

Intelligente Durchführung von in-situ Ermüdungsversuchen auf Mikroebene mittels OPC UA

Intelligent execution of in-situ fatigue tests at micro level using OPC UA

M. Müller, C. Wünsch, S. Reh

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Test und Simulation für Gasturbinen, Augsburg

Kurzfassung – Innovative Werkstoffe tragen maßgeblich zur Entwicklung emissionsärmer und energieeffizienter Gasturbinensysteme bei. Dabei erfordert der qualifizierte Einsatz dieser Werkstoffe eine fundierte Analyse werkstoffspezifischer Schädigungsmechanismen sowie eine darauf basierende modellgestützte Lebensdauervorhersage unter realitätsnahen thermomechanischen Belastungen. Hierzu werden Materialproben in dafür konzipierten Prüfständen [1] experimentell untersucht, sodass Rückschlüsse auf die strukturelle Integrität und Einsatzdauer dieser Werkstoffe getroffen werden können. Bei den Ermüdungsversuchen ergeben sich durch die hohe Bruchlastspielzahl Versuchszeiten von mehreren Tagen.

Dieser Beitrag beschreibt das Konzept der Erweiterung eines Prüfstands für Ermüdungsversuche. Dieser ermöglicht die zyklische Belastung von Proben in einem Rasterelektronenmikroskop, sodass die Rissentwicklung in-situ beobachtet werden kann. Die Erweiterung wird eine automatisierte Erfassung, Übertragung und Interpretation von Versuchsdaten mittels einer vernetzten Prüfstandarchitektur mittels OPC UA (Open Platform Communication Unified Architecture) ermöglichen. Damit können dann in Abhängigkeit der Schwingspielzahl die Bildaufnahmen der Rissentwicklung erfasst und die Versuchszeit am Prüfstand deutlich reduziert werden.

Stichwörter: Ermüdung, Lebensdauer, Werkstoffprüfung, Automatisierung, Datenkommunikation, IIoT, OPC UA

Abstract - Innovative materials contribute significantly to the development of low emission and energy efficient gas turbine systems. The qualified use of these materials requires a well-founded analysis of material specific damage mechanisms and a model-based service life prediction based on this under realistic thermomechanical stresses. For this purpose, material samples are experimentally analyzed in test rigs designed for this purpose [1] so that conclusions can be drawn about the structural integrity and service life of these materials. Fatigue tests require a test time of at least several test days due to the high number of fracture load cycles. This article describes the concept of extending a test bench for in-situ fatigue tests to include the possibility of automated acquisition, transmission, and interpretation of test data by means of a networked test bench architecture using OPC UA (Open Platform Communication Unified Architecture). Depending on the number of cycles, images of the crack development are taken in order to significantly reduce the test time on the test bench.

Keywords: fatigue, lifetime, material testing, Automation, data communication, IIoT, OPC UA

1 Einleitung

Für die Entwicklung von leistungsstarken Gasturbinen trägt der Einsatz innovativer Werkstoffe maßgeblich zu dem Erreichen der von Gesellschaft und Politik gesetzten Ziele, unter anderem für eine klimaneutrale Luftfahrt [2,3], bei. So erfahren die Werkstoffe innerhalb der Gasturbinen starke thermische und mechanische Lastwechsel, welche sich auf die Lebensdauer auswirken können. Die Werkstoffe sollen in Versuchen unter realitätsnahen Bedingungen experimentell getestet werden, um ein besseres Verständnis der Schädigungsmechanismen zu erlangen. Die Bedingungen setzen sich unter anderem aus dem Zusammenwirken von mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen (MTC) und deren gegenseitigen Wechselwirkungen zusammen. Um die Schädigungsmechanismen der Werkstoffe verstehen zu können, werden diese thermomechanischen Belastungen unter anderem durch zyklische Belastungen und Erhitzen auf Hochtemperatur in Low Cycle Fatigue Versuchen (LCF) [4,5] experimentell erzeugt. Bei diesen Ermüdungsversuchen ergeben sich auf Grund der hohen Bruchlastspielzahl Versuchszeiten von mehreren Versuchstagen. Während der Versuche werden Daten üblicherweise von einer Steuersoftware des Prüfstandsherstellers lokal gespeichert. Diese Daten können dann für die Auswertung weiter aufbereitet werden.

