

FVV PRIMEMOVERS. TECHNOLOGIES.

1970 - 2025 | W10 | FVWHT + FVV

Forschung am Hochtemperatur- verhalten warmfester Stähle

Anwendungsorientierte Werkstoffforschung für die Energieindustrie



Science for a
moving society

55 Jahre Forschung	
Hochtemperaturverhalten warmfester Stähle	2
› W10 – eine gemeinsame Arbeitsgruppe von FVWHT und FVW	3
› Anwendungsorientierte Werkstoffforschung	7
› Drei Fragen an Dr. Stefanie Brockmann (FVWHT)	8
› Drei Fragen an Dirk Bösel (FVW)	10
WERKSTOFFE	
Hochfeste Stähle im Wandel der Zeit	12
LABORVERSUCHE // MESSUNGEN	
Laborversuche verifizieren	
Lebensdauermodelle	18
MATERIALMODELLE	
Genauere Modelle geben mehr Entwicklungsspielraum	22
Projekte und Mitglieder	28

55 Jahre Forschung

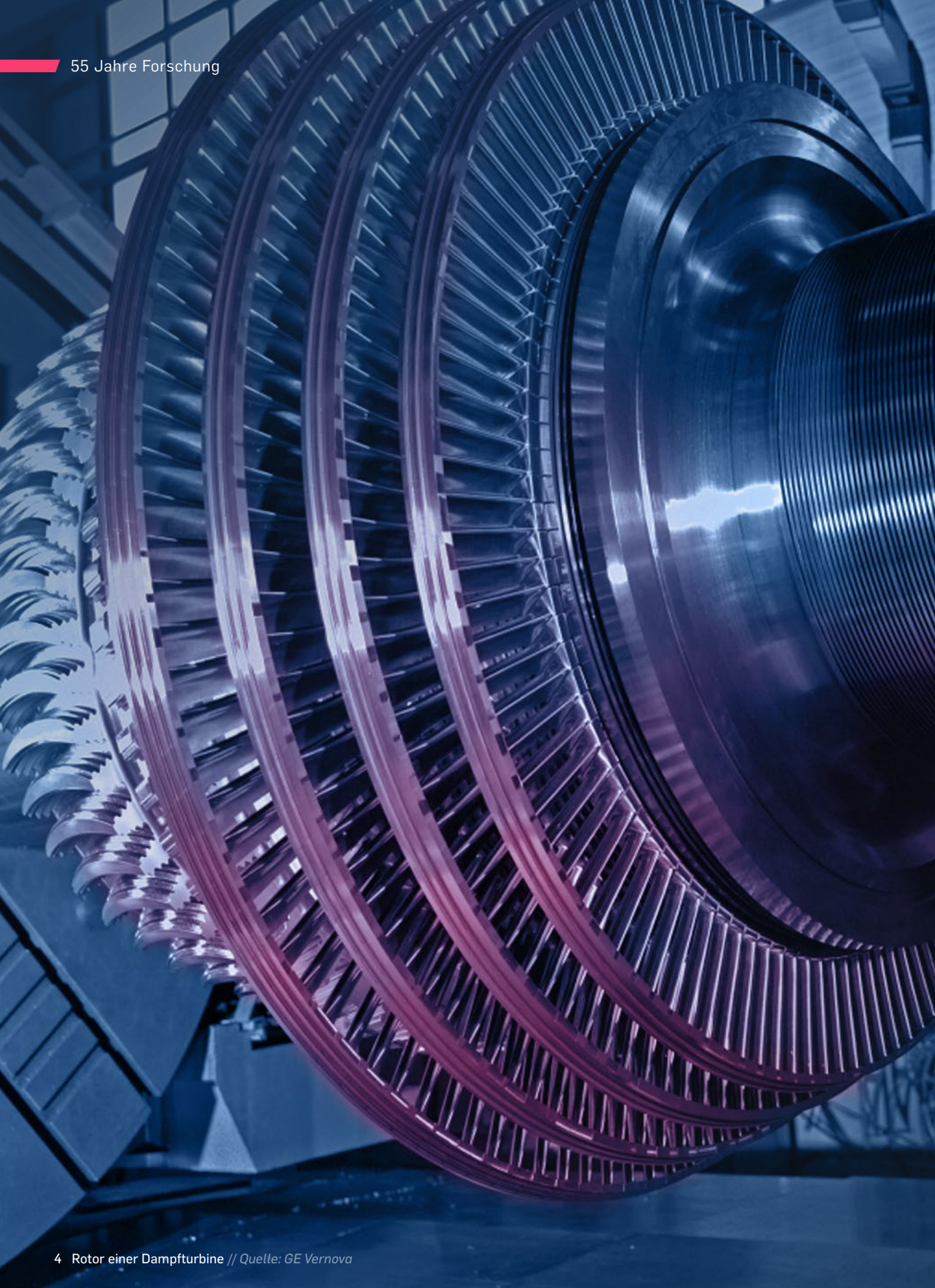
Hochtemperaturverhalten warmfester Stähle

W10 ›Hochtemperaturverhalten von Werkstoffen unter veränderlicher Beanspruchung‹ – eine gemeinsame Arbeitsgruppe von FVWHT und FVV

Zur Auslegung und Lebensdauerbewertung von Hochtemperaturbauteilen beispielsweise für die Anwendung in Dampfturbinen für die Kraftwerksindustrie müssen die Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe unter anwendungsnahen Bedingungen bekannt sein.

Seit nunmehr fünf Jahrzehnten koordiniert die **Forschungsvereinigung für warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe (FVWHT)** Projekte zur Erforschung des Werkstoffverhaltens unter zeitlich veränderlicher Beanspruchung.

Gebündelt sind die Aktivitäten in der Projektgruppe, in der die FVWHT zusammen mit der FVV praxisorientiert an metallischen Werkstoffen für die Energieindustrie forscht.



»Je größer der Anteil erneuerbarer Energien am Strommix wird, desto mehr Herausforderungen ergeben sich für die deutschlandweite Versorgungssicherheit.«

Immer mehr Energie aus Sonnen- und Windkraft, immer weniger Anteil am Strommix aus klassischen Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen: Die Energiewende in Deutschland nimmt immer weiter an Fahrt auf. Im Jahr 2023 wurde erstmals mehr als die Hälfte des gesamten Stromverbrauchs aus erneuerbaren Quellen gedeckt, langfristig soll die Stromerzeugung sogar komplett treibhausgasneutral erfolgen.

Je größer der Anteil erneuerbarer Energien am Strommix wird, desto mehr Herausforderungen ergeben sich allerdings für die deutschlandweite Versorgungssicherheit mit elektrischer Energie. Denn der Bedarf von Haushalten und Unternehmen muss auch bei sogenannten Dunkelflauten gedeckt werden, also wenn Solaranlagen keinen Strom produzieren und Windräder aufgrund einer Flaute stillstehen. In diesem Fall müssen thermische Kraftwerke einspringen und die Energieerzeugung ergänzen.

Mit ihrem neuen Stellenwert als Netzreservekapazität ändern sich auch die technischen Anforderungen an die thermischen Kraftwerke und ihre Turbinen. Beim in der Auslegung noch charakteristischen Dauerlastbetrieb wurden die Turbinen lebensdauer-schonend auf Temperatur gebracht und

liefen dann permanent. Künftig werden sie für die Abdeckung der Residuallast sehr viel dynamischer betrieben, müssen kurzfristig aus dem Stand hochlaufen und rasch Energie erzeugen.

»Die während des An- und Abfahrens entstehende Überlagerung von Fliehkraftbeanspruchung und thermischer Wechselbeanspruchung in den Oberflächenkerben des Rotors begrenzt die Lebensdauer der Turbine beziehungsweise definiert die minimalen Anfahrzeiten«, erklärt Henning Almstedt von Siemens Energy. Er ist langjähriges Mitglied in der gemeinsamen Projektgruppe der FVWHT und FVV. Das geänderte Belastungsprofil der Turbine hat somit direkte Auswirkungen auf die eingesetzten Werkstoffe für den Rotor und das Gehäuse.

