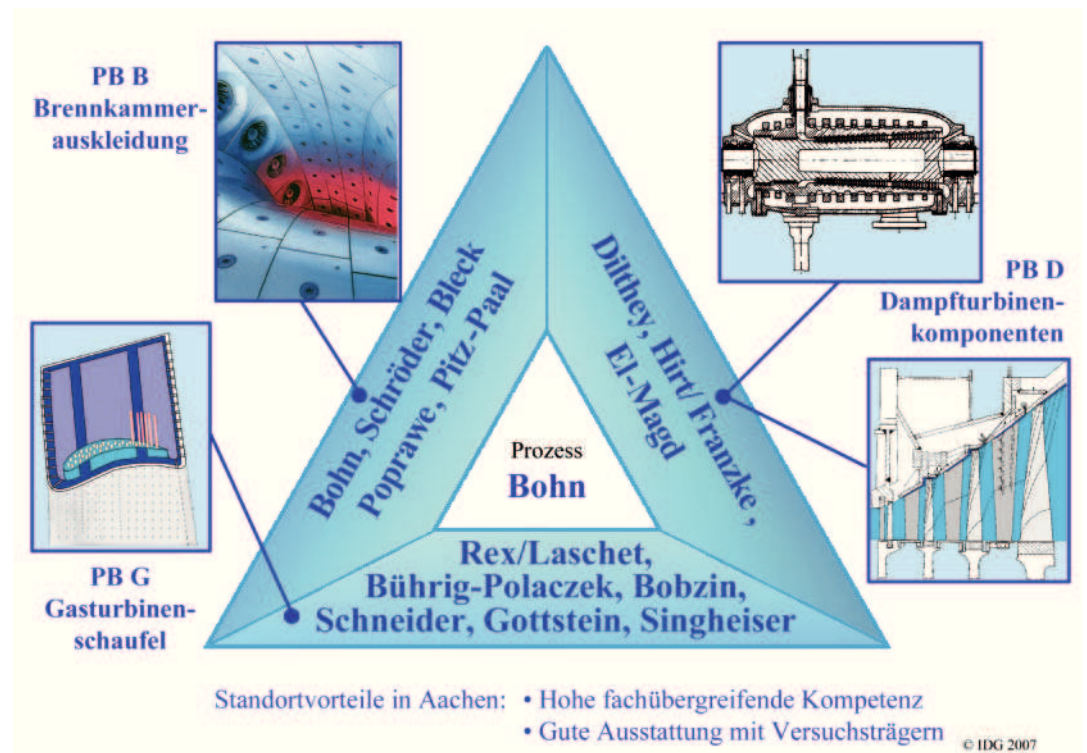


Forschung für das Kühltechnologie für die Gasturbine

Die Schonung der natürlichen Brennstoffressourcen und die Reduzierung der Emission umweltschädlicher Gase sind die treibenden Kräfte zur Verbesserung der thermischen Wirkungsgrade zukünftiger und neuer Kraftwerke. Die wirtschaftliche und umweltfreundliche Produktion von elektrischer Energie ist eine der grundsätzlichen technologischen Herausforderungen, deren Lösung nachhaltig über den Lebensstandard und das Wohlergehen der Menschheit in der modernen Welt entscheidet. Die Herausforderung an die Energiewirtschaft des beginnenden 21. Jahrhunderts wird aber sein, sowohl den Forderungen nach höherer Effizienz nachzukommen als auch die zu erwartenden strengen Umweltauflagen zu erfüllen und dennoch Garantien für den Anlagenwirkungsgrad wie auch für die Verfügbarkeit bei reduzierten Betriebskosten zu übernehmen. Daher sind angewandte Grundlagenarbeiten bei der universitären Forschung von Nöten. Der Sonderforschungsbereich 561 „Thermisch hochbelastete, offenporige und gekühlte Mehrschichtsysteme für Kombikraftwerke“ hat sich zum Ziel gesetzt, die heutigen technischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse zu erweitern und neue wissenschaftliche Grundlagen zu schaffen, um in einem Kombikraftwerk der Zukunft etwa ab dem Jahr 2025 Gesamtwirkungsgrade von 65 Prozent zu erreichen. Durch die Steigerung der Effizienz von Kraftwerken, nicht nur von einzelnen Komponenten sondern im Zusammenspiel aller Komponenten, kann ein wesentlicher Beitrag zur Schonung der Brennstoffressourcen und Emissionsreduktion geleistet werden. Heute können moderne kombinierte Gas- und Dampfturbinen Kraftwerke bei Feuerung mit Erdgas Gesamtwirkungsgrade von 58 Prozent erreichen. Dabei werden mit Eintrittstemperaturen von etwa 1230 Grad Celsius in Gasturbinen und maximal 600 Grad Celsius in Dampfturbinen bereits Fluidtemperaturen erreicht,



die die Belastungsgrenzen der eingesetzten Werkstoffe erreichen oder gar überschreiten, so dass ein sicherer und langlebiger Betrieb bei hoher Verfügbarkeit der Anlagen nur über komplexe Kühlverfahren, anspruchsvolle Konstruktionen und Revisionsvorschriften möglich wird.

