aus dem Bereich der Verdichterauslegung Datensammlungen für Lauf- und Leitschaufeln zur Befüllung der Datenbank herangezogen werden. Diese Datensammlungen sind in Excelformaten angelegt, welche der Struktur der FDF's für die bereits angelegten Hierarchieebenen 'Blade' und 'Vane' sehr ähnlich sind, aber natürlich andere Attribute aufweisen. Unter Verwendung der vorhandenen FDF's wurden die FDF's für die Verdichtermodule von der Firma Indec entsprechend ergänzt und befüllt. Mit diesen Daten wurde ein Befüllungsgrad erreicht, der ein Testen des Datenbanksystems ermöglichte.

In der Testphase des Datenbanksystems wurden sowohl die in Arbeitspaket C1.1 definierten Anforderungen, als auch die Umsetzung der Datenstruktur aus Arbeitspaket C1.2 überprüft, ebenso wie die Richtigkeit der implementierten Daten.

Der Prototyp ist aktuell als Datenpool mit dem Namen 'design2life – Pool' in einer bereits bestehenden Installation ausgeführt, kann aber auch in eine eigenständige Installation übergeführt werden. Die einzelnen Daten-Pools sind grundsätzlich voneinander unabhängig, deren Inhalte können im Bedarfsfall miteinander verlinkt werden, dies war jedoch nicht im Anforderungsprofil definiert.

Bild C.3 zeigt einen screen shot aus dem 'design2life – Pool' für das Triebwerk PW4084, aus dem die Umsetzung der Datenstruktur aus Arbeitspaket C1.2 in der Datenbank zu erkennen ist.

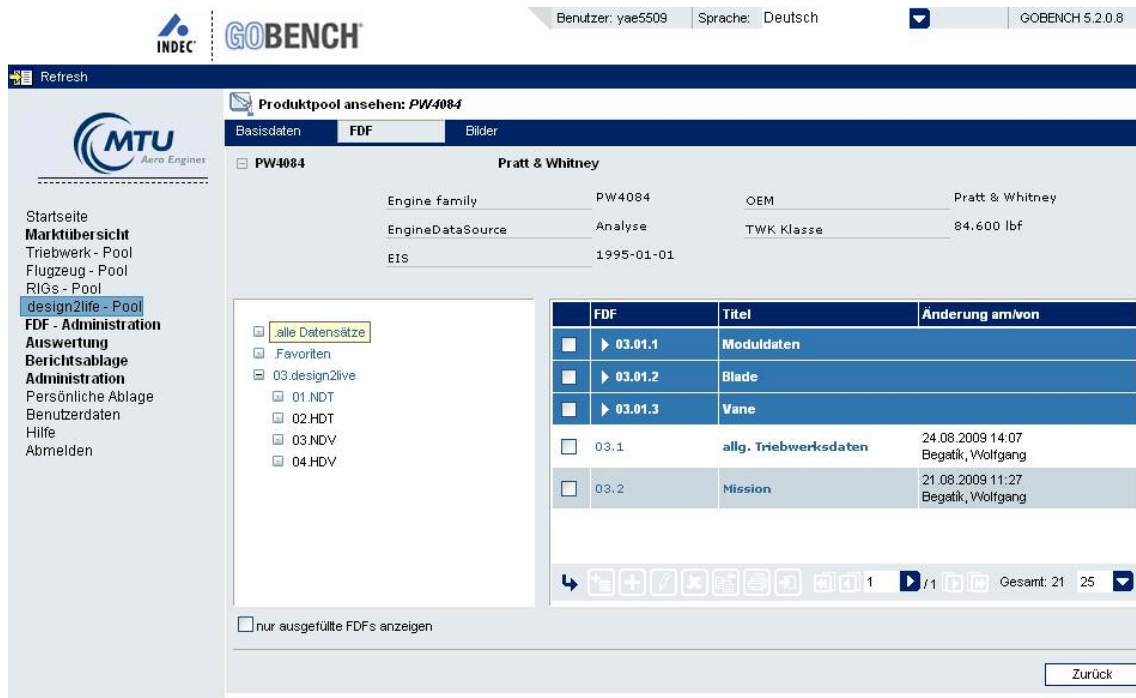


Bild C.3: Screen shot aus der Triebwerksebene 'GoBench' für ein Beispiel Triebwerk

Weitere Themen, welche das Anforderungsprofil abdecken, sind im Folgenden dargestellt.

