

Gruppe

**LEBENSDAUERKONZEPTE, THERMOMECHANIK**

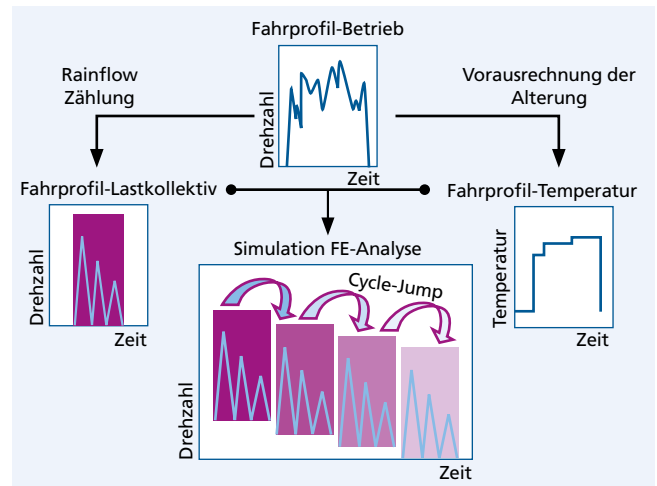
Dr. Christoph Schweizer | Telefon +49 761 5142-382 | christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de

## RECHNERISCHE LEBENSDAUERBEWERTUNG VON ALUMINIUM UNTER EINBEZIEHUNG DER ALTERUNG

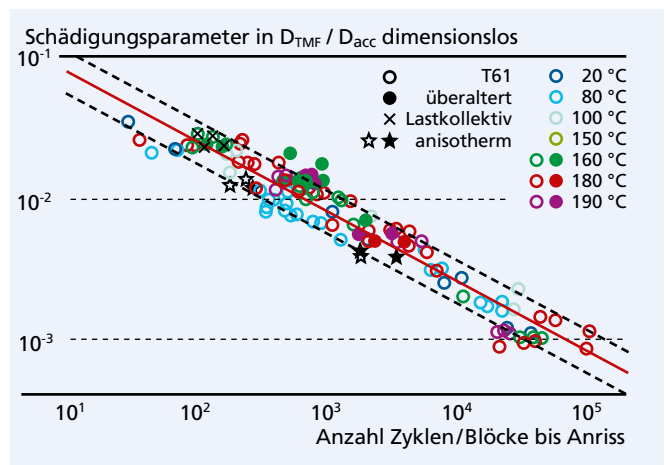
Abgasturbolader (ATL) erfahren weiterhin eine steigende Bedeutung im Gesamtsystem des Kolbenmotors, um Effizienz, Komfort und Wirtschaftlichkeit zu steigern. Der ATL wird dabei stetig zunehmenden Belastungen ausgesetzt. Für die Verdichterräder im ATL wird nahezu ausschließlich die Aluminiumlegierung EN AW-2618A verwendet. Um die im Betrieb auftretende und mit einem Festigkeitsabfall verbundene Überalterung der Legierung in die rechnerische Bauteilbewertung einbeziehen zu können, wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens die Mikrostrukturveränderung bei Überalterung experimentell charakterisiert. Eine auf diesen Erkenntnissen aufbauende Methode für die Bauteilbewertung wurde weiterentwickelt.

### Experimentelle Werkstoffcharakterisierung

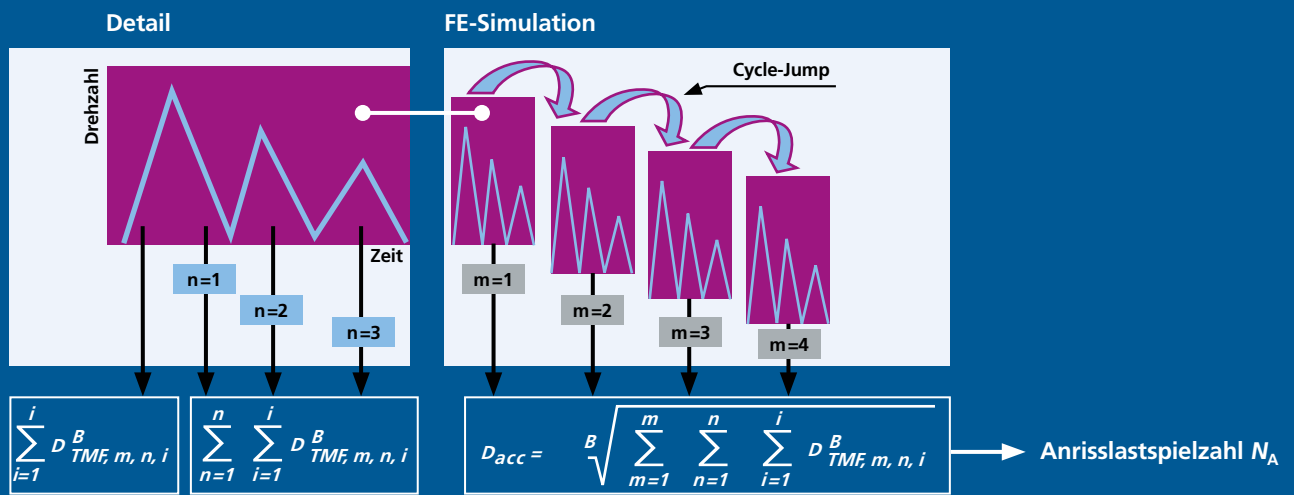
In Anlehnung an die Betriebsbelastungen, wie erhöhte Temperatur, Kriechen und zyklische Belastung infolge von Betriebspunktwechsel, wurde ein Versuchsprogramm definiert. Die mechanische Festigkeit des Werkstoffs EN AW-2618A ist wesentlich durch eine Ausscheidungsverfestigung mit teilweise metastabilen, stäbchenförmigen Phasen mit wenigen Nanometern Durchmesser geprägt. Die optimale Festigkeit der Legierung wird durch eine entsprechende Wärmebehandlung gezielt eingestellt (T61-Zustand). Die stäbchenförmigen Ausscheidungen sind unterschiedlich groß, wie Untersuchungen des Projektpartners Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) zeigten. Ist die Temperatur hoch genug, so wachsen größere Stäbchen auf Kosten der kleinen im Betrieb weiter, was zu einem Festigkeitsverlust führt. Bei erhöhter Temperatur wird weiterhin eine zyklische Entfestigung beobachtet, die mit der Bildung von persistenten Gleitbändern korreliert und sich mit der akkumulierten viskoplastischen Dehnung beschreiben lässt.



