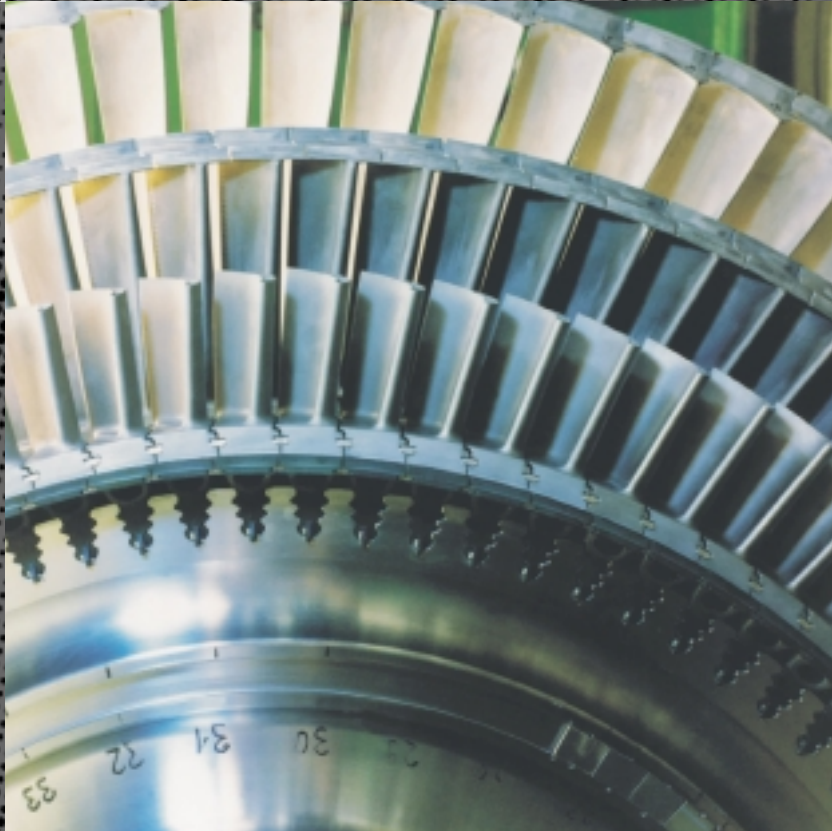


Eberhard Roos
Jürgen Föhl
Markus Rauch

Moderne Materialprüfung





Die moderne Materialprüfung umfasst nach wie vor zerstörende und zerstörungsfreie Prüftechniken. Die zerstörungsfreien Prüftechniken liefern Informationen über Fehlstellen im Bauteil, die die Belastungsfähigkeit reduzieren, während die zerstörenden Prüftechniken unabdingbar sind für die Ermittlung von Werkstoffkennwerten für die Auslegung und die Sicherheitsanalyse von Bauteilen. Diese traditionelle Aufgabe der Materialprüfung hat im Laufe der Jahre einen Evolutionsprozess durchgemacht, der wesentlich durch die Entwicklung im Bereich der Prüfgeräte in Verbindung mit der Entwicklung der Techniken der Informationsverarbeitung und der Software geprägt wurde.

Mit dieser modernen Geräte- und Messtechnik ist die experimentelle Ermittlung von Werkstoffgesetzen möglich, die das Werkstoffverhalten so erfassen, dass es in numerischen Berechnungsverfahren eingesetzt werden kann, um auf dieser Grundlage das Verhalten eines Bauteiles unter allen möglichen Betriebsbedingungen simulieren zu können. Das einfachste Werkstoffgesetz ist die Fließkurve des Zugversuchs, die jedoch ab Einschnürbeginn von einem mehrachsigen Spannungszustand beeinflusst wird. Durch Vergleich einer Fließkurve des Zugversuchs mit der Fließkurve des Druckversuchs kann das Werkstoffverhalten festgelegt werden. Ähnliches gilt für das Werkstoffverhalten bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten und bei wechselnden Belastungen, insbesondere im überelastischen Bereich. Hinzu kommt nun die Möglichkeit, das Werkstoffverhalten im Nano- und Mikrostukturbereich durch den Einsatz von Höchstleistungsrechnern in Abhängigkeit von der chemischen Analyse, den Herstellungs-, Verarbeitungs- und Betriebsbedingungen zu simulieren.

Hierfür sind Informationen über die Mikrostruktur wie unterschiedliche metallurgische Phasen, Korngrößen, Ausscheidungen nach Größe, Art und Verteilung sowie Versetzungsdichte erforderlich, die zum Beispiel mit den heutigen Rasterelektronenmikroskopen oder Transmissionselektronenmikroskopen und den Zusatzeinrichtungen quantitativ ermittelt werden können.

Damit sind Veränderungen und deren Ursache identifizierbar, und darauf basierend können zielorientierte Optimierungsmaßnahmen eingeleitet werden.

Eberhard Roos / Jürgen Föhl / Markus Rauch ■
Moderne Materialprüfung ■

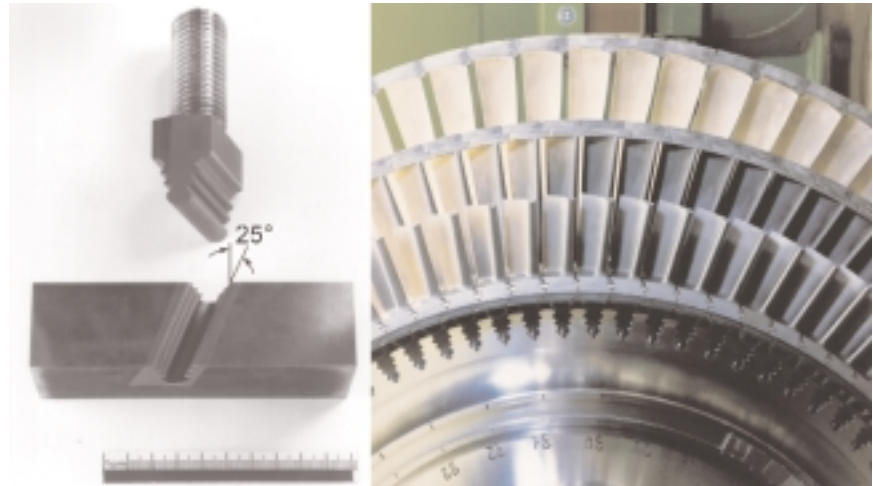


Abb. 1: Dreistufiger Modellkörper mit 25° Anstellwinkel und entsprechende Verbindung einer Gasturbine.

Nachfolgend soll über die Verknüpfung moderner Materialprüfung mit fortgeschrittenen Werkstoffgesetzen, implementiert in Softwaresysteme für Hochleistungsrechner, am Beispiel der Einbindung einer Turbinenschaufel in den Rotor einer Turbine gezeigt werden, welche Verbesserungspotenziale erschlossen werden können.

Turbinen unterliegen im Betrieb komplexen mechanischen, thermischen und chemischen Beanspruchungen. Bei der Lebensdauerbewertung der An- und Abfahrvorgänge steht die Verbindung zwischen Schaufel und Scheibe bei Gasturbinen, kurz Schaufel-Scheibe-Verbindung beziehungsweise die Schaufel-Welle-Verbindung bei Dampfturbinen, im Mittelpunkt. Dabei kommt es unter Umständen zu beträchtlichen Ermüdungs- oder Kriechermüdungsbeanspruchungen, die an den hochbelasteten Stellen zu Wechselplastifizierungen führen. Für eine Lebensdauervorhersage sind die bislang verfügbaren konventionellen Berechnungsansätze unbrauchbar, da die wesentlichen Einflüsse auf die Schädigung nur unzureichend oder gar nicht berücksichtigt werden.

