

# Lebensdauerbewertung von Turbinenkomponenten

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Seifert**

Fakultät Maschinenbau  
und Verfahrenstechnik (M+V)

Badstraße 24  
77652 Offenburg  
Tel 0781 205-436  
thomas.seifert@hs-offenburg.de

**1976:** Geboren in Lindau im Bodensee  
**1996:** Studium des Maschinenbaus an der  
Berufsakademie Ravensburg  
**1999:** Projektingenieur bei der Nothelfer GmbH  
und der Aich & Co. GmbH  
**2001:** Studium der Rechnerischen Werkstoff- und  
Strukturmechanik an der Universität Stuttgart  
**2003:** Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut  
für Werkstoffmechanik IWM  
**2008:** Promotion an der Universität Karlsruhe (TH)  
**2009:** Leiter der Gruppe „Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik“  
am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM  
**Seit 2011:** Professor an der Hochschule Offenburg  
**Lehrgebiete:** Werkstofftechnik, Werkstoffmechanik, Festigkeitslehre,  
Schadenskunde  
**Forschungsgebiete:** Simulation und Lebensdauerbewertung von thermisch  
und mechanisch beanspruchten Bauteilen und Komponenten



## 3.4 Lebensdauerbewertung von Turbinenkomponenten

Prof. Dr.-Ing. Thomas Seifert  
Dipl.-Ing. (FH) Michael Schlesinger

### Abstract

Components of thermal turbo-machines are exposed to high thermal and mechanical loads, resulting in creep and fatigue damage of the used materials. Thus, reliable computational methods for the design of the components are needed. In a research project the damage mechanisms of the nickel-base superalloy Inconel718 are investigated and models for life prediction of turbine components are derived which can be applied by engineers in the development phase of the components.

### Einleitung

Bauteile in Dampfturbinen, stationäre Gasturbinen und Fluggasturbinen sind hohen Beanspruchungen ausgesetzt. Wenn die Turbinen gestartet werden, erwärmen sich die Bauteile im „heißen Bereich“ der Turbine auf über 1000 °C. Damit die Bauteile bei diesen Temperaturen nicht einfach dahinschmelzen, werden spezielle hochtemperaturfeste Legierungen verwendet, wie beispielsweise Nickelbasis-Superlegierungen. Die hohen Temperaturschwankungen die beim Starten und beim Abschalten der Turbine auftreten, machen aber auch diese Werkstoffe auf Dauer nicht mit. Beim Aufheizen dehnt sich das Material aus, beim Abkühlen zieht es sich wieder zusammen. Dieses Hin- und Her-Verformen führt dazu, dass der eingesetzte

Werkstoff unter „Stress“ kommt und Spannungen im Werkstoff auftreten. Diese Spannungen können dazu führen, dass sich Risse im Material bilden, die unter der zyklischen Belastung (wiederholtes Starten und Abschalten) wachsen, bis das Bauteil kaputt ist. Der Fachmann spricht dabei von der thermo-mechanischen Ermüdung (Thermomechanical Fatigue, TMF) des Werkstoffs.

Doch nicht nur durch die Temperaturschwankungen beim Starten und Abschalten werden die Turbinenbauteile stark beansprucht. Auch im stationären Flugbetrieb liegen hohe Temperaturen vor, wodurch der Werkstoff sich verformt. Dabei spricht man vom Kriechen des Werkstoffs, welches ebenfalls zu einer Werkstoffschädigung führen kann. Die Belastungen einer Turbine führen also zur Kriech- und Ermüdungsschädigung des Werkstoffs. Daher müssen beispielsweise Flugturbinen nach einer bestimmten Anzahl an Flugstunden zur Inspektion, wobei die hoch beanspruchten Bauteile auf Risse und unzulässige Verformungen untersucht werden.

