

Schwingverschleiß und Reibermüdung unter triebwerksähnlichen Bedingungen: Prüfstandentwicklung und Versuchsbetrieb am DLR

Fretting wear and fretting-fatigue under engine-like conditions: test bench development and operation at the German Aerospace Center (DLR)

N. Kind, J. Walz, W. Müller, A. Langfeld-Rosner, M. Müller, V. Oberländer, J. Roth, C. Wunsch, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Test und Simulation für Gasturbinen, Augsburg

A. Blug, Fraunhofer-Institut für physikalische Messtechnik IPM, Freiburg

Kurzfassung – Der Einsatz von innovativen Werkstoffen in Gasturbinen erfordert präzise und verlässliche Lebensdauervorhersagen unter komplexen Lastkollektiven. Das DLR Institut für Test und Simulation für Gasturbinen (DLR-SG) strebt die triebwerksnahe Werkstoff- und Komponentenprüfung unter einer kombinierten Beaufschlagung von mechanischen, thermischen und chemischen Lasten (MTC) an. Materialschädigung durch Schwingverschleiß und Reibermüdung spielt für reibbehaftete Kontakte im Heißgaspfad und in peripheren Systemen der Gasturbine eine große Rolle. Der Einfluss von korrosiven Atmosphären inkl. Wasserdampf auf die Verschleißkinematik ist jedoch noch unzureichend untersucht. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Entwicklung und den Aufbau von zwei dedizierten Prüfständen für die Untersuchung von Schwingverschleiß und Reibermüdung bei Temperaturen bis 1000 °C unter Beaufschlagung einer korrosiven Gasmischung (zusammengesetzt aus N₂, O₂, CO₂, NO, CO, SO₂, H₂O-Dampf) bei Drücken bis 20 bar.

Stichwörter: Verschleiß, Reibermüdung, Hochtemperatur, Korrosion, Prüfstandentwicklung

Abstract – The use of innovative materials in gas turbines requires precise and reliable service life predictions under complex load conditions. The DLR Institute of Test and Simulation for Gas Turbines (DLR-SG) aims to test materials and components under conditions similar to those found in actual engines, subjecting them to a combination of mechanical, thermal, and chemical loads (MTC). Material damage caused by vibration wear and friction fatigue plays a major role in friction-related contacts in the hot gas path and in peripheral systems. However, the influence of corrosive atmospheres, including water vapor, on wear kinematics has not yet been sufficiently investigated. This article describes the development and construction of dedicated test bench configurations for investigating wear and friction fatigue at high temperatures up to 1000 °C under exposure to a corrosive gas mixture (N₂, O₂, CO₂, NO, CO, SO₂, H₂O vapor) at ambient pressures up to 20 bar.

Keywords: wear, fretting, fretting-fatigue, high temperature, harsh environment, test bench development

1 Einleitung

Die Untersuchung von Schwingverschleiß und Reibermüdung auf verschiedenen Größenebenen ist eine wichtige Grundlage, um die Lebensdauer der eingesetzten Werkstoffe in neuen Triebwerksgenerationen zu ermitteln. Reibverschleiß und Schwingermüdung sind maßgebliche Schädigungsmechanismen in kontaktierenden Teilen der Gasturbine. Komponenten mit merklicher Reibbeanspruchung umfassen beispielsweise Rotorscheaufelfüße und Scheibennuten, Steckverzahnungen, Durchführungen, axiale Fixierungen von Rotorscheaufeln, Lager-sitze und Haltenasen. Die hohe dynamische Belastung dieser Komponenten und deren zeitliche Temperaturänderungen mit teils hohen Gradienten begünstigen dynamische Relativbewegungen [1]. Der künftige Einsatz von alternativen Brennstoffen in Gasturbinen (z.B. Wasserstoff, Ammoniak) und die Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur gehen mit einer höheren thermischen Belastung der kontaktierenden Systemelemente einher. Der Einfluss tendenziell höherer Temperaturen an Kontaktstellen in Kombination mit einer Gasbeaufschlagung auf die Bildung tribokorrosiver Partikel und Agglomerate muss grundsätzlich erforscht werden. Bislang ist der Einfluss von Einzelgasen auf die Schädigungsmechanismen,