Bei der Dateneingabe ist es möglich Werte, Listen Tabellen, Dokumente, Bilder und auch Links einzugeben, wenn die entsprechenden Berechtigungen zugewiesen sind. Ebenso können Daten aus Exceltabellen importiert werden. Bei großen Datenmengen ist es sinnvoll einen Import durch die Firma Indec durchführen zu lassen.

Zum Thema Organisation besteht die Möglichkeit ein detailliertes Rollenkonzept zu realisieren. Das System bietet die Rechte 'Lesen', 'Schreiben' und 'Administrieren'. Mit dem Recht 'Administrieren' ist es möglich FDF's anzulegen mit dem Recht 'Schreiben' können FDF's geändert werden, Daten eingegeben werden. Die Zugriffsrechte werden durch Gruppen geregelt, denen unterschiedliche Rechte zugeordnet werden sind. Anwender können die Datenbank über eingetragene Userkeys nutzen und entsprechend der gewünschten Zugriffsrechte in eine oder mehrere Gruppen aufgenommen werden. Dies ermöglicht ein sehr granulares Konzept beim Einrichten der Rechte bis hin zu einzelnen FDF's, wodurch die erforderliche Sicherheit, je nach Sensitivität der Daten, gewährleistet ist.

Die Graphische Oberfläche entspricht weitestgehend der MTU Corporate Identity. Es handelt sich um eine Web-basierte Oberfläche, welche den üblichen defacto-Standards entspricht. Es existiert ein Hilfesystem, wie man es aus der Microsoft-Welt kennt.

Den Anforderungen an das Datenhandling entspricht das System durch die Möglichkeit aus mehreren Auswahlfeldern (maximal 7) Suchabfragen zu kombinieren. Die Suchabfragen können gespeichert und wieder verwendet werden. Dies bietet die Möglichkeit wesentliche Ergebnisse von Analysen oder wesentliche Daten aus dem Triebwerksbetrieb in einheitlichen, zusammenfassenden Übersichten zu dokumentieren. Mit den Ergebnissen von Suchabfragen können vergleichende Auswertungen durchgeführt werden, welche entweder in Tabellen oder in verschiedenen Diagramm-Typen, wie Balken-, Linien- und Kreisdiagramm, angezeigt, bzw. auch gedruckt oder als pdf-Datei abgespeichert werden können. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit diese Ergebnisse nach Excel zu exportieren und dort entsprechende Darstellungen zu erzeugen, oder die Daten weiterzuverarbeiten. Basierend auf den Ergebnissen einer Suche kann auch ein Bericht in pdf generiert werden. Eine weitere hilfreiche Funktion bietet 'GoBench' durch die Möglichkeit, im System abgelegte Daten durch nutzerdefinierte Funktionen miteinander zu verknüpfen.

Ein Beispiel eines Vergleiches aus einer Suchabfrage zeigt Bild C.4, in dem radiale Temperaturverteilungen zweier Schaufeln aus verschiedenen Triebwerken gegeneinander in einem Liniendiagramm geplottet sind.