In diesem Beitrag wird ein Automatisierungskonzept für die intelligente Durchführung von in-situ Ermüdungsversuchen zur Untersuchung des Rissfortschritts vorgestellt. Hierfür ist eine Materialprobe innerhalb eines Rasterelektronenmikroskops (REM) in einen dafür konzipierten Mikrozuglastrahmen, dem eigentlichen Prüfstand, eingespannt. Dabei erfolgt der Informationsaustausch zwischen REM und dem Mikrozuglastrahmen durch die Kommunikationsschnittstelle OPC UA. Diese Kommunikationsschnittstelle erlaubt eine Übertragung von Informationen und Events mittels in OPC UA definierten Methoden und Funktionen. Sämtliche Ereignisse, Fehlermeldungen und Zustandsänderungen während des Versuchsdurchlaufs können kontinuierlich sowie ereignisgesteuert erfasst und dokumentiert werden. Im Konzept wird dabei die Vorgehensweise zur automatisierten Erfassung, Übertragung und Interpretation von Versuchsdaten durch eine vernetzte Prüfstandsarchitektur

beschrieben. Als Kriterium für das Auslösen der Events wird die aktuelle Schwingpielzahl genutzt, um die Bildgenerierung im REM auszulösen. Die Anzahl wird über eine Konfigurationsdatei festgelegt und über die Steuersoftware eingeladen. Ein manuelles Eingreifen durch den Benutzer ist dadurch nicht notwendig.

2 Materialwissenschaftliche Betrachtung und Motivation

Die Risslängenmessung ist eine wesentliche Methode im Bereich der Bruchmechanik zur Bestimmung der Lebensdauer von Werkstoffen. Gegenüber klassischen Methoden wie dem Wöhlersversuch bei dem nur Bruchlastspielzahlen bestimmt werden, wird bei der Risslängenmessung mit Einsatz bildgebender Verfahren, z.B. mittels digitaler Bildkorrelation auch die phänomenologische Charakterisierung des Rissspitzenzustandes ermöglicht. Der Vorteil besteht darin, dass bereits existierende Modelle wie zum Beispiel das Damage-Tolerance-Konzept optimiert werden, und folglich Lebensdaueraussagen noch präziser getroffen werden können [6]. Darüber hinaus können Effekte wie Rissabschließmechanismen, -mäandrierung und -verzweigung beobachtet werden und somit ebenfalls in die Modelle einfließen. Dies ermöglicht, dass die Materialstreuung nicht mehr nur durch eine empirischen Beschreibung behandelt werden kann, sondern physikalisch-basiert charakterisiert werden kann. Ein Nachteil dieser Methode sind jedoch die langen Versuchszeiten, da der Ermüdungsversuch zusätzlich um periodische Unterbrechungen für die Bildgebung ergänzt wird. Dies ist notwendig um die Versetzungs- und Schädigungsmechanismen, welche ca. 70-90% der Gesamtlebensdauer einnehmen, auf Mikroebene mittels Elektronenmikroskopie erfassen zu können. Dabei wird bei bestimmten Schwingpielzahlen der Versuch unterbrochen, und die Prüflingsoberfläche einmal im lastfreien und anschließend im belasteten Zustand fotodokumentarisch festgehalten. Da jedoch Versetzungs- und Schädigungsmechanismen auf mikroskopische Ebene stattfinden, benötigt es besonders hohe Auflösungen um die Effekte zu erfassen. Im Rahmen dieser Arbeit wird dies mittels Rasterelektronenmikroskopie umgesetzt. Dadurch ergeben sich Aufnahmezeiten von mindestens mehreren Minuten und dementsprechend eine zusätzliche Verlängerung der Versuchszeit. Eine erste Einordnung dieser Situation kann aus **Bild 1** entnommen werden. Hierbei sind die Risslängen dreier Ermüdungsversuche (grün, rot und blau) an Ti-6Al-4V gegenüber der Schwingpielzahl abgebildet. Jeder Datenpunkt entspricht dabei einer Unterbrechung des Versuchs und wiederholter Bildaufnahme (lastfrei und belasteter Werkstoffprüfling) [7].

