

AUTOREN



Dipl.-Ing. Philipp von Hartrott
ist Leiter des Teams Thermomechanische Ermüdung am Fraunhofer IWM in Freiburg.



Dr.-Ing. Mario Metzger
ist Wissenschaftler in der Gruppe Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik am Fraunhofer IWM in Freiburg.



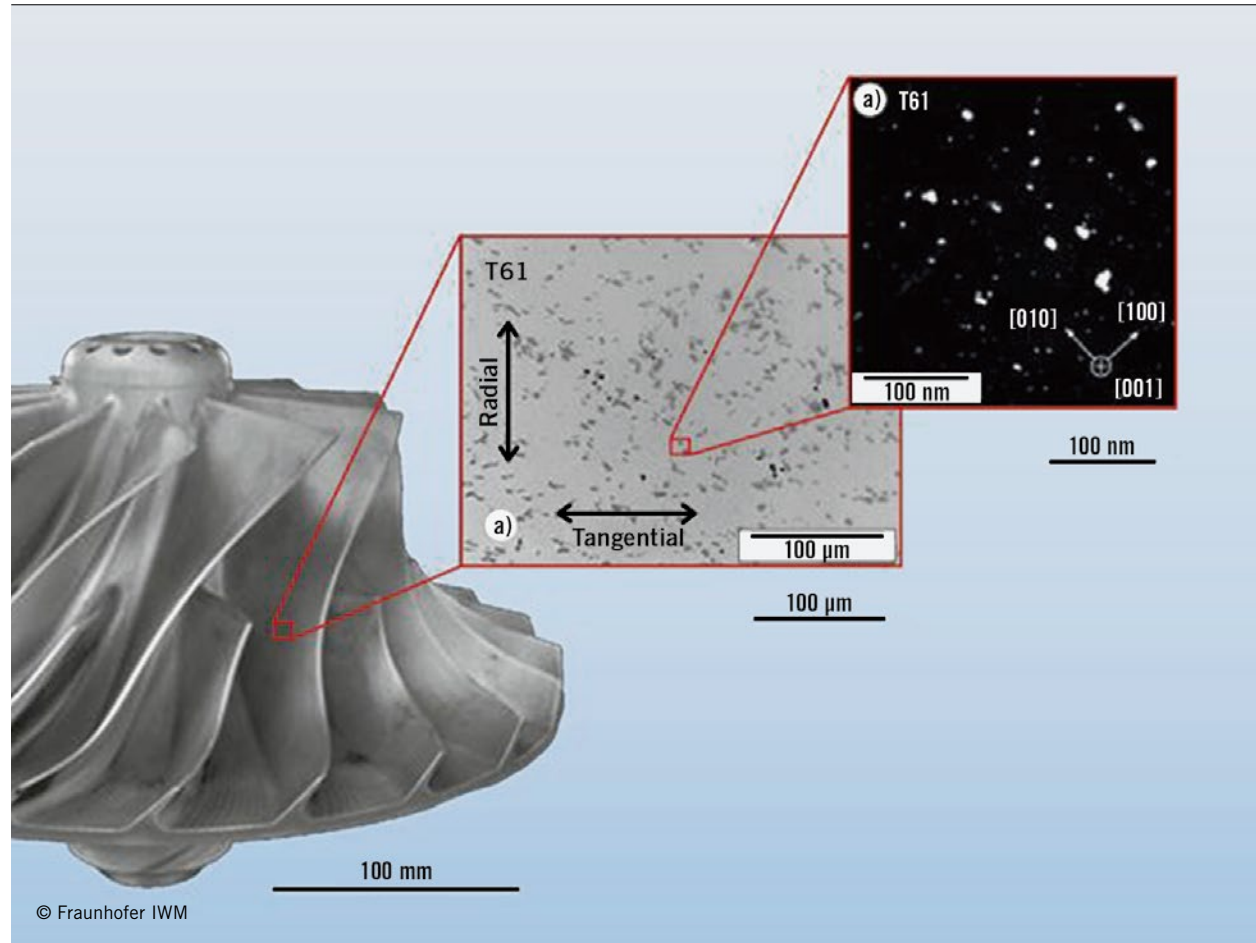
Dr. rer. nat. Christian Rockenhäuser
ist Wissenschaftler im Fachbereich Experimentelle und modellbasierte Werkstoffmechanik der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin.