welche durch wechselseitige Wirkung von Tribo-Oxidation, Diffusion, Zerspanung, plastischer Verformung, Adhäsion und Bildung versinterter Oxidagglomerate bestimmt ist, unzureichend oder nur teilweise beschrieben. Die Prüfstände SRV@5 und MTC-BIAX am Institut DLR-SG wurden für die Untersuchung von Schwingverschleiß und Reibermüdung bei Hochtemperatur bis 1000 °C unter Schadgasbeaufschlagung konzipiert und bieten somit die Möglichkeit, zentrale Fragestellungen zu Kontaktproblemen in flexiblen Gasturbinen zu adressieren. Das systematische Verständnis der genannten Schädigungsmechanismen ist Grundlage sowohl für die Lebensdauerbestimmung von Systemkomponenten als auch für den wirkungsvollen Einsatz neuartiger Werkstoffe und Beschichtungen.

2 Schwingverschleiß

Für die Untersuchung von Schwingverschleiß bei gleichzeitig hohen Temperaturen und korrosiver Atmosphäre wurde ein SRV@5-Prüfstand beschafft und dieser in einer Prototypenentwicklung um eine gasbeschickte Druckkammer durch den Hersteller Optimol Instruments Prüftechnik GmbH erweitert. SRV@-Tribometer (Schwingung, Reibung, Verschleiß) erzeugen eine linear oszillierende Gleitbewegung, um realitäts- und praxisnahe Beanspruchungsbedingungen nachzuahmen. Hierbei werden komplexe Kontaktkonfigurationen auf reproduzierbare Punkt-, Linien- und Flächenkontakte mittels einfacher Prüfkörpergeometrien wie z.B. Scheiben, Kugeln und Zylindern abstrahiert.

Die durch einen elektromagnetischen Linearantrieb generierte Translationsbewegung ist definiert durch den Frequenzbereich f von 0,001 Hz bis 500 Hz mit Hübem s von 0,01 mm bis 5 mm bei gleichzeitig aufgebrachter Prüfkraft F_N zwischen Grundkörper und Gegenkörper im Bereich von 25 N bis 2500 N. Die aus der Bewegung des Gegenkörpers auf dem Grundkörper resultierende laterale Reibkraft wird gemessen und der Reibungskoeffizient berechnet. Über diese Grundausstattung hinaus verfügt der bei DLR-SG eingesetzte SRV@5-Prüfstand über ein Hochtemperaturmodul mit Kontaktheizung, welches Versuchstemperaturen von bis zu 1000 °C an der Probenoberfläche realisiert.