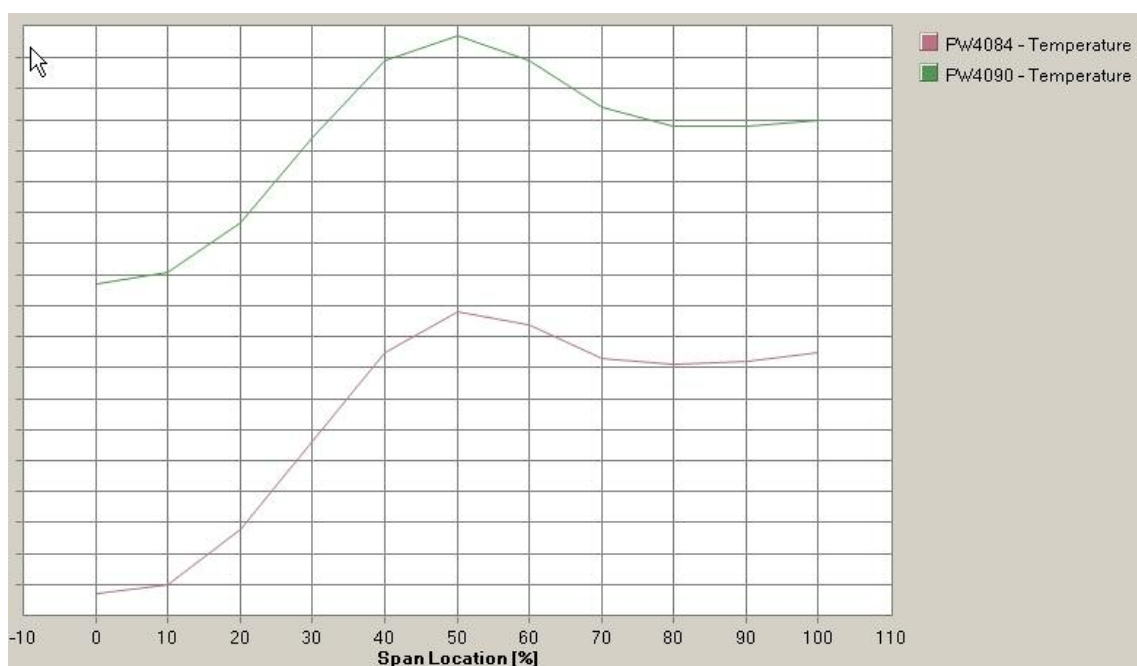


Bild C.4: Vergleich Temperaturverteilungen

Neben der Selektion und dem Vergleich von Daten bietet 'GoBench' in seinem Auswertungsmodul die Möglichkeit Korrelationen und statistische Auswertungen durchzuführen. Diese Funktionen sind vor allem bei sehr großen Datenmengen hilf-

reich, um beispielsweise Trends erfassen zu können oder auch Streubänder zu ermitteln.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass dieses Datenbanksystem für MTU einen Mehrwert darstellt, da Auslegungsdaten, sowie Daten zu Lauferfahrungen aus Serien- und Entwicklungstriebwerken zentral und vor allem auch fachübergreifend verfügbar gemacht werden können. Darüber hinaus erleichtert so ein System, aufgrund seiner Flexibilität, die Datenablage bzw. Erweiterungen der bestehenden Datenbasen, welche zudem nicht einheitlich und teilweise in verschiedenen Tools angelegt sind.

Die Erfahrungen bei der Datenerhebung in diesem Technologieprogramm haben gezeigt, dass sich ein Abgleich gerechneter Lebensdauern mit Schädigungsdaten aus Serientriebwerken sehr schwierig gestaltet, da in den meisten Fällen Belastungshistorie und Belastungsprofile nur lückenhaft vorhanden, bzw. nicht nachvollziehbar sind. Zudem sind sämtliche Daten aus den Serientriebwerken Eigentum der Betreiber und vertraulich und daher entweder nicht, bzw. nur durch Sondervereinbarungen verfügbar. Für analytisch ermittelte Daten aus älteren Triebwerksprogrammen gilt, dass diese aufgrund der Weiterentwicklung von Prozessen und Lebensdauermodellen für die Ablage in dem Datenbanksystem nicht mehr relevant sind, zu dem ist der Aufwand für ein systematisches Zusammentragen der Daten und für die Befüllung sehr hoch und dadurch nicht zu rechtfertigen. Das Tool enthält aus den oben genannten Gründen in der aktuellen Konfiguration im Wesentlichen analytisch ermittelte Daten, womit ein Datenabgleich und eine daraus abgeleitete Verbesserung von Lebensdauervorhersagen noch nicht möglich ist. MTU verfolgt daher den folgenden Ansatz:

Daten aus Serientriebwerken sollen angelegt werden, falls die Datenbasis sinnvoll auswertbar ist. Bei Schädigungsmechanismen, für die keine analytischen Lebensdauermodelle verfügbar sind, wie z.B. Sulfidation, soll eine zentrale Erfahrungsdatenbank angelegt werden.

Die Kalibrierung gerechneter Lebensdauern für Schädigungsmechanismen wie Kriechen oder TMF und die daraus folgende mögliche Optimierung der bestehenden Prozesse und Lebensdauermodelle kann sinnvoll nur mit Daten aus Testtriebwerken betrieben werden.

Ein systematisches Aufbereiten und Erfassen von Triebwerksdaten und analytischen Daten soll für aktuelle Triebwerksprogramme und für zukünftige Triebwerksprogramme auch als Bestandteil des Auslegungsprozesses erfolgen, womit sowohl eine Kalibrierung, als auch eine Verbesserung von Lebensdauervorhersagen möglich werden.