Ein Ausweg bietet sich in der Entwicklung eines Berechnungsverfahrens auf der Basis von inelastischen FE-Analysen an /1/. Dabei werden komplexe Werkstoffmodelle benötigt, die das statische, zyklische und viskoplastische Werkstoffverhalten berücksichtigen. Das Ziel derzeitiger Forschungsarbeiten ist es, ein fortschrittliches Berechnungskonzept auf den Bereich typischer Betriebsbeanspruchungen zu erweitern und zu verifizieren /2/. Als Werkstoffe werden für Gasturbinen in diesem Temperaturbereich Nickel-Basis-Legierungen verwendet. Die im Folgenden diskutierte Scheibe besteht aus der geschmiedeten Legierung IN 718, die Schaufeln aus der polykristallinen Feingusslegierung IN 939.

Experimente

Die Umsetzung des Berechnungskonzepts verlangt entsprechende Werkstoffkennwerte und -gesetze. Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen zur Basischarakterisierung des Werkstoffes (Zugversuche, so genannte „Low-Cycle-Fatigue (LCF)“ Versuche sowie Zeitstandversuche) durchgeführt. Die isothermen Versuche werden bei der für stationäre Gasturbinen im Bereich der Schaufel-Scheibe-Verbindung maßgeblichen Temperatur von 550 °C durchgeführt. Dabei werden „Masterkurven“ /3/ unter Verwendung des Larson-Miller-Parameters eingesetzt, um Kriechkurven für sämtliche Versuchstemperaturen angeben zu können.

Um das Bauteilverhalten simulieren und verstehen zu können, wurden zusätzlich Versuche mit praxisrelevanten Belastungs-Zeitverläufen, ebenfalls LCF-Versuche, an bauteilähnlichen Modellkörpern durchgeführt. Bei den Modellkörpern für die Schaufel-Scheibe-Verbindungen von Gasturbinen werden dreistufige sowie vierstufige tannenbaumförmige Profile eingesetzt (Abb. 1).

Zur Durchführung dieser LCF-Versuche wurde eine spezielle Vorrichtung konzipiert (Abb. 2). Damit ist es möglich, die komplexe Beanspruchung bei Schaufel-Scheibe-Verbindungen von Gasturbinen durch einfache Modellkörper abzubilden. Der mehrachsige Spannungszustand wird durch eine schwellende Zugbelastung der Schaufel, die Übertragung der Belastung auf die Scheibe durch die Kontaktstellen sowie durch eine möglichst realitätsnahe Anordnung der Lager

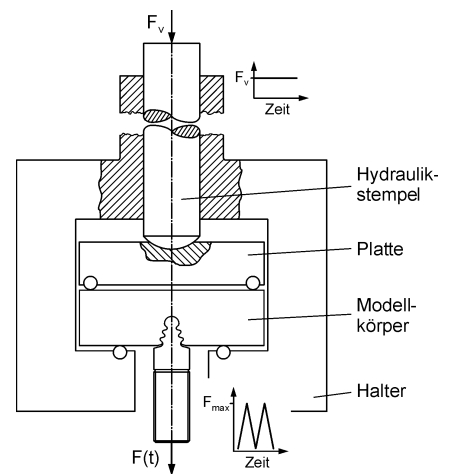


Abb. 2: Vorrichtung für LCF-Versuche.

erzeugt. Durch eine zusätzliche statische Vorspannkraft F_v kann die Wechselwirkung zwischen benachbarten Schaufeln insofern berücksichtigt werden, als auf diese Weise ein Teil der erzielten Aufbiegung der Scheibe wieder rückgängig gemacht wird. Dies entspricht im Prinzip der teilweise behinderten Dehnung in Gasturbinen infolge der Wechselwirkung der Schaufeln untereinander. Die konstante Vorspannkraft wird dabei durch einen Hydraulikzylinder aufgebracht. Diese Randbedingungen für die Versuche konnten über numerische Berechnungen der realen Turbine gewonnen werden. Mit diesen Ergebnissen konnte der Modellkörper so gestaltet werden, dass die Beanspruchungen der Turbine reproduziert wurden.

Der Vergleich Messung-Rechnung bei 550 °C erfordert kapazitive Hochtemperatur-Dehnmessstreifen (HT-DMS), um die Dehnungen zu messen. Bedingt

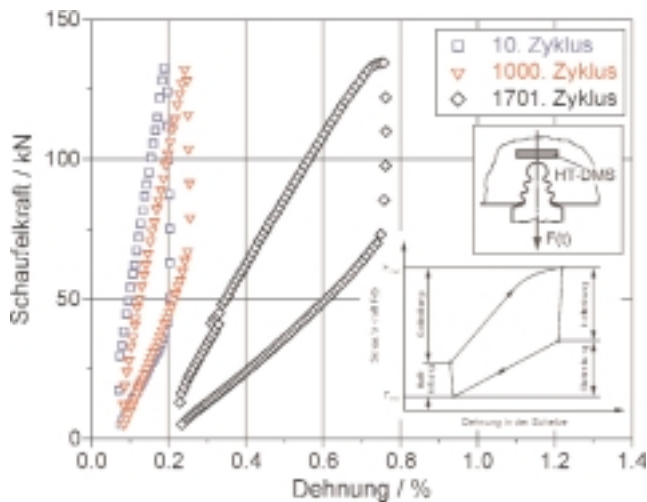


Abb. 3: Charakteristische Hystereseschleifen im LCF-Versuch.

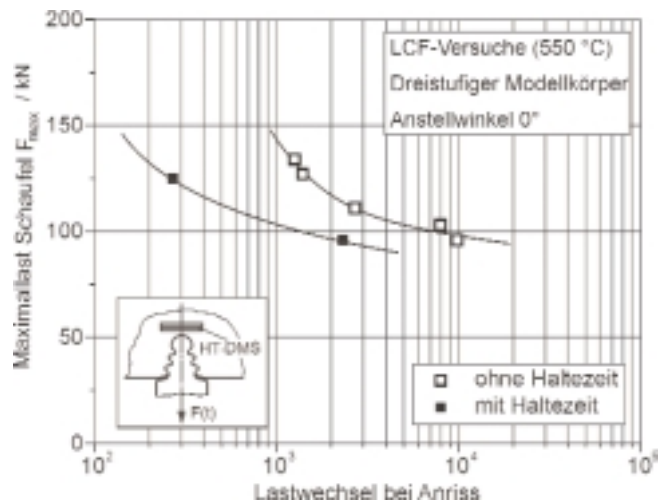


Abb. 4: Anrisskennlinien für den dreistufigen Modellkörper.

durch die vergleichsweise große Messlänge des HT-DMS sind nur Messungen in einiger Entfernung von der höchstbeanspruchten Stelle wegen des dort herrschenden großen Spannungsgradienten sinnvoll. Während der ersten Lastwechsel tritt eine geringfügige Werkstoffentfestigung ein. Daran schließt sich ein quasistabiler Bereich an, bis nach Anriss der Probe ein kontinuierlicher Anstieg der Dehnungen bis zum Bruch erfolgt. In Abbildung 3 sind einige charakteristische Lastwechsel für diesen Versuch mit der maximalen Schaufellast $F_{max} = 134 \text{ kN}$ dargestellt. Dabei unterscheidet sich ein typischer stabilerer Zyklus ($N = 1000$) nur unwesentlich von einem der anfänglichen Lastwechsel. Diese Erkenntnis ist von großer praktischer Bedeutung für die Nachrechnung der Experimente, da es somit ausreichend ist, die numerischen Analysen nur bis zu einer vergleichsweise geringen Lastwechselzahl durchzuführen.

Die beim Durchlaufen eines Belastungszyklus entstehende Hystereseschleife und die dabei auftretenden Reibungsmechanismen werden ebenfalls in Abbildung 3 schematisch erläutert. Bei zunehmender Last wird eine maximale Grenze für die Haftreibungskraft überschritten, Schaufel und Scheibe gleiten bei höheren Lasten aufeinander ab. Bei Lastumkehr findet prinzipiell derselbe Vorgang statt. Bis zu einer bestimmten Last haften Schaufel und Scheibe aneinander, wobei die hieraus resultierenden Verformungen in der Scheibe außerordentlich gering sind. Schließlich beginnt erneut ein Gleitvorgang zwischen Schaufel und Scheibe, die Dehnungsänderun-

gen in der Scheibe werden betragsmäßig größer. Damit ist es gelungen, die bei Gasturbinen auftretenden Relativbewegungen und Reibungsmechanismen mit Hilfe der LCF-Versuche an den Modellkörpern abzubilden und zu identifizieren.