»Die Herausforderung sind insbesondere die großen Temperaturgradienten aufgrund der steilen Hochlaufampen der Turbine. Die Temperaturdifferenzen im Material erzeugen Spannungen, die zu Rissen führen können«, so Dr. Martin Reigl von GE Vernova. Er ist Koordinator der Projektgruppe W10, die am Verhalten von Werkstoffen für die Turbine forscht, mit denen sich beispielsweise die geänderten Anforderungen an die thermischen Kraftwerke im Rahmen der Energiewende noch besser umsetzen lassen.

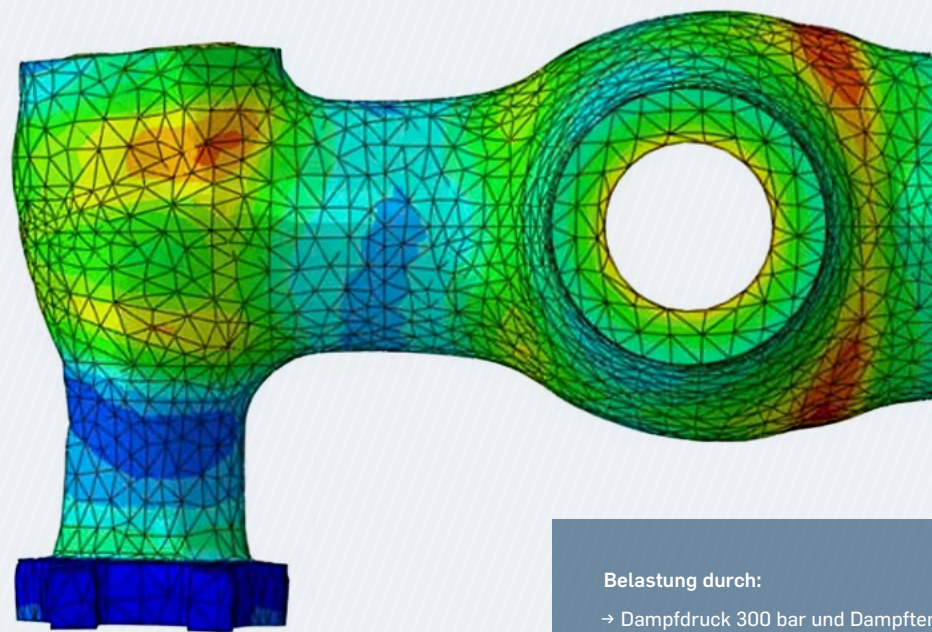
Dabei kann die Hochtemperatur-Werkstoffforschung auf eine lange Tradition zurückblicken: Im Jahr 1970 startete das erste Vorhaben der FVWHT, um die veränderliche Betriebsbeanspruchung realer Bauteile im Labor experimentell zu simulieren.

Der damals eingerichtete begleitende Arbeitskreis aus Industrievertretern betreut seitdem Projekte zur veränderlichen Zeitstandsbeanspruchung (AiF Forschungsaufgabe IV.1) und zur kombinierten Dehnwechsel und Kriechbeanspruchung (AiF Forschungsaufgabe IV.2) – und das ohne Unterbrechung bis heute.

Seit 1978 firmiert der Arbeitskreis mit seinen beiden Forschungsschwerpunkten als Projektgruppe W9 (IV.1) und W10 (IV.2), seit dem Jahr 2000 nur noch unter dem Namen W10.

Aus der Kooperation der beteiligten Forschungsstellen – neben anderen waren vor allem die Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart und das Institut für Werkstoffkunde (IfW) der Technischen Universität Darmstadt kontinuierlich eingebunden – mit der Industrie [→ S. 28] ist in den vergangenen mehr als 55 Jahren eine breite Basis an Werkstoffdaten sowie Berechnungsmethoden entstanden.

ABBILDUNG 1
FEM-Simulation eines USC-Hochdruck-Ventilgehäuses // Quelle: GE Vernova



Belastung durch:

- Dampfdruck 300 bar und Dampftemperatur 600 °C über 300.000 Betriebsstunden
- Temperaturwechselbeanspruchung durch Kalt-, Warm-, Heißstarts, Lastwechsel und Abfahren

Anwendungsorientierte Werkstoffforschung

Die Inhalte und Aufgabenstellungen der FVWHT-Hochtemperaturforschung orientierten sich dabei immer am Bedarf der Energiewirtschaft. »Grundsätzlich konzentrierte sich die Forschung auf Werkstoffe für höhere Turbinenwirkungsgrade, um die Grundlast noch wirtschaftlicher abdecken zu können. In den 1970er Jahren war der zunehmende Einsatz von Kernkraftwerken dafür verantwortlich, dass konventionelle Kraftwerke zunehmend variabel betrieben werden mussten, und heute ist es in noch viel stärkerem Maß der Ausbau der erneuerbaren Energien«, so Almstedt.

Obwohl die Ergebnisse der Projektgruppe W10 prinzipiell für alle thermisch beanspruchten Maschinen und Apparate anwendbar sind, fokussieren sich die Aktivitäten traditionell auf die Anwendung im Dampfturbinenbau.

Das zeigt sich unter anderem bei der Auswahl der Werkstoffe und der Belastungen im Versuch, die bisher vor allem im Hinblick auf den Rotor als das lebensdauerführende Bauteil erfolgte. Erst seit wenigen Jahren wird auch das massive Turbinengehäuse mitberücksichtigt. »Unsere erzielten Fortschritte bei der Lebensdauerbestimmung und Konstruktion des Rotors haben dazu geführt, dass nun auch das Gehäuse infolge thermischer Wechselbeanspruchung begrenzend

für die Anfahrzeit werden könnte. Wir versuchen daher, die für die Rotorwerkstoffe entwickelten Methoden auf die Gehäusewerkstoffe zu übertragen«, sagt Reigl.

Die von der Projektgruppe W10 entwickelten Methoden lassen sich einerseits bei der Auslegung neuer Kraftwerksturbinen nutzen, andererseits helfen sie aber auch bei der genaueren Restlebensdauerbestimmung älterer Anlagen.

Im Unterschied zum Neubau sind bei einer bestehenden Anlage die tatsächlich vorgelegenen Betriebsbedingungen, die von den in der Auslegung angenommenen Betriebsbedingungen erheblich abweichen können, bekannt. »Durch die Forschungsergebnisse der Projektgruppe W10 lässt sich die Betriebsdauer häufig über die ursprünglich vorgesehene Laufzeit hinaus verlängern, eventuell unter Austausch einzelner Bauteile, deren Lebensdauer rechnerisch erreicht ist«, erklärt Almstedt.

Neben der Bewertung von Gefügeabdrücken oder Verformungsmessungen der Bauteile spielt dabei die theoretische Untersuchung mittels Berechnung und Simulation eine wesentliche Rolle.

Die Forschungen der Projektgruppe W10 sorgen damit für hohe Effizienz bei der Energieerzeugung durch robuste, langlebige Turbinen in neuen und alten Kraftwerken und schaffen darüber hinaus die Grundlage für eine hohe Versorgungssicherheit bei der nachhaltigen Stromerzeugung.

Drei Fragen an Dr. Stefanie Brockmann

// Geschäftsführendes Vorstandsmitglied Stahlinstitut VDEh

1 Wie kam es zur Gründung der FVWHT und welcher organisatorische Zusammenhang besteht mit dem Stahlinstitut VDEh?

Die Gründung der FVWHT geht auf das Jahr 1949 zurück. Auf Anregung des Verbandes Deutscher Großkessel-Besitzer (heute: vgbe energy e.V.) wurde in diesem Jahr der Arbeitskreis »Gemeinschafts-Dauerstandversuche« von verschiedenen Herstellern von Röhren, Guss- und Schmiedestücken gegründet, später kamen Stahlanwender hinzu. Das war die Geburtsstunde der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle (AGWS).