1 Die FE-Analyse mit Cycle-Jump zur Voraussage der Alterung und zyklischen Entfestigung basiert auf dem Lastkollektiv und dem Temperaturzyklus.



2 Schädigungsparameter  $D_{TMF}$  und  $D_{acc}$  über experimenteller Anrisslastspielzahl einstufiger Ermüdungsversuche beziehungsweise Anzahl ertragener Lastkollektive mehrstufiger Versuche. Darstellung der Alterungszustände, Temperaturen, Haltezeiten sowie kraft- und dehnungskontrollierten Belastungen.



3 Berechnung Anrisslastspielzahl  $N_A$  in Abhängigkeit der Rainflow Zählung ( $i$  und  $n$ ) und den Blöcken zum gewählten Lebensdauerzeitpunkt ( $m$ ) unter Einbeziehung des Alterungszustands und der zyklischen Entfestigung des Werkstoffs in Block  $m$ .

### Alterung und zyklische Plastizität

In Bauteilen sind Beanspruchungen oberhalb der temperaturabhängigen Fließgrenze des Werkstoffs nicht immer vermeidbar. Viskoplastische Verformungsmodelle vom Chaboche-Typ haben sich bewährt, um die wesentlichen Effekte der Hochtemperatur-Plastizität, wie temperaturabhängige Verfestigung, Dehnratenabhängigkeit und Relaxation, zu 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. Über einen Cycle-Jump-Ansatz konnte die kontinuierliche Veränderung der Werkstoffeigenschaften über der Bauteillebensdauer (Alterung) berücksichtigt werden. Durch Extrapolation der beiden inneren Modellvariablen zu einem gewählten Lebensdauerzeitpunkt wurden dann die lokalen Verformungen infolge eines bestimmten Lastkollektivs (Block) berechnet (Abbildung 1). Die Spannungs-Dehnungs-Temperaturverläufe für verschiedene Blöcke werden danach dem Postprocessing für die Lebensdauerberechnung zugeführt.

### Ermüdung und Lastkollektive

Für die Bewertung der Legierung EN AW-2618A konnte das bereits vorgestellte  $D_{TMF}$ -Konzept (Khalil, O. et al., Aluminium- Radialverdichterräder, Heft 911, FVV, Frankfurt a. M., 2010) aufgegriffen und weiter verfeinert werden. Der Schädigungsparameter  $D_{TMF}$  beinhaltet Einwirkungsgrößen (Spannungsschwingbreite, plastische Dehnungsschwingbreite) und Größen, die den Werkstoffwiderstand beschreiben (zyklische Fließgrenze, Verfestigungsexponent). Die zyklische Fließgrenze ist hier abhängig von den inneren Variablen der Werkstoffalterung 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 Spannungsschwingbreiten und Temperaturen ausgewertet (Abbildung 2). Für Lastkollektive wird der auf  $D_{TMF}$  aufbauende Schädigungsparameter  $D_{acc}$  verwendet, dem eine Akkumulationsregel der einzelnen  $D_{TMF}$ -Beiträge zugrunde liegt. Die Berechnungsmethode im Rahmen einer FE-Analyse skizziert Abbildung 3. Ausgehend von Blöcken, in denen die Materialeigenschaften im Hinblick auf Alterung und zyklische Entfestigung konstant sind, wird der Schädigungsparameter entsprechend des Lastkollektivs summiert. Die Schädigung von Block zu Block wird entsprechend dem Cycle-Jump summiert und die Anrisslebensdauer zur Visualisierung berechnet.

### Bewertung mit Werkstoffalterung

Die vorliegenden Methoden ermöglichen die rechnerische Bewertung unter Berücksichtigung der Werkstoffalterung. Trotz dieser Verbesserung ist es notwendig, den Bereich der rechnerischen Lebensdauerbewertung von ATL-Verdichterrädern weiterzuentwickeln. Folgende Themen sind dabei aus akademischer und industrieller Sicht interessant: eine Erhöhung der Untersuchungstemperaturen über 200 °C, getrieben durch Abgasrückführung und steigende Verdichtungsverhältnisse, eine Erhöhung der untersuchten Lastwechselzahlen in den Bereichen bis  $10^8$  Zyklen zur Absicherung kleinerer Lastwechselbeanspruchungen sowie eine Absicherung der Methode für gekerbte Konfigurationen, da diese am Bauteil unvermeidlich sind.

Philipp von Hartrott, Dr. Mario Metzger