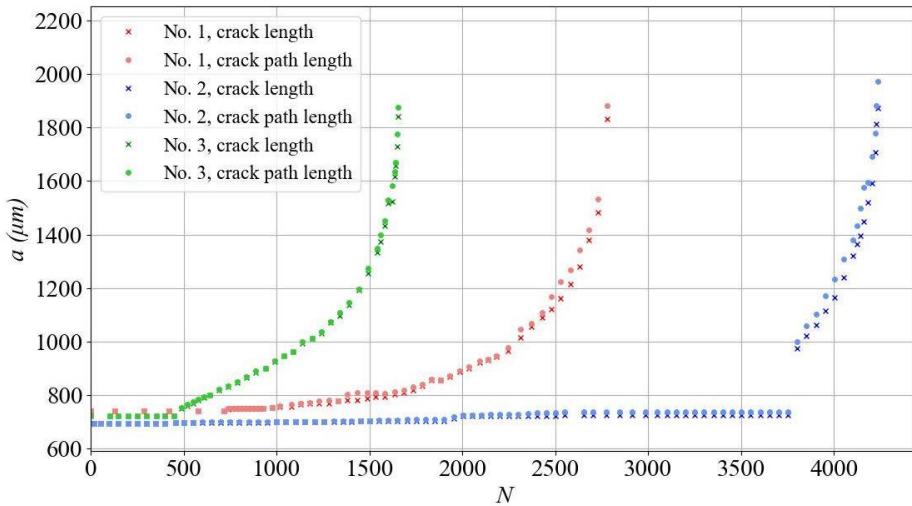


Bild 1: Darstellung der Risslängen in Abhängigkeit der Schwingpielzahl für drei Werkstoffprüflinge gefertigt aus Ti-6Al-4V. Jeder Datenpunkt stellt dabei eine Versuchsunterbrechung zur Bestimmung der Risslänge dar. [7]

Figure 1: Illustration of crack lengths dependent on elapsed cycles for three specimens made out of Ti6-Al-4V. Each data point represents an interruption of the fatigue test to determine the crack length. [7]

Dieser Umstand führt dazu, dass die Gesamtversuchsdauer durch die Mikroskopieaufnahmen um 10-20% verlängert wird. Hinzu kommt, dass sich über die langen Versuchsperioden die Bildeigenschaften wie Kontrast, Helligkeit, aber auch REM-spezifische Artefakte wie Astigmatismus, elektrostatische Prüflingsaufladung oder Drift der Probe ändern können. Eine manuelle Bewertung über mehrere Tage hinweg ist jedoch nur sehr eingeschränkt möglich, sodass sich die Qualität der Bilder sowie die Reproduzierbarkeit mit der Zeit ändern. Darüber hinaus ist eine durchgehende Betreuung des Versuchs mit großem personellem Aufwand verbunden, jedoch notwendig um die Genauigkeit der Messergebnisse zu gewährleisten [7].

Eine Automatisierung der Versuchsdurchführung trägt also nicht nur zur Schonung der personellen und finanziellen Ressourcen bei, sondern fördert auch die Qualität der Messergebnisse und unterstützt die optimierte Bestimmung der Lebensdauer von Werkstoffen.

3 Konzept

Die Entwicklung des Automatisierungskonzepts, wie in **Bild 2** skizziert, basiert auf einer eventgesteuerten Architektur, bei welcher der Mikrozuglastrahmen (3) mittels eines Steuer-PCs (1) über eine Ethernetverbindung mit dem Steuer-PC (4) des REMs (5) verbunden ist. Für die Datenkommunikation wird eine Server/Client-Architektur von OPC UA verwendet. Hierbei ist der Server als Serverapplikation auf dem Steuer-PC des Mikrozuglastrahmens (1) und der Client als Clientapplikation auf dem Steuer-PC des REMs (4) installiert. Mithilfe dieser Architektur können mehrere Clients (6) ohne weiteren Aufwand an den Server angebunden werden. Dies ermöglicht es, den Prüfstand direkt und von einem Remote-PC aus über einen Client zu steuern. Bei einer Remoteverbindung wird auf die bereits bestehenden Sicherheitsmechanismen innerhalb der OPC Spezifikationen zurückgegriffen. Die Verbindung zwischen dem Controller (2) und dem Mikrozuglastrahmen (3) ist über eine Kabelverbindung realisiert und versorgt den Mikrozuglastrahmen mit der notwendigen elektrischen Leistung sowie den Steuersignalen. Bei der Verbindung zwischen dem REM (5) und dessen Steuer-PC (4) handelt es sich um eine herstellerspezifische Verbindung, welche eine Programmierschnittstelle mit Python bietet.