Für die Werkstoffe für Gasturbinen und Flugtriebwerke, die Temperaturen bis weit über 800 °C standhalten müssen, gründete sich 1957 die Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe (AGHT). Im Laufe der Jahre wurde die Arbeit von AGWS und AGHT zunehmend gemeinsam organisiert, was 2015 zur Verschmelzung der beiden Kooperationsgremien in der Forschungsvereinigung Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe (FVWHT) führte, die nun ein eigenständiger Verein ist.

Das Stahlinstitut VDEh mit Sitz in Düsseldorf fungiert als Geschäftsführung der FVWHT. Das Stahlinstitut VDEh selbst ist aus dem Verein Deutscher Eisenhüttenleute hervorgegangen und widmet sich bereits seit 1860 technisch-wissenschaftlichen

Fragestellungen der Stahlindustrie. Neben Stahlherstellern sind sowohl Anlagenhersteller als auch weitere Zulieferer der Stahlindustrie im VDEh vertreten.

2 Wie ist die Projektgruppe W10 in die FVWHT eingegliedert?

Die von der FVWHT betreuten Forschungsvorhaben unterteilen sich in zwei Gruppen: Forschungsvorhaben (in der Regel Prüfungsaufgaben), die ausschließlich durch die Mitgliedsbeiträge der FVWHT finanziert werden sowie öffentlich geförderte, vorwettbewerbliche Forschungsvorhaben. Darunter fallen die AVIF- und IGF-Forschungsvorhaben der Projektgruppe W10. Die Vorhaben der W10 werden von der FVV und damit nur mittelbar durch die FVWHT betreut.

Die Arbeit aller Projektgruppen und so auch der Projektgruppe W10 wird durch den Lenkungsausschuss koordiniert, der gemeinsam neue Forschungsthemen initiiert und dies an qualifizierte Prüfstellen vergibt. Der Ergebnistransfer findet innerhalb der FVWHT statt (in den Sitzungen der Projektgruppe W10) sowie für die Öffentlichkeit in der jährlichen Vortragsveranstaltung der FVWHT.

3 Gibt es neben der FVV auch andere Kooperationspartner der FVWHT?

Die FVWHT wird von insgesamt fünf Organisationen getragen, dem Stahlinstitut VDEh, dem BDG Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie, dem FDBR/VAIS Verband für Anlagentechnik und IndustrieService, der vgbe energy und der FVV. In diesem Gefüge nimmt die FVV aufgrund ihrer Ausrichtung als Initiator und Koordinator von Forschungsvorhaben in der operativen Arbeit eine Sonderstellung ein.

Die Geschäftsführung der FVWHT unterstützt die Projekte der Industrie organisatorisch und deckt über ihre kooperierenden Trägerverbände den gesamten Bereich der Werkstoffhersteller und Anwender ab. Auch als Kooperationspartner anzusehen sind die Forschungseinrichtungen und Prüfstellen, mit denen die FVWHT fortwährend zusammenarbeitet.



Drei Fragen an Dirk Bösel

// Projektmanagement FVV

1 Warum beschäftigt sich die FVV mit der Forschung an hochfesten Stählen unter Hochttemperatureinfluss?

Ein zentraler Baustein für die Entwicklung nachhaltiger, klimaneutraler Technologielösungen im Bereich der Energieerzeugung und -wandlung ist die Werkstoffwissenschaft. Speziell für die Entwicklung von Gas- und Dampfturbinen besteht ein hoher Bedarf an neuen hochtemperaturfesten Stählen, mit denen sich Anforderungen wie höhere Wirkungsgrade, kürzere Hochlaufzeiten und längere Standzeiten umsetzen lassen.

Die Forschungsergebnisse der Projektgruppe W10 schaffen auf vorwettbewerblicher Ebene die Grundlagen für eine effiziente Entwicklung bei unseren Mitgliedsunternehmen und damit für eine schnelle Markteinführung von Turbomaschinen und -komponenten. Mit den Forschungsaufgaben greifen wir aktuelle Fragestellungen auf, die sich aus dem zunehmend flexiblen Einsatz von Netzreserve-Kraftwerken ergeben und leisten mit den Untersuchungen zur Werkstoffqualifizierung einen direkten Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz.

2 Welche Vorteile hat die Kooperation der FVV mit der Forschungsvereinigung Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe (FVWHT)?

Durch die Kooperation mit der FVWHT schlagen wir eine Brücke von der Herstellung bis zum späteren Einsatz der Werkstoffe und Komponenten in den Kraftwerken. In FVV und FVWHT arbeiten Werkstoffproduzenten, Werkstoffanwender und die Hersteller von Energieerzeugungsanlagen eng abgestimmt an gemeinsam definierten Forschungsaufgaben.

Durch diese Gemeinschaftsprojekte bündeln FVV und FVWHT ihre Aufwände und heben Synergien, da die Forschungsergebnisse allen relevanten Industriekreisen direkt zugänglich gemacht werden und so eine schnelle Umsetzung in die Praxis ermöglicht wird.

Für mich zeigt die Zusammenarbeit mit der FVWHT exemplarisch die Potenziale, die die vorwettbewerbliche gemeinschaftliche Forschung für Unternehmen und Gesellschaft bietet.

3 Seit wann besteht die Kooperation mit der FVWHT?

Mit der FVWHT beziehungsweise den Vorgängerorganisationen hat die FVV seit jeher einen engen Kontakt gepflegt. Die Kooperation bei den Forschungen zum Langzeitverhalten metallischer Hochtemperaturwerkstoffe in der heutigen Form besteht seit Anfang der 1980er-Jahre.

In dieser Zeit konnten wir in den Projekten eine Vielzahl an Werkstoffen untersuchen und charakterisieren. Gas- und Dampfturbinen stellen technologisch hochkomplexe Systeme dar, für deren Auslegung viele Disziplinen ineinandergreifen müssen.

Die Zusammenarbeit mit der FVWHT ist ein wertvoller Baustein unseres Kooperationsnetzwerks zur industriellen Forschung an Anlagen zur Energieerzeugung, mit dem wir den Transfer von Wissen und Technologien fördern.



»Die Zusammenarbeit mit der FVWHT ist ein wertvoller Baustein unseres Kooperationsnetzwerks, mit dem wir den Transfer von Wissen und Technologien fördern.« // Dirk Bösel

Hochfeste Stähle

im Wandel der Zeit



Die Optimierungspotenziale in der Kraftwerkstechnik sind direkt an die Eigenschaften der Werkstoffe gekoppelt, aus denen zentrale Bauteile wie der Rotor, aber auch Gehäuse und Rohrleitungen gefertigt sind. So erfordert das Ziel immer höherer Turbinenwirkungsgrade steigende Dampftemperaturen und -drücke, die sich wiederum nur durch Stähle mit höherer Zeitstandfestigkeit umsetzen lassen.

Bis Anfang der 1980er-Jahre lag die maximale Dampftemperatur der Turbinen für Kraftwerke durch die verwendeten niedriglegierten Chromstähle bei 540 °C. Der Sprung zu hochlegierten Stählen wie X12CrMoWVNbN-10-1-1 für den Rotor und Gusswerkstoffen wie GX12CrMoWV10-1 beziehungsweise GX12CrMoVNbN 9-1 (C91) für das Gehäuse ermöglichte Dampftemperaturen bis etwa 600 °C und damit erheblich höhere Systemeffizienz ohne Einbußen bei der Lebensdauer. **Heutiger Stand der Technik sind hochtemperaturfeste Stähle wie X13CrMoCoVNbNB9-2-1 (FB2) und G-X13 CrMoCoVNbN 9-2-1 (CB2), mit denen sich Dampftemperaturen bis etwa 620 °C und Dampfdrücke bis etwa 300 bar umsetzen lassen. [→ Tab. 1]**

Als künftige Alternative für noch höhere Temperaturen sind MarBN-Stähle in Diskussion, die durch Zugabe von Bor und Stickstoff eine weiter verbesserte Langzeitstabilität der Mikrostruktur bieten.

Mit der zunehmenden Leistungsfähigkeit haben auch Entwicklung und Fertigung der hochfesten Stähle eine größere Komplexität erreicht. So sind beispielsweise die zulässigen Temperaturfenster bei der Wärmebehandlung immer enger geworden und die Legierungsbestandteile müssen immer genauer dosiert werden, um das gewünschte Gefüge zuverlässig zu erzielen.

