

Gruppe

LEBENSDAUERKONZEPTE UND THERMOMECHANIK

Dr. Christoph Schweizer | Telefon +49 761 5142-382 | christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de

LEBENSDAUERVORHERSAGE DÜNNWANDIGER GEKÜHLTER HOCH-TEMPERATURKOMPONENTEN VERBESSERT

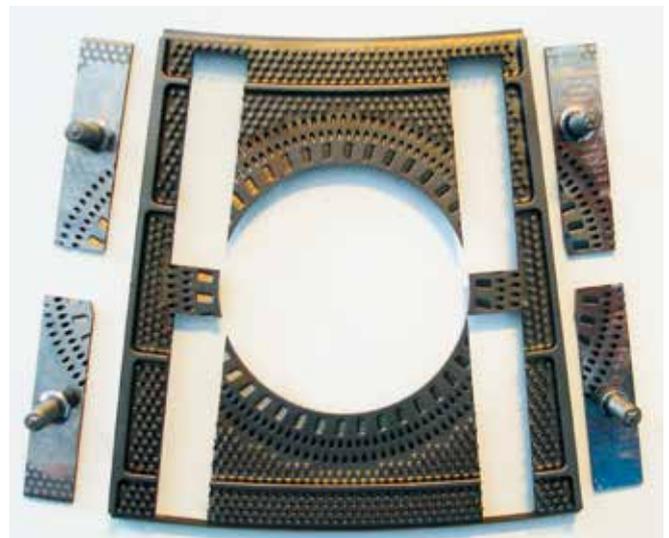
Um hohe Wirkungsgrade sowie eine Reduzierung der Emissionen in Flug- und stationären Gasturbinen zu erreichen, spielen effektive Kühlstrategien eine immer wichtigere Rolle. Flugtriebwerkshersteller wie Rolls-Royce Deutschland (RRD) reduzieren durch eine optimierte Prall-Effusionskühlung die Oberflächentemperatur der heißgasbeaufschlagten Wandschindeln in der Brennkammer und realisieren dabei eine strömungsoptimierte Konfiguration der Luftbeimischung. Durch die Möglichkeiten der additiven Fertigung lassen sich darüber hinaus komplexe Schindel- und Effusionslochgeometrien realisieren und damit die Kühleffektivität weiter steigern. Gleichzeitig lassen sich die Bauteile in einem einzigen Fertigungsschritt kostenoptimiert herstellen.

Gekühlte Bauteile unterliegen thermomechanischer Ermüdungsbeanspruchung

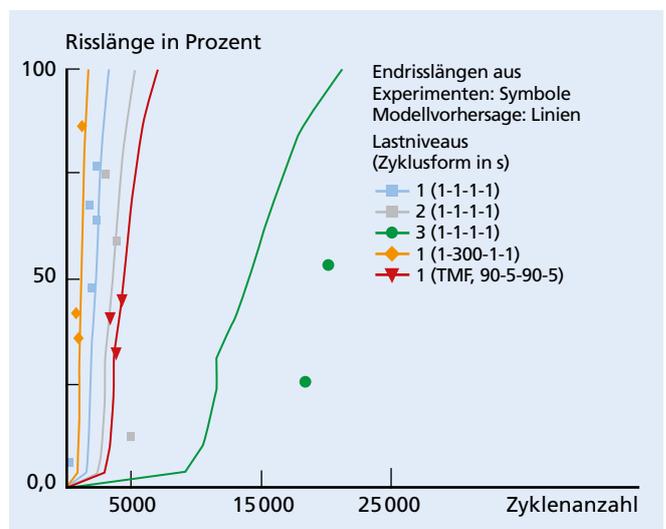
Die durch den Flugzyklus bedingten häufigen An- und Abfahrvorgänge der Triebwerke führen zu einer thermomechanischen Ermüdungsbeanspruchung (engl. thermomechanical fatigue, TMF) der Wandschindeln. Die höchstbelasteten Stellen treten in Bereichen der Schindelanbindung auf, da dort hohe Zwangsbedingungen die Freiheitsgrade einschränken. Auch andere, mit Effusionslöchern versehene Bereiche unterliegen einer zyklischen Belastung, und es ist zu klären, inwiefern Effusionslöcher die Lebensdauer der Bauteile beeinflussen.