Die zur Erzielung eines Gesamtwirkungsgrads von 65 Prozent erforderlichen hohen Prozesstemperaturen können nur durch die Entwicklung von neuen Werkstofflösungen, einschließlich Wärmedämmschichten, in Kombination mit verbesserten Kühlkonzepten beherrscht werden. Für die Gasturbine bedeutet das die Verwirklichung effektiverer Kühltechnologien, wie zum Beispiel der Effusionskühlung für die Brennkammer und für die Beschaukelung. Im Sonderforschungsbereich sollen deshalb die aero-thermomechanischen, strukturellen, werkstoffkundlichen und fertigungstechnischen Grundlagen für hochbelastete Komponenten von ressourcenschonenden und umweltfreundlichen Kombikraftwerken der übernächsten Generation geschaffen werden. Die Entwicklungsschritte der erforderlichen neuen Technologien für ein zukünftiges Kombikraftwerk

mit einem Wirkungsgrad von 65 Prozent wurden für diesen Sonderforschungsbereich bereits frühzeitig projektiert. Die Ziele können dabei nur durch einen interdisziplinären Verbund verschiedener Institute mit jeweils speziellen Fachkompetenzen erreicht werden, siehe Bild 1. Über die mit allen Teilprojekten verbundene Prozessanalyse wird darüber hinaus gewährleistet, dass die in einem Projektbereich erzielten Ergebnisse dem gesamten Sonderforschungsbereich zur Verfügung gestellt und somit Synergieeffekte systematisch genutzt werden können.

Grundsätzlich wird die Wirkungsgradsteigerung für den Gesamtprozess durch Erhöhung der Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Prozesstemperatur erreicht. Daher wird eine Steigerung der Turbineneintrittstemperaturen als Beitrag zur Wirkungsgradverbesserung angestrebt, siehe Bild 2. Mit dem Einsatz von Wärmedämmschichten auf Keramikbasis wäre zwar ein Anheben der Gasturbineneintrittstemperatur um 150 Grad Celsius prinzipiell möglich, doch kann dieses Potenzial heute noch nicht genutzt werden, weil die Lebensdauer dieser Schichten noch nicht reproduzierbar

Bild 1: Kompetenz der RWTH Aachen.

quantifiziert werden kann. Nur durch die Kombination von Effusions- beziehungsweise Transpirationskühlung mit Wärmedämmmaßnahmen wird sich die angestrebte Wirkungsgraderhöhung realisieren lassen.

Zur Erreichung des angestrebten Wirkungsgrades müssen zusätzlich für die Dampfturbine Ausführungsprinzipien zur Beherrschung der Frischdampftemperaturen von rund 700 Grad Celsius mit höchsten Drücken gefunden werden. Dabei müssen Kühlmöglichkeiten für das Gehäuse der Hochtemperatur-Dampfturbinen erarbeitet werden. Zur Vermeidung des Einsatzes von Nickel-Basis-Legierungen, der mit fertigungstechnischen Problemen und sehr hohen Kosten verbunden wäre, wird schwerpunktmäßig an der Realisierung gekühlter Strukturen aus ferritischen Werkstoffen gearbeitet. Ein weiterer Schritt zur Steigerung des Gesamtwirkungsgrades ist die Reduktion der Verluste beim Entwässerungsvorgang des Sattdampfes am Ende des Expansionsvorganges in der Niederdruck-Dampfturbine. Zur Vermeidung von erosiven Schädigungen durch auskondensier-

Kombikraftwerk der Zukunft

Bild 2: Umsetzung der Vision des Sonderforschungsbereichs 561 in technologisch logische Schritte.

