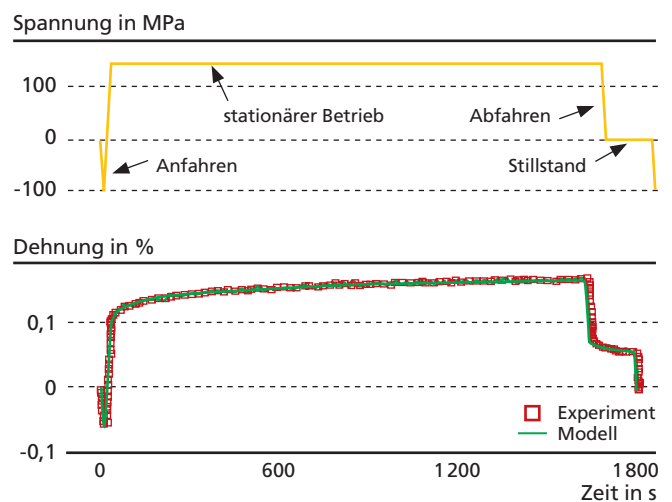


## LEBENSDAUERBEWERTUNG VON KRAFTWERKSKOMPONENTEN UNTER FLEXIBLER FAHRWEISE

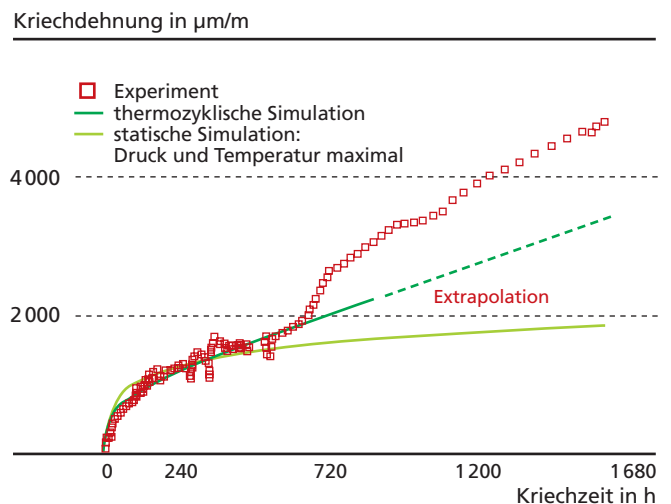
Um die Schwankungen der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen ausgleichen zu können, müssen konventionelle Kraftwerke häufiger und schneller an- und abfahren. Dadurch werden dickwandige Hochtemperaturkomponenten neben der herkömmlichen Kriechbelastung zusätzlich einer Wechselbeanspruchung ausgesetzt. Folglich müssen die heute verfügbaren Methoden zur Auslegung neuer und zur Restlebensdauerbewertung bestehender Komponenten hinsichtlich ihrer Eignung zur adäquaten Beschreibung der resultierenden Kriechermüdgungsbeanspruchung überprüft und gegebenenfalls verbessert werden. In kürzlich abgeschlossenen FuE-Projekten wurde am Fraunhofer IWM ein fortschrittliches Konzept zur (Rest-)Lebensdauerbewertung von Kraftwerkskomponenten unter flexibler Fahrweise entwickelt und anhand von Bauteilversuchen validiert. Das Konzept besteht aus klassischen und betriebsähnlichen Laborversuchen, fortschrittlichen Modellen zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens unter Kriechermüdgung und aus Berechnungsroutinen zur effizienten Lebensdauerbewertung von Komponenten mit der Finite-Elemente-Methode. Das Konzept wurde bereits an einigen herkömmlichen und neuartigen Kraftwerkswerkstoffen erfolgreich erprobt.

### Betriebsähnliche Laborversuche

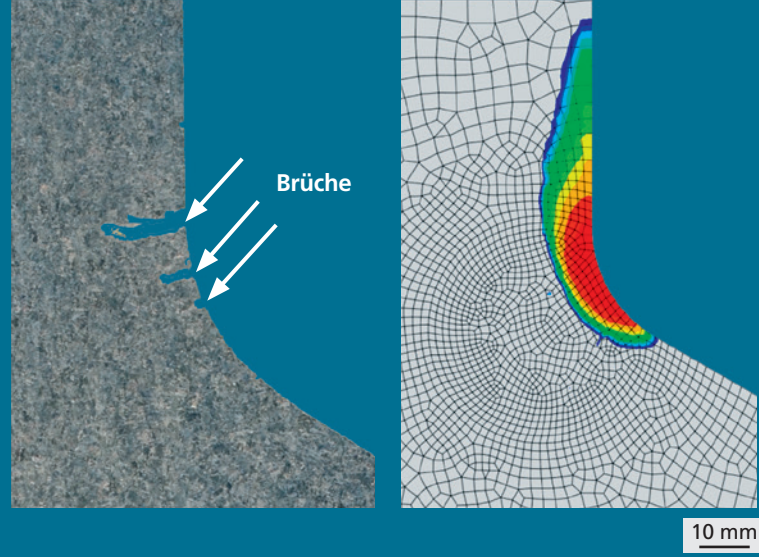
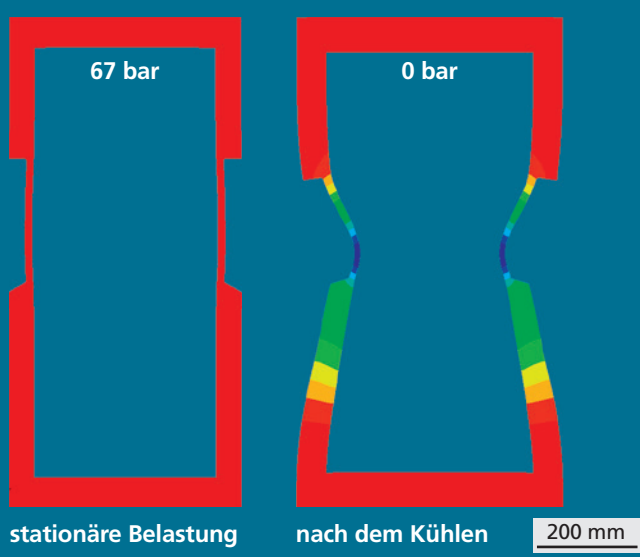
Zur Materialcharakterisierung haben wir einachsige Laborversuche an direkt aus Kraftwerkskomponenten entnommenen Proben durchgeführt. Dazu zählen neben isothermen und anisothermen Ermüdungsversuchen auch Experimente mit Haltezeiten oder langsamen Dehnraten, in denen gezielt zeitabhängige Effekte aktiviert werden. Außerdem kamen neuartige Versuche mit betriebsähnlichen Lastverläufen und Zykluszeiten zum Einsatz. Der Lastverlauf in Abbildung 1 wurde beispielsweise der Belastung an der Innenseite einer dickwandigen Kraftwerkskomponente unter flexibler Fahrweise nachempfunden. Zum besseren Verständnis der Schädigungsentwicklung