Dass diese neuen Werkstoffe in der Kraftwerktechnik zum Einsatz kommen können, ist auch ein Verdienst der Projektgruppe W10. Ihre Forschungen orientieren sich an den geänderten Anforderungen, sodass der Industrie immer die passenden Daten und Modelle zur Beschreibung der Werkstoffe für die weiterentwickelte Turbinentechnik zur Verfügung stehen.

»In großen Teilen der Kraftwerkstechnik greifen keine DIN-, EN oder ISO-Normen, daher sind die Hersteller und Betreiber der Anlagen bei der Auslegung auf eigene Erfahrungen angewiesen. Durch unsere vorwettbewerbliche Forschung beantworten wir die Frage, welche Werkstoffe für welche Einsatzzwecke geeignet sind, und geben so den Rahmen für die industrielle Forschung und Entwicklung vor«, sagt Reigl. Die in den Projekten der W10 untersuchten Werkstoffproben werden von den Industriepartnern angeliefert und stammen in der Regel direkt aus der Bauteilfertigung, sodass Untersuchungen und Versuche mit diesen Proben repräsentative Ergebnisse liefern können. Bei Gusswerkstoffen beispielsweise ist so gewährleistet, dass die Gefügezusammensetzung identisch mit den im Kraftwerk eingesetzten Bauteilen ist.

Alle Werkstoffe durchlaufen in den Projekten der W10 eine detaillierte Eingangsprüfung, in der eine erste Charakterisierung der Schmelze bezüglich chemischer Zusammensetzung, Wärmebehandlung und mechanischer Eigenschaften vorgenommen und in einem Vorprüfungszeugnis dokumentiert wird, bevor die langlaufenden Versuche durchgeführt werden. **Mit diesem »Geburtsschein«, den die W10 seit Gründung für alle untersuchten Stähle erstellt, ist sie Vorreiter des konsolidierten Datenmanagements, wie sie die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) als Sammlung der Metainformationen (FAIR-Daten) seit einiger Zeit fordert.** Das Akronym FAIR steht für »Findable« (Auffindbar), »Accessible« (Zugänglich), »Interoperable« (Interoperabel) und »Reusable« (Wiederverwendbar).

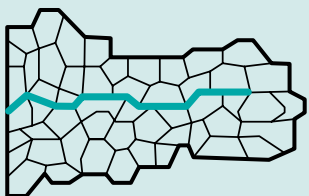
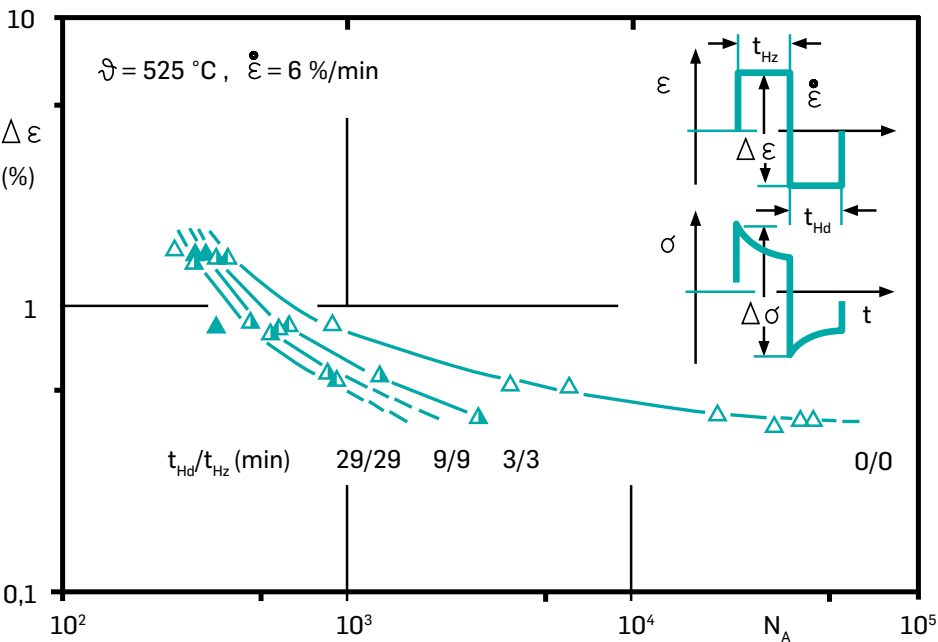
Schäden bei Stählen im Hochtemperaturbereich sind vor allem auf Kriechen und Ermüdung sowie eine Kombination beider Ursachen zurückzuführen. Mit der Laufzeit kommt es dabei zu einem Wechsel der Schadensbilder. Zu Beginn entstehen transkristalline Schäden, also die Rissbildung innerhalb der Körner des Gefüges, später sind interkristalline Schädigungen entlang der Korngrenzen dominierend. **In Langzeitversuchen untersucht die Projektgruppe W10 Mikrostrukturentwicklungen der Stähle bei Kriech-, Ermüdungs- sowie kombinierter Kriechermüdungsbeanspruchung unter isothermen, anisothermen und betriebsähnlichen Bedingungen.** Analysiert werden dabei Veränderungen der Subkorngröße, der Versetzungsstruktur, der Porendichte und der Ausscheidungsstruktur.

»Unter Kriechermüdungsbelastung kommt es bereits nach relativ kurzer Dauer zu erheblichen Veränderungen auf Mikrostrukturebene. Dies ist vor allem auf zyklische Entfestigungen zurückzuführen, die mit der Auflösung der anfänglichen Latten- und Subkorgrenzen, der Vergröberung der Subkörner sowie der Reduzierung der Versetzungsdichte verbunden sind. Beim Vergleich von Kriech- und Kriechermüdungsbelastung wird auch ersichtlich, dass die Abnahme der Versetzungsdichte und die Zunahme der Subkorngröße bei überlagerter Belastung wesentlich schneller ablaufen als im Fall reinen Kriechens« so Reigl zu den Ergebnissen eines exemplarischen W10-Forschungsprojekts, bei dem erstmalig Untersuchungen zur Quantifizierung der Versetzungs- und Subkornstrukturänderung bei komplexer Hochtemperaturbeanspruchung von martensitischen 9-%-Cr-Werkstoffen durchgeführt wurden.

Inbetriebnahme der Turbinen	Typische max. Dampftemperatur	Werkstoffe für Rotoren	Werkstoffe für Gehäuse
seit den 1950ern	530 bis 540 °C	1CrMoV	1CrMoV
seit ca. 1990	565 °C	1CrMoV, 2CrMoWV	1CrMoV
seit ca. 1997	580 °C	10CrMoWVNbN	9CrMoWVNbN 9CrMoVNB (C91)
seit ca. 2002	610 °C	9Cr-2Mo-1Co-VNbNB (FB2)	9Cr-2Mo-1Co-VNbNB (CB2)
seit ca. 2012	620 °C		

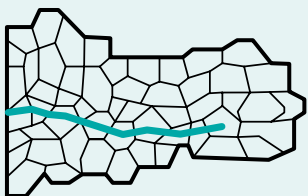
TABELLE 1
Entwicklung der Dampftemperaturen von Dampfturbinen zur Elektrizitätsversorgung (Anhaltswerte)
// Quelle: Projektgruppe W10

ABBILDUNG 2
Frühe Arbeiten zur Kriech-Ermüdungs-Wechselwirkung der
Arbeitsgruppe W10 // Quelle: IfW | TU Darmstadt



Intergranularer Riss:

- Hohe Temperatur
- Lange Haltezeit
- Niedrige Dehnungsrate



Transgranularer Riss:

- Niedrige Temperatur
- Kurze Haltezeit
- Hohe Dehnungsgeschwindigkeit

Ein weiterer relevanter und zeitabhängiger Mechanismus der langfristigen Eigenschaftsveränderung hochlegierter Stähle infolge der hohen Dampftemperaturen ist der Ausscheidungszustand der Legierungsbestandteile im Werkstoffgefüge auf atomarer Ebene. Je nach Zusammensetzung sind das unter anderem Chrom, Vanadium und Molybdän (CrVMo-Stahl). »Auch die Entwicklung derartiger Mechanismen bilden wir bei den Langzeitversuchen der W10 ab und machen sie durch moderne Methoden der Materialanalytik, beispielsweise mithilfe der Energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDS) und der Elektronenmikroskopien (REM, TEM), sichtbar«, erklärt Dr. Min Huang von der MPA der Universität Stuttgart. [→ Abb. 3] Gusswerkstoffe, die beispielsweise für Turbinengehäuse eingesetzt werden, stellen eine besondere

Herausforderung bei der Herstellung, aber auch der Lebensdauerabschätzung dar. Durch den Gieß- und Erstarrungsprozess sind Verunreinigungen und unerwünschte Hohlräume, sogenannte Lunker, im Werkstoff nahezu unvermeidlich. Diese Inhomogenitäten im Gefüge sind Schwachstellen, die zu einer reduzierten Zeitstandfestigkeit des Bauteils führen können. Bei den Untersuchungen von Gusswerkstoffen werden die Proben für die Zeitstandversuche daher systematisch verteilt aus der äußersten Lage und dem Kernbereich des Stahlgusses entnommen, sodass die Versuche alle Bereiche des Gussbauteils abdecken.

Die Projektgruppe W10 liefert so Forschungsergebnisse für die gesamte Bandbreite der im Kraftwerksbau eingesetzten hochfesten Stahlwerkstoffe.

initial state	600 - 200 °C, 840 cycles $t_H = 3.2\text{ h}$, 2,688 h	600 - 300 °C, 510 cycles $t_H = 3.2\text{ h}$, 856 h	600 - 300 °C, 462 cycles $t_H = 3.2\text{ h}$, 1,728 h plateau 0.0006 %/min
---------------	--	--	--

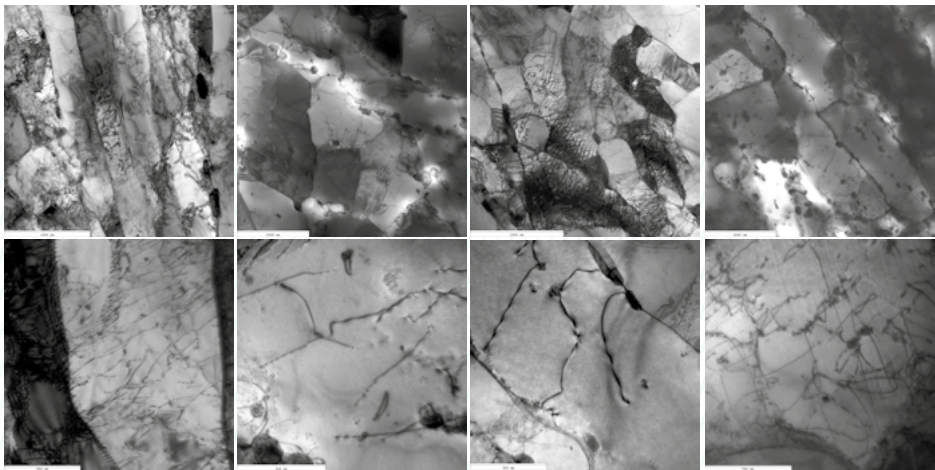


ABBILDUNG 3
TEM-Hellfeldaufnahmen von Proben aus betriebsähnlichen anisothermen Kriechermüdungsversuchen // Quelle: MPA Stuttgart

A large, stylized magnifying glass graphic is positioned on the left side of the slide. It features a large circular lens and a handle, both rendered in a light green color that matches the background. The background itself is a solid green with a subtle pattern of diagonal lines.

Laborversuche verifizieren Lebensdauermodelle

Die in den Forschungsprojekten der W10 umgesetzten Werkstoffversuche haben in erster Linie die Aufgabe, die Vorhersage-Genauigkeit der Lebensdauermodelle für die in Dampfturbinen eingesetzten warmfesten Stähle zu verbessern. Diese Modelle und deren Absicherung eröffnen den Herstellern und Betreibern von Kraftwerken die Möglichkeit, die Spielräume der einzelnen Werkstoffe bezüglich längerer Betriebszeiten und höherer Beanspruchung optimal auszunutzen.

Dazu orientieren sich die Versuchsaufbauten eng an den realen Bedingungen in Turbinen. **Der Temperatureinfluss auf die Leistungsfähigkeit der warmfesten Stähle wird durch Prüftemperaturen bis über 600 °C abgebildet.**

Herausfordernd ist die notwendige Laufzeit der Versuche. »Um das Verhalten der untersuchten Stähle realitätsnah abzubilden, wurden die Proben im Kriechermüdungsversuch zum Teil 15.000 Stunden, oder anders ausgedrückt mehr als zwei Jahre, am Stück geprüft. In dieser Zeit ist der Prüfstand mit diesem Versuch belegt und kann nicht anderweitig genutzt werden,« so Dr. Christian Kontermann vom IfW. Das erklärt, warum die Langzeitprojekte der W10 in der Regel nur zwei bis drei unterschiedliche Werkstoffe betrachten, die dann aber umfassend untersucht und charakterisiert werden.

Allgemein verbreitet in der Werkstofftechnik sind Versuche mit einem Standard-Belastungszyklus in Dreiecksform, also mit linearen Rampen. »Diese Betrachtung liefert für die Bedürfnisse der Kraftwerks-industrie nicht ausreichend genaue Ergebnisse. Daher haben wir ein eigenes Prüfmuster entwickelt, das der realen Betriebsweise in einer Kraftwerksturbine nahekommt«, erklärt Kontermann. Ein Beispiel eines repräsentativen Prüfzyklus umfasst einen Kaltstart, drei Warmstarts sowie 16 Heißstarts und bildet die Temperaturbelastungen beim Anfahren der Turbine (Erwärmen), während der Haltezeit auf Betriebstemperatur (Konstantlast oder Relaxation) und beim Abfahren in den Stillstand (Abkühlen) ab. [→ Abb. 5] Dieses standardisierte Vorgehen wurde am IfW schon in den 1970er- Jahren etabliert und hat nach wie vor Gültigkeit.

»Der daraus resutierende Vorteil ist die Vergleichbarkeit aller Ergebnisse, die unsere Werkstoffforschungen seither zutage gefördert haben. Wir können heute noch nachvollziehen, welche Eigenschaften

diese Werkstoffe hatten und mit unseren modernen Proben vergleichen«, sagt Kontermann. Das hilft auch bei der Absicherung der Berechnungs- und Ausle-gungsmodelle, da mehr Versuchsergebnisse für den Abgleich der Ergebnisse zur Verfügung stehen.

Auch bei den Prüflingen für die Versuche werden aufgrund der spezifischen Anforderungen im Turbinenbau teilweise Sonderlösungen benötigt. Daher kommen einerseits die bekannten Rundproben mit und ohne Kerbe zum Einsatz, andererseits werden auch Versuchsreihen mit Kreuz-proben und Hohlkörpern durchgeführt. Mit den Rundproben sind dabei im Laufe der Zeit neben belastungs- und kraft-gesteuerten Versuchen unter anderem Tests mit Zyklen mit und ohne Haltezeiten, betriebsrelevanten Belastungsprofilen und Untersuchungen alternativer Schmelzen erfolgt. Kreuzproben erlauben durch die zweiachsige Lasteinleitung Messungen des Einflusses der mehrdimensionalen Beanspruchung. Diese Mehrachsigkeit tritt auch in einigen Bauteilen von Turbinen auf,

