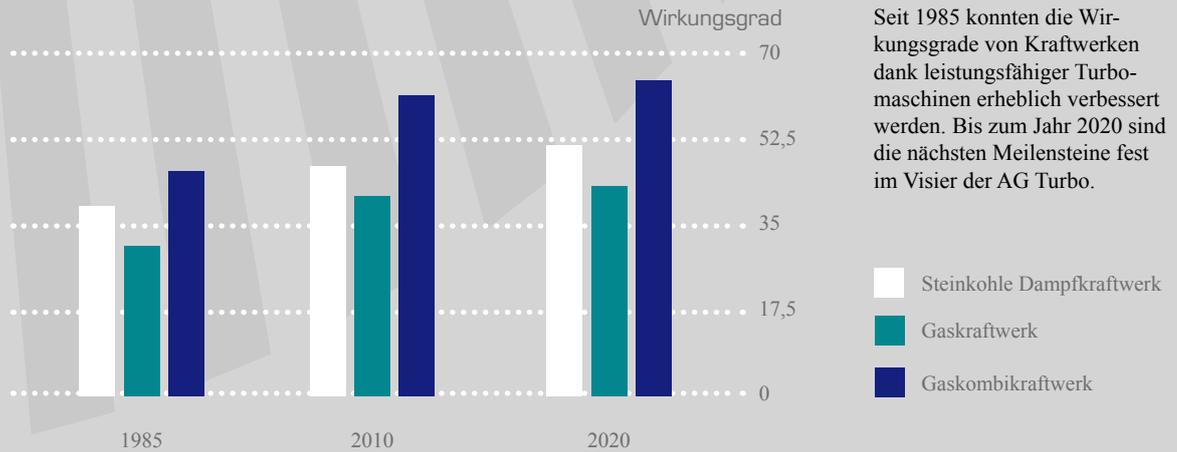




# Turbomaschinen

Schlüsselkomponenten für mehr Effizienz  
in der Energieversorgung





## Turbomaschinen – vielseitig und leistungsstark

Die eingesetzte Turbomaschine entscheidet bei vielen technischen Anlagen über Effizienz und Umweltfreundlichkeit

Alltagssprachlich legen Menschen, die ein Ziel besonders nachdrücklich und engagiert verfolgen, den „Turbo“ ein. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass sie ihre Energien sehr fokussiert und zielgerichtet einsetzen. Der Begriff „Turbo“ ist der Technik entlehnt und steht dort für Turbomaschinen. Zu diesen gehören Gas- und Dampfturbinen in Kraftwerken, Flugtriebwerke, Verdichter und Kompressoren. Diese Maschinen sind in Flugzeugen, Kraftwerken sowie beim Transport von Gasen in Pipelines zu finden. Vereinfacht dargestellt gibt es im Gehäuse einer Gasturbine drei Sektoren: Verdichter (Kompression der angesaugten Luft), Brennkammer (Zuführung von Brennstoff) und die Turbine (Expansion des Heißgases). Das unter Überdruck stehende Verbrennungsgas durchströmt die Turbinenschaufelräder, expandiert dabei und überträgt Leistung vom Heißgas an die rotierende Turbomaschine. Ein Teil der Leistung wird zum Antrieb des Verdichters benötigt. Den überschüssigen Teil dieser Leistung nutzt man beispielsweise in Kraftwerken, um Stromgeneratoren anzutreiben.

Turbomaschinen sind Hightech-Komponenten des Maschinenbaus. Ingenieure entwickeln Verfahren, um mit optimalen Kühlstrategien Materialien bei Temperaturen einsetzen zu können, die jenseits deren Schmelzpunkts

liegen. In Kraftwerksturbinen soll der Spalt zwischen den mit mehreren Tausend Umdrehungen pro Minute rotierenden Schaufelblättern und dem umgebenden Gehäuse unter einem Millimeter liegen, um Effizienzverluste zu vermeiden. Flugzeugtriebwerke müssen immer größere Verkehrsflugzeuge zuverlässig antreiben und sollen dabei möglichst Kraftstoff sparend, schadstoffarm und leise sein. Um dies zu erreichen, testen Forscher und Entwickler in Industrieunternehmen und Hochschulinstituten neue Materialien, entwickeln Simulationsprogramme und prüfen neue Komponenten auf Testständen.

### Wirtschaftliche Perspektiven

Weltweit wird der Strombedarf in den nächsten Jahren weiter wachsen, besonders in den Entwicklungs- und Schwellenländern. Derzeit werden 80 % des globalen Strombedarfs von Dampf- oder Gasturbinen erzeugt und sie werden auch in den nächsten Jahrzehnten das Rückgrat der Weltstromversorgung bilden. Diese Turbinen stecken nicht nur in Großkraftwerken mit fossilen Brennstoffen wie Erdgas oder Kohle, sondern auch in kleineren Aggregaten für die Kraft-Wärme-Kopplung und in Biomasse-



Bei der Endmontage einer Gasturbine müssen die Laufschaufeln des Rotors auf hundertstel Millimeter genau zwischen die im Gehäuse fest montierten Leitschaufelreihen passen. Rechts sind der Verdichter und links die zum Teil beschichteten Schaufelreihen der Gasturbine zu erkennen. (Quelle: Alstom Power GmbH)

oder Geothermie-Heizkraftwerken. Für die globale Stromversorgung wird es neben einem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien, einer höheren Effizienz aufseiten aller Verbraucher, besonders auch auf den Einsatz möglichst effizienter und CO<sub>2</sub>-armer Kraftwerke ankommen. Technologisch gehören in Deutschland hergestellte Turbomaschinen zur Spitzenklasse und sind auf dem Weltmarkt sehr gefragt. Die Exportquote der Firmen bei Kraftwerksturbinen betrug 2012 80 % und der weltweite Umsatz der Branche lag bei rund 19 Mrd. Euro. In den Firmen sind ca. 64.000 Beschäftigte tätig.