Prof. Dr.-Ing. Birgit Skrotzki
ist Leiterin des Fachbereichs Experimentelle und modellbasierte Werkstoffmechanik der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin.

Lebensdauerbewertung von alternden Werkstoffen

Werkstoffe im Hochtemperatureinsatz verändern mit der Zeit ihre Mikrostruktur. Mit diesem Alterungsprozess geht sowohl eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften als auch eine Veränderung des Schädigungsverhaltens einher. Im Rahmen des FVV-Vorhabens Alterung und Lebensdauer haben das Fraunhofer IWM in Freiburg und die BAM in Berlin die weitverbreitete warmfeste Aluminiumlegierung EN AW-2618A in verschiedenen Alterungszuständen experimentell charakterisiert und darauf aufbauend Modelle für die Lebensdauerbewertung mit der Finite-Elemente-Methode implementiert.



1	MOTIVATION
2	EXPERIMENTELLE WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG
3	ALTERUNG UND ZYKLISCHE PLASTIZITÄT
4	ERMÜDUNG UND LASTKOLLEKTIVE
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

1 MOTIVATION

Abgasturbolader (ATL) erfahren weiterhin eine steigende Bedeutung im Gesamtsystem des Kolbenmotors, um Effizienz, Komfort und Wirtschaftlichkeit zu steigern. Das Aggregat wird dabei stetig wachsenden Anforderungen bezüglich seiner Betriebsfestigkeit ausgesetzt. Für die Verdichterräder im ATL wird heute nahezu ausschließlich die warmverfestbare Aluminiumlegierung EN AW-2618A verwendet. Nur mit einer gezielt eingestellten Mikrostruktur erreicht die Legierung die Festigkeit, um die Anforderungen an Kriech- und Ermüdungsfestigkeit erfüllen zu können. Wenn die Verwendbarkeit dieser Legierung nicht mehr sicher nachgewiesen werden kann, kommen Titanbauteile zum Einsatz, was jedoch aufgrund der höheren Massenträgheit und der deutlich höheren Material- und Bearbeitungskosten keine wünschenswerte Lösung darstellt. Um die im Betrieb auftretende und mit einem Festigkeitsabfall verbundene Überalterung der Legierung EN AW-2618A in die rechnerische Bauteilbewertung einbeziehen zu können, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens die Mikrostrukturveränderung bei Überalterung experimentell charakterisiert. Eine auf

den Erkenntnissen aufbauende Methode für die Bauteilbewertung wurde weiterentwickelt.

2 EXPERIMENTELLE WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG

Die Belastungen, denen der Werkstoff im Rahmen der experimentellen Untersuchungen ausgesetzt wurde, orientieren sich an den Belastungen, die ein Verdichterrad im Betrieb erfährt: erhöhte Temperatur, Kriechen und zyklische Belastung infolge von Betriebspunktwechseln. Die mechanische Festigkeit des Werkstoffs EN AW-2618A ist wesentlich durch eine Ausscheidungsverfestigung mit teilweise metastabilen, stäbchenförmigen Phasen vom Typ Al_2CuMg geprägt. Die optimale Festigkeit der Legierung wird erreicht durch eine Wärmebehandlung bestehend aus Lösungsglühen, Abschreckung und anschließender Warmauslagerung über 28 h bei 195 °C (T61-Zustand). Während der Warmauslagerung keimen und wachsen die stäbchenförmigen Ausscheidungen mit wenigen Nanometer Durchmesser. Die stäbchenförmigen Ausscheidungen sind nicht alle gleich groß, sondern zeigen näherungsweise eine logarithmisch normalverteilte Größenverteilung. Das Wachstum größerer Stäbchen auf Kosten der kleinen setzt sich nach der Wärmebehandlung, sofern die Temperatur hoch genug ist, im Betrieb weiter fort und führt in der Folge zu einem Festigkeitsverlust. Gut beobachten kann man den Festigkeitsverlust beispielsweise im Härteverlauf in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit, **BILD 1**. Zur Charakterisierung der stäbchenförmigen Ausscheidungen wurden im Forschungsvorhaben die Stäbchengrößen im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) abgebildet und anschließend ausgewertet. Neben dem Festigkeitsverlust durch die Ausscheidungsreifung zeigt der Werkstoff bei erhöhter Temperatur und zyklischer Belastung eine zyklische Entfestigung, die mit der Bildung von persistenten Gleitbändern korreliert. Diese Form der zyklischen Entfestigung