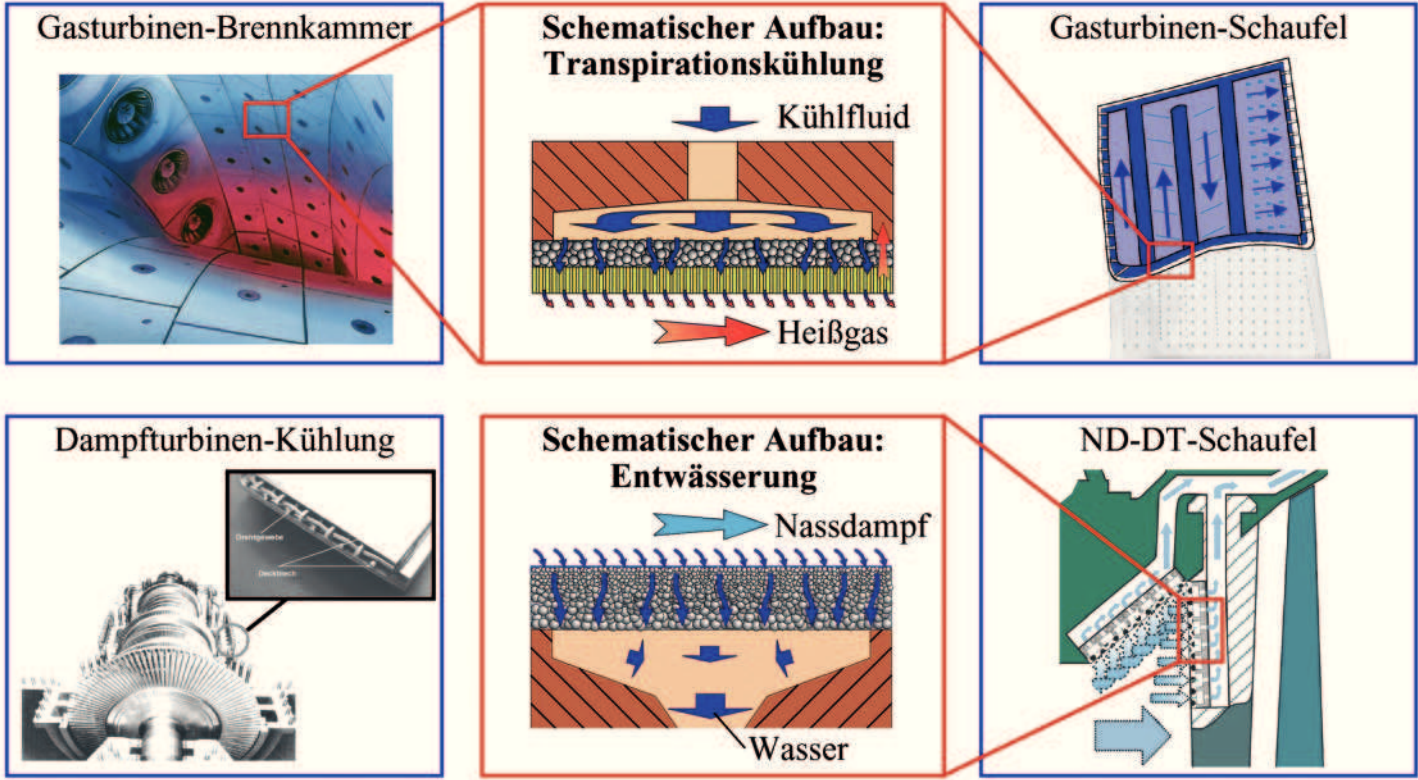
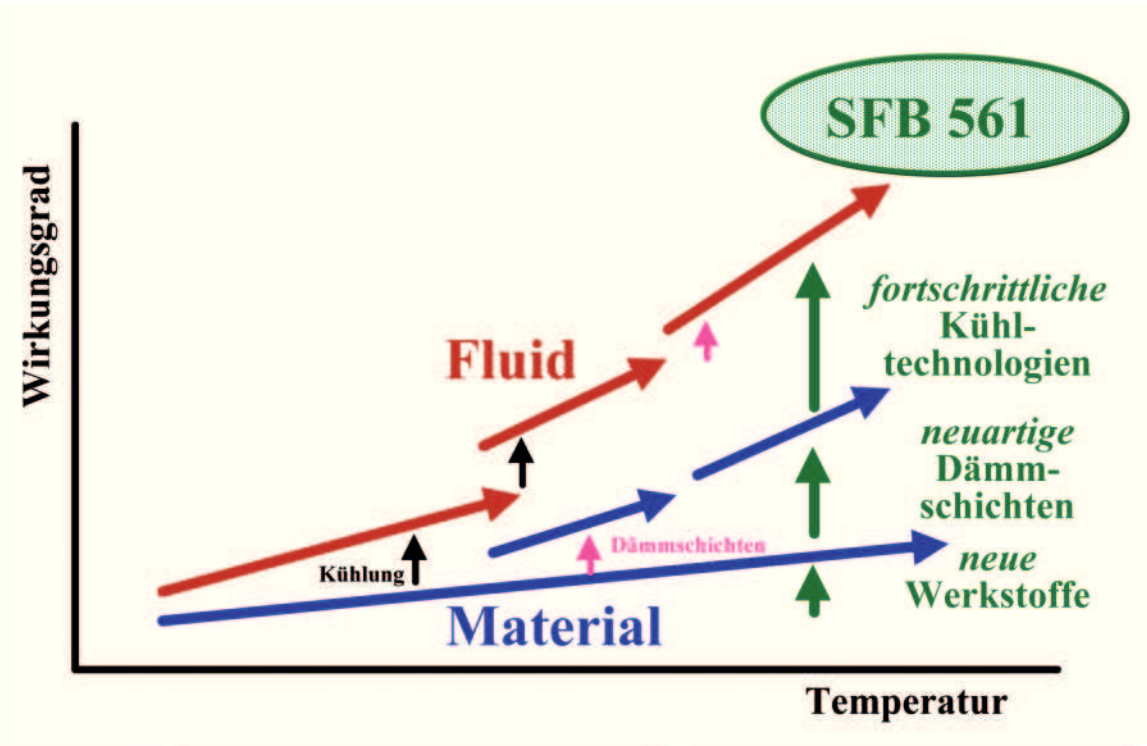