## Schlüsselkomponente für die Energiewende

Deutschland ist auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung. Bis 2050 sollen 80 % der Stromversorgung aus Anlagen mit erneuerbaren Energien stammen. Um dabei die Netzstabilität, die Versorgungssicherheit und die Wirtschaftlichkeit der Stromversorgung garantieren zu können, müssen künftig konventionelle und erneuerbare Stromerzeugungsanlagen besser aufeinander abgestimmt werden. Kraftwerke müssen künftig flexibel auf schnell wechselnde Nachfrage reagieren und mit verschiedenen Brennstoffen betrieben werden können. Dabei sollen der Wirkungsgrad, die Schadstoffemissionen, die Zuverlässigkeit sowie die Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer möglichst hoch bleiben. Bisher sind die Turbinen auf lange Betriebsphasen mit konstanter Stromnachfrage ausgelegt. Um sie künftig unter den Bedingungen eines flexiblen Strommarkts mit hoher Effizienz betreiben zu können, sind intensive Forschungsanstrengungen nötig.

## Technik kooperativ weiterentwickeln

Anlagenhersteller, Zulieferer, Universitätsinstitute und weitere Forschungseinrichtungen aus dem gesamten Spektrum der Turbomaschinen arbeiten seit mehr als 25 Jahren bei der vorwettbewerblichen Forschung in der Arbeitsgemeinschaft Turbo (AG Turbo) zusammen. Ziel ist, gemeinsame technische Probleme kooperativ und zum Vorteil aller zu bearbeiten und zu lösen. Für die nächsten Jahre gibt es weitere ehrgeizige Pläne.

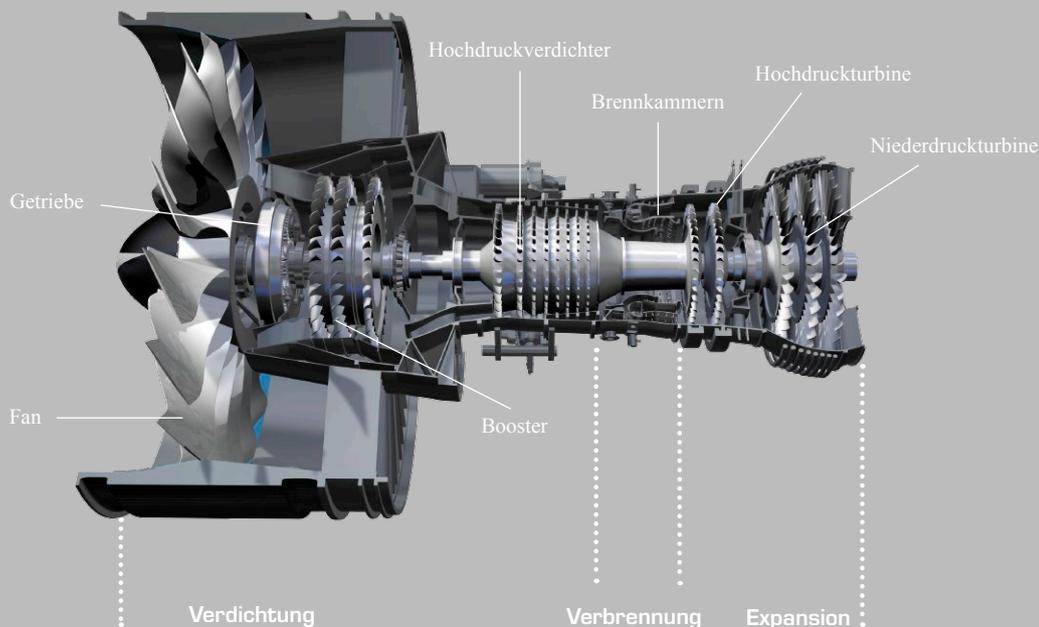
Diese Broschüre stellt die AG Turbo und die Arbeit der vier Themenschwerpunkte – Verdichten, Verbrennen, Expansion und Kühlen – vor und gibt jeweils einen Einblick in ein aktuelles Forschungsvorhaben. Im Interview diskutieren Dr. Georg Menzen, Leiter des Referates Energieforschung Projektförderung im Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, und Dr. Dirk Goldschmidt, Vorsitzender der Programmleitung der AG Turbo, den Stellenwert der Turbomaschinen in der Energieforschung.

[www.ag-turbo.de](http://www.ag-turbo.de)

Im Webportal der Arbeitsgemeinschaft Turbo finden Sie weitere Informationen zu den Zielen, zur Historie sowie Dokumente zur aktuellen Programmatik zum Download.