1 Lastverlauf (oben) sowie Werkstoff- und Modellantwort (unten) eines Zyklus in einem betriebsähnlichen Kriechermüdgungsversuch am Kraftwerkstahl P92 bei 600 °C.



2 Bleibende Dehnung in Umfangsrichtung ( $T > 550 \text{ °C}$ ,  $p > 50 \text{ bar}$ ): In der thermozyklischen Simulation beschleunigt sich das Kriechen gegenüber der statischen Simulation und stimmt mit den Messdaten gut überein.



*Berechnete Verformung des MACPLUS Prüfkörpers (links),  
Schliffbild (Mitte) und Schädigungsvorhersage (rechts)  
im Bereich des unteren Radius.*

haben wir klassische und betriebsähnliche Lasten auch in Risswachstumsversuchen auf sogenannte Corner-Crack-Proben aufgebracht. Die betriebsähnlichen Versuche unter anisothermen Bedingungen wurden zusätzlich zur Validierung der eingesetzten Modelle verwendet.

### Material berechenbar machen

Das Verformungs- und Schädigungsverhalten der untersuchten Werkstoffe modellierten wir anhand der gewonnenen Labordaten. Ein modifiziertes Modell vom Typ Chaboche konnte die Wechselverformung ebenso gut beschreiben wie das in den Versuchen zu beobachtende, zyklische Ver- und Entfestigen der Kraftwerkswerkstoffe. Des Weiteren ist eine Beschreibung der zeitabhängigen Effekte wie Relaxation und Kriechen möglich. Im Modell sind die Terme für Wechsellastizität und zeitabhängiges Verhalten außerdem gekoppelt, sodass eine Beschreibung der in den Kriechermüdungsversuchen gemessenen Verformung möglich ist (Abbildung 1 unten).

Für die Schädigungsmodellierung haben wir ein auf Risswachstum basiertes Lebensdauermodell benutzt. Dieses ist in der Lage, zeit- und temperaturabhängige Effekte auf den Rissfortschritt abzubilden. Zur Validierung des Lebensdauermodells wurden die Ergebnisse aus den Risswachstumsversuchen herangezogen. In der Regel konnten wir damit alle Ermüdungsversuche eines Werkstoffs unabhängig von Temperatur, Dehnraten oder Haltezeiten sowie die betriebsähnlichen Kriechermüdungsversuche einheitlich innerhalb eines Streubands mit Faktor zwei beschreiben.

### Bauteilverhalten simulieren

Die eingesetzten Modelle sind in Routinen zur Anwendung in Finite-Elemente-Programmen implementiert. Dies ermöglicht Vorhersagen über die zu erwartenden Spannungen und Deh-

nungen sowie die Lebensdauer von Komponenten und deren Versagensorte. Damit lassen sich vergleichsweise einfach Lasten wie das Anfahren oder das Komponentendesign optimieren. Liegen Betriebsdaten vor, lassen sich Berechnungen zum bisherigen Lebensdauerverbrauch der Komponente durchführen.

So wurde zum Beispiel im Rahmen des EU-finanzierten MACPLUS Projekts ein Rohrprüfkörper aus P91 unter zyklischem Innendruck und starken Temperaturwechseln getestet, wobei wir das Bauteildesign sowie den Lastzyklus durch Vorausrechnungen gezielt festlegten. Außerdem wurde der Prüfkörper mit zahlreichen Dehnungs- und Temperaturmessstellen versehen, sodass eine Nachrechnung der Verformung und Schädigung infolge der aufgetragenen Kriechermüdungsbelastung möglich war. Abbildung 2 zeigt Ergebnisse dieser Nachrechnungen unter der Annahme einer rein statischen Belastung und überlagerter Kriechermüdungsbelastung. Die eingesetzten Modelle sind in der Lage, die Beschleunigung des Kriechens durch die Wechselbelastung sowie den Schadensort und die Zyklenzahl bis zum Versagen korrekt wiederzugeben.

Mit der beschriebenen Methode ließ sich außerdem für die Hochtemperatur-Werkstoff-Teststrecke II (HWT-II) im Großkraftwerk Mannheim der Lastzyklus für den zyklischen Teststreckenabschnitt von anfänglich 6 Stunden auf 105 Minuten optimieren. Der gewählte Lastzyklus führte wie vorhergesagt innerhalb der Betriebszeit zu deutlich sichtbaren (aber unkritischen) Rissnetzwerken an den Rohrinneenseiten.

Dr. Gerhard Maier, Heiner Oesterlin