Prüfstand zur Aufbringung bauteilnaher Belastungen

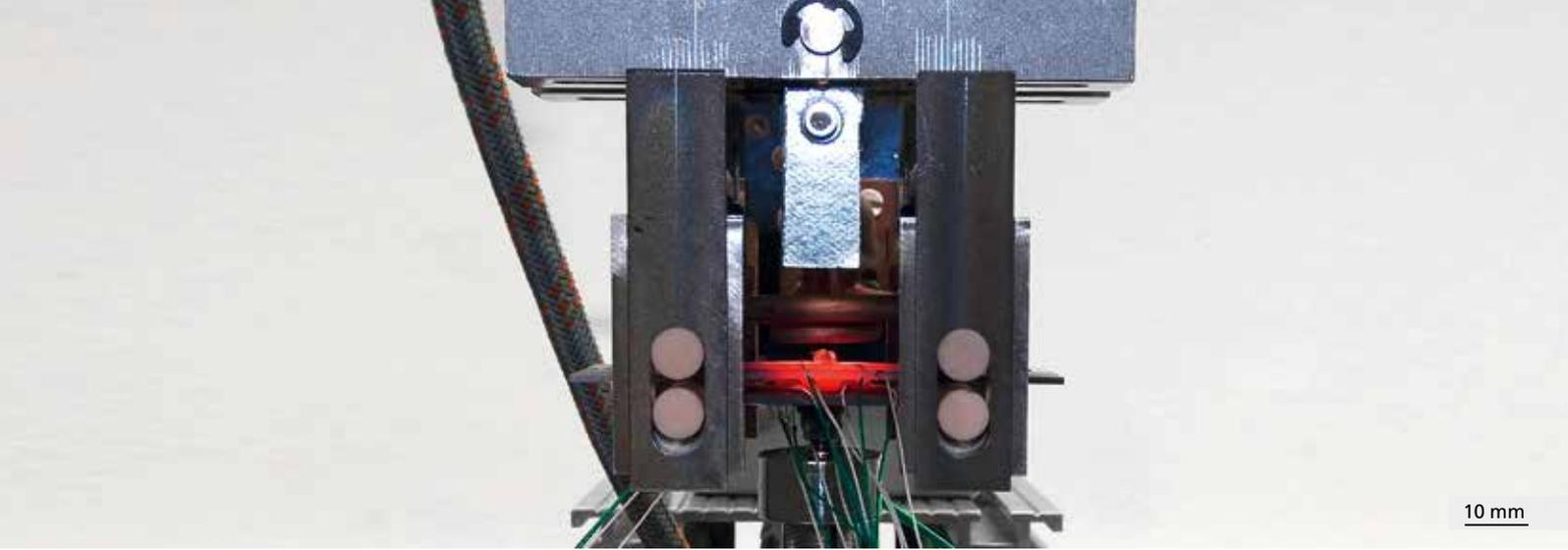
Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanzierten Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo) wurden gemeinsam mit RRD Einflüsse auf die Ermüdungslebensdauer von Brennkammerschindeln untersucht. Innerhalb des Vorhabens wurde hierfür ein 3-Punkt-



1 Vier Proben (rechts und links), aus einem Brennkammerhitzeschild entnommen (Mitte).



2 Für verschiedene Versuchsbedingungen vorhergesagte Rissverläufe (Linien) und die im Prüfstandsversuch erreichten Endrisslängen.