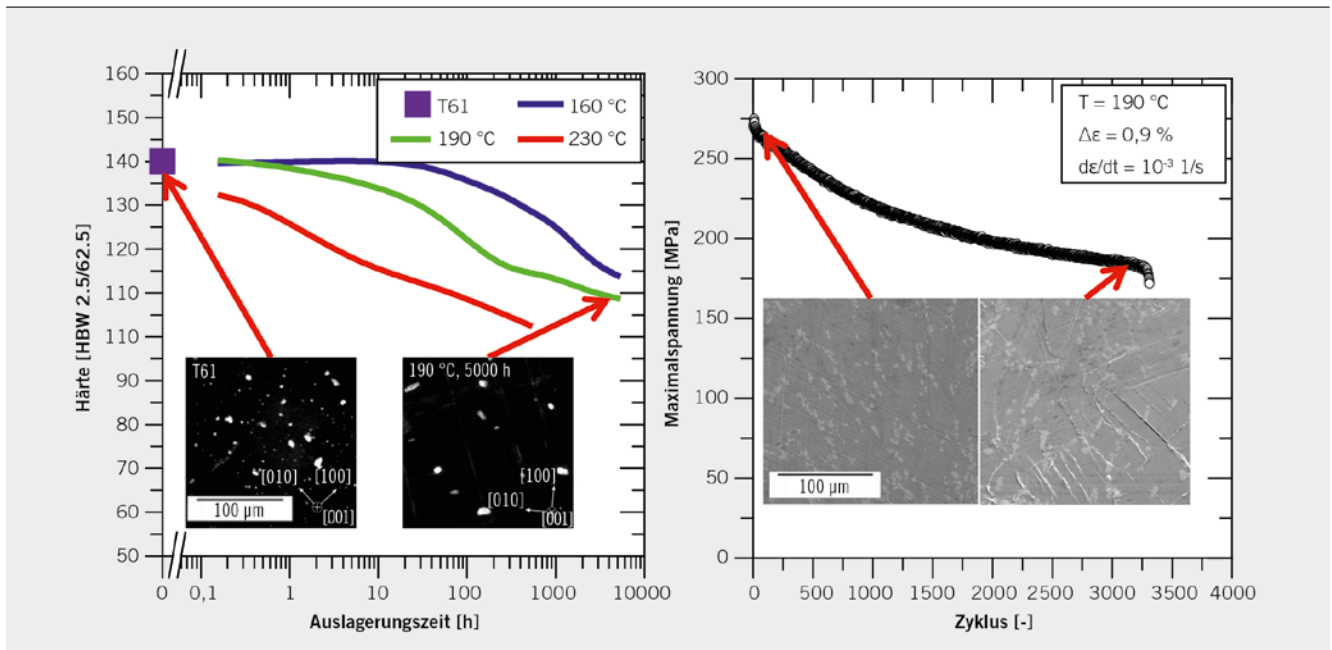


BILD 1 Entwicklung der Härte in Abhängigkeit von Auslagerungszeit und -temperatur mit zugehörigen TEM-Aufnahmen der aus der Bildebene herausragenden Stäbchen (links) und Entwicklung der Maximalspannung im dehnungskontrollierten Versuch mit der Zyklenzahl und zugehörigen REM-Aufnahmen von der Probenoberfläche (rechts) © Fraunhofer IWM

lässt sich in Abhängigkeit von der akkumulierten viskoplastischen Dehnung beschreiben.

3 ALTERUNG UND ZYKLISCHE PLASTIZITÄT

In gekerbten Bereichen von Bauteilen sind Beanspruchungen, die über die temperaturabhängige Fließgrenze des Werkstoffs hinausgehen, nicht immer vermeidbar. Als konstitutives Gesetz für die Beschreibung des temperatur- und zeitabhängigen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens für solche Bauteile haben sich viskoplastische Verformungsmodelle vom Chaboche-Typ [1] bewährt. Mit diesem Modelltyp lassen sich die wesentlichen Effekte der Hochtemperatur-Plastizität wie temperaturabhängige Verfestigung, Dehnratenabhängigkeit und Relaxation beschreiben. Für die Modellierung der Legierung EN AW-2618A wurde ein bestehendes Chaboche-Modell um die inneren Variablen für den Stäbchenradius und die akkumulierte viskoplastische Dehnung erweitert. Die Parameter für das von Alterung und Entfestigung abhängige Spannungs-Dehnungs-Verhalten werden im Modell in Abhängigkeit von den inneren Variablen interpoliert.