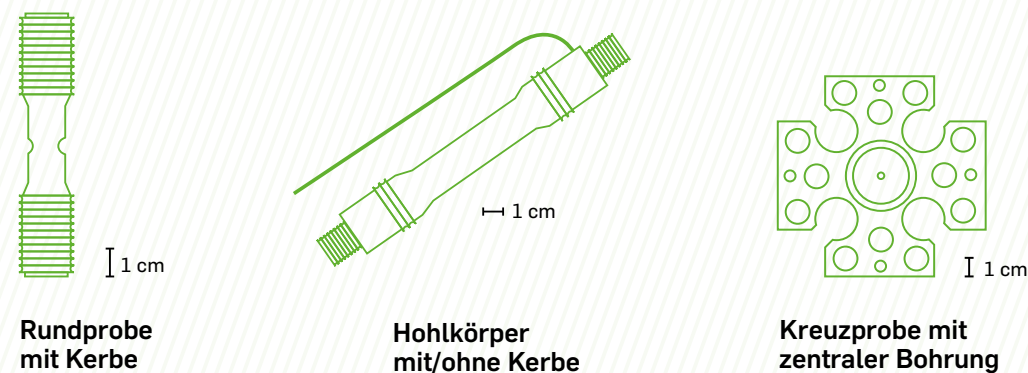
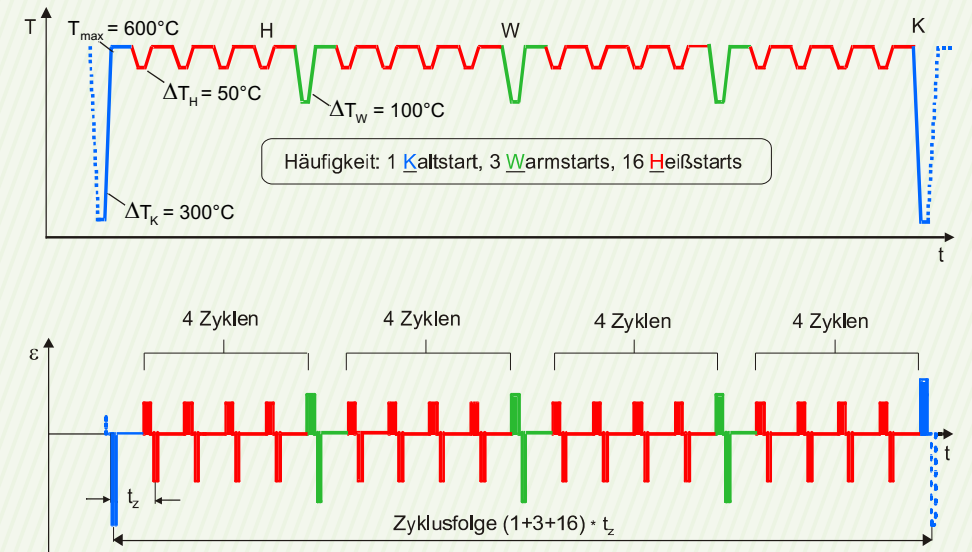


ABBILDUNG 4
Probenformen zur Adressierung bauteilähnlicher Beanspruchungssituationen // Quelle: MPA | IfW

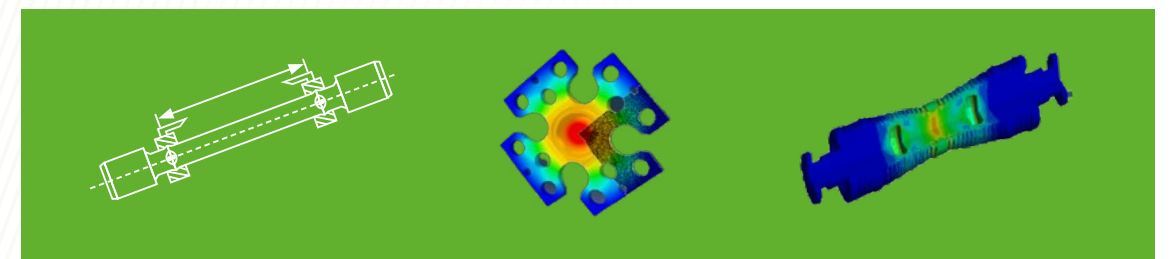
ABBILDUNG 5
Beispielzyklen und Prüfstrategien zur Beschreibung bauteilähnlicher Beanspruchungsszenarien // Quelle: IfW | TU Darmstadt



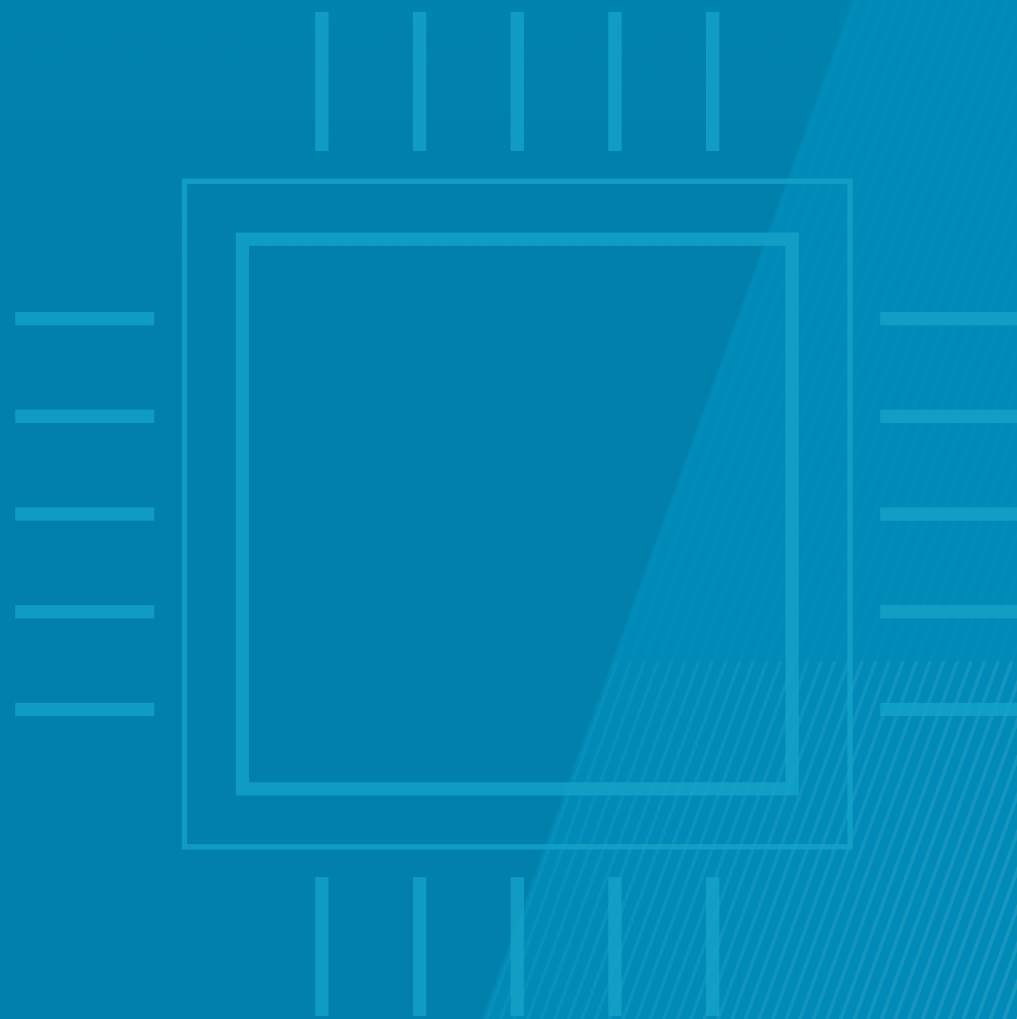
zum Beispiel an Wandübergängen und Kerben von Gehäusen. Diesen Belastungs-fall adressieren auch Versuche mit Hohl-zylindern an der MPA. »Im Inneren des Prüflings können wir einen Gasdruck bis 400 bar und eine Temperatur bis 600 °C erzeugen und damit die Belastungen durch den Dampfdruck nachbilden, wie er in der Realität auftritt«, sagt Huang.