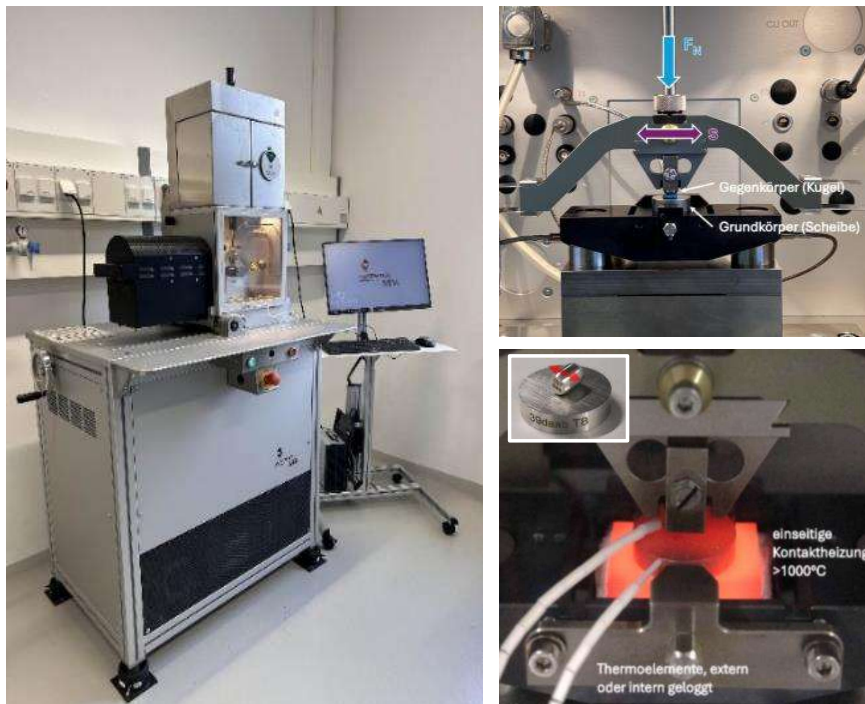


Bild 1: SRV@5 Prüfstand bei DLR-SG (links), Standard-Prüfaufbau mit linear oszillierender Schwinde sowie eingebautem Grund- und Gegenkörper mit Schmierstoff (rechts oben) und Hochtemperaturmodul (rechts unten)

Figure 1: SRV@5 test stand at DLR-SG (left), standard test stand configuration with linearly oscillating swing and ball-on-disk configuration (top right) and high temperature module (bottom right)

Bei DLR-SG werden metallische und keramische Legierungen und Beschichtungssysteme hinsichtlich ihrer tribologischen Eigenschaften untersucht. Dies umfasst auch Cobalt-Legierungen, darunter sowohl die etablierten Tribaloy™-Legierungen T800 und T400, als auch neu entwickelte Legierungen. Die unter einer Fretting-Belastung von $F_N = 100\text{ N}$, $s = 150\text{ }\mu\text{m}$ und $f = 50\text{ Hz}$ für eine Prüfdauer von 2 h in dem Temperaturbereich von $200\text{ }^\circ\text{C} - 700\text{ }^\circ\text{C}$ geprüften Proben werden nach dem Versuch mittels Weißlichtinterferometrie vermessen und die Verschleißvolumina bestimmt. In Ergänzung mit mikroanalytischen Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop ermöglichen diese Ergebnisse eine Aussage über geeignete Temperatureinsatzbereiche der verschiedenen Legierungen in reibbehafteten Kontakten.

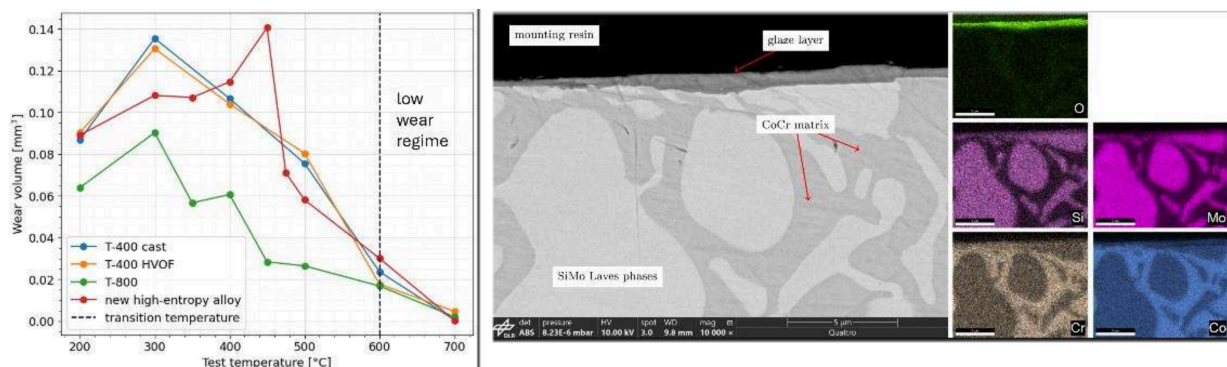


Bild 3: deutliche Reduktion des Verschleißvolumens von untersuchten Co-Legierungen bei Temperaturen $> 500\text{ }^\circ\text{C}$ als Ergebnis der Bildung eines kompaktierten Oxids bzw. Glaze Layer (links) und Elementanalyse dieser Verschleißschutzschicht per EDX (rechts)

