

Lebensdauertests für Hochtemperaturwerkstoffe unter triebwerksähnlichen Bedingungen: Aufbau und Inbetriebnahme der MTC-Prüfstände für das DLR

Tests for more precise service life predictions under engine-like conditions: Development and bringing-into-service of the MTC test stands at DLR

W. Müller, N. Kind, 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

Kurzfassung – Die Lebensdauer von Triebwerkskomponenten wird durch das Zusammenwirken mechanischer, thermischer und chemischer Belastungen (MTC) und insbesondere durch deren gegenseitige Wechselwirkungen begrenzt. Dieser Beitrag beschreibt die Entwicklung und den Aufbau einer Gruppe von Prüfständen, die auf einzigartige Weise Ermüdungstests von Materialproben unter MTC-Belastungen ermöglicht. Die vier MTC-Prüfstände sind mechanisch komplementär ausgelegt (biaxiale Ermüdung, uniaxiale Ermüdung, VHCF: very high cycle fatigue, Kriechermüdung), so dass sie die relevantesten Schädigungsverhalten in Flugzeugtriebwerken abdecken. In jedem der MTC-Prüfstände befindet sich der Prüfling in einem Druckbehälter, der mit einem variablen Gemisch aus Reingasen (N_2 , O_2 , CO_2 , NO , CO , SO_2) sowie einem hohen Wasserdampfgehalt beaufschlagt werden kann, um den korrosiven Einfluss realer Triebwerksabgase zu simulieren. Darüber hinaus ist jeder MTC-Prüfstand mit einem neuentwickelten Laserheizsystem ausgestattet, das Materialtemperaturen von bis zu 1400 °C ermöglicht.

Stichwörter: Ermüdung, Korrosion, Hochtemperatur, Lebensdauer, Werkstoffprüfung

Abstract – The service life of aero-engine components is limited by the acting collective of mechanical, thermal and chemical loads (MTC) and in particular by their mutual interactions. This article describes the development and construction of a group of test rigs that enables fatigue testing of material samples under MTC loads in a unique way. The four MTC test rigs have a complementary mechanical design (biaxial fatigue, uniaxial fatigue, VHCF: very high cycle fatigue, creep fatigue), so that they cover the most relevant damage behaviour in aircraft engines. In each of the MTC test benches, the test specimen is located inside a pressure vessel that can be subjected to a variable mixture of clean gases (N_2 , O_2 , CO_2 , NO , CO , SO_2) and a high water vapour content in order to reproduce the corrosive influence of real engine exhaust gases. In addition, each MTC test bench is equipped with a newly developed laser heating system that enables material temperatures of up to 1400 °C.

Keywords: fatigue, corrosion, high temperature, lifetime, material testing

1 Einleitung

Hocheffiziente Gasturbinen, betrieben mit nachhaltigen Kraftstoffen, spielen für eine zukunfts-fähige, klimaverträgliche Luftfahrt eine unverzichtbare Rolle [1]. Die Anforderungen, die neue Triebwerksgenerationen an Turbinenwerkstoffe stellen, gehen in Richtung höhere Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit (geringerer Kühlluftbedarf, höherer Wirkungsgrad) bei geringerem Gewicht und gleichbleibender Lebensdauer. Der Einsatz innovativer Werkstoffe in Gasturbinen sowie etablierter Werkstoffe an neuen Betriebspunkten erfordert präzise und zuverlässige Lebensdauerprognosen.

Die Lebensdauer von Triebwerkskomponenten wird durch das Zusammenwirken mechanischer, thermischer und chemischer Belastungen (MTC) und insbesondere durch deren gegenseitige Wechselwirkungen begrenzt. Lebensdauermodelle werden durch eine Kombination aus Felddaten und experimentellen Daten validiert. Da Prüfstandsversuche die Möglichkeit bieten, kontrollierte Bedingungen einzustellen und Einflussgrößen gezielt zu variieren, ist ihr Beitrag zur Validierung von Lebensdauermodellen, ergänzend zur Nutzung von Felddaten, unerlässlich.

Nach dem Stand der Technik werden in Lebensdauertests jeweils zwei der drei Belastungsarten (mechanisch, thermisch, chemisch) simultan angesprochen. Dafür stehen hervorragende Werkstoffprüfkapazitäten für Forschung, Entwicklung und Industrie zur Verfügung. Die Wechselwirkungen zwischen den drei simultan einwirkenden Belastungsarten waren jedoch bislang experimentell weitgehend unzugänglich.