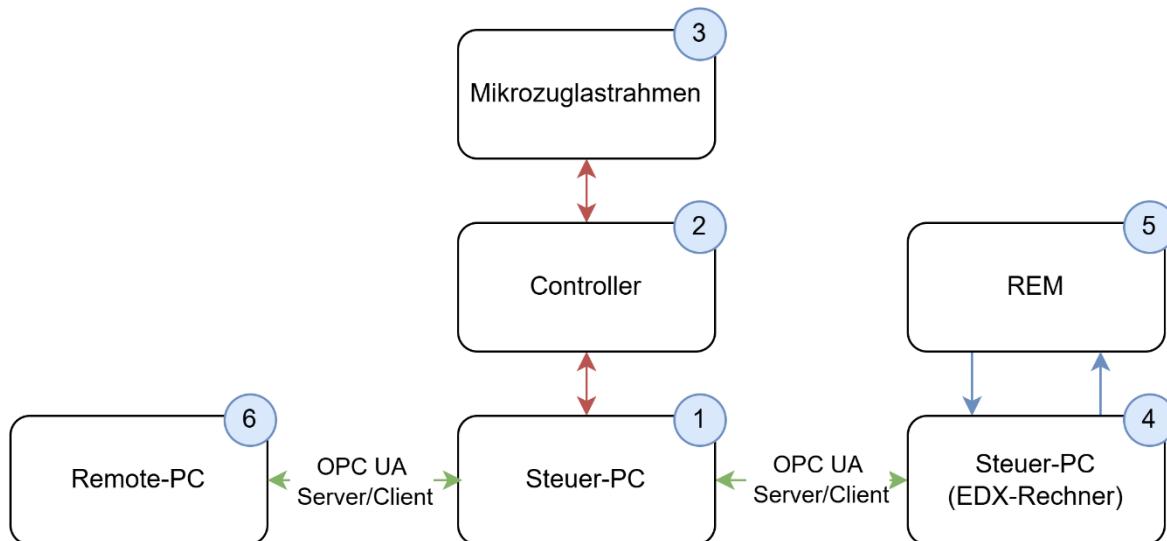


Bild 2: Konzept für die vernetzte Prüfstandsarchitektur zur Umsetzung eines Automatisierungskonzepts
Figure 2: Concept for the connected test bench architecture for the implementation of an automation concept

OPC UA bzw. IEEE 62541 ist ein offener plattformunabhängiger Kommunikationsstandard, welches ein Framework für Anwendungen im Bereich IIoT (Industrial Internet of Things) und verwandten Anwendungen anbietet. [8] Aufgrund des IT-Sicherheitskonzeptes befinden sich die Geräte in separaten Netzwerksegmenten. Das Routing erfolgt hier über eine Firewall, bei welcher ausschließlich dediziert freigegebene Ports erreicht werden können. Vorteilhaft ist es, dass OPC UA nur wenige Ports für die Datenübertragung benötigt. Der Steuer-PC des Mikrozuglastrahmens ist direkt mit dem Controller des Mikrozuglastrahmens verbunden. Der Mikrozuglastrahmen, wie in **Bild 3** abgebildet, kann bis zu 10 kN in quasistatischen und dynamischen Versuchen aufbringen. Das erlaubt es die Rissentstehung und -ausbreitung und somit Schädigungsmechanismen auf Mikroebene zu untersuchen. [7] Für Werkstoffcharakterisierungen auf Mikroebene nutzt das Institut ein REM (5).