Figure 3: significant reduction of wear volume of studied Co-alloys for temperatures $> 500\text{ }^\circ\text{C}$ due to formation of a compacted oxide or glaze layer (left) and elemental analysis of this protective coating by means of EDX (right)

Um zusätzlich zur Umgebungstemperatur den Einfluss von Einzelgasen und Gasmischungen auf die Schädigungskinetik zu untersuchen, wird das zu untersuchende Tribosystem einer Gasmischung, bestehend aus variierbaren Anteilen von N_2 , O_2 , CO_2 , NO , CO , SO_2 und H_2O -Dampf, ausgesetzt. Die Gasbeaufschlagung des Prüfraumes muss über ein geschlossenes System erfolgen, was die Entwicklung und Fertigung einer speziell für diese Gase ausgelegte Druckkammer mit einem Innenvolumen von ca. $0,3\text{ l}$ erforderlich machte. Dieser Prototypenbau wurde vom Hersteller Optimol Instruments GmbH umgesetzt. Mehrere technische Anforderungen und Rahmenbedingungen sind von besonderer Bedeutung für die Prototypenentwicklung gewesen: Da die vorgeheizte Gasmischung mit Wasserdampfanteilen von bis zu $30\text{ wt}\%$ sehr feucht sein kann, ist die Vermeidung von Kondensatbildung von großer Wichtigkeit. Um eine Unterschreitung des Taupunktes an allen Stellen des Prüfraumes zu unterbinden, wird die Druckkammerwand über einen autarken Heizthermostaten mit Silikonöl mit einer Temperatur von bis zu $200\text{ }^\circ\text{C}$ durchströmt und somit aktiv beheizt. Zusätzlich muss der Linearantrieb zur Aufbringung der oszillierenden Gleitbewegung durch diese heiße Kammerwand geführt werden. Die hierfür benötigten Dichtungen bestehen aus Hochleistungspolymeren, welche Temperaturen oberhalb von $200\text{ }^\circ\text{C}$ standhalten. Eine Vielzahl der in den Prototypen verbauten Komponenten ist dauerhaft hohen Temperaturen unter gleichzeitig korrosiver Atmosphäre ausgesetzt. Für diese Bauteile wurde ein korrosionsbeständiger und hochwarmfester Werkstoff gewählt, der gleichzeitig kosteneffizient zerspanend zu bearbeiten und auf dem Markt verfügbar ist.

Die Gasbeschickung über eine zentrale Gasversorgungsstrecke erfolgt über Swagelok-Verbindungen. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Beitrages befindet sich der Prototyp in der Abnahme beim Hersteller.



Bild 4: CAD der gasbeschickten Kammer mit einem Innenvolumen von ca. 0,3 l (gelb) für den SRV®5-Prüfstand (links) und Teilaufbau der Kammer während Abnahme beim Hersteller Optimol Instruments GmbH (rechts)

Figure 4: CAD of test chamber for corrosive gases with an inner volume of ca. 0,3 l (yellow) for the SRV®5 test stand (left) and partial mounting of the chamber during factory acceptance at Optimol Instruments GmbH (right)

3 Reibermüdung

Im Rahmen einer Innovationspartnerschaft zur Entwicklung von MTC-Prüfständen zwischen dem DLR Institut für Test und Simulation für Gasturbinen (DLR-SG) und der IABG (Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH) ist ein Sonderaufbau für die Untersuchung von Reibermüdung umgesetzt worden. Dieser Sonderbau ist Teil der biaxialen hydraulischen Prüfanlage, welche eine simultane Aufbringung von mechanischen, thermischen und chemischen Lasten ermöglicht. Eine nähere Beschreibung des MTC-BIAX Prüfstands findet sich bei Müller et al. [2]. Im Sonderaufbau werden die Ermüdungsprobe sowie Fretting-Pads in biaxialer Konfiguration in einer gasbeschickten Druckkammer eingebaut. Probentemperaturen von bis zu 1000 °C werden durch eine innovative Laserheiztechnik realisiert. Eine nähere Beschreibung der Laserheiztechnik findet sich bei Oberländer et al. [3]. Die optische Wegmessung per digitaler Bildkorrelation ermöglicht die genaue Bestimmung von Relativbewegungen zwischen den sich kontaktierenden Probenpaarungen [4].