Mit dem nebenstehenden QR-Code erreichen Sie eine Deutschlandkarte mit allen Firmen und Institutionen, die Mitglied der AG Turbo sind.





## Mit Hochdruck zur Effizienz

### Verdichter: hier wird Druck gemacht

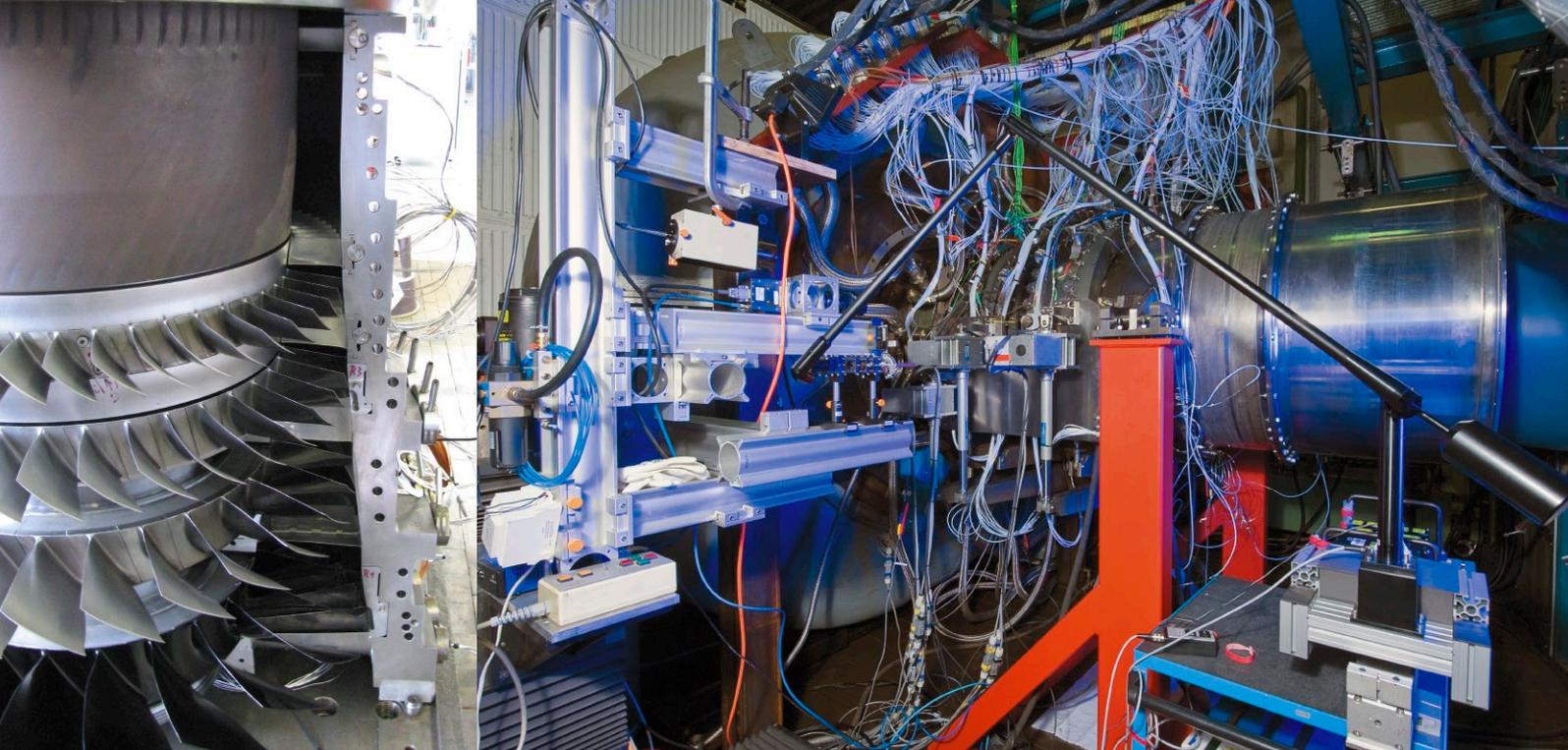
In einem Verdichter wird der Luftmassenstrom, meist über mehrere Stufen, komprimiert. Dadurch steigen Druck und Temperatur, während gleichzeitig das Volumen (Strömungsquerschnitt) sinkt. Sowohl bei stationären Gasturbinen in Kraftwerken wie bei mobilen in Flugzeugen wird diese Luft dann anschließend mit Brennstoff gemischt und gezündet. Ein Teil der komprimierten Luft wird auch zur Kühlung der thermisch höchstbelasteten Komponenten einer Gasturbine – Brennkammer und erste Stufen der Turbine – verwendet.