Der vorliegende Beitrag beschreibt den Aufbau und die Funktion einer Gruppe aus vier Prüfständen, die erstmals die simultane Prüfung von Materialproben unter MTC-Belastungen - ähnlich zu den Belastungen einer Gasturbine - ermöglicht.

2 Entwicklung der Prüfstände

Die MTC-Prüfstände wurden in einer mehrjährigen sog. Innovationspartnerschaft zwischen dem DLR-Institut für Test und Simulation für Gasturbinen (SG) und der IABG (Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH), sowie einer größeren Anzahl an Unterauftragnehmern konzeptioniert, entwickelt und beschafft.

In einer Konzeptphase wurden ein grundsätzliches Konzept für die Realisierung der mechanischen, thermischen und chemischen Anforderungen entwickelt. Dabei wurden besonders kritische Komponenten identifiziert und Lösungsansätze erarbeitet, unter der Prämisse, dass marktverfügbare (Teil-) Lösungen gegenüber Neuentwicklungen zu bevorzugen sind. Es wurde allerdings festgestellt, dass sich eine Reihe der teils konkurrierenden Anforderungen weder mit marktgängigen Komponenten und Lösungen noch durch einfache Adaptierungen erfüllen lassen. In solchen Fällen wurden potentielle Entwicklungspartner durch Marktrecherchen identifiziert und in das Entwicklungsvorhaben integriert.

Als Beispiel schließen die extremen Bedingungen hinsichtlich Temperatur, Druck und korrosiven Medien eine taktile Dehnungsmessung aus, während etablierte Heizlösungen (wie Strahlungsöfen oder Induktionsheizung) die Zugänglichkeit für optische Verfahren stark einschränken. Als Lösung wurde eine Laserheizung präferiert, wobei kein System am Markt zur Verfügung stand, das unter den gegebenen Randbedingungen die hohen Anforderungen an Temperaturhomogenität erfüllen konnte. Als Folge wurden Technikumsversuche mit unterschiedlichen Lösungsansätzen potentieller Lieferanten durchgeführt und schließlich ein Entwicklungsvorhaben zur Laserheizung gestartet.

Bei einigen Technologien wurde am Ende der Konzeptphase das technische Risiko als zu groß betrachtet, um in die nächste Entwicklungsphase einzutreten. Für diese als kritisch eingeschätzten Technologien wurde eine Validierungsphase mit experimenteller Validierung im Labor- und Technikumsmaßstab durchgeführt, um technische Risiken zu minimieren und die Technologiereife zu erhöhen. An die Konzept- und Validierungsphase schloss sich die Prototypenphase an, innerhalb der die Entwicklung, Realisierung und Erprobung der vier Prototypen-Prüfstände durchgeführt wurde.

Parallel zu diesen Entwicklungsphasen der Prüfstände wurde am Standort in Augsburg die notwendige Infrastruktur zum Betrieb der MTC-Prüfstände geschaffen. Die notwendige Infrastruktur umfasst den Neubau einer Prüfhalle einschließlich der Medieninfrastruktur (Elektrik, Hydraulik, Kälteleistung, Druckluft), der Gasmischtechnik, der Gasbefeuchtung, der Sicherheitstechnik sowie einer übergeordneten Steuerung.

3 MTC-Prüfstände: Aufbau und Funktion der Hauptkomponenten

Die MTC-Prüfstände (Biax, Uniax, VHCF und Creep) sind mechanisch komplementär ausgelegt und decken dadurch gemeinsam die im Triebwerk relevantesten, korrosionsinduzierten Schadensverhalten ab.

3.1 MTC-Biax Prüfstand

Das Ziel des MTC-Biax Prüfstands (**Bild 1**) ist es, das Lebensdauerverhalten von Werkstoff-Prüflingen unter mehrachsigen Spannungszuständen unter mechanischer Ermüdungsbelastung und unter triebwerksähnlichen Bedingungen hinsichtlich Materialtemperatur, Medien- und korrosiver Atmosphäre zu untersuchen. Die Prüfung der Werkstoffproben erfolgt in standardisierten Geometrien, typischerweise einer Kreuzproben-Geometrie. Die Ergebnisse der Lebensdauerprüfungen dienen der Validierung numerischer Lebensdauermodelle, die u.a. am DLR-Institut SG entwickelt werden.