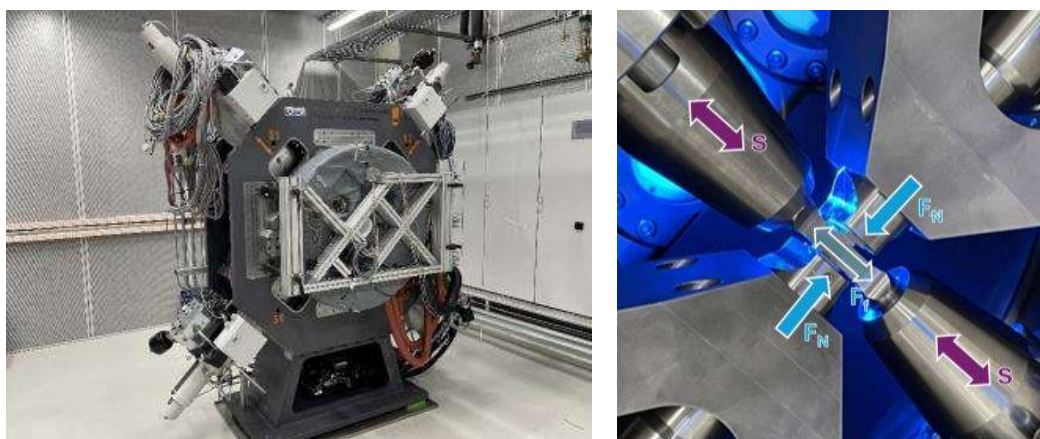


Bild 5: MTC-BIAX Anlage bei DLR-SG (links) und Sondereinbau für Reibermüdung (rechts)

Figure 5: MTC-BIAX test stand at DLR-SG (left) and setup for fretting-fatigue (right)

Die unabhängige Regelung aller vier hydraulischen Zylinder ermöglicht es, die Ermüdungsprobe schwellend zu belasten (F_f) und diese gleichzeitig in ihrer Achse zu verschieben,

sodass sich ein relativer Reibweg s zwischen Pads und Probe einstellt. Der Reibweg ist somit flexibel einstellbar.

3.1 Optische Messung von Reibweg und Dehnung

Die Messung von Reibweg und Dehnung in den Reibermüdungsversuchen erfolgt optisch mit Hilfe eines erweiterten RODiS-Sensors [4, 5]. Hierbei handelt es sich um ein 2D-Bildkorrelationssystem, das Verschiebungen nach dem Prinzip der „Digital Image Correlation“ (DIC) in Echtzeit auf der Grafikkarte (GPU) auswertet. Das System wurde mit einem telezentrischen Objektiv mit einem Arbeitsabstand von 360 mm ausgestattet und kann somit – wie in **Bild 6a** gezeigt – außen an der Druckkammer montiert werden. Durch ein Fenster im Deckel der Druckkammer des biaxialen Prüfstandes wird die Seitenkante von Probe und Reibpads mit einem quadratischen Bildfeld von 2176 x 2176 Pixeln bzw. 11,7 x 11,7 mm² – das entspricht einer Auflösung von 5,4 µm/Pixel – und einer Bildrate von 950 Hz vermessen. Die schnelle Verarbeitung hochauflösender Bilder ermöglicht eine berührungs- und markierungsfreie Messung, indem es die Mikrostruktur der Probenoberfläche korreliert. Daher sind in **Bild 6b** die unbehandelten Oberflächen ohne Aufbringung von Speckle-Lack zu sehen. Die Probenachse in **Bild 6b** verläuft parallel zur Achse X1 des biaxialen Prüfstandes, die Messpunkte auf den Seitenflächen der beiden Reibpads liegen senkrecht dazu auf der Achse X2, die den Anpressdruck der Reibpads regelt. Die beiden Messpunkte auf der Probenachse dienen einem doppelten Zweck: einmal zur Dehnungsmessung analog zu [6] (rotes Signal in **Bild 6c**), zum anderen Messung der Verschiebung von Probe (grüne Kurve in **Bild 6c**) und Reibpads (blaue Kurve in **Bild 6c**) entlang der Probenachse. Die Differenz beider Wege ist der Reibweg, den die Pads auf der Probe zurücklegen (schwarze Kurve).