Bild 3: Wissenschaftliche Reduzierung der technologischen Herausforderungen auf Modelle.

te Wassertropfen soll durch ein flächiges Absaugen des Wassers über Schäume der Anteil der Tropfen in der Strömung reduziert werden. Durch die gegenüber den heutigen Schlitzabsaugungen glattere Oberfläche werden die Strömungsverluste reduziert und damit eine weitere Wirkungs-

gradsteigerung erzielt. In Bild 3 ist der prinzipielle Aufbau von offenporigen Strukturen und deren Einsatzmöglichkeiten im Kraftwerk dargestellt. Den schematischen Aufbau einer effusions-/transpirationsgekühlten Gasturbinenwandung zeigt Bild 3, oben. Der Strukturwerkstoff führt über ein Kammer-

tem das Kühlfluid einer offenporösen Zwischenschicht zu die vor direktem Heißgaskontakt durch eine permeable Wärmedämmschicht geschützt ist. Auf der Heißgasseite tritt das Kühlfluid flächig aus, so dass sich ein kontinuierlicher Kühlfilm ausbildet. Die Außenhaut einer zukünftigen Gasturbinenschaufel-

SchlickerReaktionsSchaumSinter-Verfahren

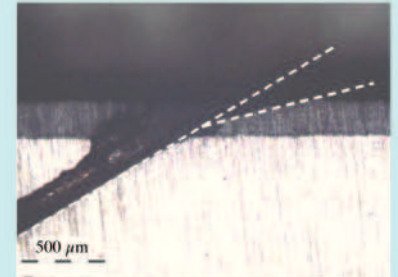


Offenporige
Metallschäume
mit gezielter
Porosität

© TP B.2.1 - IEHK

Laserbohren

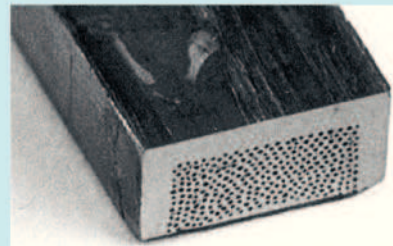
Herstellverfahren
für konturierte
Feinstbohrungen
in dem Mehr-
schichtsystem:
Substrat, MCrAlY
und TBC



© TP B.2.2 - LLT

Herstellverfahren für den Verbundwerkstoff

Kopplung der
 Al_2O_3 -Fasern
mit der NiAl-
Matrix durch
geeignete
Schichten und
Verfahren



© TP G.3.1 - IMM

Gießtechnik NiAl

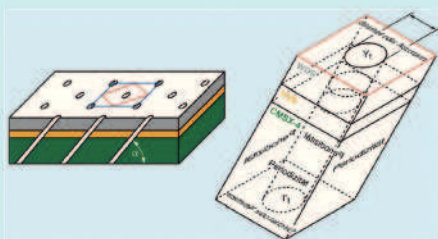


Herstellung
prüffähiger
Hohlkörper
aus NiAl

© TP G.2.1 - GI

Bild 4a: Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 561 im Bereich Herstellung und Prüfung neuer Werkstoffe.

Homogenisierung

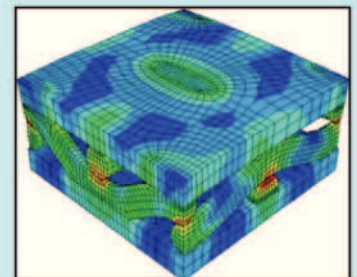


Berechnung
äquivalenter
Werkstoff-
eigenschaften
für gekühlte
offenporige
Strukturen

© TP G.1.1 - ACCESS

Mechanisches Verhalten

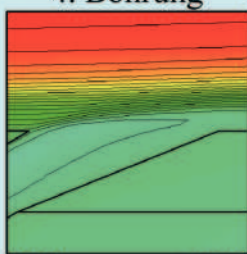
Berechnung der
mechanischen Lasten
unter Verwendung
der experimentell
bestimmten Werk-
stoffeigenschaften



© TP D.3.1 - LFW

Conjugate, RANS

4. Bohrung



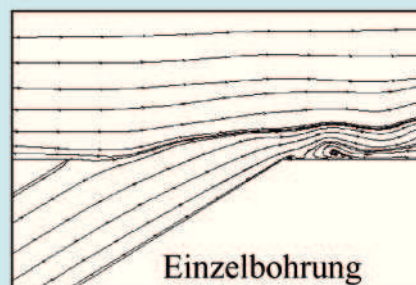
3 Bohrungen
stromauf

3 Bohrungen
stromab

Untersuchung der
Interaktion von
mehreren Bohrun-
gsreihen und der
thermischen Belastung
des Materials