In den Forschungsprojekten der jüngsten Zeit hat sich der Betrachtungshorizont

erweitert. Ein neues Kriterium ist die Ent-wicklung kleiner Risse an Bauteilkerben, die sich im Gefüge ergeben und über die Zeit weiterwachsen. **Während in der Vergangenheit Sicherheitsfaktoren im Sinne einer konservativen Auslegung für die notwendige Langzeithaltbarkeit sorgten, können neue Forschungs-ergebnisse dazu beitragen, das reale Risswachstum genauer zu berück-sichtigen und damit besser in die Modelle zu überführen.**



Uniaxiale Referenz → Multiaxiale Verifizierung → Bauteilanwendung



Genauere Modelle geben mehr Entwicklungsspielraum

Aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwands, den Langzeit-Werkstoffversuche verursachen, kann die Auslegung der Turbinenbauteile nicht vollständig durch Labortests abgesichert werden. Vielmehr müssen Berechnungs- und Simulationsmodelle gefunden werden, mit denen sich die Vorgänge im Werkstoff und die aus diesen resultierende Lebensdauer präzise prognostizieren lassen. Eine der größten Herausforderungen sind dabei die hohen Beanspruchungen beim Anfahren einer Turbine, verursacht durch die großen Temperaturgradienten der zumeist sehr dicken und schweren Bauteile.

Erste Berechnungsansätze lieferte schon vor rund 60 Jahren der NASA-Mitarbeiter S. S. Manson. Den spezifischen Betriebszyklus im Kraftwerk bildete er vereinfacht durch einen Faktor ab. Als Faustformel galt dabei, dass der Betrieb unter Kriechbedingungen 90 % der zyklischen Lebensdauer ausmacht.

Eine erheblich genauere Methode geht auf den ehemaligen Leiter der Hochtemperaturforschung am IfW, Dr. Alfred Scholz, zurück. Im Rahmen seiner Dissertation entwickelte er in den 1980er-Jahren das Post-Prozessor-Verfahren SARA (Schadens-Akkumulation-Rechner-Anwendung). Als Eingangsgröße dienen dabei die Ergebnisse strukturmechanischer Berechnungen der Komponente. **Aus den FEM-Ergebnissen leitet SARA innerhalb weniger Minuten eine Schadensakkumulation ab. Dabei werden betriebsähnliche Zyklen aus Anfahr-, Halte- und Abfahrphase für Kalt-, Warm- und Heißstarts vorgegeben und entsprechend dem Betrieb in verschiedener Anzahl kombiniert.** Die Genauigkeit hängt dabei vom modellierten Zyklus ab – je näher er am Realzyklus liegt, desto genauere Ergebnisse generiert SARA. »Die Erkenntnisse der W10 werden in den Unternehmen in interne Auslegungsregeln umgesetzt und haben sich in unzähligen Anwendungen bewährt«, so Almstedt.

Noch präzisere Resultate liefern sogenannte Unified Modelle. Sie können mit probabilistischen Methoden angewendet werden und geben genaue Auskunft darüber, an welchen Stellen Schäden auftreten können, wie hoch die Wahrscheinlichkeit dafür ist und welcher Schadensverlauf zu erwarten ist. Bei der Überführung der Ergebnisse in die industrielle Forschung

und Entwicklung macht Almstedt jedoch auf einen zentralen Punkt bei den Unified Modellen aufmerksam: »Ausgefeilte Analysen lassen sich nur bei genauer Kenntnis aller Eingabewerte wie Belastungsregime, Geometrien und Materialinformationen durchführen. Sind diese Angaben in der Bauteilentwicklung nur annäherungsweise bekannt, reicht eine grobe Berechnung mittels SARA vollkommen aus.« Denn nachteilig bei den Unified Modellen sind die langen Rechenzeiten von mehreren Wochen und die mitunter mangelnde Rechenstabilität.

»Mit großem Aufwand arbeitet die W10 daher an Möglichkeiten, einerseits die Genauigkeit von SARA weiter zu steigern und andererseits die Rechenzeit der Unified Modelle zu reduzieren und ihre Robustheit zu verbessern«, erklärt Almstedt. Dazu sollen die Potenziale verschiedener Akteure, die Unified Modelle nutzen, künftig gebündelt werden. Auf Initiative der W10 wurde ein über das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Verbundprojekt im Rahmen der Initiative »MaterialDigital« ins Leben gerufen. Ziel ist die Etablierung von einheitlichen Ein- und Ausgabeschnittstellen der Unified Modelle.

Die vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung könnte dann von einer einfacheren Handhabung und einer besseren Vergleichbarkeit der Rechenergebnisse profitieren.