### Die Strömungsverhältnisse im Verdichter erforschen

Das Arbeitsmedium in einem Verdichter ist die Luft. „Stationäre Gasturbinen zur Stromerzeugung werden vornehmlich auf einen Betriebspunkt hin ausgelegt, um in diesem Auslegungspunkt einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Bedingt durch die stark zunehmende Einspeisung von Wind- und Solarkraft werden Kraftwerke mit Gasturbinen zunehmend komplementär, zum Ausgleich von Lastschwankungen, betrieben. Es ergibt sich in Zukunft damit zusätzlich die Forderung nach hoher Betriebsflexibilität mit sehr schnellen und ggf. häufigen Lastwechseln. Es ist daher notwendig, möglichst robuste

Verdichter zu entwickeln, die über einen möglichst breiten Arbeitsbereich einen hohen Wirkungsgrad erzielen“, erläutert Heinz Knittel, Koordinator für das Thema Verdichtung in der AG Turbo. Verdichter müssen daher in Richtung Verbesserung des Teillastverhaltens weiterentwickelt werden, d. h., auf stabilen Betrieb mit hohem Wirkungsgrad bei variablem Luftmengenumsatz sowie Betriebsflexibilität mit schnellen Lastwechseln. Die Forschungsarbeiten in den nächsten Jahren konzentrieren sich darauf, die technischen Voraussetzungen hierfür zu schaffen. Um den Wirkungsgrad auch unter Teillast hochhalten und neue Verdichter möglichst zielgerichtet entwickeln zu können, muss der Einfluss einzelner Parameter, wie z. B. Oberflächengeometrien und strukturelles Verhalten, im Detail verstanden werden. Hierfür werden sowohl numerische Untersuchungen und Simulationen als auch experimentelle Untersuchungen benötigt. Dies schließt für spezifische Fragestellungen auch die Neu- bzw. Weiterentwicklung von Messverfahren ein. Auf Basis dieser Validierungen können dann in Folge große Teile der Entwicklungsarbeiten per Rechner durchgeführt werden, bevor aufwendige und kostenintensive Prototypen hergestellt werden müssen.

Zukünftig sollen insbesondere Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung über einen weiteren Betriebsbereich mit möglichst geringem Wirkungsgradabfall bei Teillast-



Zusammenführen von Gehäusehälften und Rotorsystem  
(Quelle: DLR)

Rig250 in Verdichterprüfstand (M2VP) mit optischer Instrumentierung (PIV)  
(Quelle: DLR)

betrieb vorangetrieben werden. Im Fokus steht hierbei die Optimierung des Sekundärströmungsverhaltens im wandnahen Bereich durch geeignete Maßnahmen wie 3-D Seitenwandgestaltung und aktive Strömungsbeeinflussung im Randbereich. Für transienten Betrieb (schnelle Lastwechsel) ergeben sich hohe Anforderungen zur Sicherstellung des Stabilitätsverhaltens (z. B. bei schnellen Anfahrvorgängen). Schwerpunkte sind die Untersuchung des Verhaltens mehrstufiger Systeme, integriertes Design der Verdichterendstufen mit der nachfolgenden Tragstruktur und die Berücksichtigung variabler Zu- und Anströmbedingungen. Entsprechend ihrer wachsenden Bedeutung sollen komplexe Simulationsverfahren weiterentwickelt werden. Wichtige Aufgaben sind die Simulation des Systemverhaltens über mehrere Stufen bzw. des Gesamtverdichters und die Kopplung von Struktur- mit Strömungsmechanik.

## Forschungsprojekt „Versuchsstand Rig 250“ des DLR

Innerhalb der AG Turbo steht mit dem „RIG250“ eines der zentralen Testvehikel auf dem Gelände des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln. Das Erforschen und Optimieren von Druck, Strömungen und Wirbeln in Verdichtern ist das tägliche Geschäft des Teams um Dr. Eberhard Nicke vom DLR-Institut für Antriebstechnik. Das „RIG250“ ist ein axialer Verdichter mit vier Stufen. Die Anlage ist mit rund 750 Messsensoren (Druck-, Temperatur- und Heißfilmsonden sowie Fenstern für laser-optische Messverfahren) bestückt und repräsentativ für die vorderen Stufen eines realen Verdichters in einer Gasturbine.

Dr. Nicke erläutert die Ziele: „Durch unsere Untersuchungen sollen die zukünftig in Kraftwerken und Flugzeugen eingesetzten Verdichter maximal effizient und sicher ausgelegt werden. Ein immer wichtiger werdender Aspekt dabei ist die geforderte Teillastfähigkeit.“ Auf dem Teststand werden die Ergebnisse früherer numerischer Simulationen mit den Messergebnissen der Versuchsanlage abgeglichen. Hieraus lässt sich der Einfluss einzelner Parameter ableiten, was das gezielte Entwickeln neuer Verdichter erleichtert. Einer der Forschungsschwerpunkte liegt auf neuen Bauweisen und der Konturierung der Gehäuseinnenwand. Hier, wo die Schaufeln mit geringstem Abstand und teilweise mit Schallgeschwindigkeit rotieren, können starke Wirbel, wechselnde Strömungsrichtungen und lokale Ablösegebiete entstehen, die die Leistungsfähigkeit der Turbine schmälern.