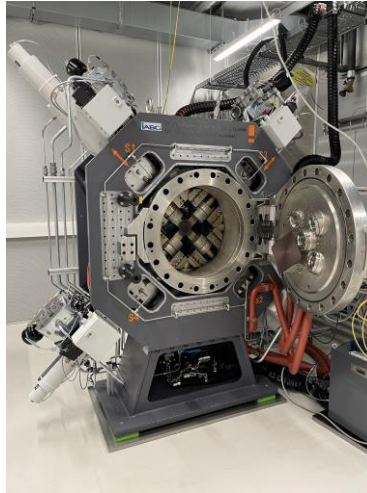


Bild 1: MTC-Biax Prüfstand im Zustand vor der Inbetriebnahme
Figure 1: MTC-Biax test bench before commissioning

Der MTC-Biax Lastrahmen ermöglicht durch je zwei servohydraulische Aktuatoren auf beiden Achsen Ermüdungsprüfungen mit Kräften bis ± 100 kN pro Achse bei Frequenzen bis 10 Hz. Durch einen Umbau von mechanischen Vorrichtungen ermöglicht dieser Prüfstand darüber hinaus den Einsatz für Fretting Fatigue Testing (Reibermüdung) bis 50 Hz. Eine nähere Beschreibung des Fretting-Aufbaus findet sich bei Kind et al. [2].

Der Druckbehälter ist an die konstruktiven Anforderungen des Biax-Prüfstandes angepasst und ermöglicht die Beaufschlagung der Probe mit einem Gasdruck von bis zu 20 bar. Er ist zylindrisch geformt, die beiden Stirnseiten sind als Türen ausgeführt. Der Druckbehälter bietet im Bereich des Zylindermantels die erforderlichen Durchführungen für die Laststränge mit entsprechenden Dichtungskonzepten, eine Reihe druckfester Durchführungen für z.B. Thermoelemente an verschiedenen Positionen, sowie in beiden Druckbehältertüren optische Zugänge für die Messtechnik, sodass Probenvorder- und -rückseiten zugänglich sind. Die Fenster der optischen Zugänge sind aus Saphirglas und tragen Beschichtungen, die an den jeweils erforderlichen Transmissionsbereich angepasst sind. Die Druckbehälterwand ist temperierbar, um zu hohe Temperaturen an den Dichtungen zu verhindern und um unerwünschte Kondensation an den Wänden beim Betrieb des Prüfstands unter einem hohen Wasserdampfanteil zu vermeiden. Zu diesem Zweck ist die Wand doppelwandig ausgeführt und wird über ein Wärmeträgeröl auf eine Temperatur im Bereich zwischen 40 °C und 200 °C gekühlt bzw. beheizt. Die Behälterwand-Temperierung erfolgt über das System Ölkonditionierung. Der Druckbehälter ist thermisch nach außen mit angepassten Formstücken isoliert.

Der Prüfstand wird von einem Gasmischsystem mit einer variablen Gasmischung aus Reingasen versorgt. Um die Zusammensetzung realer Triebwerkabgase kontrolliert nachzustellen, stehen die Gase N_2 , O_2 , CO_2 , NO , CO , SO_2 zur Verfügung. Eine Druckregelung ermöglicht den Betrieb bei einem Absolutdruck von bis zu 20 bar. Die vorgewärmte Gasmischung kann zudem über ein Befeuchtungssystem mit bis zu 30 wt% Wasserdampf versetzt werden.

Während der Lebensdauerprüfungen erfolgt ein geringfügiger, kontinuierlicher Gasaustausch, um Reaktionsprodukte abzuführen und konstante Bedingungen zu gewährleisten.

Zur Erwärmung des Prüfbereichs der Werkstoffproben (zone-of-interest) auf Temperaturen bis 1400 °C dient ein neuentwickeltes Laserheizsystem. Das Laserheizsystem besteht aus einer Laserquelle (Wellenlänge 1070 nm), die über Lichtleiter mit je einer Scanoptik auf der Vorder- und Rückseite des Prüfstands verbunden ist, sowie jeweils einer Wärmebildkamera auf beiden Seiten. Die Scanoptiken ermöglichen, dass ein punktförmig fokussierter Laserstrahl mit hoher Geschwindigkeit auf einer frei programmierbaren Bahn über die Probenoberfläche geführt und dadurch die Zone-of-Interest abgerastert wird. Um die angestrebte Temperaturhomogenität innerhalb dieses Probenbereichs zu erreichen, erfolgt eine Regelung der Lasergeschwindigkeit und -leistung entlang seiner Bahn, basierend auf den Wärmebilddaten. Eine detaillierte Darstellung des Aufbaus und der Funktionsweise des Laserheizsystems findet sich bei Oberländer et al. [3].