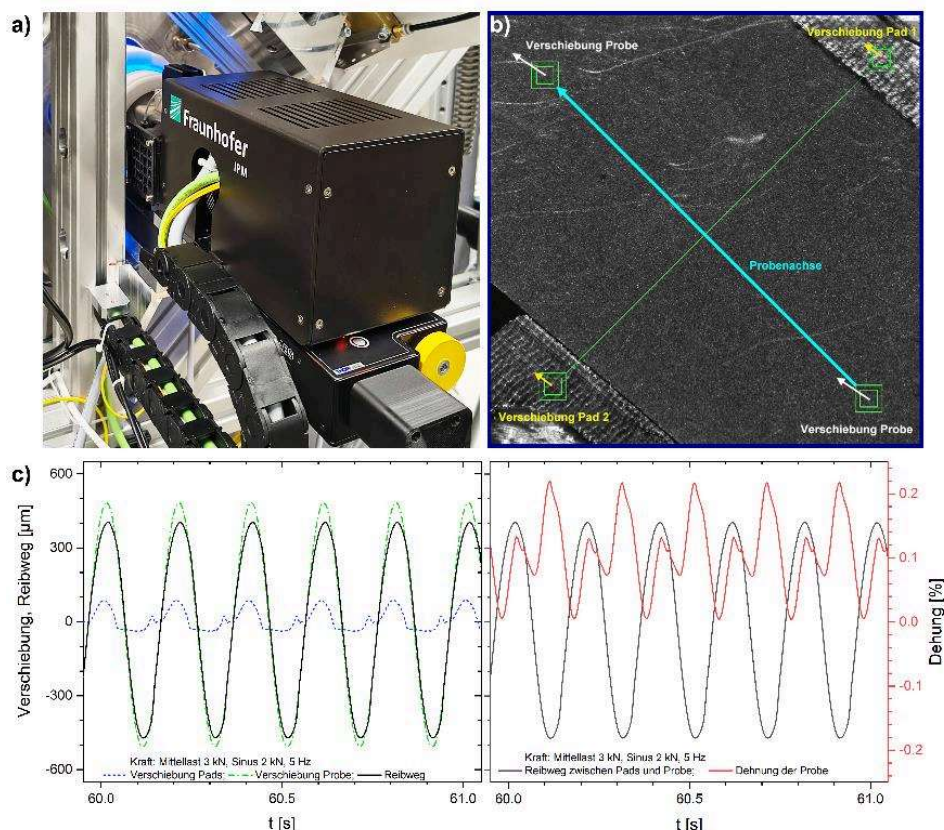


Bild 6: a) RODiS-Messkopf an einem Fenster der Druckkammer des biaxialen Prüfstandes zur optischen Messung von Reibweg und Dehnung in Fretting-Versuchen. b) Kamerabild (11,7 x 11,7 mm²) mit Seitenansicht von Fretting-Probe und anliegenden Reibpads. Die Verschiebungen von Probe (weiße Pfeile) und Pads (gelbe Pfeile) werden auf die Probenachse (cyan) projiziert. c) Links: der Reibweg (schwarz) ergibt sich aus der Differenz der

Verschiebungen von Probe (grün) und Pads (blau). Rechts: sowohl der Reibweg (schwarz) als auch die Dehnung (rot) können zur Versuchssteuerung verwendet werden.