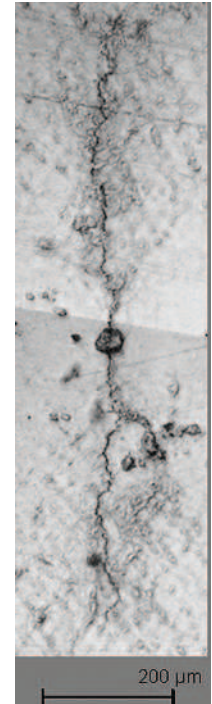
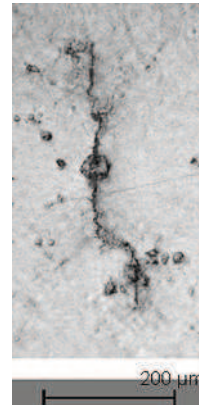
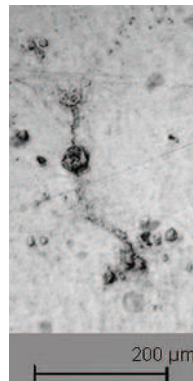
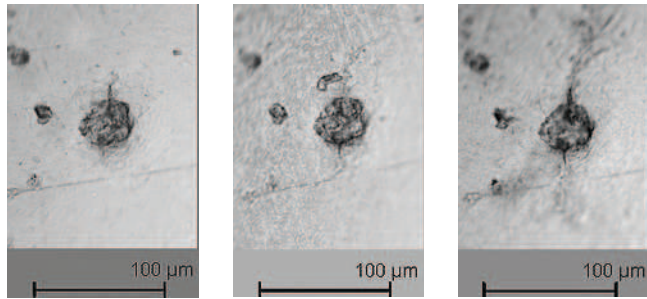
Damit ein stets zuverlässiger Betrieb der Turbinen möglich ist, benötigen die Entwicklungsingenieure verlässliche Methoden zur Berechnung der Spannungen und Dehnungen in den hoch beanspruchten Turbinenkomponenten wie auch zur Bewertung deren Lebensdauer. In einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) geförderten Forschungsvorhaben werden an der

Hochschule Offenburg zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM und der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart (MPA Stuttgart) verbesserte Berechnungsmodelle zur Bewertung von kriechermüdungsbeanspruchten Turbinenkomponenten aus der Nickelbasis-Superlegierung Inconel718 entwickelt.

Der Schwerpunkt der Arbeiten an der Hochschule Offenburg und am Fraunhofer-IWM liegt in der experimentellen Untersuchung der Schädigungsmechanismen bei thermomechanischer Ermüdung und der Entwicklung von fortschrittlichen Werkstoffmodellen zur Lebensdauervorhersage. Verlässliche Vorhersagen können meist nur dann getroffen werden, wenn verstanden wird, welche physikalischen Mechanismen bei der Schädigung des Werkstoffs ablaufen.

### Schädigungsmechanismus Mikrorisswachstum

Die zyklische Beanspruchung des Werkstoffs durch die Temperaturschwankungen beim Starten und Abschalten der Turbine führt recht bald zur Bildung von kleinen, wenige Mikrometer großen Rissen, sogenannten Mikrorissen. Dies ist typisch bei der Werkstoffermüdung im Bereich der Kurzzeitfestigkeit (Low-Cycle Fatigue, LCF) und bei thermomechanischer Ermüdung TMF. Die Mikrorisse können dann wachsen, bis eine für das Bauteil relevante Größe erreicht ist und das Bauteil ausgetauscht werden muss. Der lebensdauerbegrenzende Schädigungsmechanismus, der daher unter-



**Lebensdauer - Risslänge**

22%	56%	67%	78%	89%	100%
46 µm	77 µm	143 µm	304 µm	974 µm	3794 µm

Abb. 3.4-1: Mit der Replika-Methode gemessenes Risswachstum unter LCF-Beanspruchung bei 650 °C und einer Dehnrates von  $5 \cdot 10^{-5}$  1/s

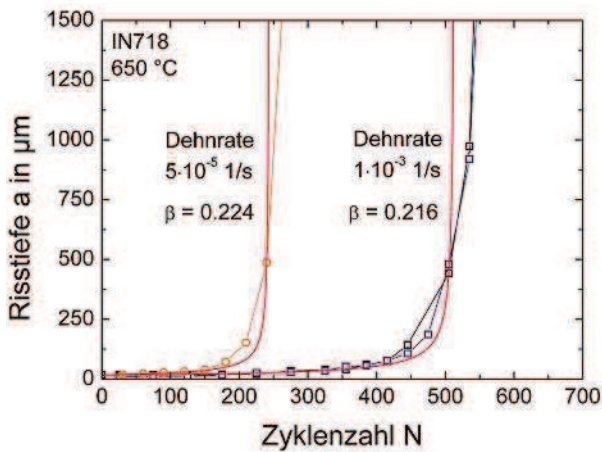


Abb. 3.4-2: Entwicklung der Risstiefe über der Zyklenzahl unter LCF-Beanspruchung bei 650 °C und unterschiedlichen Dehnrates (Linien mit Symbolen: Messergebnisse; Linien ohne Symbole: Modell)

sucht wird, ist das Risswachstum im Bereich der Kurzzeitermüdung LCF und der thermomechanischen Ermüdung TMF.