© TRP B.1.1 - IDG

Adiabat, LES



Einzelbohrung

Detaillierte
Untersuchung
der Wirbel-
systeme der
Interaktion von
Kühlstrahl und
Hauptströmung

© TP B.1.2 - AIA

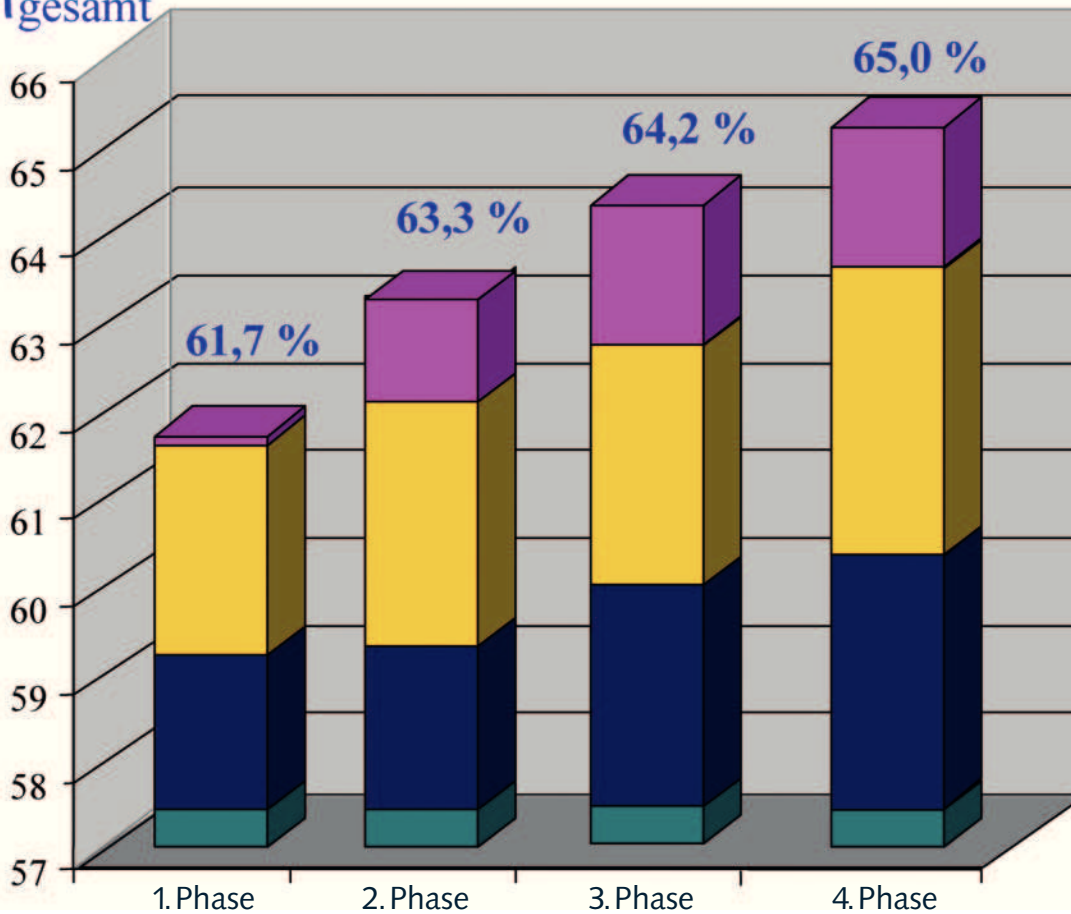
Bild 4b: Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 561 im Bereich Modellierung der aerothermomechanischen Phänomene.

fel kann nach dem gleichen Prinzip wie die Brennkammerwand aufgebaut werden. Zur Absaugung des auskondensierenden Wassers in der Niederdruck-Dampfturbine soll ebenfalls ein Kammersystem realisiert werden. Hierbei wird das Prinzip der Kühlung umgekehrt

und das Wasser durch die poröse Schicht in die Kammern geleitet, siehe Bild 3, rechts unten. Die grundsätzliche Methodik der offenporigen Strukturen soll im Hochtemperaturbereich der Dampfturbinen durch Gewebestrukturen realisiert werden, siehe Bild 3, links unten, durch

die Kühldampf geleitet wird, der das Bauteil konvektiv kühlt. Durch die Gewebelage wird die Turbulenz innerhalb der Struktur und dadurch der Wärmeübergang in der Hohlstruktur erhöht, so dass eine effektivere Kühlwirkung erzielt wird.