Heinz Knittel arbeitet bei MTU Aero Engines AG und ist in der AG Turbo Sprecher für den Bereich Verdichtung. „Bei stationären Gasturbinen werden bis 2020 Verdichtungsverhältnisse weit über 40, bei Fluggasturbinen bis über 50 angestrebt. Simulationstools sollen weiterentwickelt werden, um das Strömungsverhalten möglichst exakt abzubilden und neue Möglichkeiten der Strömungsbeeinflussung zu entwickeln.“



## COORETEC Beirat

F&E für effiziente, flexible und emissionsarme Kraftwerksprozesse

### Arbeitsgruppe 1

Effiziente Gas-, Kombi- und Dampfkraftwerke

### Arbeitsgruppe 2

Vergasung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern

### Arbeitsgruppe 3

CO<sub>2</sub> Abtrennung und Transport

### Arbeitsgruppe 4

CO<sub>2</sub> Speicherung  
COORETEC und dem GEOTECHNOLOGIE-Programm



Entwicklung und Optimierung von Turbomaschinen

### AG Turbo

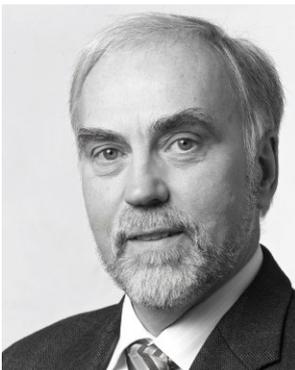
Die Forschung der Arbeitsgemeinschaft Turbomaschinen (AG Turbo) ist eine Querschnittsaufgabe, die eng mit allen vier Arbeitsgruppen der Kraftwerksforschung (COORETEC) in Deutschland zusammenarbeitet. Auch in Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung und Kraftwerken auf Basis erneuerbarer Energien arbeiten Turbinen.

## Heiße Fakten

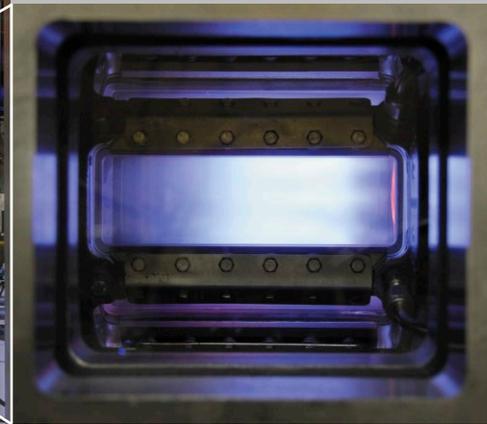
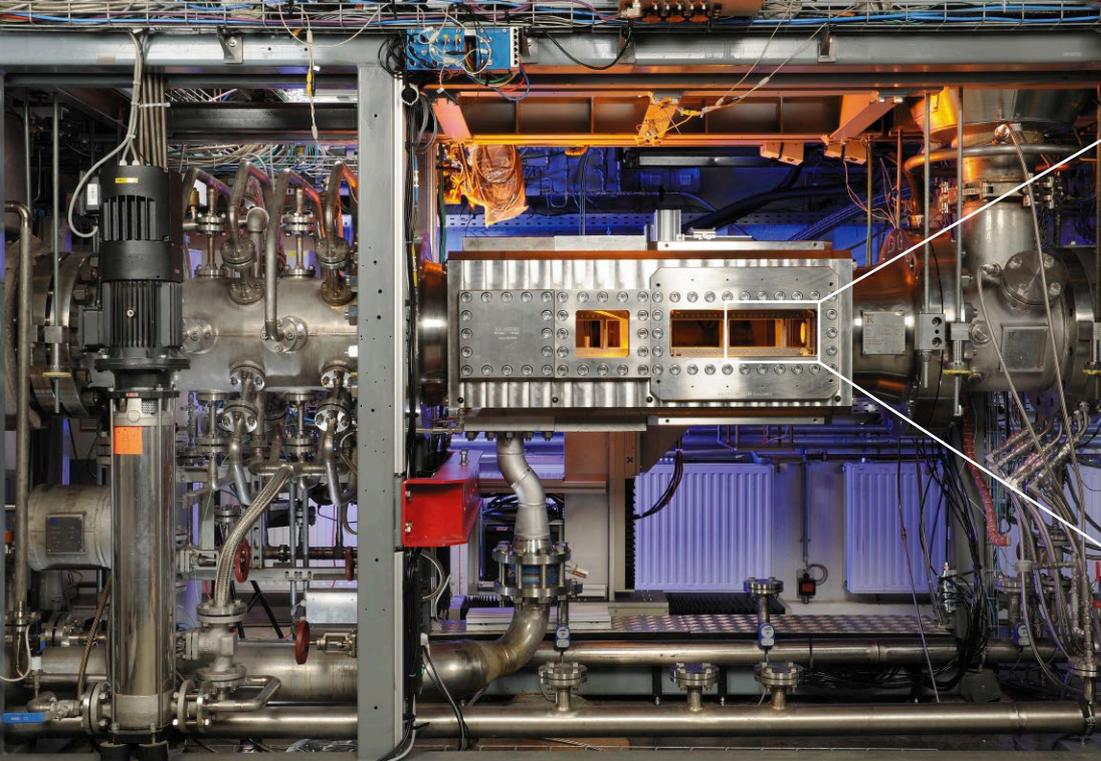
**Nur eine kontrollierte Verbrennung funktioniert effektiv, ist schadstoffarm und schont die Anlage**