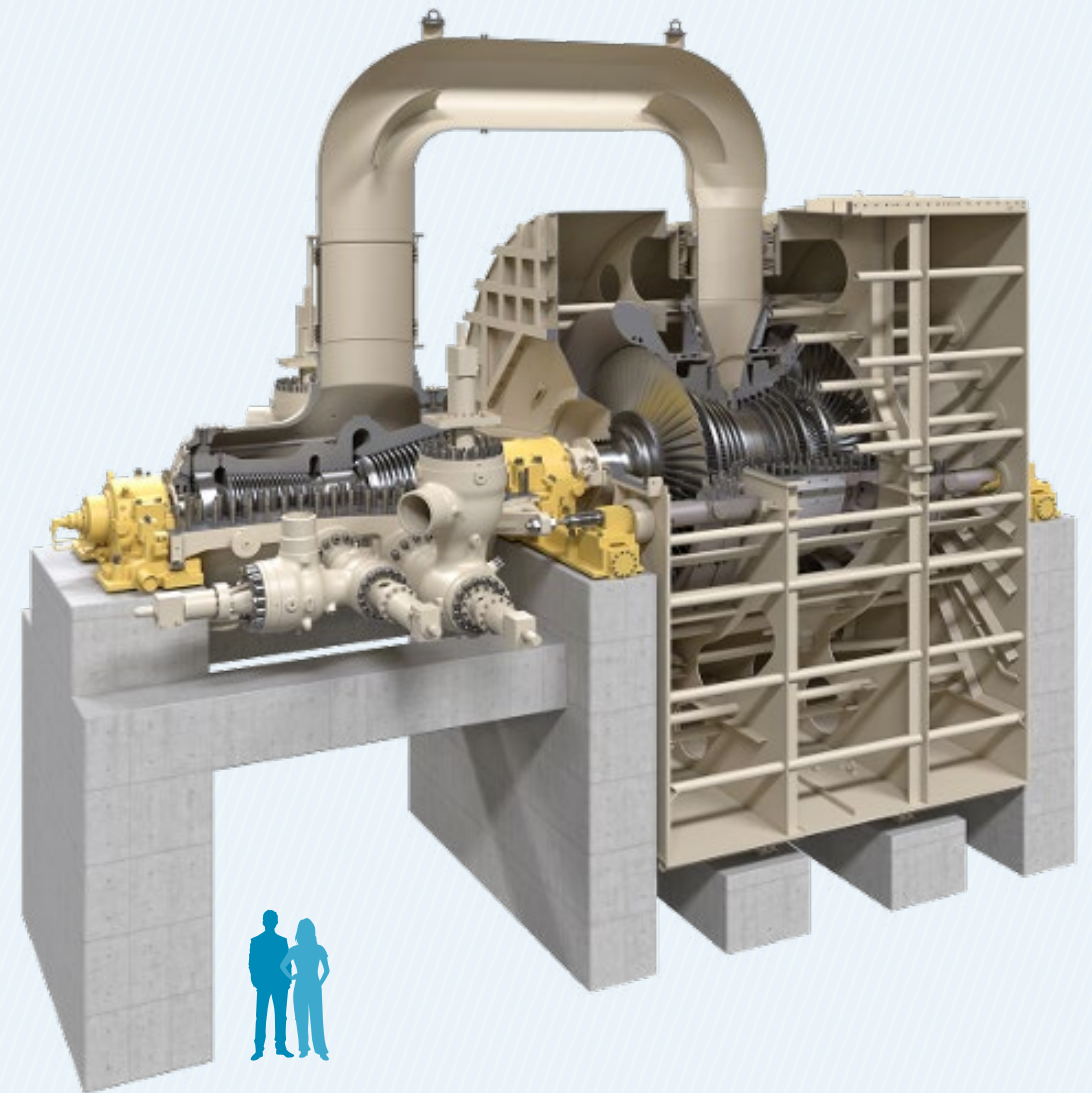


ABBILDUNG 6

Dampfturbine: Aufbau und Größenvergleich // Quelle: Siemens Energy



PROJEKT- NUMMER	THEMA // LAUFZEIT	FORSCHUNGS- SCHWERPUNKT	FÖRDER- GEBER	FORSCHUNGS- STELLEN	PROJEKT- KOORDINATION
904	Schnelle Anfahrvorgänge: Verformungs- / Schädigungs- entwicklung an massiven heißgängigen Kraftwerkskomponenten bei schnellen Anfahrvorgängen // 01-07-2006 bis 31-12-2010	Werkstoffe	AVIF	Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW)	GE Vernova
925	Optimierung Werkstoffmodellparameter: Fortschrittliche Methoden zur Parameteridentifizierung und sequentiellen Extrapolation zur Anwendung bei konstitutiven Material- modellen für Kriech- und Kriechermüdungsbeanspruchung // 01-01-2007 bis 31-03-2010	Entwicklungs- werkzeuge	AVIF	Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW)	Siemens Energy Global
106	Dickwandige Gehäuse: Zur Schädigungsentwicklung mehrachsiger und anisotherm hochbeanspruchter dickwandiger Gehäuse moderner thermischer Maschinen und Anlagen // 01-01-2011 bis 31-03-2015	Werkstoffe	AVIF	Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW)	GE Vernova
113	Stützwirkung Kriechermüdung: Einfluss von Stützwirkungs- effekten auf das Langzeit-Kriechermüdungsverhalten von Kraftwerkskomponenten bei hohen Laständerungsgeschwindig- keiten // 01-01-2013 bis 30-06-2016	Werkstoffe	AVIF	Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) Universität Stuttgart / Materialprüfungsanstalt (MPA)	Siemens Energy Global
1181	Probabilistik Methoden-Kriechermüdung: Probabilistische Lebensdauerbewertung von Hochtemperaturbauteilen unter Kriechermüdung // 01-01-2015 bis 30-06-2018	Werkstoffe	AVIF	Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW)	Siemens Energy Global
1259	Dickwandige Gehäuse II: Lebensdauer und Schädigungs- mechanismen bei variabler Betriebsweise dickwandiger Gehäuse aus modernen Stahlgusswerkstoffen. Die Ansätze zur Model- lierung der rechnerischen Lebensdauer bzw. Schädigung umfassten ein akkumulatives Rechenmodell (SARA) sowie ein konstitutives Modell. // 01-01-2017 bis 31-12-2020	Entwicklungs- werkzeuge	AVIF	Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) Universität Stuttgart / Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) Universität Stuttgart / Materialprüfungsanstalt (MPA)	GE Vernova
1299	Stützwirkung Stahlguss: Quantifizierung von Stützwirkungs- effekten für Bauteile aus Stahlguss vor dem Hintergrund flexiblerer Betriebsweisen // 01-01-2018 bis 31-12-2020	Werkstoffe	AVIF	Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) Universität Stuttgart / Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) Universität Stuttgart / Materialprüfungsanstalt (MPA)	Siemens Energy Global
1380	Probabilistischer Lebensdauermodellvergleich - Kriechermüdung: Anwendung und Vergleich von Modellen zur Lebensdaueranalyse von Hochtemperaturbauteilen unter Kriechermüdung auf Basis fortschrittlicher probabilistischer Methoden // 01-01-2020 bis 31-12-2023	Entwicklungs- werkzeuge	AVIF	Bergische Universität Wuppertal / Angewandte Mathematik - Stochastik Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW)	Siemens Energy Global
1401	LPBF Hochtemperaturlebensdauer: Entwicklung von Konzepten zur Ermittlung von Kennwerten zur Bewertung von additiv- gefertigten Komponenten für den Hochtemperatureinsatz // 01-05-2020 bis 30-04-2024	Werkstoffe	BMWK/IGF	Universität Stuttgart / Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) Universität Stuttgart / Materialprüfungsanstalt (MPA) Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW)	MAN Energy Solutions
1518	Integrierte Kriechermüdungsbewertung: Verallgemeinerung, Erweiterung und Verifikation von Ansätzen zur Kriechermüdungs- Schädigungsberechnung für anwendungsnahe Beanspruchungs- zyklen und Integration in FEM-Programme // 01-03-2024 bis 31-08-2026	Entwicklungs- werkzeuge	BMWK/IGF	»Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM) Universität Stuttgart / Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) Universität Stuttgart / Materialprüfungsanstalt (MPA)«	GE Vernova

FORSCHUNGSSTELLEN

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM)

Universität Stuttgart / Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF)

Universität Stuttgart / Materialprüfungsanstalt (MPA)

Technische Universität Darmstadt / Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW)

INDUSTRIE

Accelleron // Turbo Systems Switzerland Ltd.

B&B-AGEMA GmbH

Bosch Engineering GmbH

CTWe GmbH

Delta JS AG

DEUTZ AG

GE Vernova // General Electric (Switzerland) GmbH

IHI Charging Systems International GmbH

INPROSIM GmbH

KS Kolbenschmidt GmbH

MAN Energy Solutions SE

Metal Improvement Company, LLC

MTU Aero Engines AG

Rheinmetall Automotive AG

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

Siemens Energy Global GmbH & Co. KG

Steinbeis-Transferzentrum Bauteilfestigkeit und
-sicherheit, Werkstoff- und Fügetechnik (BWF)

Volkswagen AG

Die FVV dankt den Koordinatoren der Projektgruppe W10 ›Hochtemperaturverhalten von Werkstoffen unter veränderlicher Beanspruchung‹ Dr. Martin Reigl (GE Vernova) und Henning Almstedt (Siemens Energy Global) für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht an die Mitglieder der W10, die FVWHT und die beteiligten Experten in den Forschungsstellen sowie weiteren Institutionen, die ihr Wissen zur Verfügung gestellt haben.

Innovative und nachhaltige Forschungskooperationen benötigen einen stabilen Finanzierungsrahmen. Unsere Projekte werden aus den Beiträgen der Mitgliedsunternehmen, Kooperationen und aus Mitteln der öffentlichen Forschungsförderung finanziert. Wir bedanken uns bei allen Forschungspartnern für die langjährige, großzügige Unterstützung:

AVIF

Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V.

BMWK

Die Projekte wurden/werden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

IGF

Die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) ist ein europaweit erfolgreiches, themenoffenes und vorwettbewerbliches Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), das kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) einen einfachen Zugang zu praxisorientierter Forschung und zu aktuellen Forschungsergebnissen ermöglicht. In der IGF bestimmen Unternehmen bzw. Verbände, Forschungsvereinigungen und Forschungseinrichtungen gemeinsam den Forschungsbedarf und die Forschungsthemen ihrer Branche. Die Begleitung der Forschungsprojekte durch die Unternehmen garantiert die Praxisnähe der Forschungsprojekte. Die Ergebnisse der IGF-Projekte sind öffentlich und stehen allen interessierten Unternehmen zu gleichen Bedingungen zur Verfügung. So stärkt die IGF die Wettbewerbsfähigkeit des Mittelstands in Deutschland und trägt damit maßgeblich zu Deutschlands Innovationssouveränität bei.



Alle Angaben sind ohne Gewähr, Änderungen vorbehalten.
Vervielfältigung und Onlinestellung der Publikation – ganz oder in Teilen – ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers gestattet. Alle Rechte vorbehalten.



R610 | 2024

HERAUSGEBER

FVV e.V.
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main
www.fvv-net.de

AUTOR

Richard Backhaus, Wiesbaden

REDAKTION

Petra Tutsch und
Dirk Bösel, FVV

GRAFISCHE KONZEPTION UND UMSETZUNG

Lindner & Steffen GmbH, Nastätten

BILDNACHWEIS

AdobeStock: evannovostro
iStock: typo-graphics

FVV e.V.

Lyoner Straße 18 | 60528 Frankfurt am Main
+49 69 6603 1345 | info@fvv-net.de

www.fvv-net.de