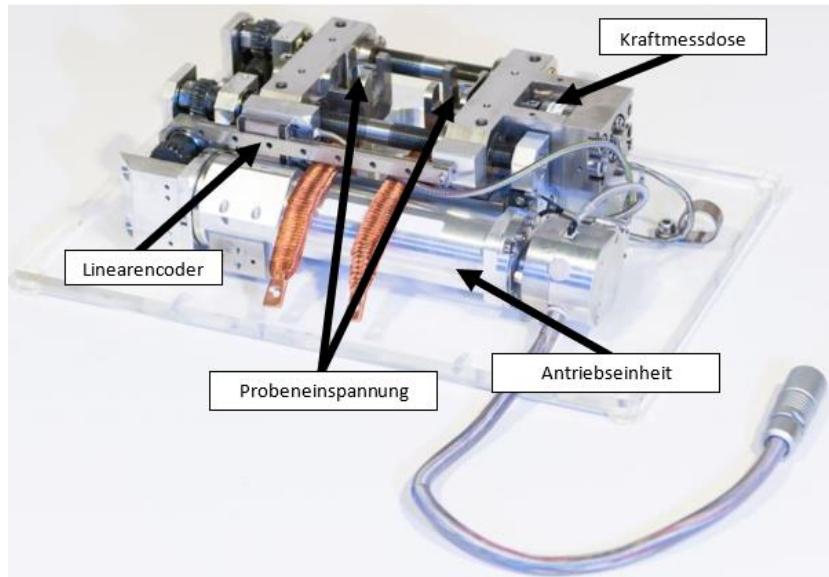


Bild 3: Mikrozuglastrahmen in kompakter Bauweise ($270 \times 150 \times 85$ mm)

Figure 3: Uniaxial in-situ test stage for tensile and fatigue tests in a compact design ($270 \times 150 \times 85$ mm)

4 Funktion

Die Beschreibung der Funktionen des Automatisierungskonzepts wird anhand der Ablaufschemas (**Bild 4**) dargestellt. Aufgrund des Aufbaus des Konzeptes (**Bild 2**) ergeben sich die Funktionsblöcke Konfigurationsdatei generieren (1), Steuersoftware (2), Serverapplikation (3), Clientapplikation (4), Versuchsdurchlauf (5), Server (6), und die Bildaufnahme (7).

- Vor Versuchsbeginn benötigt die Steuersoftware des Mikrozuglastrahmens neben festen Konfigurationsparametern wie Regelgrößen auch die Materialeigenschaften. Diese werden als Parameter über einen Konfigurationseditor in eine Konfigurationsdatei geschrieben. Das geschieht im Funktionsblock Konfigurationsdatei generieren (1).
- Die Datei wird von der Steuersoftware (2) gelesen, interpretiert und für die Initiierung genutzt.
- Über die Serverapplikation (3) wird der OPC UA Server initiiert, der Namespace geladen und dadurch die Variablen für die Clients gesetzt. Ein Eventhandler in Form eines Watchdogs ist so aufgesetzt, dass dieser ein von der Steuersoftware des Mikrozuglastrahmens beschreibbares Verzeichnis überwacht und Änderung im Verzeichnis als Eventnachricht an den Server meldet. Die Serverapplikation ist anschließend funktionstüchtig.
- Der Client wird über Clientapplikation (4) initiiert und verbindet sich mit dem Server und dem Steuer-PC des REMs.
- Über die Steuersoftware des Mikrozuglastrahmen wird der Ermüdungsversuch gestartet. In **Bild 5** ist ein typischer Versuchsablauf über der Zeit dargestellt. Es sind die zyklischen Belastungen und auch die Unterbrechungen für die Bildgebungen erkennbar. Für die Bildaufnahme wird abhängig von der Schwingpielzahl eine vordefinierte Last angefahren und gehalten. In dem **Bild 5** wurde hier die Maximallast gewählt, um den Riss zu öffnen und somit den Rissfortschritt im REM besser betrachten zu können.
- Der Watchdog erkennt dies als neues Event und ein Variablenwert im Server (6) wird geändert. Der Client in der Bildaufnahme (7) greift diese Änderung des Variablenwertes auf und eine Funktion innerhalb der Bildaufnahme (7) leitet nun den Vorgang für das Erzeugen eines Bildes ein. Nach der Bildaufnahme des REMs wird das Bild gespeichert und der Variablenwert, der die Bilderzeugung ausgelöst hat, wird im Client wieder zurückgesetzt und dem Server übermittelt. Dieser registriert diese Änderung und der Ermüdungsversuch im Mikrozuglastrahmen kann fortgesetzt werden.
- Dieser Ablauf wiederholt sich gemäß der in der Konfigurationsdatei festgelegten Schwingpielzahlen bis zum Erreichen der Bruchlastzahl oder durch einen Abbruch durch den Benutzer. Neue oder geänderte Konfigurationsdateien können über die Steuersoftware geladen werden. Der Versuch wird hierzu unterbrochen und kann ohne erneutes Initiieren der Serverapplikation oder der Clientapplikation weitergeführt werden.
- Nach Abschluss der Auswertung können der Mikrozuglastrahmen über die Steuersoftware beendet und der Server sowie der Client von dem Benutzer geschlossen werden.