Aufgrund von Rechenzeitbeschränkungen besteht das Standard-Vorgehen bei der rechnerischen Bewertung von Bauteilen mit zyklischer Plastizität aus zwei Schritten: erstens der Berechnung der lokalen Verformung eines (quasi) stabilisierten Belastungszyklus mit dem konstitutiven Gesetz und zweitens aus einem Postprocessing der Verformung und deren Bewertung mit einem Schädigungsparameter. Im Folgenden wird die Berechnung der Verformung erläutert. Die Bewertung mit einem Schädigungsparameter ist in Kapitel 4 dargestellt.

Die kontinuierliche Veränderung der Werkstoffeigenschaften und damit des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens über der Bauteillebensdauer erfordert, dass die Berechnung der lokalen Verformung zu verschiedenen Zeitpunkten in der Lebensdauer erfolgt. Dazu wurde ein Cycle-Jump-Ansatz implementiert. Der Cycle-Jump-Ansatz extrapoliert die inneren Variablen für die Alterung (das heißt den Stäbchenradius) und die zyklische Entfestigung (die akkumulierte viskoplastische Dehnung), die sich im Laufe der Lebensdauer verändern, zu einem gewählten Lebensdauerzeitpunkt. Zu jedem gewählten Lebensdauerzeitpunkt werden dann die lokalen Verformungen infolge eines Lastkollektivs, das zuvor beispielsweise mittels eines Rainflow-Algorithmus ermittelt wurde, berechnet. Dieses Lastkollektiv zu einem definierten Zeitpunkt wird als Block bezeichnet. Das Vorgehen ist schematisch in **BILD 2** dargestellt. Als Ergebnis liegen die Spannungs-Dehnungs-Temperaturverläufe für verschiedene Blöcke vor. Diese werden dem Postprocessing zugeführt.

4 ERMÜDUNG UND LASTKOLLEKTIVE

Im LCF-Bereich erfolgt die Lebensdauerbewertung im einfachsten Fall über zyklusbezogene Schädigungsparameter, wie beispielsweise die plastische Vergleichsschwingbreite nach [2, 3] oder die temperatur- und mittelspannungskorrigierte mechanische Dehnschwingbreite nach [4]. Lastkollektive werden typischerweise mit Schadensakkumulationsregeln wie zum Beispiel der Palmgren-Miner-Regel [5] bewertet. Für die Bewertung der Legierung EN AW-2618A konnte das bereits in [6] vorgestellte D_{TMF} -Konzept aufgegriffen und weiter verfeinert werden. Der Schädigungsparameter D_{TMF} ist in Gl. 1 angegeben.

$$D_{TMF} = \left(1,45 \frac{\Delta\sigma_{I,eff}^2}{E} + 2,4 \frac{\Delta\sigma_I^2 \Delta\epsilon_{e,pl}}{\Delta\sigma_e \sqrt{1 + 3N}} \right) F(t, \sigma, T) \sigma_{cy}(r, p)^{-1}$$

Der Schädigungsparameter D_{TMF} beinhaltet Einwirkungsgrößen (Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$, plastische Dehnungsschwingbreite $\Delta\epsilon_{pl}$) und Größen, die den Werkstoffwiderstand beschreiben (zyklische Fließgrenze σ_{cy} , Verfestigungsexponent N). Der Index I bezeichnet die erste Hauptspannung des Schwingbreitentensors, der Index e die von-Mises-Vergleichsgröße. Risssschließen wird über eine effektive Spannungsschwingbreite (Index eff) nach [7] berücksichtigt. Die Widerstandsgröße σ_{cy} ist im vorliegenden Fall abhängig von den inneren Variablen der Werkstoffalterung, dem Radius der Stäbchen r und der inneren Variablen für die zyklische Entfestigung, der akkumulierten viskoplastischen Dehnung p formuliert. Der D_{TMF} -Wert einer Spannungs-Dehnungs-Hystereseschleife kann unmittelbar aus den experimentell gemessenen Größen berechnet werden. Er wurde für zahlreiche einstufige Ermüdungsversuche mit verschiedenen Alterungszuständen, Dehnungs- beziehungsweise