Als Beispiel ist in Abbildung 4 die Anrisskennlinie für die dreistufigen Modellkörper mit Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$ dargestellt. Bei den Kriechermüdungsversuchen wurde eine Haltezeit von $t_{H2} = 20 \text{ min}$ bei maximaler Schaufellast beachtet. Diese soll den Einfluss des stationären Belastungszustands berücksichtigen. Erwartungsgemäß tritt bei dem schwellenden Verlauf der Last ein beträchtlicher Einfluss der Haltezeit auf. Im Vergleich zu den Experimenten ohne Haltezeit wird die Lebensdauer bis zum Anriss etwa um den Faktor 4 verkürzt. Ebenfalls aus Abbildung 4 ist die für bauteilähnliche Versuche außerordentlich geringe Streuung der Versuchsergebnisse ersichtlich.

Numerische Untersuchungen

Die numerischen Untersuchungen gliedern sich in die Rechnungen an Gasturbinen und Modellkörpern sowie in die Entwicklung der Werkstoffmodelle. Ausgangspunkt der numerischen Arbeiten sind FE-Rechnungen an Gasturbinen zur Ermittlung der typischen Spannungs- und Verformungszustände im Bereich der Schaufel-Scheibe-Verbindung. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse waren, wie erwähnt, die Grundlagen zur Optimierung der Versuchsrandbedingungen, so dass eine bestmögliche Übereinstimmung der Beanspruchung von realem Bauteil

und Modellkörper an der höchstbeanspruchten Stelle erreicht werden konnte.

Werkstoffmodellierung

Die Nachrechnung der LCF-Versuche bei erhöhter Temperatur erfordert Werkstoffmodelle, die statisches, zyklisches und viskoplastisches Werkstoffverhalten nachbilden können. Hierzu ist prinzipiell das Werkstoffmodell von Chaboche/Nouailhas geeignet, das bereits in zahlreichen Forschungsarbeiten /4-6/ mit Erfolg eingesetzt wurde. Dabei wird kinematische und isotrope Verfestigung sowie viskoplastisches Werkstoffverhalten berücksichtigt.

Das Modell unterscheidet nicht explizit zwischen zeitunabhängigen Plastifizierungsvorgängen, die infolge von Laständerungen auftreten und solchen, die durch zeitabhängiges viskoses Werkstoffverhalten (Kriechen, Relaxation) hervorgerufen werden, sondern beschreibt diese beiden Beiträge zur bleibenden (inelastischen) Verformung mit übergeordneten Formulierungen. Zur Anpassung an das hier herrschende, komplexe Werkstoffverhalten mussten Modellverfeinerungen vorgenommen und in das FE-Programmsystem ABAQUS implementiert werden /7/.

dungs- oder das isotrope beziehungsweise kinematische Festigkeitsänderungsverhalten beschreiben. Da sich nahezu alle Parameter gegenseitig beeinflussen, ist bei der Anpassung von Parametergruppen an einzelne Werkstoffeigenschaften jedoch keine Aussage hinsichtlich der Auswirkungen der Interaktion möglich. Der erforderliche Parametersatz wurde daher mit einer speziell entwickelten iterativen Optimierungsprozedur bestimmt. Zur Beschreibung des tertiären Kriechens und der Ermüdungsschädigung wurden Schädigungsparameter eingeführt, Tabelle 2 und Tabelle 3.

Mit einer zunächst linearen Überlagerung der Schädigungsanteile aus Kriechen und Ermüden konnte das Verformungsverhalten bis zum Beginn des tertiären Kriechens gut beschrieben werden. Das tertiäre Kriechen selbst wird insbesondere bei mehrachsiger Kriechermüdnungsbeanspruchung durch eine lineare Akkumulation der Schädigungsanteile nicht richtig erfasst. Durch eine stärkere Berücksichtigung des Einflusses der Ermüdungsschädigung auf das nachfolgende Kriechen (Tabelle 4) kann auch zusätzlich das tertiäre Kriechen der mehrachsigen Kriechermüdnungsversuche gut beschrieben werden /7/.

Insgesamt wurde damit eine sehr gute Beschreibung des zyklischen und viskoplastischen Werkstoffverhaltens für die untersuchten Werkstoffe erstellt. Beispielfähig ist in Abbildung 5 die Nachrechnung eines LCF-Versuchs für den Scheibenwerkstoff IN 718 dargestellt. Die Modellierung des Ermüdungs- und Zeitstandverhaltens ist am Beispiel eines martensitischen hochwarmfesten zehn Prozent Chromstahls wiedergegeben, Abbildungen 6 und 7.

Modellkörperberechnung

Die entwickelten Werkstoffmodelle werden nun zur Nachrechnung der LCF-Versuche an den Modellkörpern eingesetzt. Im Folgenden wird die Vorgehensweise am Beispiel des Gasturbinen-Modellkörpers mit gerader Schaufel (Anstellwinkel: 0°) erläutert. Aufgrund der vorliegenden Geometrie und Belastung ist es ausreichend, eine zweidimensionale Rechnung bei ebenem Dehnungszustand (EDZ) durchzuführen.

Mit diesen Berechnungen konnte ein anderes wichtiges werkstoffmechanisches Phänomen bei diesem Werkstoff bestimmt werden, nämlich eine beträchtliche Span-

nungsrelaxation in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl (Abb. 8). Dies führt zu einer erheblichen Reduzierung der Mittelspannung. Es ist offensichtlich, dass der erste Zyklus sich ganz erheblich vom stabilisierten Zustand unterscheidet. Der quasistabile Beanspruchungszustand im 20. Zyklus wird dann im vorliegenden Belastungsfall zur Vorhersage der Lebensdauer herangezogen, da bei dem untersuchten Temperaturniveau und der Dauer der LCF-Versuche der Einfluss des Kriechverhaltens keinen wesentlichen Einfluss auf das Anrissverhalten hat. Dies zeigt, dass für eine detaillierte Berücksichtigung aller Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Schaufel-Scheibe-Verbindungen ein fortschrittliches Werkstoffmodell erforderlich ist.

Lebensdauerkonzept

Die Entwicklung eines fortschrittlichen Konzepts für einen Lebensdauernachweis von Schaufel-Scheibe-Verbindungen unter Verwendung eines viskoplastischen Werkstoffmodells kann aufgrund der Komplexität der Problemstellung nur auf der Basis der örtlichen Spannungen und Dehnungen erfolgen. In Abbildung 9 ist ein Vorschlag für ein Berechnungskonzept bei reiner Ermüdungsbeanspruchung von Schaufel-Scheibe-Verbindungen schematisch dargestellt. Grundlage der rechnerischen Werkstoffcharakterisierung ist die Entwicklung eines viskoplastischen Stoffgesetzes, das, wie erwähnt, die Beschreibung des statischen, zyklischen und viskoplastischen Werkstoffverhaltens ermöglicht. Die Beschreibung des Versagensverhaltens bei reiner Ermüdungsbeanspruchung erfordert die Anrisskennlinie des Werkstoffs, die in dehnungs- oder spannungskontrollierten LCF-Versuchen ohne Mittelspannungen ermittelt wird.