Figure 6: a) RODiS measurement head at a window of the pressure vessel of the biaxial test side for optical real-time measurement of fretting length and specimen stain. b) Camera image (11.7 x 11.7 mm²) of the side of specimen and fretting pads. The displacements of specimen (white arrows) and pads (yellow arrows) are projected on the specimen axis (cyan). c) Left: the fretting length (black) is calculated as the difference of specimen displacement (green) and pad displacement (blue). Right: both, fretting length (black) and specimen strain (red) can be used to control fretting tests.

Beide Signale – Reibweg und Dehnung – können als Analogsignale mit einer Messrate von 950 Hz und einer Latenz von 4 ms ausgegeben und zur Versuchssteuerung verwendet werden. Bei dem Versuch in **Bild 6c** handelt es sich um einen kraftgeregelten Versuch an Stahl mit einer Mittellast von 3 kN, die von einer sinusförmigen Wechsellast mit einer Amplitude von 2 kN und einer Zyklusfrequenz von 5 Hz überlagert wird. Im blauen Signal erkennt man reibungsbedingte Mitnahmeeffekte in der Verschiebung der Pads an den Umkehrpunkten der Last, die sich auch auf die Dehnung der Probe auswirken (rotes Signal).

4 Ausblick

Die beschriebenen Prüfstände ermöglichen dank der Kombination aus tribologischer Belastung, Aufbringung von extremen Temperaturen und Beaufschlagung einer korrosiven Belastung eine triebwerksnahe Abbildung reibbehafteter Belastungszustände. Diese Anlagen bieten die Möglichkeit, den Einfluss von Schadgasen und deren Einzelbestandteilen auf die Bildung tribokorrosiver Partikel und Aggregate systematisch zu untersuchen. Nach Abschluss der laufenden Inbetriebnahmen sind umfangreiche Vorhaben geplant, um die Qualität und Zuverlässigkeit der Prüfergebnisse nachzuweisen.

Danksagung – Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie unter dem Förderkennzeichen LABAY99 und LABAY115 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Literatur

- [1] A Rossmann, Turbo Consult: Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik für Praktiker - Untersucher, Gutachter, Dienststellen und Behörden, Betreiber, Qualitätssicherung, Konstrukteure, Wartung und Kundendienst (2000); ISBN 3-00-008429-0
- [2] W. Müller, N. Kind, A. Langfeld-Rosner, M. Müller, V. Oberländer, J. Roth, C. Wünsch: Lebensdauertests für Hochtemperaturwerkstoffe unter triebwerksähnlichen Bedingungen: Aufbau und Inbetriebnahme der MTC-Prüfstände für das DLR. In: Tagungsband Werkstoffprüfung, DGM - Gesellschaft für Materialkunde, 2025 (eingereicht).
- [3] V. Oberländer, N. Kind, W. Müller: Innovatives Hochtemperatur-Laserheizsystem aus zwei kombinierten Laserscannern: Entwicklung und Prüfstandsintegration für Lebensdauerprüfungen. In: Tagungsband Werkstoffprüfung, DGM – Gesellschaft für Materialkunde, 2025 (eingereicht).
- [4] A. Blug, F. Conrad, A. Bertz, C. Kontermann, D. Carl, M. Oechsner: Application of high-performance DIC for a comprehensive evaluation of biaxial fatigue crack growth experiments. Strain 59/6 (2023), e12455. <https://doi.org/10.1111/str.12455>
- [5] RODiS-System zur optischen Dehnungsmessung, <https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/produktionskontrolle-inlinemesstechnik/systeme/rodis-dehnungssensor.html> , recherchiert am 28.8.2025
- [6] Blug, A.; Regina, D. J.; Eckmann, S.; Senn, M.; Bertz, A.; Carl, D.; Eberl, C. (2019): Real-Time GPU-Based Digital Image Correlation Sensor for Marker-Free Strain-Controlled Fatigue Testing. Applied Sciences 9 (10), S. 2025. DOI: 10.3390/app9102025. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/10/2025> .