Die optische Messtechnik befindet sich außerhalb des Druckbehälters und ist an einem Messgerätehalter angebracht. Der optische Zugang erfolgt über die beschriebenen Saphirglasfenster. Zur Erfassung von zweidimensionalen Temperaturfeldern steht eine zusätzliche, hochauflösende Wärmebildkamera sowie auf der gegenüberliegenden Seite der Probe ein Quotientenpyrometer zur punktförmigen Erfassung der Oberflächentemperatur zur Verfügung. Für die zeitlich und örtlich hochaufgelöste, berührungsfreie Dehnungsmessung bei Hochtemperatur kommt ein optisches System zum Einsatz, das erlaubt, markierungsfrei zu arbeiten. Das Dehnungsmesssystem basiert auf dem in Bug et al. [4,5] beschriebenen System und ist auf den vorliegenden Anwendungsfall adaptiert. Das GPU-basierte Bildkorrelationsverfahren ermöglicht einen dehnungsgeregelten Betrieb des Lastrahmens.

3.2 MTC-VHCF Prüfstand

Der Lastrahmen des MTC-VHCF Prüfstands (**Bild 2**) beruht auf einer angepassten elektrodynamischen Resonanzprüfmaschine und ermöglicht eine Testfrequenz nahe 1000 Hz bei einer max. Nennlast von 25 kN statisch und ± 15 kN dynamisch. Der VHCF-Prüfstand ist ausgelegt auf die Untersuchung von Schädigungsphänomenen im Bereich des Very High Cycle Fatigues mit einer sehr hohen Zahl an Lastwechseln (Größenordnung 10^9) unter triebwerksähnlichen Bedingungen. Die Untersuchung erfolgt an Prüflingen in Flach- und Rundgeometrien.

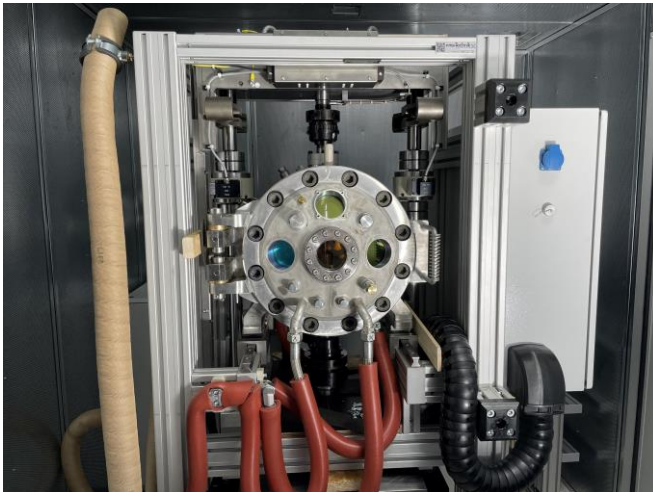


Bild 2: MTC-VHCF Prüfstand (Lastrahmen mit integriertem Druckbehälter) im Zustand vor der Montage der Messtechnik

Figure 2: MTC-VHCF test stand (load frame with integrated pressure vessel) before the measurement technology was installed

Die weiteren Hauptkomponenten des MTC-VHCF Prüfstands (Druckbehälter, Gasmischung, Gasbefeuchtung, Ölkonditionierung, Laserheizsystem, Messtechnik) sind in Analogie zum MTC-Biax Prüfstand ausgeführt (siehe Abschnitt 3.1) und auf die geometrischen und betriebstechnischen Randbedingungen des VHCF-Lastrahmens adaptiert.

3.3 MTC-Creep Prüfstand

Der MTC-Creep Prüfstand (**Bild 3 links**) dient der Untersuchung von Zeitstandsverhalten und Kriechermüdung unter ein- und mehrachsigen Spannungszuständen unter triebwerksähnlichen Bedingungen.