Die Anwendung des so abgeleiteten Werkstoffgesetzes in der FE-Analyse auf den Modellkörper der untersuchten Schaufel-Scheibe-Verbindung zeigt eine schlechte Übereinstimmung mit den Versuchswerten. Die oben beschriebenen Kontakt- und Reibungseinflüsse müssen bei der Modellbildung bei Schaufel-Scheibe-Verbindungen berücksichtigt werden. Es hat sich in /1/ gezeigt, dass die Höhe des Reibungskoeffizienten großen Einfluss auf die berechneten Verformungs- und Spannungskomponenten besitzt. Eine zusätzliche Einbeziehung des Reibphänomens in die FE-Berechnung zeigt in

Diese Modifikationen erlauben

- die Verwendung von zwei inelastischen Dehnraten, eine für vorwiegend hohe und eine für vorwiegend niedrige Beanspruchungen,
- die Verwendung von kinematischen Verfestigungsvariablen nach Ohno-Wang /8-10/ zur besseren Abbildung des zyklischen Verformungsverhaltens,
- die Einführung von Schädigungsparametern, die neben der Zustandsbeschreibung des Werkstoffs auch eine Beschreibung des tertiären Kriechens ermöglichen,
- die nichtlineare Überlagerung von Schädigungsanteilen aus Kriechen und Ermüden.

Bei der Modifizierung des ursprünglichen Modells wurde insbesondere das bei diesen Werkstoffen auftretende entfestigende Verhalten bei Ermüdungsbeanspruchung im Werkstoffmodell speziell berücksichtigt, da das ursprünglich von Chaboche vorgeschlagene Modell im Wesentlichen für verfestigende austenitische Werkstoffe konzipiert war.

Die konstitutiven Gleichungen des verfeinerten Modells sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Da das Kriechen bei niedriger Beanspruchung vorwiegend diffusionsgesteuert abläuft, während bei hoher Last Versetzungskriechen dominiert, ist eine Aufteilung der inelastischen Dehngeschwindigkeit auf zwei Dehnraten in Verbindung mit zwei Fließbedingungen auch aus physikalischer Sicht sinnvoll. Das Modell ermöglicht somit eine umfassende Beschreibung des Werkstoffverhaltens sowohl unter reiner Kriech- und reiner Ermüdungs- als auch unter überlagerter Kriechermüdnungsbeanspruchung.

Ein wesentliches Problem stellt die Bestimmung der Modellparameter dar. Dies erfolgte zunächst über eine sukzessive Anpassung von Parametergruppen an jeweils separat betrachtete Werkstoffeigenschaften, die das Zeitstand-, das Ermü-

Tabelle 1: Elastisch-viskoplastisches Stoffgesetz nach Chaboche/Nouailhas

Bedeutung	Berechnungsformel
viskoplastisches Potential	$\Omega_p = \sum_{i=1}^2 \frac{K_i}{(n_i + 1)} \exp\left(\left(\frac{\sigma_{vis,i}}{K_i}\right)^{n_i+1}\right)$
Fließgrenzflächen	$f_1 = J_2(\bar{\sigma} - \bar{X}_1) - R - k - \sigma_{vis1} = 0; f_2 = J_2(\bar{\sigma} - \bar{X}_2) - \sigma_{vis2} = 0$ mit $J_2(\bar{\sigma} - \bar{X}_1) = \sqrt{\frac{3}{2}(\bar{\sigma}' - \bar{X}'_1) : (\bar{\sigma}' - \bar{X}'_1)}$ $J_2(\bar{\sigma} - \bar{X}_2) = \sqrt{\frac{3}{2}(\bar{\sigma}' - \bar{X}'_2) : (\bar{\sigma}' - \bar{X}'_2)}$
inelastische Dehnrate für vorwiegend hohe Beanspruchung	$\dot{\bar{\epsilon}}_{in1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-D_f} \cdot \left\langle \frac{\sigma_{vis1}}{K_1 \cdot (1-D_f)} \right\rangle^{n_1} \cdot \frac{\bar{\sigma}' - \bar{X}'_1}{J_2(\bar{\sigma} - \bar{X}_1)} = \frac{3}{2} \dot{p}_1 \cdot \frac{\bar{\sigma}' - \bar{X}'_1}{J_2(\bar{\sigma} - \bar{X}_1)}$
inelastische Dehnrate für vorwiegend niedrige Beanspruchung	$\dot{\bar{\epsilon}}_{in2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-D_c} \cdot \left\langle \frac{\sigma_{vis2}}{K_2 \cdot (1-D_c)} \right\rangle^{n_2} \cdot \frac{\bar{\sigma}' - \bar{X}'_2}{J_2(\bar{\sigma} - \bar{X}_2)} = \frac{3}{2} \dot{p}_2 \cdot \frac{\bar{\sigma}' - \bar{X}'_2}{J_2(\bar{\sigma} - \bar{X}_2)}$
akkumulierte inelastische Dehnungen	$\dot{p}_k = \sqrt{\frac{2}{3} \bar{\epsilon}_{ink} : \bar{\epsilon}_{ink}}; \dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{k=1}^2 \bar{\epsilon}_{ink} : \sum_{k=1}^2 \bar{\epsilon}_{ink}}; k=1,2$
kinematische Variable für vorwiegend hohe Beanspruchung (Ohno-Wang)	$\bar{X}_{1i} = \frac{2}{3} c_{1i} a_{1i} \bar{\epsilon}_{in1}(1-D_f) - c_{1i} \left(\frac{\bar{X}_{1i}}{a_{1i}}\right)^{m_{1i}} \bar{X}_{1i} \dot{p}_1 - \beta_{1i} \left(\frac{3}{2} \bar{X}_{1i} : \bar{X}_{1i}\right)^{\frac{f_{1i}-1}{2}} \bar{X}_{1i}$ mit $\bar{X}_1 = \sum_{i=1}^6 \bar{X}_{1i}$
kinematische Variable für vorwiegend niedrige Beanspruchung (Ohno-Wang)	$\bar{X}_{2i} = \frac{2}{3} c_{2i} a_{2i} \bar{\epsilon}_{in2}(1-D_c) - c_{2i} \left(\frac{\bar{X}_{2i}}{a_{2i}}\right)^{m_{2i}} \bar{X}_{2i} \dot{p}_2 - \beta_{2i} \left(\frac{3}{2} \bar{X}_{2i} : \bar{X}_{2i}\right)^{\frac{f_{2i}-1}{2}} \bar{X}_{2i}$ mit $\bar{X}_2 = \sum_{i=1}^3 \bar{X}_{2i}$
isotrope Variable	$\dot{R} = b(Q - R) \dot{p}_1(1-D_f) + \gamma Q_r - R ^{m-1} (Q_r - R)$

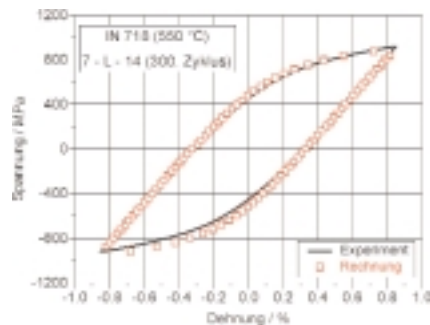


Abb. 5: Nachrechnung eines dehnungskontrollierten LCF-Versuchs an IN 718.

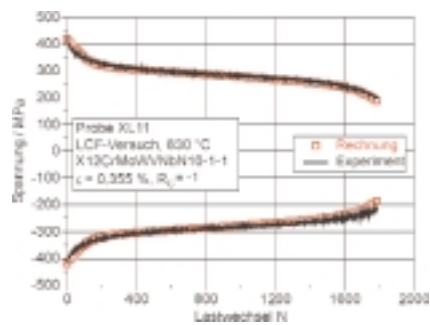


Abb. 6: Nachrechnung eines dehnungskontrollierten LCF-Versuchs am Wellenwerkstoff X12CrMoWVNb10-1-1 bei 630 °C.