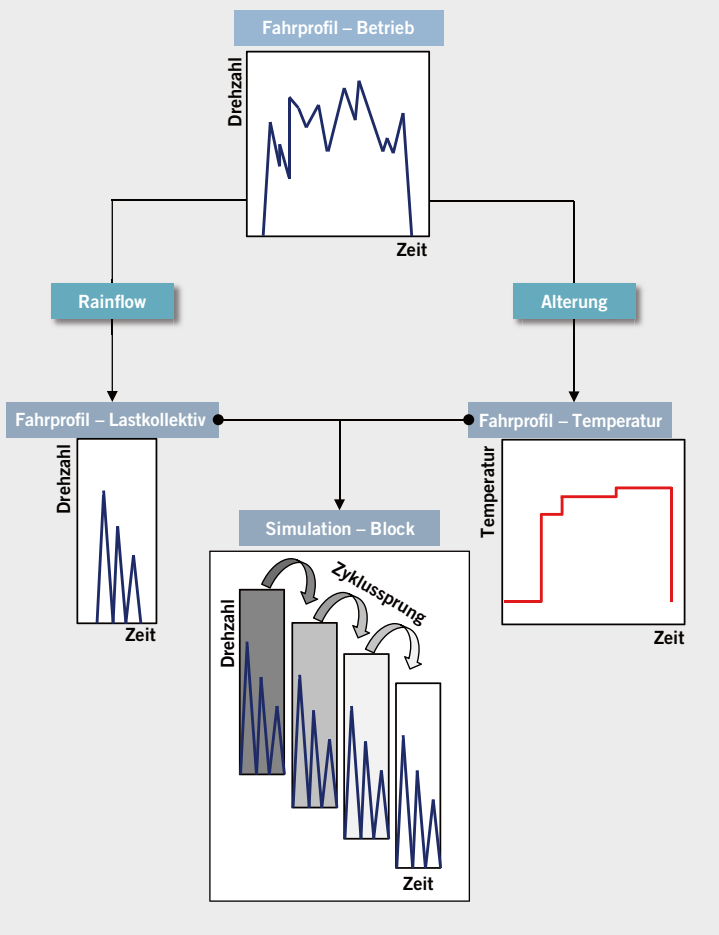


BILD 2 Schematische Darstellung zum Berechnungsablauf, Betriebsbelastung (oben), Rainflow-Zählung und Erstellung Lastkollektiv (links), repräsentativer Temperaturzyklus zur Vorausrechnung der Alterung (rechts), Finite-Elemente-Analyse mit Cycle-Jump für Alterung und zyklische Entfestigung (unten) (© Fraunhofer IWM)