In heutigen Gasturbinen befindet sich die Brennkammer mittig innerhalb des Gehäuses und umschließt die Welle zwischen dem Verdichter vorne und den Schaufelrädern der eigentlichen Turbine am Ende (Expansionsbereich). An die Qualität eines Verbrennungsprozesses gibt es hohe Anforderungen: Eine Verbrennung soll gleichmäßig erfolgen und möglichst wenig pulsieren, d. h., im rhythmischen Wechsel heißer und kälter werden. Benötigt wird dazu eine konstante Leistungsdichte des Brennstoffs, das ist der Heizwert pro Volumeneinheit. Auch die homogene Vermischung von Brennstoff und Luft sowie die Druckverhältnisse in der Brennkammer haben einen Einfluss. Die Gleichmäßigkeit der Verbrennung trägt dazu bei, den

eingesetzten Brennstoff energetisch optimal zu nutzen, die entstehenden Schadstoffemissionen zu minimieren und die Anlage schonend zu betreiben. So werden Schwingungen und Geräuschemissionen vermieden. Für eine Brennkammer gibt es einen optimalen Bereich für Brennstoff- und Sauerstoffgehalt. Ist der Sauerstoffanteil zu niedrig, so bildet sich aufgrund der unvollständigen Verbrennung zu viel Kohlenmonoxid. In modernen Gasturbinen wird daher der Brennstoff mit der Verbrennungsluft vorgemischt und eine magere Reaktion (Luftüberschuss) angestrebt. Mit zunehmenden Verbrennungstemperaturen nähert man sich jedoch dem stöchiometrischen Zustand, d. h., es liegt genau so viel Luftsauerstoff vor wie zur vollständigen Reaktion benötigt wird. Dadurch entstehen sehr hohe Verbrennungstemperaturen und es kommt zu vermehrten Stickoxidemissionen. Die Anforderungen an die Flexibilität sind in zweifacher Hinsicht gestiegen. Einerseits betrifft das die geforderte Teillastfähigkeit bei möglichst hohem Wirkungsgrad und niedrigen Emissionen. Andererseits stehen künftige Anlagenbetreiber unter wirtschaftlichen Zwängen. Die Energiepolitik und der Markt sind derzeit im Wandel. Es ist kaum zu prognostizieren, welche Primärenergieträger künftig zu welchem Preis angeboten werden und welche Anforderungen Strommarkt und Klimaschutz stellen. Eine Brennkammer sollte daher in der Lage sein, sowohl mit wechselnden Qualitäten eines Brennstoffs als



Dr. Dirk Goldschmidt arbeitet bei Siemens Energy Power Division und ist in der AG Turbo Sprecher des Bereichs Verbrennung sowie Vorsitzender der Programmleitung. „Ich erwarte bis zum Ende des Jahrzehnts, dass bei erheblich gesteigerten Temperaturen und erweitertem Brennstoffspektrum die Verbrennung weiterhin schadstoffarm und stabil bleibt.“



Hochdruckbrennkammer-Prüfstand Stuttgart (HBK-S): Test von Brennkammersystemen unter realen Gasturbinenbedingungen (links) und FLOX-Brenner in Betrieb (rechts). (Quelle: DLR)

auch in allen Leistungsklassen wahlweise mit gasförmigen und flüssigen Energieträgern im Wechsel betrieben zu werden.

## Berechnungen und Messwerte in Einklang bringen

In einer Brennkammer wirken auch die Geometrie sowie die eingesetzten Materialien und deren Wärmeübergang ein. „Die Forschungen zum Bereich Verbrennung verfolgen als ein wichtiges Ziel, noch unzureichend verstandene Effekte in Brennkammern zu erforschen, unsere Modelle und Simulationsrechnungen anzupassen und diese mit Messwerten von Prototypen auf Messständen abzugleichen“, erklärt Dr. Dirk Goldschmidt, Koordinator des Bereichs Verbrennung innerhalb der AG Turbo. Damit werden Grundlagen geschaffen, um neue und optimierte Brennkammern möglichst zielgerichtet zu entwickeln. Ein wichtiges Forschungsthema ist die Thermoakustik. Hierbei werden über Verbrennungsschwingungen akustische Wellen erzeugt. Diese dienen zum einen gezielt als Diagnoseinstrument, um aus akustischen Messwerten Rückschlüsse auf den Ablauf des Verbrennungsprozesses zu ziehen. Andererseits müssen Schwingungen und akustische Effekte in Brennkammern möglichst vermieden werden, weil sie das Material vorzeitig verschleifen können und außen als Lärm wahrgenommen werden. Daher werden Kühlkonzepte für die Wände von Brennkammern und dämpfende Wandelemente erprobt.