10 mm

3 Zentraler Bereich des 3-Punkt-Biegeprüfstands mit eingebauter Probe im Hochtemperaturversuch.

Biegeprüfstand entwickelt, der es erlaubt, Proben unter kontrollierten bauteilnahen mechanischen und thermischen Randbedingungen zu testen (Abbildung 3). Die Proben können dabei entweder direkt aus den Bauteilen entnommen (Abbildung 1) oder durch additive Fertigung hergestellt werden, sodass die Geometrie im Bereich der Anbindung und die Werkstoffmikrostruktur dem realen Bauteil entsprechen.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Analyse der Schädigungsentwicklung unter thermomechanischer Ermüdung in lebensdauerkritischen Bereichen wie Effusionslochrändern und Radiusübergängen an der Bolzenanbindung sowie auf der Bestimmung des Klemmkraftverlusts der Bolzenanbindung. Der Prüfstand ist in eine Universalprüfmaschine integriert, sodass sich Kräfte und Verschiebungen sowie das Risswachstum messtechnisch erfassen lassen. Insbesondere das verbesserte Verständnis über das Rissverhalten an Bereichen wie Effusionslochrändern ist ein wichtiger Bestandteil der Messergebnisse. Die Versuche wurden mit drei unterschiedlich hohen Verschiebungsamplituden (Lastniveau 1 bis 3) bei erhöhter, zeitlich konstanter Temperatur durchgeführt. Dabei wurde eine trapezförmige Zyklusform mit einer Rampenzeit für Be- und Entlasten sowie einer Haltezeit bei minimaler und maximaler Last von jeweils 1 s gewählt (1-1-1-1-Zyklus).

Als weitere Variation wurde eine erhöhte Haltezeit von 300 s bei maximaler Last gewählt (1-300-1-1-Zyklus), um zeitabhängige Einflüsse zu untersuchen. Darüber hinaus wurden Versuche mit wechselnder Temperatur innerhalb eines Zyklus durchgeführt (TMF mit Zyklusform 90-5-90-5), um die Bauteilbelastung noch besser im Versuch abzubilden. Abbildung 2 zeigt anhand der Symbole die in den Versuchen erreichte normierte Endrisslänge über der erreichten Zyklenzahl für die verschiedenen Versuchsparameter.

Verbessertes Lebensdauermodell

Die zahlreichen Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen konnten für die Weiterentwicklung eines existierenden Lebensdauermodells genutzt werden. Hierfür wurden bruchmechanische numerische Studien zum Rissverhalten an den experimentell beobachteten Anrissstellen durchgeführt. Die Risse laufen typischerweise durch Bereiche hoher Spannungsgradienten. Das Ziel war, durch validierte viskoplastische Verformungsmodelle die auftretenden Spannungen und Dehnungen gut mittels der Finite-Elemente-Methode abzubilden und für die Vorhersage des Rissfortschritts den Spannungsverlauf entlang definierter Risspfade zu berücksichtigen. Durch das Nachrechnen der oben genannten Prüfstandsversuche konnte das Modell erfolgreich validiert werden. Die in Abbildung 2 dargestellten Linien stellen den vorhergesagten Rissverlauf dar und decken sich gut mit den experimentellen Ergebnissen. Die weiterentwickelte Methode konnte schließlich zur Vorhersage komplexer Bauteile angewandt werden.

Inzwischen konnten sich die bauteilnahen Biegeversuche als wichtige und sinnvolle Ergänzung zu einachsigen Versuchen etablieren, da sie bauteilspezifische Besonderheiten besser berücksichtigen. Es lassen sich beispielsweise durch Variation der Bauteilgeometrie, der Werkstoffauswahl und der Mikrostruktur frühzeitig im Entwicklungsprozess und unter realitätsnahen Bedingungen die Auswirkungen derartiger Veränderungen auf das Lebensdauerverhalten bewerten. Ein weiterer Vorteil ergibt sich daraus, dass sich solche Versuche wesentlich effizienter als zum Beispiel in zeit- und kostenintensiven Komponententests durchführen lassen.

Dr. Michael Schlesinger, Dr. Christoph Schweizer