Für die Gasturbinenlauf-

η_{gesamt} 

Wirkungsgradsteigerung

Höhere Materialtemperaturen

Dampfturbine
höhere Dampfparameter
Dampfkühlung

Gasturbine
bessere Strömungsführung

Referenz-Kraftwerk

SONDER-
FORSCHUNGS-
BEREICH
RWTH THEMEN

schaufel wird unter alleiniger Verwendung poröser Materialien keine ausreichende Zeitstandfestigkeit zu erzielen sein. Daher wird für dieses Bauteil ein Konzept verfolgt, das eine faserverstärkte NiAl-Legierung als lasttragenden Kern der Schaufel vorsieht, der von einem NiAl-Mantel umschlossen wird, der das äußere Profil der Schaufel bildet. Der Mantel wird durch eine Wärmedämmschicht geschützt und mit Bohrlochfeldern versehen sein. Auf dem Wege zur Realisierung der flächigen Bauteilkühlung und der flächigen Wasserabsaugung sind in einem ersten Schritt die Fertigungstechnologien für die offenporösen Werkstoffe zu entwickeln. Unter anderem wurden hierzu bislang folgende Erfolge erzielt, siehe Bild 4a:

- Zur Herstellung von offenporösen Strukturen für Brennkammerauskleidungen wurde das SchlickerReaktions-SchaumSinter-Verfahren entwickelt. Bei diesem Verfahren bilden sich in dem Schaum größere Primärporen, die durch kleinere Sekundärporen miteinander verbunden sind.
- Zur Herstellung von Kühlbohrungen in Mehrschichtsystemen, bestehend aus einem Substrat, einer Bindschicht und einer keramischen Wärmedämmschicht, wird ein Laserbohrverfahren eingesetzt, bei dem das Austreiben der Schmelze über den Bohrungseintritt erfolgt.
- Für den lasttragenden Kern einer zukünftigen Gasturbinen-

schaufel wurde ein Konzept und ein Herstellverfahren zur Einbindung von Keramikfasern in eine NiAl-Matrix entwickelt.

● Auf dem Gebiet der Feingusstechnologie zur Herstellung von Gasturbinenkomponenten aus neuen Werkstoffen und Werkstoffverbunden wurden umfassende Ansätze zur Entwicklung neuer Formschalengeramiken und adäquater Kernmaterialien umgesetzt und auf die Herstellung von Probenmaterial angewendet.

Die detaillierte Bestimmung der mechanischen Eigenschaften ist eine notwendige Voraussetzung für die realitätsnahe Modellierung der offenporigen Strukturen. Somit können Modelle entwickelt werden, mit deren Hilfe unter anderem:

- die Interaktion von Außen- und Kühlluftströmung,
- die mechanischen Belastungen verschweißter Gitterbleche,
- die kombinierte Berechnung von Strömung und Festkörper sowie
- die äquivalenten Werkstoffeigenschaften gekühlter offenporiger Strukturen unter Verwendung der experimentell bestimmten Werkstoffeigenschaften detailliert untersucht werden können, siehe Bild 4b. Durch die gezielte Konturierung und die geometrische Anordnung von geeigneten Kühlbohrungen wird auf der Bauteiloberfläche ein homogener Kühlfilm erreicht, der die zu kühlende Struktur vor dem Kontakt mit Heißgas schützt. Die jeweils erforderliche Kühlluftmenge kann durch den Ver-

Bild 5: Beitrag der Technologien zur Entwicklung des Kraftwerk-Gesamtwirkungsgrades.

gleich mit der aus Prozessrechnungsdaten ermittelten notwendigen Kühleffektivität bestimmt werden.

Da sich die RANS-Modelle zwar durch eine hohe Rechengeschwindigkeit auszeichnen, das Ergebnis jedoch in erheblichem Maße von der Wahl des Turbulenzmodells abhängig ist, muss sichergestellt sein, dass das verwendete Modell die physikalischen Phänomene bei der Interaktion von Heißgas und Kühlluftstrahl vollständig erfasst. Dazu wurden zusätzlich hochgenaue, aber deutlich rechenintensivere LES-Untersuchungen durchgeführt und die Ergebnisse beider Methoden miteinander verglichen.

Für die Bewertung der erreichbaren Wirkungsgradverbesserung durch die entwickelten Kühl- und Entwässerungstechnologien wurde als Basis das Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk Tapa-do-Outeiro in Portugal gewählt, das den heutigen Stand der Technik widerspiegelt. Auf Basis dieses Referenzkraftwerks wurde ein Modell für die Prozessanalyse erstellt, das derart detailliert ist, dass die Beiträge der einzelnen Projekte des Sonderforschungsbereichs zur Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bewertet werden können. Durch diese Bewertung der Ergebnisse werden der derzeitige Stand und die notwendigen weiteren Fort-

schritte zum Erreichen des Ziels eines Gesamtwirkungsgrades von 65 Prozent bestimmt. Durch eine weitere Verbesserung der Technologien – insbesondere durch Einführung der Gradierung – können die weiteren Potenziale der neuen Konzepte noch erschlossen werden, so dass bei Reduktion der Kühlluftströme und Steigerung der zulässigen Materialtemperaturen ein Wirkungsgrad von 65 Prozent erreicht werden kann, siehe Bild 5.