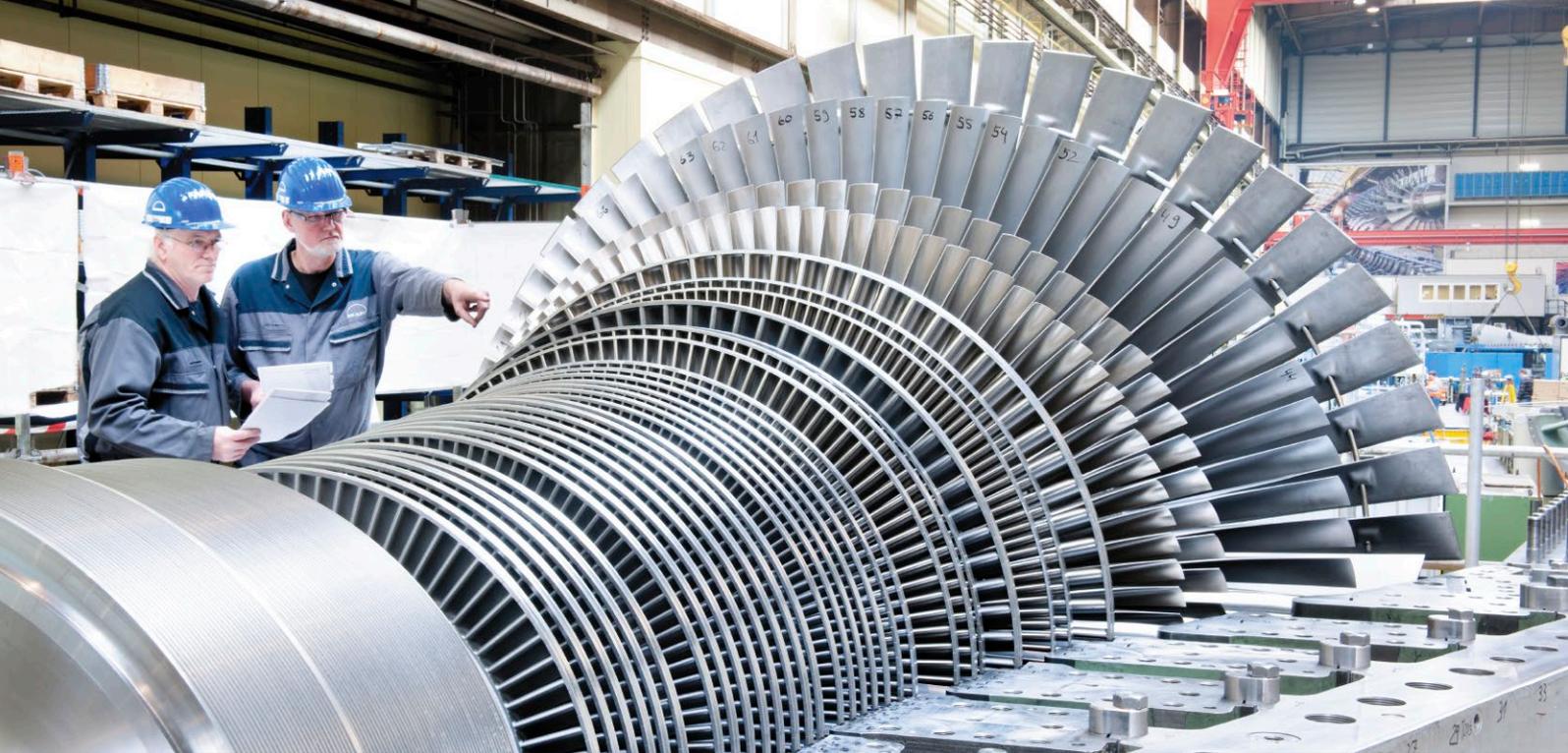
Flüssige Brennstoffe werden mittels Zerstäuber in den Brennraum injiziert. Tendenziell verfügen sie über eine höhere Leistungsdichte als gasförmige. Um der drohenden Entstehung von Stickoxiden in der Verbrennung zu begegnen, werden sie mit Wasser oder Dampf vermischt

eingesetzt. Daher benötigt man für die verschiedenen flüssigen Brennstoffe eine genaue Kenntnis ihrer chemischen Eigenschaften und tatsächlichen Reaktionsmechanismen.

## Mit flammloser Verbrennung Schadstoffe vermeiden

Ein vielversprechender Ansatz, emissions- und schwingungsarme Brenner zu entwickeln, ist die flammlose Verbrennung, kurz FLOX<sup>®</sup> genannt. Derartige Brenner sind ein Schwerpunkt des Forschungsteams um Dr. Oliver Lammel, vom Institut für Verbrennungstechnik des DLR in Stuttgart. Dr. Lammel benennt die Stärken des Systems: „Diese Brenner haben ein einfaches und kostengünstiges Design. Sie ermöglichen eine konstante Verbrennung bei relativ niedrigen Temperaturen.“

Bei einer flammlosen Verbrennung kommt ein zylindrischer Brennraum zum Einsatz. Ringsum befinden sich zwölf Brenner, die ein Brennstoff-Luftgemisch weit in den Brennraum eindüsen. So haben Brennstoff und Luft ausreichend Zeit, sich homogen zu vermischen, und füllen vor Beginn der eigentlichen Verbrennung einen großen Raum aus. Das Ergebnis ist eine Verbrennungstemperatur von ca. 1.500 °C und eine sehr homogene Temperaturverteilung. Da die Flamme bei diesem Verfahren optisch kaum sichtbar ist, entstand die Bezeichnung flammlose Verbrennung. Derzeit arbeiten die Wissenschaftler am optimalen Design des Systems. Mit Simulationsrechnungen, die drei Dimensionen abbilden, erkunden sie Strömungen und Verbrennungsreaktionen. Ein FLOX-Brenner benötigt weniger aufwendige Kühlkonzepte und vermeidet weitgehend Schwingungen. Bisher stehen stationäre Gasturbinen als Einsatzgebiet noch im Vordergrund.