Bild 3: MTC-Creep (links) und MTC-Uniax (rechts) Prüfstand (Lastrahmen mit integriertem Druckbehälter) im Zustand vor der Montage der Messtechnik

Figure 3: MTC-Creep (left side) and MTC-Uniax (right side) test stand (load frame with integrated pressure vessel) before the measurement technology was installed

Der Lastrahmen basiert auf einer elektromechanischen Zentralspindel-Prüfmaschine (± 50 kN) mit Torsionsantrieb (100 Nm). Durch eine Überlagerung der Kriechermüdung in Zug-/Druckrichtung mit der Torsionsbelastung lassen sich mehrachsige Spannungszustände realisieren. Die Prüfgeschwindigkeit in axialer Richtung liegt im Bereich 200 mm/min bis 0,1 μ m/s. Die Einspannvorrichtungen des MTC-Creep Prüfstands erlauben den Einsatz von Flach- und Rundproben.

Die weiteren Hauptkomponenten des MTC-Creep Prüfstands sind in Analogie zum MTC-Biax Prüfstand ausgeführt (siehe Abschnitt 3.1) und auf die individuellen Randbedingungen des Creep-Prüfstandes adaptiert.

3.4 MTC-Uniax Prüfstand

Der Lastrahmen des MTC-Uniax Prüfstands (**Bild 3 rechts**) basiert auf einem servohydraulischen Lastrahmen, der konstruktiv an die Integration des Druckbehälters angepasst wurde.

Die Prüfkraft beträgt ± 100 kN bei Prüffrequenzen bis 30 Hz. Bei der Auslegung dieses Prüfstands lag der Fokus auf der Variabilität der möglichen Prüfungen. So erlaubt die Konstruktion des Lastrahmens eine Umrüstung der hydraulischen Zylinder sowie der Kraftmessdose auf kleinere (10 kN, 30 kN, 50 kN) bzw. größere (200 kN) Kraftbereiche. Neben mechanisch betätigten Hochtemperatur-Spannzeugen für Flach- und Rundproben gibt es eine

Biegevorrichtung für 3-Punkt- und 4-Punkt-Biegeprüfungen, sowie spezielle Vorrichtungen für Rissfortschrittsuntersuchungen (z.B. in CT-Geometrie [6]).

Die weiteren Hauptkomponenten des MTC-Uniax Prüfstands sind in Analogie zu den anderen MTC-Prüfständen ausgeführt (siehe Abschnitt 3.1) und auf die individuellen Randbedingungen des Uniax-Prüfstandes adaptiert.

4 Ausblick

Nach Abschluss der laufenden Inbetriebnahmen sind umfangreiche Vorhaben geplant, um die Qualität und Zuverlässigkeit der Prüfergebnisse nachzuweisen, und somit das hohe Potenzial dieser Anlagen für Industrie und Forschung in bestmöglichem Maße auszuschöpfen.

Durch Lebensdauertests von Hochtemperaturwerkstoffen an den beschriebenen Prüfständen können neue, numerische Lebensdauermodelle erstmals unter kontrollierten, triebwerksähnlichen Bedingungen experimentell validiert werden, wodurch ein Sprung in der Zuverlässigkeit und Präzision von Lebensdauervorhersagen erwartet werden darf. Eine gesteigerte Qualität von Lebensdauerprognosen wird nicht zuletzt Potenziale für eine Erweiterung von Limits bestehender Bauteile sowie in der Neuteilauslegung eröffnen.

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

Literatur

- [1] Zero Emission Aviation – Emissionsfreie Luftfahrt, White Paper der Deutschen Luftfahrtforschung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.), 2020
- [2] N. Kind, W. Müller, A. Langfeld-Rosner, M. Müller, V. Oberländer, J. Roth, C. Wünsch: Schwingreibverschleiß und -ermüdung unter triebwerksähnlichen Bedingungen. In: Tagungsband Werkstoffprüfung 2025, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, 2025
- [3] V. Oberländer, N. Kind, W. Müller: Innovatives Hochtemperatur-Laserheizsystem aus zwei kombinierten Laserscannern: Entwicklung und Prüfstandsintegration für Lebensdauerprüfungen. In: Tagungsband Werkstoffprüfung 2025, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, 2025
- [4] A. Blug, A. Bertz, D. Carl, F. Conrad, C. Kontermann, M. Oechsner: GPU-basierte Bildkorrelation für uni- und biaxiale Risswachstumsversuche. In: Zimmermann, M. (Hrsg.): Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand, Tagungsband Werkstoffprüfung 2022, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, 2022
- [5] 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.
- [6] Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials, E399-17. In: Annual Book of ASTM Standards, 2018.