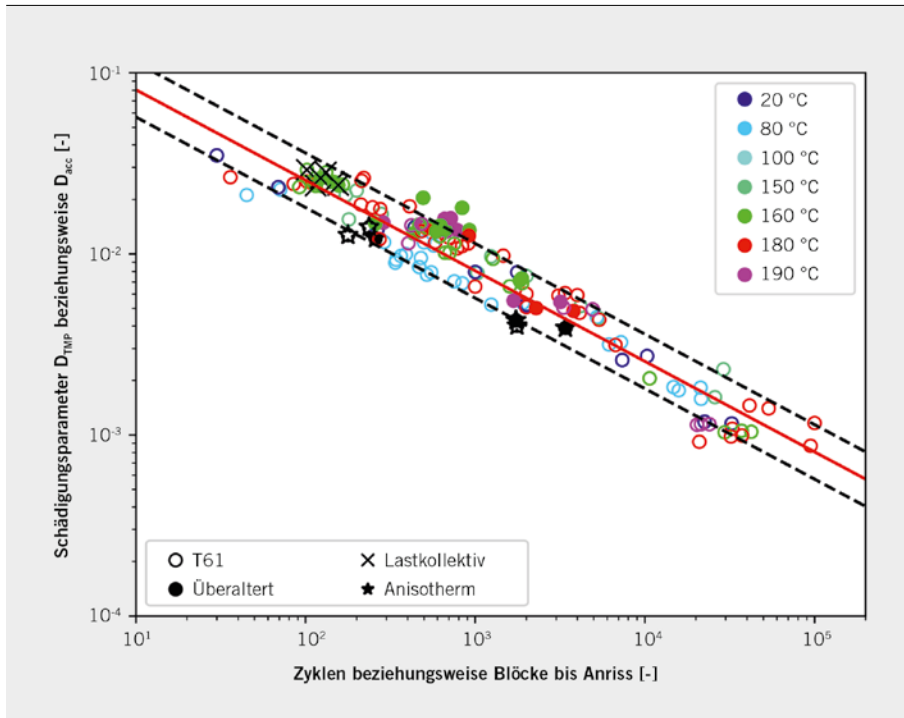


BILD 3 Schädigungsparameter D_{TMF} über der experimentellen Anrisslastspielzahl von einstufigen Ermüdungsversuchen beziehungsweise Schädigungsparameter D_{acc} über der Anzahl ertragener Lastkollektive von mehrstufigen Versuchen (Daten aus diesem Vorhaben zusammen mit Daten aus [6]); dargestellt sind verschiedene Alterungszustände des Werkstoffs, Temperaturen, Haltezeiten und sowohl kraftkontrollierte als auch dehnungskontrollierte Belastungen (© Fraunhofer IWM)

Spannungsschwingbreiten und Temperaturen ausgewertet, **BILD 3**. Für Lastkollektive wird der auf D_{TMF} aufbauende Schädigungsparameter D_{acc} verwendet:

$$G1.2 \quad D_{acc} = \sqrt[B]{\sum_{Block=1}^{m_{Block}} \sum_{Zyklus=1}^{n_{Zyklus}} \sum_{Häufigkeit=1}^{i_{Häufigkeit}} D_{TMF,m,n,i}^B}$$

Dabei ist $D_{TMF,m,n,i}$ der D_{TMF} -Parameter in Block m für den Zyklus Typ n , der i -fach Rainflow gezählt wurde, und B ein Werkstoff-

parameter, der an einstufigen Versuchen ermittelt wird. Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Versuche mit dreistufigen Lastkollektiven werden mit dem Schädigungsparameter D_{acc} einheitlich mit den einstufigen Versuchen beschrieben. Die verwendeten Schädigungsparameter sind also ein angemessenes Werkzeug, um die Ermüdungslebensdauer unter Einbeziehung der Werkstoffalterung zu beschreiben.

Der Ablauf für die Anwendung der Berechnungsmethode im Rahmen einer Finite-Elemente-Analyse ist in **BILD 4** skizziert. Ausgegangen wird von den jeweiligen Blöcken, das heißt zeitliche Abschnitte, in denen die Materialeigenschaften im Hinblick auf

BRANCHEN- VERBUNDEN

Der neue Newsletter „Kleb- und Dichttechnik“ von **adhäsion**

Jetzt registrieren:

www.springerprofessional.de/mynewsletters



Alle Top-News und Branchen-Highlights aus der Welt der Kleb- und Dichttechnik, regelmäßig in Ihrem Postfach: Bestellen Sie jetzt unseren kostenlosen Newsletter.