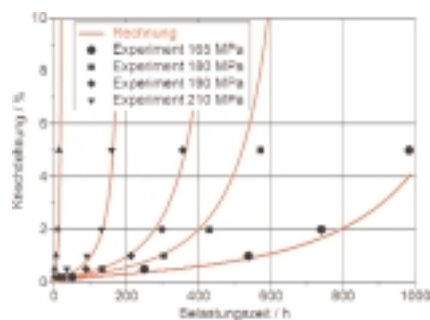


Abb. 7: Nachrechnung von Zeitstandversuchen an X12CrMoWVNb10-1-1 bei 630 °C.

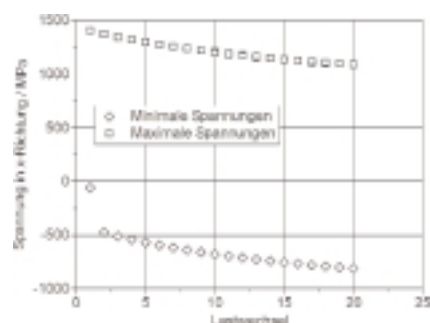


Abb. 8: Relaxationsvorgang IN 718 (dreistufiger Modellkörper, 550 °C).

Tabelle 2: Modellierung der Kriechschädigung D.

Berechnungsansatz	$\dot{\rho}_c = A(\sigma) \cdot p_2^B; D_c = 1 - \exp(-\rho_c)$
Werkstoff	Nimonic 80A X12CrMoWVNb10-1-1
Temperatur	630 °C 600 °C, 630 °C

Tabelle 3: Modellierung der Ermüdungsschädigung D.

Berechnungsansatz	$D_f = A \cdot p_1 + B \cdot p_1^c$
Werkstoff	Nimonic 80A X12CrMoWVNb10-1-1
Temperatur	630 °C 600 °C, 630 °C

Tabelle 4: Stärkere Berücksichtigung der Ermüdung auf die Kriechschädigung

Berechnungsansatz	$D_c^* = D_c + A \cdot (D_f - B)$
mit	$\langle D_f - B \rangle = \begin{cases} D_f - B & \text{für } D_f - B \geq 0 \\ 0,0 & \text{für } D_f - B < 0 \end{cases}$

mit der aus der Anrisskennlinie abgeleiteten Schädigungslinie des Werkstoffs kann dann die Anrisslastwechselzahl bestimmt werden. Hierfür wird der Schädigungsparameter P_{SWT} nach Smith, Watson und Topper /11/ verwendet. Prinzipiell lässt sich dieser Parameter bei mehrachsiger Schwingbeanspruchung in Abhängigkeit von der größten Hauptspannung, der Vergleichsspannung nach von Mises oder von der maximalen Schubspannung beschreiben.

$$P_{SWT,1} = \sqrt{(\sigma_{1,m} + \sigma_{1,a}) \varepsilon_{1,a}} \bar{E} \quad (1)$$

$$P_{SWT,v} = \sqrt{(\sigma_{v,m} + \sigma_{v,a}) \varepsilon_{v,a}} \bar{E} \quad (2)$$

$$P_{SWT,max} = 2 \cdot \sqrt{(\tau_{max,m} + \tau_{max,a}) \gamma_{max,a}} \bar{G} \quad (3)$$

Abhängigkeit vom Reibkoeffizient eine deutlich bessere Anpassung an die Versuchswerte (Abb. 10).

Die FE-Simulation muss bis zu einem stabilisierten Zyklus durchgeführt werden, wobei unter Umständen sehr lange Rechenzeiten auftreten können. Aus den Beanspruchungen des stabilen Zyklus wird ein Schädigungsparameter berechnet, der ein Maß für die Beanspruchungshöhe bei mehrachsigem Spannungszustand ist. Durch den Vergleich

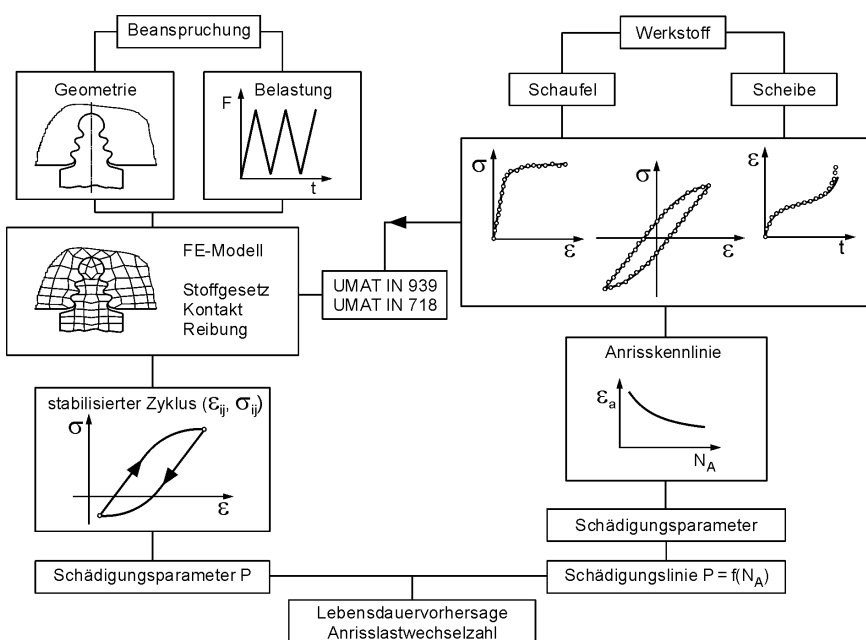


Abb. 9: Lebensdauernachweisconcept für Schaufel-Scheibe-Verbindungen.

Wie in Abbildung 11 dargestellt, ist eine sehr gute Vorhersage der Lebensdauer mit Hilfe des Parameters $P_{SWT,1}$, das heißt unter Berücksichtigung der ersten Hauptspannung σ_1 möglich. Mit den beiden anderen Ansätzen wird die im Experiment festgestellte Lebensdauer des Modellkörpers dagegen deutlich nach der unsicheren Seite bewertet.

Reibermüdung

Wie beschrieben ist neben den rein mechanischen Beanspruchungen in den Kontaktbereichen von kraftübertragenden Verbindungen eine tribologische Beanspruchung vorhanden, die das Potenzial für die Anrissbildung noch erhöht. Bei solchen Verbindungen treten aufgrund von meist hochfrequenten äußeren Belastungen elastische Verformungen auf, was im Kontaktbereich, abhängig von den geometrischen Verhältnissen, zum Teil hohe oberflächenparallele Kraftanteile bewirkt. Abhängig von der Höhe dieser Kräfte, der senkrecht auf die Oberfläche wirkenden Kraft und den Reibungsverhältnissen in der Kontaktzone kann es zu zyklischen Relativbewegungen kommen, deren Wegamplituden in der Regel nur wenige Mikrometer betragen. Daraus resultieren zwei wesentliche Wirkungen:

- Die tribologische Beanspruchung führt zu Verschleiß in den Kontaktzonen, oftmals verbunden mit Oxidation der Oberfläche und der Verschleißpartikel, die eine hohe Verweilzeit in der Kontaktzone haben und wegen der hohen Härte der Oxide eine überlagerte Abrasionsbeanspruchung (Furchungverschleiß) bewirken.

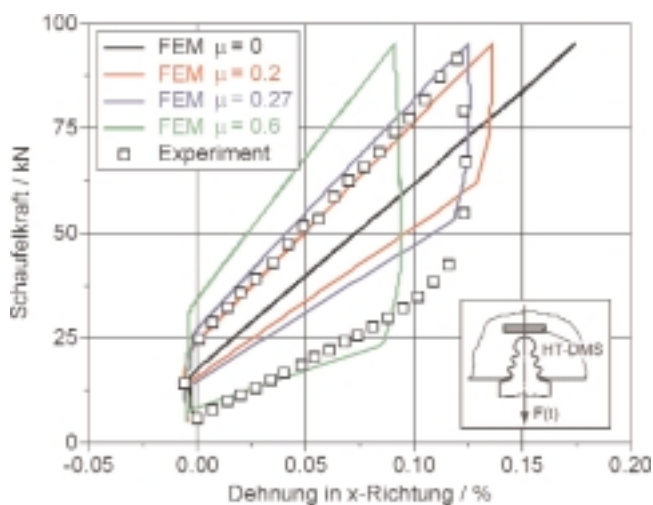


Abb.10: Einfluss der Reibzahl auf die berechneten Hystereseschleifen.