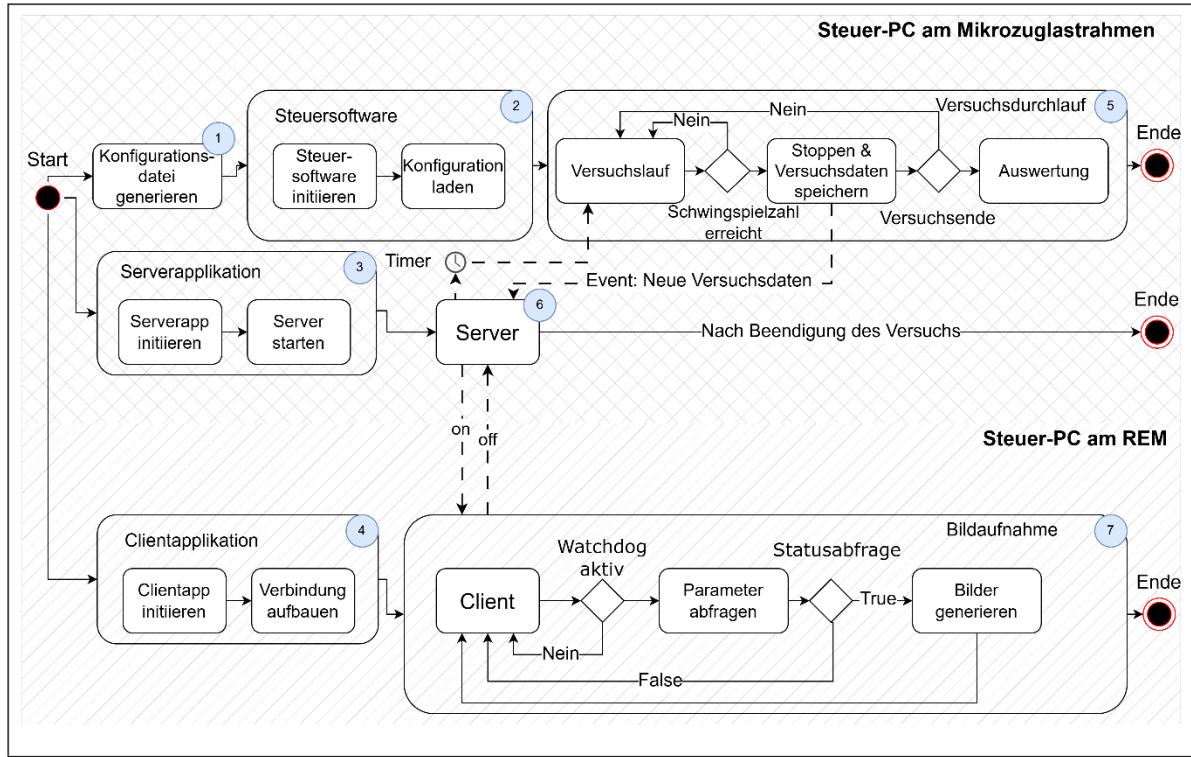


Bild 4: Ablaufschema für die vernetzte Prüfstandsarchitektur zur Umsetzung eines Automatisierungskonzepts
Figure 4: Flow chart for the networked test bench architecture for the implementation of an automation concept