Im Bereich der Strömungsmechanik, Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik zur Entwicklung thermisch hochbelasteter offenporiger Komponenten für ein Kombi-Kraftwerk der Zukunft wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs erhebliche Fortschritte erzielt. Durch die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse ergibt sich für Kombi-Kraftwerke der Zukunft somit ein Wirkungsgradpotenzial um etwa zwölf Prozent und ein CO₂-Minde-rungspotenzial von etwa 15 Prozent gegenüber dem heutigen Stand der Technik.

www.sfb561.rwth-aachen.de

Autor:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Bohn ist Sprecher des Sonderforschungsbereichs 561 „Thermisch hochbelastete, offenporige und gekühlte Mehrschichtsysteme für Kombikraftwerke“ und Leiter des Instituts für Dampf- und Gasturbinen.

Umweltverträgliche Tribosysteme im Blick

Werkstoffe übernehmen Schmier- und Verschleißschutzeigenschaften

SONDER-
FORSCHUNGS-
BEREICHE
RWTH AACHEN

Reibungsbehaftete Kontaktstellen von relativ zu einander bewegten Bauteilen werden Tribosysteme genannt und sind grundsätzliche Bestandteile technischer Geräte. Sie kommen in unterschiedlichsten Ausführungsformen im Maschinenbau zum Einsatz. Dieser ist in der Bundesrepublik Deutschland ein traditionsgemäß starker Wirtschaftsfaktor mit einem hohen Anteil am Export und damit von Innovationen abhängig, bei denen Rohstoffe eingespart und intelligenter eingesetzt werden können.

Die Anwendungen der Tribosysteme liegen sowohl im Bereich der Leistungsübertragung als auch bei den formgebenden Prozessen. Dort tragen sie nicht nur zur Funktionserfüllung bei, sondern beeinflussen signifikant sowohl die ökonomische als auch ökologische Bilanz der technischen Systeme. Diese wird insbesondere durch das hohe ökotoxikologische Gefährdungspotenzial der mineralölbasierten und mit Additiven legierten Zwischenstoffe geprägt. Denn durch Leckagen können die Zwischenstoffe in die Umwelt gelangen und dort zu Schäden führen. Aber auch durch unsachgemäßen Umgang mit den Schmierstoffen im weiteren Sinn werden Verschwendungen von Ressourcen in enormer Höhe verursacht.

Der für den Sonderforschungsbereich daraus abgeleitete Leitgedanke besteht in der Übertragung tribologischer Funktionen von den Fluiden auf die Werkstoffe der Tribopartner. Dies bedeutet, dass biologisch schnell abbaubare und nicht toxische Fluide entwickelt und eingesetzt werden, die nur gering und umweltverträglich additiviert sind. Die dann dem System fehlenden Schmier- und Verschleißschutzeigenschaften müssen von den Materialien der Tribopartner übernommen werden, wozu Verbundwerkstoffe erforscht und entwickelt werden.

Neue Beschichtungen und Schmierstoffe werden entwickelt

Zur Durchführung der Forschungsaufgaben sind Tribometer entwickelt worden, an denen hoch belastete Kontakte aus Maschinen nachgebildet werden und anhand vereinfachter Modelluntersuchungen analysiert und den Zielen folgend entwickelt werden können. Ein Beispiel ist der in Bild 1 gezeigte Kolben einer Hochdruck-Axialkolbenmaschine. Aufgrund der Querkraftbelastung am Kolben ist dieser hinsichtlich seiner Mikro- und Makrogeometrie neu gestaltet worden, die konturierte Oberfläche ist mit bloßem Auge nicht zu erkennen und verlangt höchste Präzision in der Fertigung. In Bild 2 sind die Ergebnisse interdisziplinärer Forschung am Beispiel der Kolben-Buchse dargestellt. Im Prüfstand sowie im späteren Einsatz im Getriebe wird ein biologisch schnell abbaubares Schmiermittel und Druckübertragungsmedium eingesetzt, das von Wissenschaftlern im Institut für Technische und Makromolekulare Chemie entwickelt wurde. Zum Nachweis der toxischen Unbedenklichkeit ist von den beteiligten Wissenschaftlern vom Institut für Hygiene und Umweltmedizin eine Methodik entwickelt worden.