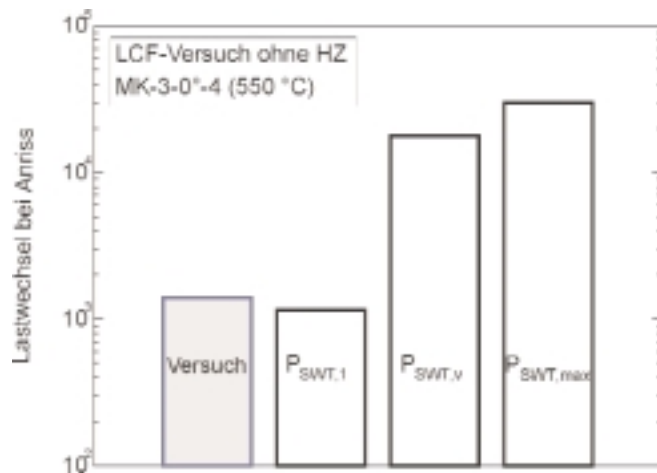


Abb.11: Verifizierung des Berechnungskonzepts.

- Die Grenzflächenenergie wird durch Oxidbildung herabgesetzt, es bilden sich Mikro- und Makroerbstellen infolge von lokalem Verschleiß aus, eine Vorschädigung des Werkstoffs in der Grenzschicht entsteht durch plastische Wechselverformung im Mikrobereich und die Einleitung eines Schwingbruchs wird begünstigt.

Diese komplexe tribologische Beanspruchung wird mit Schwingungsver-schleiß (Fretting) oder Reibkorrosion beziehungsweise Passungsrost bezeichnet. Der Prozess, der schließlich zu Anrissbildung und Bruch des Bauteils führt, ist als Reiber-müdung oder Fretting Fatigue bekannt. Zahlreiche Schadensfälle, die durch einen Bruch des Bauteils unter schwingender Beanspruchung gekennzeichnet sind, stehen in Verbindung mit Fretting Fatigue. Beispiele hierfür sind auf Wellen aufgesessene Naben oder Wälz-lager, wenn die Presspassung nicht optimal ausgelegt ist.

Überlegungen zur vorbeugenden Schadensverhütung waren ausschlaggebend dafür, dass sich die Materialprüfungsanstalt (MPA) Stuttgart in den letzten Jahren intensiv mit dem Problem des Fretting Fatigue befasst hat [12]. Im Mittelpunkt der Betrachtungen standen deshalb experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung von Abminderungsfaktoren der Schwingfestigkeit bei überlagerter Fretting-Beanspruchung sowie die numerische Simulation der Beanspruchung der oben beschriebenen Schaufel/Scheibe-Verbindungen in Gasturbinen unter Berücksichtigung der Reibungsverhältnisse und die experimentelle Verifikation der numerischen Analyseergebnisse in Bauteilversuchen.

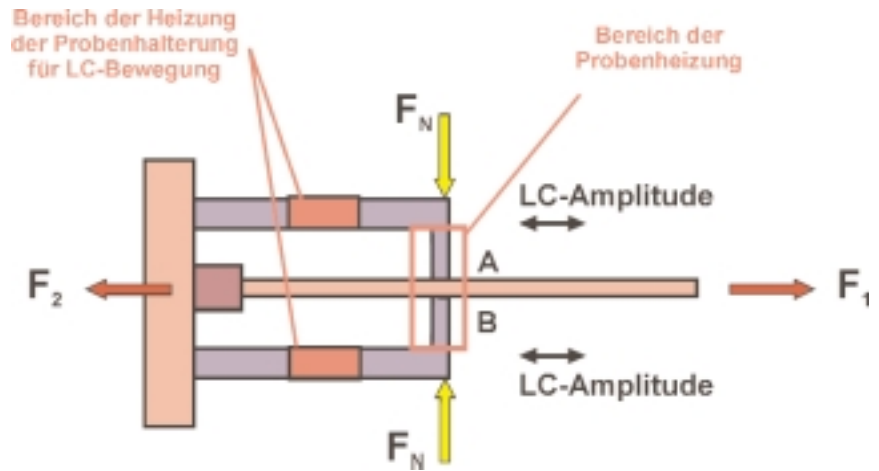


Abb. 13: Versuchskonzeption (schematisch) für die Untersuchung des Fretting Fatigue-Verhaltens von Turbinenwerkstoffen.

Das Schwingfestigkeitsverhalten eines Werkstoffs wird üblicherweise im so genannten Wöhler-Versuch ermittelt. Dabei wird eine Zugprobe einer zyklischen Belastung mit vorgegebener Spannungsamplitude σ_a und Mittelspannung σ_m beansprucht. Bei Stählen kann davon ausgegangen werden, dass nach Erreichen einer Lastwechselzahl N von 10^7 ohne Eintreten eines Bruches auch weitere Lastwechsel bruchfrei ertragen werden können, das heißt der Werkstoff ist für eine solche Spannungsamplitude „dauerfest“. Wird der schwingenden Beanspruchung eine Fretting-Beanspruchung überlagert, so muss die Spannungsamplitude zum Teil erheblich reduziert werden, um die gleiche Lastwechselzahl wie bei Schwingbeanspruchung ohne Fretting zu erhalten (Abb. 12). Es ist sogar davon auszugehen, dass eine Dauerfestigkeit im eigentlichen Sinne nicht mehr erreicht werden kann und Brüche auch noch oberhalb von 10^7 Lastwechseln auftreten können.

Versuchsstrategie

Die für die Schaufel-Scheibe-Verbindung maßgebliche Fretting-Beanspruchung ist durch eine kurzhubige Schwingbeanspruchung gekennzeichnet, deren Amplitude maximal nur wenige Mikrometer beträgt. Um die Prozesse in einer solchen Stelle experimentell nachzubilden, wurde ein vereinfachtes Modell realisiert, bei dem eine Zugprobe, an deren Oberfläche Reibklötze angepresst werden, schwellend beansprucht wird (Abb. 13). Die Gleitamplitude ergibt sich dabei aus der Relativbewegung zwischen dem „feststehenden“ Reibklotz und sich der unter der zyklischen Belastung ergebenden elastischen Längenänderung der Zugprobe. Abhängig von der Spannungsamplitude σ_a im Zugstab, der Flächenpressung p sowie den stofflichen Eigenschaften, die die Reibungszahl bestimmen, kommt es zu lokalem Mikrogleiten innerhalb der Kontaktfläche bis hin zu globalen translatorischen Verschiebungen der Reibklötze auf der Zugprobe. In jedem Fall wirken aber hohe oberflächenparallele Kräfte (Reibkräfte), die bei der Berechnung der Spannungsfelder zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus laufen in der Grenzfläche Prozesse ab, die die Schwingfestigkeit des Werkstoffs herabsetzen. Neben ei-

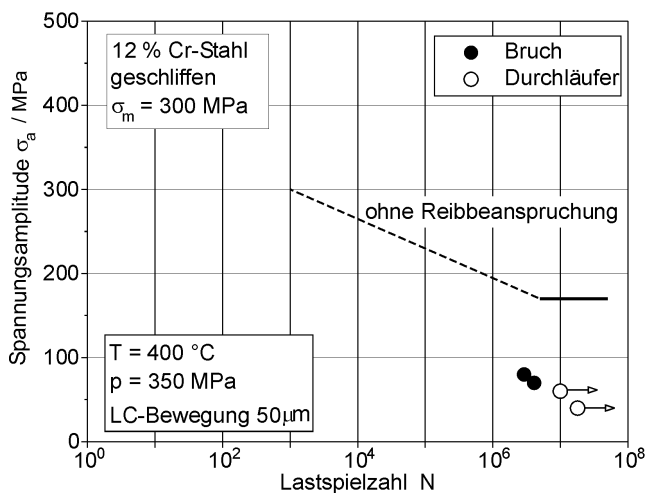


Abb. 12: Beispiel für die Reduktion der Schwingfestigkeit durch überlagerte Fretting-Beanspruchung.