Um das Risswachstum der Nickelbasis-Superlegierung verstehen zu können wurden im Labor Werkstoffproben unter den zyklischen Beanspruchungen getestet, wie sie ähnlich in den hoch beanspruchten Bauteilen auftreten. In den Laborversuchen wurde das Wachstum der Mikrorisse an der Oberfläche der getesteten Proben in Abhängigkeit der Lastspielzahl, also der Anzahl an Beanspruchungszyklen, die die Laborprobe erfahren hat, aufgezeichnet. Hierzu wurde die Replika-Methode eingesetzt.

In regelmäßigen Intervallen wird der Laborversuch unterbrochen und eine in Aceton angelöste Acetatfolie auf der Probenoberfläche angebracht. Somit entsteht ein Negativ des Risses, ein Replika, auf der Acetatfolie, und die Oberflächenrisslänge kann auf diesem Replika ausgemessen werden. Durch das wiederholte Aufbringen der Folie während des Ermüdungsversuchs kann somit die Oberflächenrisslänge in Abhängigkeit der Zyklenzahl und somit das Risswachstum dargestellt werden. In Abbildung 3.4-1 ist beispielhaft das mit der Replika-Methode gemessene Wachstum eines Oberflächenrisses bei einer vorgegebenen Belastung zu verschiedenen Stadien der Lebensdauer dargestellt.

Geht man davon aus, dass es sich bei einem Ermüdungsriss um einen halb-kreisförmigen Oberflächenriss handelt, so entspricht die gemessene Risslänge  $2a$  in etwa der doppelten Risstiefe  $a$ . In Abbildung 3.4-2 sind die gemessenen Risswachstumskurven für zwei unterschiedliche Dehngeschwindigkeiten abgebildet (Linien mit Symbolen). Bereits nach wenigen Belastungszyklen sind wachstumsfähige Mikrorisse vorhanden. Die Entwicklung der Risstiefe über der Zyklenzahl lässt ein deutlich schnelleres Risswachstum bei niedriger Dehngeschwindigkeit erkennen. Die Lebensdauer der mit der langsamen Dehnrates getesteten Probe P16 fällt dadurch um ca. Faktor 2 kleiner aus.

**Mechanismenbasiertes Risswachstumsmodell**

Zur Vorhersage der Lebensdauer im Bereich der Kurzzeitermüdung LCF und der thermomechanischen Ermüdung TMF wurde ein mechanismenbasiertes Modell für Mikrorisswachstum verwendet. Unter „mechanismenbasiert“ wird dabei verstanden, dass die physikalischen Vorgänge bei der Schädigung im Modell abgebildet werden. Im Modell wird berechnet, wie weit sich ein Riss im Material während eines Temperaturzyklus wie ein Spalt öffnet. Diese Rissöffnung ist daher ein wichtiges Maß, da

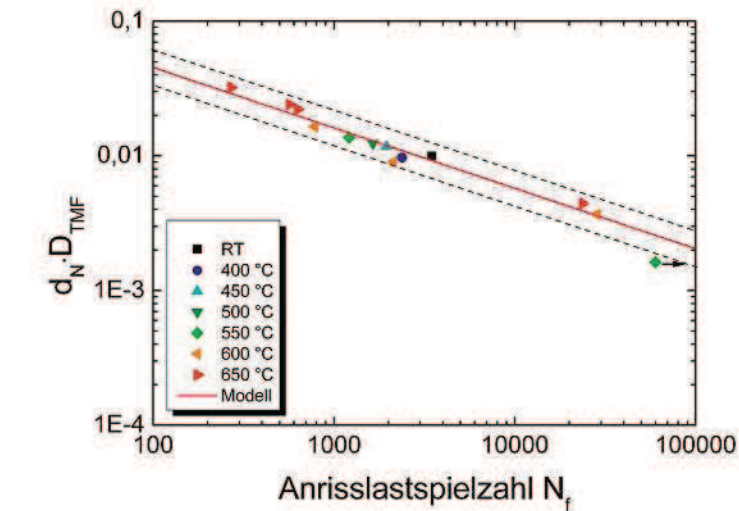
ein Riss in einem Belastungszyklus ungefähr so weit wächst, wie er in diesem Zyklus auf- und zugeht. Mathematisch wird dieser Zusammenhang so formuliert, dass der Rissfortschritt pro Zyklus  $da/dN$  mit der zyklischen Rissöffnung  $\Delta CTOD$  korreliert [1, 2]:

$$\frac{da}{dN} = \beta \Delta CTOD^B$$

$B$  und  $\beta$  sind werkstoffspezifische Kennwerte, die für die Nickelbasis-Superlegierung extra bestimmt wurden. Die zyklische Rissöffnung  $\Delta CTOD$  wurde über einen Schädigungsparameter, der als  $D_{TMF}$  bezeichnet wird, abgeschätzt, der auf bruchmechanischen Gesetzmäßigkeiten basiert [3].

Mit Hilfe des mathematischen Zusammenhangs können die gemessenen Rissfortschrittskurven nachgerechnet werden. Die Ergebnisse der Berechnung zeigt Abbildung 3.4-2. Die im Versuch mit der Replika-Methode gemessenen Rissfortschrittskurven (Linien mit Symbolen), und die mit dem mechanismenbasierten Modell berechneten Rissfortschrittskurven (Linien ohne Symbole) stimmen gut überein. Dabei wird sowohl der Verlauf der Kurven als auch der Einfluss der Dehngeschwindigkeit mit dem Modell gut abgebildet. Die Berechnungsingenieure sind mit dem neuen Modell nun in der Lage das Wachstum von Mikrorissen in den Bauteilen zu bewerten, effizientere Turbinen zu entwerfen und die regelmäßigen Inspektionen besser zu planen.

Über das Risswachstumsmodell können des Weiteren Aussagen zur Lebensdauer getroffen werden. Der Schädigungsparameter  $D_{TMF}$  korreliert nämlich mit der Anrisslastspielzahl, also der Anzahl an Belastungszyklen, die der Werkstoff er-



**Abb. 3.4-3:** Abschätzung der Anrisslastspielzahl in LCF- und TMF-Versuchen mit dem mechanismenbasierten Modell

tragen kann, siehe Abbildung 3.4-3. Alle Versuche, die bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt wurden, liegen innerhalb eines Streubands mit Faktor zwei (gestrichelte Linien) um die Modellgerade. Mit dem Risswachstumsmodell können die Ingenieure also den Schädigungsparameter für jede Stelle eines Bauteils ausrechnen und dann eine Aussage zur Lebensdauer des Bauteils treffen.

#### Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem mechanismenbasierten Risswachstumsmodell können die experimentell ermittelten Rissfortschrittskurven wie auch die Lebensdauern der Proben gut abgebildet werden. Das Modell wird im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens im Hinblick auf Kriechschädigung erweitert und in ein Berechnungsprogramm (Finite-Elemente-Programm) implementiert, das in der Industrie eingesetzt wird. Damit soll das neu entwickelte Modell unmittelbar den Entwicklungsingenieuren zur Bauteilauslegung zur Verfügung stehen.

#### Referenzen/References

- [1] Schweizer, C.; Seifert, T.; Schlesinger, M.; Riedel, H. (2007), Korrelation zwischen zyklischer Risspitzenöffnung und Lebensdauer, in DVM-Bericht 239: Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge; Bruchmechanik und Bauteilsicherheit, 237-346
- [2] Tvergaard, V.; Hutchinson, J.W. (2002), Crack growth per cycle by blunting and void growth, In: Fatigue 2002 - Proceedings of the Eighth International Fatigue Congress held 3-7 June 2002, Stockholm, Sweden (Ed. A.F. Blom), 107-116
- [3] Schmitt, W.; Mohrmann, R.; Riedel, H.; Dietsche, A.; Fischersworring-Bunk, A.: Modelling the fatigue life of automobile components, Fatigue 2002 – Proceedings of the Eighth International Fatigue Congress held 3-7 June 2002, Stockholm, Sweden (Ed. A. F. Blom)