Ein wesentliches Ergebnis ist in der Entwicklung gradierter Kohlenstoffschichten zu sehen. Hier sind von den Materialwissenschaftlern des Lehrstuhls für Oberflächentechnik im Maschinenbau neue Beschichtungen sowie deren Applikationsprozesse erforscht worden. Sie werden aus der Gasphase auf den Oberflächen abgeschieden, physikalisch vapor deposition, kurz PVD. Diese Schichten zeichnen sich durch eine mit zunehmender Tiefe angepasste Härte aus. Ein Beispiel hierfür sind gradierte Zirkonkarbidschichten, ZrCg. Der Index g steht für die Kohlenstoffgradierung, mit der das gewünschte Eigenschaftsprofil erzeugt wird. Man kann sich den Einlaufvorgang so vorstellen, dass weiche Partikel vom Gegenkörper auf den Grundkörper der im Kontakt stehen-

den Tribopartner übertragen werden. Nach kurzer Einlaufzeit kommt dieser Verschleiß durch zunehmende Schichthärte zum Erliegen und der gewünschte Effekt der Eigenschaftsübertragung von Additiv-Eigenschaften direkt in die Oberfläche des Tribopartner ist gelungen.

Im Betrieb einer Maschine ist von Bedeutung, dass die PVD-Schicht prozesssicher auf dem Bauteil haftet und sich beim Betrieb der Gleitpaarung nicht verbraucht. Ein Einlaufvorgang ist gewollt; er muss jedoch zeitlich begrenzt sein. Die Mikrogeometrie sorgt dafür, dass die Rauigkeitsspitzen in der Oberfläche mit dieser Anforderung in Einklang stehen. Die Makrogeometrie ist dafür verantwortlich, dass maximal zulässige Spannungen zwischen den berührenden Teilen nicht überschritten werden. Hier sind die Wissenschaftler der Ingenieursdisziplinen mit ihren Forschungsarbeiten gefragt.

Umweltverträglichkeit wird getestet

Im Rahmen der Forschungsarbeiten am Institut für Hygiene und Umweltmedizin ist eine Methodik angepasst worden, die es mit einem schnellen Test ermöglicht, eine Abschätzung der Wirkung der entwickelten Fluide auf menschliche Zellen zu erforschen. Hierzu wird unter anderem der „Comet assay“-Test mit in Kultur gehaltenen Leberzellen durchgeführt, Bild 3. Bei diesem Test werden mit Hilfe einer elektrophoretischen Technik mögliche Schädigungen an der DNA und Reparaturen in einzelnen Zellen detektiert. Die exponierten Zellen werden in eine Gelmatrix eingebunden, die Zellmembran wird zerstört und es erfolgt eine Elektrophorese. Während der Elektrophorese wandert die negativ geladene DNA zum Pluspol. Die geschädigte, bruchstückhafte DNA ist in der Lage, aus dem Zellkern herauszuwandern. Die Bruchstücke trennen sich der Größe nach auf, da kleinere Bruchstücke in bestimmter Zeit eine weitere Strecke zurücklegen als die größeren. Unter dem UV-Mikroskop erschei-

nen die beschädigten Zellen, welche vorher mit einem Fluoreszenzfarbstoff wie Ethidiumbromid behandelt wurden, nun mit einem Schweiß aus DNA-Bruchstücken, welcher ihnen das Aussehen eines Kometen gibt.

Die Leberzellen wurden 24 Stunden gegenüber den wässrigen Eluaten der Schmierstoffe „60.HISM“ und „60.HISM + Additive + Metalle“ exponiert. Es wurde der alkalische Komet-Test bei einem pH-Wert von 13 durchgeführt. Unter diesen pH-Bedingungen können Strangbrüche, Exzisions-Reparaturstellen, alkalilabile Stellen und crosslinks detektiert werden. Zur Überprüfung des Testablaufes wurden bei jedem Test eine Negativ- und eine Positivkontrolle mitgeführt, die die minimale beziehungsweise maximale Wirkung auf die Zelle wiedergeben. Die Testauswertung ermittelt den Olive tail moment, kurz OTM, das heißt das Produkt von Schweiflänge und Schweifintensität des Kometen. Wie in Bild 3 deutlich wird, zeigt das wässrige Eluat von „60.HISM“ keine DNA-schädigende Wirkung bei den Leberzellen, da die Werte nicht signifikant höher sind als die Werte der Negativkontrolle.

Die gleiche Wirkung konnte auch bei „60.HISM + Additive + Metalle“ beobachtet werden. Hier liegen die Werte deutlich unterhalb der Negativkontrolle, damit zeigt das Eluat keine schädigende Wirkung auf die DNA der Leberzellen. Mit diesem Biotest sowie mit weiteren Toxizitätstests konnte die Umweltverträglichkeit der entwickelten Schmierfluide aufgezeigt werden.

Die Beispiele sollen einen kleinen Einblick in Ergebnisse aus den Forschungsarbeiten des Sonderforschungsbereichs ermöglichen. Die noch verbleibende Zeit bis zum Ablauf des Sonderforschungsbereichs im Jahr 2009 wird genutzt, um die Ergebnisse an ganzen Prozessketten aufzuzeigen. Mit diesen Prozessketten sind sowohl Prozesse zur Herstellung von Fluiden, Metallverbunden und solche, die auf Werkzeugmaschi-