adhäsion KLEBEN+
DICHTEN

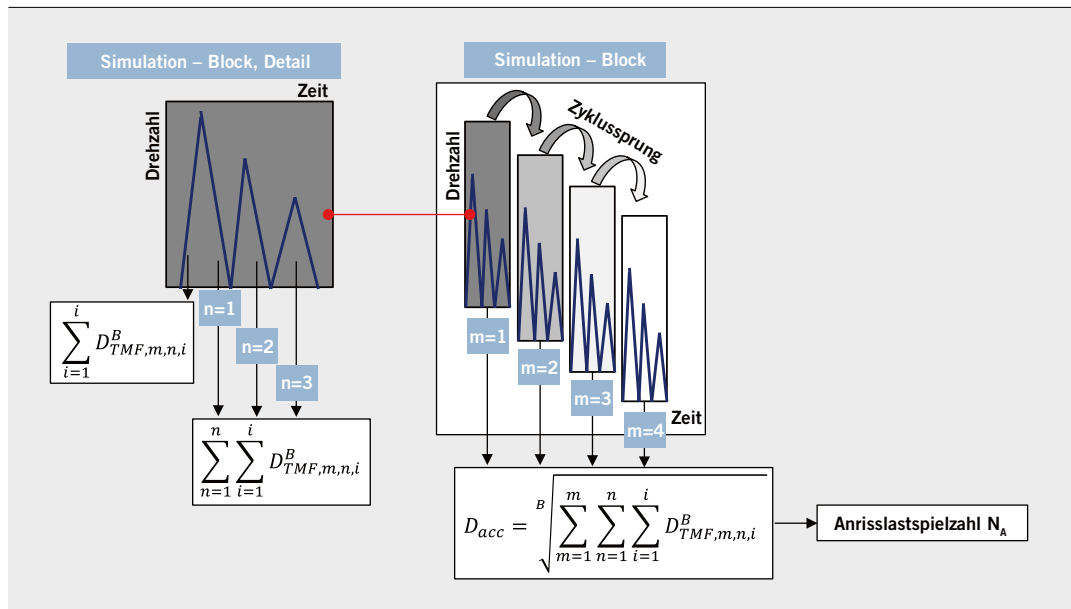


BILD 4 Schematisches Vorgehen zur Berechnung der Anrisslastspielzahl N_A in Abhängigkeit der Rainflow-Zählung (Variablen i und n) und den Blöcken zum gewählten Lebensdauerzeitpunkt (Variable m) unter Einbeziehung des Alterungszustands und der zyklischen Entfestigung des Werkstoffs in Block m (© Fraunhofer IWM)

Alterung und zyklische Entfestigung konstant sind. Innerhalb dieser Blöcke wird der Schädigungsparameter entsprechend des Lastkollektivs summiert. Anschließend wird die Schädigung von Block zu Block entsprechend dem Cycle-Jump summiert und die Anrisslebensdauer für die Visualisierung berechnet.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegenden Methoden ermöglichen eine rechnerische Bewertung unter Berücksichtigung der Werkstoffalterung und stellen einen wesentlichen Fortschritt gegenüber dem bisherigen Stand der Technik dar. Die Notwendigkeit, im Bereich der rechnerischen Lebensdauerbewertung von ATL-Verdichterrädern weiter zu forschen, besteht nach wie vor. Folgende Themen sind dabei aus akademischer und industrieller Sicht von Interesse: eine Erhöhung der Untersuchungstemperaturen über 200 °C, getrieben durch Abgasrückführung und steigende Verdichtungsverhältnisse; eine Erhöhung der untersuchten Lastwechselzahlen in den Bereich bis 10^8 -Zyklen zur Absicherung kleinerer Lastwechselbeanspruchungen; eine Absicherung der Methode für gekerbte Konfigurationen, da diese am Bauteil unvermeidlich sind.

Anstehende Forschungsarbeiten sollten weiterhin am Werkstoff EN AW-2618A durchgeführt werden. Es ist gegenwärtig nicht zu erwarten, dass dieser seine Marktbedeutung im Bereich von Verdichterrädern mittelfristig an einen anderen Werkstoff abgibt. Diese Situation könnte sich abhängig vom Einsatz von Aluminium-Lithium-Legierungen in der Luftfahrt in den nächsten Jahren verändern und sollte weiter beobachtet werden.

LITERATURHINWEISE

[1] Lemaitre, J.; Chaboche, J.-L.: Mechanics of Solid Materials. Cambridge University Press, 1994
 [2] Manson, S. S.: Behavior of Materials under Conditions of Thermal Stress. Online: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930092197>, aufgerufen am: 10.07.2018

[3] Coffin, L. F. Jr.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. In: Transactions of the ASME, Band 76 (1954), S. 931–950
 [4] Smith, K. N.; Watson, P.; Topper, T. H.: Stress-strain function for the fatigue of metals. In: J. Mater, Band 5 (1970), S. 767–778
 [5] Miner, M.: Cumulative Fatigue Damage. In: Journal of Applied Mechanics 12 (1945), Nr. 3, S. A159–A164
 [6] von Hartrott, P.; et al.: Lebensdauer vorhersage von Verdichterrädern. In: MTZ 72 (2011), Nr. 4, S. 316–321
 [7] Newman, J. J.: A crack opening stress equation for fatigue crack growth. In: International Journal of Fracture 24 (1984), Nr. 4, S. R131–R135

DANKE

Dieser Beitrag ist das Ergebnis einer abgeschlossenen Forschungsaufgabe, die unter der Koordination der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. gestellt und am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM unter der Leitung von Prof. Peter Gumbsch und an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) unter der Leitung von Prof. Birgit Skrotzki bearbeitet wurde. Dank gilt dem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Dr.-Ing. Reiner Böschen (MTU Friedrichshafen GmbH) für die Begleitung und Unterstützung sowie den Firmen Otto Fuchs KG, ABB Turbo Systems Ltd. und Continental Automotive für die Unterstützung mit Sachmitteln. Der Dank gilt ebenfalls den weiteren Projektbearbeiterinnen und -bearbeitern Johannes Karlin, Eva Augenstein, Christoph Schweizer, Benjamin Piesker und Sina Schriever. Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 17734 N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com