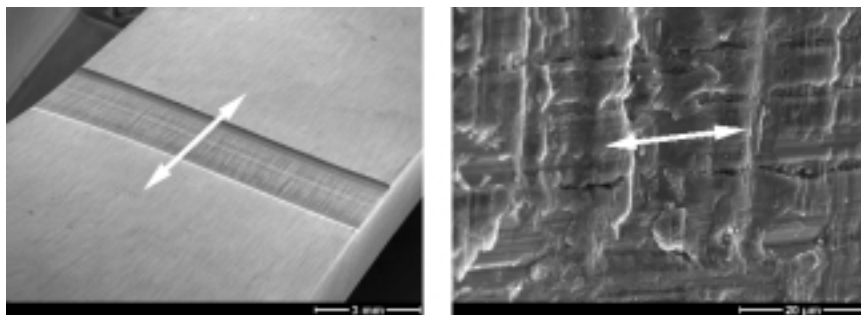


Abb.14: 12 % Cr-Stahlprobe (Zugprobe) mit Fretting-Bereich und Schädigungsprozess (Delamination und Rissbildung) im Mikrobereich; die Pfeile geben die Richtung der Fretting-Bewegung an.

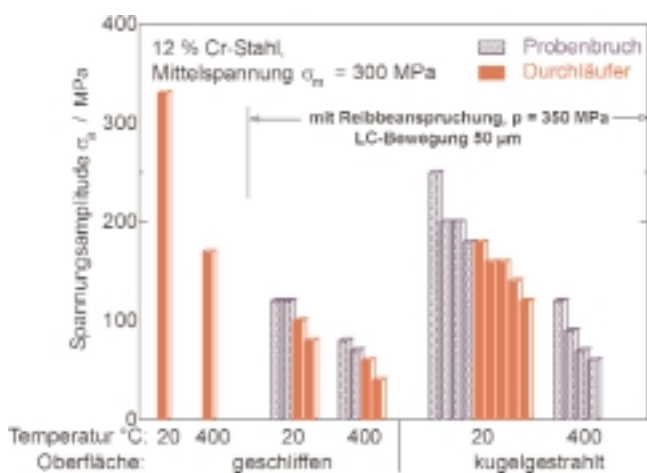


Abb.15: Einfluss von Temperatur und Oberflächenzustand der Zugproben auf das Fretting Fatigue-Verhalten.

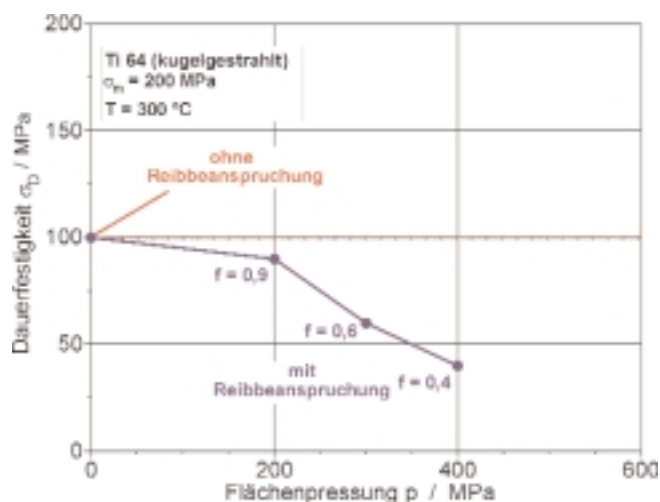


Abb.16: Abminderung der Schwingfestigkeit der Titanlegierung Ti64 bei überlagerter Fretting-Bbeanspruchung.

nem makroskopischen Fretting-Verschleiß wird auch die Mikrotopographie verändert (Abb. 14). Für die Versuche können die Mittelspannung σ_m , die Spannungsamplitude σ_a , die Flächenpressung p sowie die Temperatur T von Zugprobe und Reibklötzen vorgegeben werden.

Da im Betrieb, abhängig von der Lastsituation und den auftretenden Transienten, auch langsame Relativbewegungen (Low Cycle(LC)-Bewegung) infolge unterschiedlichen Aufheizens und Abkühlens der Bauteile auftreten können, wurde auch im Simulationsversuch die Möglichkeit einer solchen überlagerten langsamen Verschiebung realisiert. Hierzu wurden die Haltearme der Reibklötze periodisch beheizt (Abb. 13), wodurch diese, abhängig von der Temperaturdifferenz, eine Längenänderung von bis zu 200 μm erfahren können, was zu einer entsprechenden translatorischen Bewegung der Reibklötze gegenüber der Zugprobe führt. Solche niederfrequenten Verschiebevorgänge wurden in der Regel jeweils nach $5 \cdot 10^5$ Lastwechseln der Zugprobe ausgeführt. Dies führt vorrangig dazu, dass sich die Kontaktpunkte inner-

halb der Kontaktfläche, in denen die Werkstoffschädigung durch Fretting abläuft, verlagern. Dadurch werden größere Bereiche der Zugprobe am Schädigungsprozess beteiligt und die spezifische Schädigung pro Flächeneinheit nimmt ab.

Ergebnisse der Versuche an Turbinenwerkstoffen

Experimentelle Untersuchungen an einem 12 Prozent Chromstahl und zum Vergleich an einer Titanlegierung (Ti 64) haben deutlich gemacht, mit welchen Abminderungsfaktoren

$$f = \frac{\text{ertragbare Spannungsamplitude mit Fretting}}{\text{ertragbare Spannungsamplitude ohne Fretting}} \quad (4)$$

bei einer solchen Fretting Fatigue-Bbeanspruchung gegebenenfalls zu rechnen ist.

Im Fall des Chromstahls wurde der Abminderungsfaktor bei einer Flächenpressung von 350 MPa (Megapascal) und einer Mittelspannung von 300 MPa zu rund $f = 0,3$, bei Raumtemperatur zu

rund $f = 0,37$ bei 400 °C ermittelt (Abb. 15). Vom Kugelstrahlen wird erwartet, dass sich durch die Oberflächenverfestigung und die dabei eingebrachten Druckeigenstressungen ein günstigeres Schwingfestigkeitsverhalten ergibt. Eine Oberflächenverfestigung hat sich bei Raumtemperatur positiv ausgewirkt ($f = 0,55$), wogegen bei 400 °C keine Verbesserung des Schwingfestigkeitsverhaltens festzustellen war. Dies hängt möglicherweise mit Relaxations- und Oxidationsvorgängen zusammen. Außerdem ist bei Raumtemperatur praktisch kein Frettingverschleiß festgestellt worden, während bei 400 °C Fretting-Verschleiß in Höhe von rund $8\mu\text{m}/10^6$ Lastwechseln gemessen wurde, wodurch die verfestigte Zone sukzessive abgetragen wurde.

Die Titanlegierung Ti 64 wurde im kugelgestrahlten Zustand bei 300 °C untersucht. Die Versuche bei unterschiedlichen Flächenpressungen zeigen den starken Einfluss der Flächenpressung auf die Schwingfestigkeit, wobei sich Abminderungsfaktoren bis $f = 0,4$ ergeben haben (Abb. 16).

Zusammenfassung

Im Rahmen von Forschungsprojekten ist es gelungen, die komplexe Beanspruchung von Schaufel-Scheibe-Verbindungen in Gasturbinen während der An- und Abfahrvorgänge zu erfassen und darauf basierend bauteilähnliche Modellkörper zu erstellen, an denen mittels LCF-Versuchen die reale Situation simuliert werden konnte.