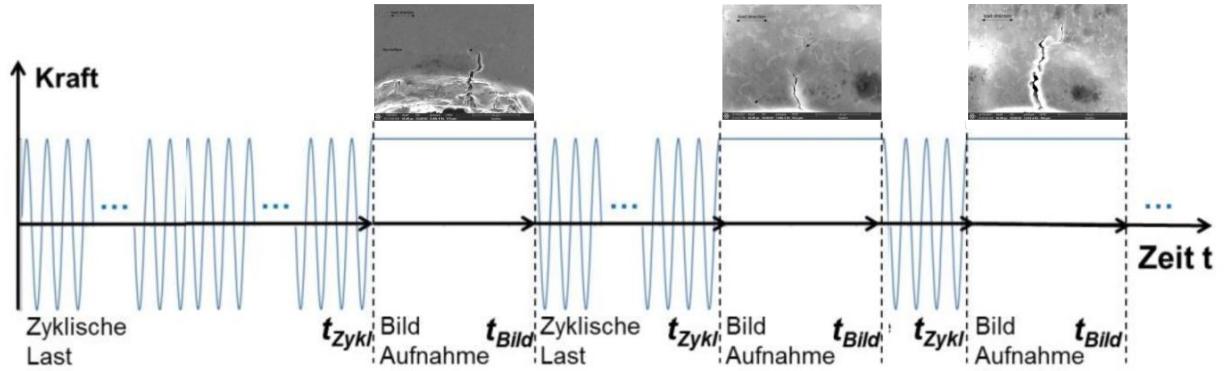


Bild 5: Angedeuteter Versuchsablauf mit zyklischer und konstanter Belastung für die Bildaufnahme im REM [7]
Figure 5: Indicated test sequence with cyclic and constant load for image acquisition in the REM [7]

5 Ausblick

Das vorgestellte Automatisierungskonzept eröffnet die Möglichkeit einer vollständigen Automatisierung der Versuchsdurchführung und trägt somit zu der Schonung von personellen und finanziellen Ressourcen bei. Hinzu kommt, dass der Ansatz die Qualität der Messergebnisse fördert und zur optimalen Bestimmung der Lebensdauer von Werkstoffen beiträgt. Dies soll durch die Nutzung der Kommunikationsschnittstelle OPC UA sowie der Verwendung einer Konfigurationsdatei erreicht werden. Der Einblick und die Anpassung von Konfigurationsdateien ermöglicht die Vergleichbarkeit der Versuche untereinander. Diese Konfigurationsdateien sollen zukünftig einer Versionskontrolle unterzogen werden, um die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Versuche zu erhöhen. Der Benutzer hat ebenfalls die Möglichkeit remote auf die OPC-Schnittstelle über einen Client zuzugreifen, und kann den Versuch z.B. aus dem Büro überwachen. Darüber hinaus werden neue Möglichkeiten eröffnet, Systeme verschiedener Hersteller in bestehende Netzwerkarchitekturen einzubinden, ohne die betriebsinterne IT-Sicherheit zu kompromittieren, da für die Kommunikation die Sicherheitsmechanismen von OPC UA und eigene Netzwerksegmente genutzt werden. Zukünftig soll das Automatisierungskonzept um weitere Prüfstände erweitert und entsprechend den neuen Anforderungen angepasst werden, sodass es möglich sein soll, Informationen zwischen Maschinen und Prüfständen auszutauschen.

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

Literatur

- [1] 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 (eingereicht).
- [2] Zero Emission Aviation Emissionsfreie Luftfahrt, White Paper der Deutschen Luftfahrt-forschung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.), 2020
- [3] Luftfahrt: Innovativ und Klimaneutral, Statusbericht zur 3. Nationalen Luftfahrtkonferenz, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2023.[8]Paris, P. C.; Gomez, M. P.; Anderson, W. E. *A rational analytic theory of fatigue* The Trend in Engineering. **1961**, Vol.13: 9–14.
- [4] ISO 12106:2017-03 Metallische Werkstoffe - Ermüdungsprüfung - Einachsige Prüfung mit der dehnungskontrollierten Methode, <https://www.dinmedia.de/de/norm/iso-12106/272307316>, recherchiert am 11.08.2025
- [5] ISO 12111:2011-08 Metallische Werkstoffe - Ermüdungsprüfung - Dehnungsgeregeltes thermomechanisches Ermüdungsprüfverfahren, <https://www.dinmedia.de/de/norm/iso-12111/145232548>, recherchiert am 11.08.2025
- [6] Paris, P.C.; Gomez, M.P.; Anderson, W.E. *A rational analytic theory of fatigue* The Trend in Engineering. 1961, Vol.13:9–14
- [7] C. Wünsch: In-situ investigation and analytical modeling of crack initiation and propagation in Ti–6Al–4V under low-cycle fatigue conditions on microscale, <https://doi.org/10.1016/j.jfatigue.2025.109148>, 2026
- [8] OPC Foundation, <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>, recherchiert am 11.08.2025