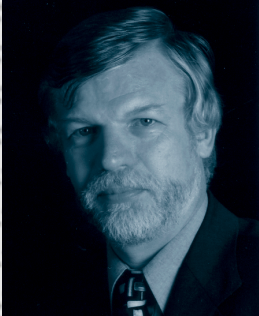
Dies gelang durch die Anpassung eines Werkstoffmodells, mit dem viskoplastisches Werkstoffverhalten simuliert werden kann und in das zusätzlich schädigungsmechanische Parameter integriert wurden. Ein Vergleich mit den am Modellkörper gemessenen Dehnungen zeigt eine gute Übereinstimmung. Das entwickelte Konzept zur Vorhersage der Lebensdauer von Schaufel-Scheibe-Verbindungen konnte unter Verwendung des globalen Schädigungsparameters $P_{SWT}(\sigma_i)$ verifiziert werden.

Kraftschlüssige und formschlüssige Füügeverbindungen sind neben der rein mechanischen Belastung auch noch einer tribologischen Beanspruchung ausgesetzt, die sich aus einem Mikrogleiten der Bauteile im Kontaktbereich (Fretting) ergibt und auf elastische Deformationen der Bauteile zurückzuführen ist. Es wurde quantitativ gezeigt, mit welcher hohen Abminderungsfaktoren bezüglich der Schwingfestigkeit zu rechnen ist, wenn der mechanischen Schwingbeanspruchung eine derartige Fretting-Beanspruchung überlagert ist. Durch eine Schädigung des Werkstoffs in der Grenzfläche und einen fortschreitenden Verschleiß liegen Bedingungen vor, die dazu führen, dass von einer Dauerfestigkeit im eigentlichen Sinne nicht mehr gesprochen werden kann.

Diese Relativbewegungen konnten am Modellkörper nachgewiesen werden und durch eine Variation der Reibparameter im Kontaktbereich der tannenbaumförmigen Verbindung deren Einfluss auf das Verformungsverhalten im Rahmen dieser Untersuchungen mit dem entwickelten Finite-Elemente Modell quantifiziert werden.

Literatur

- /1/ Issler, S.: Entwicklung und experimentelle Überprüfung eines Verfahrens zur Lebensdauervorhersage für Schaufel-Scheibe-Verbindungen bei Gasturbinen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Abschlussbericht FVV-Forschungsvorhaben Nr. 661, 2000
- /2/ Roos, E. und M. Rauch: Zwischenbericht zum Vorhaben Nr. 246 Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Ermittlung der Lebensdauer von Bauteilen mit Mehrflächenkontakten Frankfurt, Informationstagung Turbinen der FVV am 11. April 2002, Heft R 516 (2002), S. 75-87
- /3/ Granacher, J. und A. Pfenning: Kriechgleichungen II – rechnergestützte Beschreibung des Kriechverhaltens ausgewählter hochwarmfester Legierungen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Forschungsvorhaben Nr. 432, 1991
- /4/ Chaboche, J.-L.: Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity International Journal of Plasticity, Volume 5, pp. 247-302, 1989
- /5/ Nouailhas, D.: Unified modelling of cyclic viscoplasticity – application to austenitic stainless steels International Journal of Plasticity, Volume 5, pp. 501-520, 1989
- /6/ Xu, H.: Anwendung eines viskoplastischen Schädigungsmodells zur Beschreibung des Verformungs- und Versagensverhaltens einer Hochtemperatur-Schraubenverbindung Dissertation, Universität Stuttgart, 1998
- /7/ Schemmel, J.: Beschreibung des Verformungs- und Festigkeitsverhaltens von Komponenten im Kriechbereich unter instationärer Beanspruchung Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, FVV-Forschungsvorhaben Nr. 233, 2002
- /8/ Ohno, N. and J. D. Wang: Kinematic Hardening Rules with Critical State of Dynamic Recovery, Part I, Formulations and Basic Features for Ratchetting Behaviour Int. J. Plasticity, Vol. 7, 1991, p. 661-678
- /9/ Ohno, N. and J. D. Wang: Kinematic Hardening Rules with Critical State of Dynamic Recovery, Part II, Applications to Experiments of Ratchetting Behaviour Int. J. Plasticity, Vol. 9, 1993, p. 691-403
- /10/ Ohno, N., Constitutive Modelling of Cyclic Plasticity with Emphasis on Ratchetting Int. J. Sci. Vol. 40, p. 251/261, 1998
- /11/ Smith, K. N., P. Watson and T. H. Topper: A stress-strain function for the fatigue of metals Journal of Materials, JMLSA, Volume 5, pp. 767-778, 1970
- /12/ J. Föhl und K. Hippelein: Untersuchung von Fretting Fatigue-Prozessen von metallischen Paarverbindungen Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen, Abschlussbericht, AiF-Nr. 10 530, 2001



Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos

Geboren am 17. Oktober 1945 in Plochingen, studierte Maschinenbau an der Universität Stuttgart, wo er 1982 promovierte und 1992 habilitierte. Seine berufliche Tätigkeit führte ihn über die Entwicklungsabteilung der Firma Energie- und Verfahrenstechnik (EVT), Stuttgart, (1973-1977) an die Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart. Dort war Eberhard Roos zunächst wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre, zuletzt als Leiter der Abteilungen „System- und Anlagenberechnung“ und „Komponentensicherheit“ tätig. Von 1991-1995 war er bei Energie-Versorgung Schwaben AG (EVS) zuständig für Qualitätssicherung, Werkstoff- und Sicherheitstechnik für Umrüstmaßnahmen des nuklearen und konventionellen Anlagenbereichs. Am 1. Oktober 1995 wurde er Ordinarius für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre sowie stellvertretender Direktor der Staatlichen Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart. Seit dem 1. Oktober 1998 ist Prof. Roos Direktor der MPA Stuttgart.



Dr.-Ing. Jürgen Föhl

studierte von 1962 bis 1967 Maschinenbau an der Universität Stuttgart. Seit 1967 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der MPA Stuttgart mit den Schwerpunkten im Bereich Tribologie und Schadensanalyse. 1975 promovierte er auf dem Gebiet der Tribologie zum Thema Reaktionsschichtbildung durch Schmierstoffadditive. Nach einem einjährigen Gastaufenthalt am Oak Ridge National Laboratory in Tennessee, USA, von 1976 bis 1977 und Mitarbeit an Forschungsprojekten zur Strahlenversprödung von Reaktor-druckbehälterwerkstoffen übernahm Jürgen Föhl die Leitung eines Großforschungsprojektes zum Thema Strahlenversprödung in Zusammenarbeit mit der Industrie und Großforschungseinrichtungen bis 1992. Er ist verantwortlich für den „Radioaktiven Kontrollbereich“ der MPA Stuttgart und seit 1998 Leiter der Fachgruppe „Umgebungseinfluss mit den Schwerpunkten Tribologie, Heißwasserkorrosion, Tieftemperatur-Werkstoffprüfung, Werkstoffverhalten unter Wasserstoffeinfluss und Untersuchung radioaktiver Werkstoffe“.



Dipl.-Ing. Markus Rauch

wurde am 13. April 1975 in Bad Saulgau geboren. Er studierte von 1995 bis 2001 Maschinenbau an der Universität Stuttgart. 1999 ging er für ein Jahr an die George Washington University, D.C., und schloss im Schwerpunktfach Automobil Crash-Simulation mit dem Master of Science ab. Seit 2001 ist Markus Rauch wissenschaftlicher Mitarbeiter der MPA Stuttgart mit Schwerpunkten im Bereich warmfester Werkstoffe sowie Werkstoffmodellierung und Lehrstuhl-tätigkeiten. Derzeitige Forschungsthemen: Schädigungsentwicklung in hochwarmfesten Werkstoffen, Lebensdauerkonzept für Schaufel-Welle-Verbindung von Turbinen.