## Wo sich Energie entfaltet

### Expansion: Hier wird Druck abgebaut und Arbeit ausgekoppelt

Bei einer Gasturbine strömt das heiße Rauchgas aus der Brennkammer und bei einer Dampfturbine der heiße Wasserdampf in den Expansionsbereich, die eigentliche Turbine. In beiden Fällen stehen die Medien unter hohem Druck. In einer Turbine wird das komprimierte Gas bzw. der Dampf über mehrere, hintereinander angeordnete Stufen von Schaufelrädern unter Abführung von Arbeit wieder entspannt. Dabei kann das jeweilige Medium expandieren und ein größeres Volumen einnehmen. Die an dieser Stelle ausgekoppelte Energie dient zum Antrieb von Generatoren und – nur bei Gasturbinen – auch des Verdichters, um den notwendigen Druck für den Gasturbinenprozess aufzubauen.

Beim Durchströmen der Turbinen wird das einströmende Medium möglichst optimal auf die drehenden Schaufelräder (Rotoren) gelenkt. Dazu werden die Strömungen durch Einbauten im Gehäuse und auf der Welle (Diffusoren, Statoren) in Richtung und Geschwindigkeit beeinflusst. Die einzelnen Stufen einer Turbine sind auf unterschiedliche Druckverhältnisse ausgelegt. Im Niederdruckteil kommen vergleichsweise lange Schaufeln zum Einsatz. Aus Gründen der Materialersparnis wurden diese Schaufelblätter in den letzten Jahren immer filigraner ausgeführt, was das Entstehen unerwünschter Schwingungen begünstigt. Die Blattspitzen erreichen im Betrieb Geschwindigkeiten oberhalb der Schallgeschwindigkeit, und auf die Schaufelfüße, mit denen die Schaufelblätter

mit der Welle verbunden sind, wirken Fliehkräfte von mehreren Hundert Tonnen ein. Jedes einzelne Blatt sowie das Verbindungsstück zur Welle müssen dieser Beanspruchung standhalten. Künftig müssen die Turbinen häufiger und schneller zwischen Voll- und Teillastbetrieb wechseln, ohne dass hierbei das Material vorzeitig verschleifen darf.

### Turbinen auf Teillast auslegen

Da bei künftig häufigeren Änderungen des verfügbaren Stroms im Verbundnetz die Turbinen schneller zwischen Voll- und Teillastbetrieb wechseln müssen, ändert sich auch die Strömung in der Turbine. Vom Vollastbetrieb unterscheidet sich die Teillast u. a. durch einen zunehmenden Einfluss von Temperaturdifferenzen zwischen verschiedenen Turbinenbauteilen. Bei weniger als einem Millimeter Abstand zwischen den drehenden Rotoren und dem Gehäuse wird es riskant, wenn bei sinkenden Temperaturen sich die Hülle bereits zusammengezogen hat, während die Blätter noch unverändert groß sind. Turbinen haben in Bezug auf thermische Spannungen und Schwingungen kritische Bereiche. Wurden diese bisher zum Erreichen der Vollast zügig durchfahren, so müssen die Maschinen künftig bei zunehmender Teillast phasenweise in diesen Bereichen arbeiten. Sowohl bei Gas- als auch bei Dampfturbinen besteht der Trend, die Anzahl der Stufen zu



Schwingungsuntersuchungen an der Leibniz Universität Hannover (Quelle: AG Turbo)

reduzieren und damit eine kompaktere Bauweise zu erreichen. Dies verspricht technische und wirtschaftliche Vorteile. „Bei der Forschung zur Expansion zielen wir auf die Weiterentwicklung neuester Technologien, den schonenderen Einsatz der Ressourcen sowie eine verlängerte Lebensdauer und Serviceintervalle für alle Bauteile“, beschreibt Dr. Alexander Wiedermann, Koordinator des Bereichs Expansion, die Aufgaben der nächsten Jahre.

Für die künftige Auslegung von Komponenten wird die probabilistische Herangehensweise wichtiger. Auf der Grundlage von gesicherten Daten aus Simulationen und Experimenten werden z. B. Rotorblätter gezielt auf eine definierte, verlässliche Belastbarkeit durch Last- und Temperaturwechsel oder Betriebsstunden hin ausgelegt. Bei den Gasturbinen untersucht ein Projekt den Umgang mit möglichen Fertigungstoleranzen der Blätter und deren Auswirkungen auf die Aerodynamik und Lebensdauer. Die Untersuchungen finden bei praxisnahen Geschwindigkeiten und periodisch instationären Zuständen statt. Dabei soll die Frage geklärt werden, welchen Einfluss die verschiedenen Variationen der Schaufelgeometrie auf die Druckverluste haben. Dampfturbinen reagieren bei hohem Dampfdruck und tiefer Teillast mit sehr wechselhaftem, nicht konstantem Schwingungsverhalten (instationär). Diese problematischen Schwingungen sind bisher nicht zu vermeiden und noch unzureichend verstanden. Mit einem verbesserten Blattdesign und dem Einsatz von Dämpferelementen wollen die Forscher die Schwingungen besser in den Griff bekommen.

## Schwingungen vermeiden

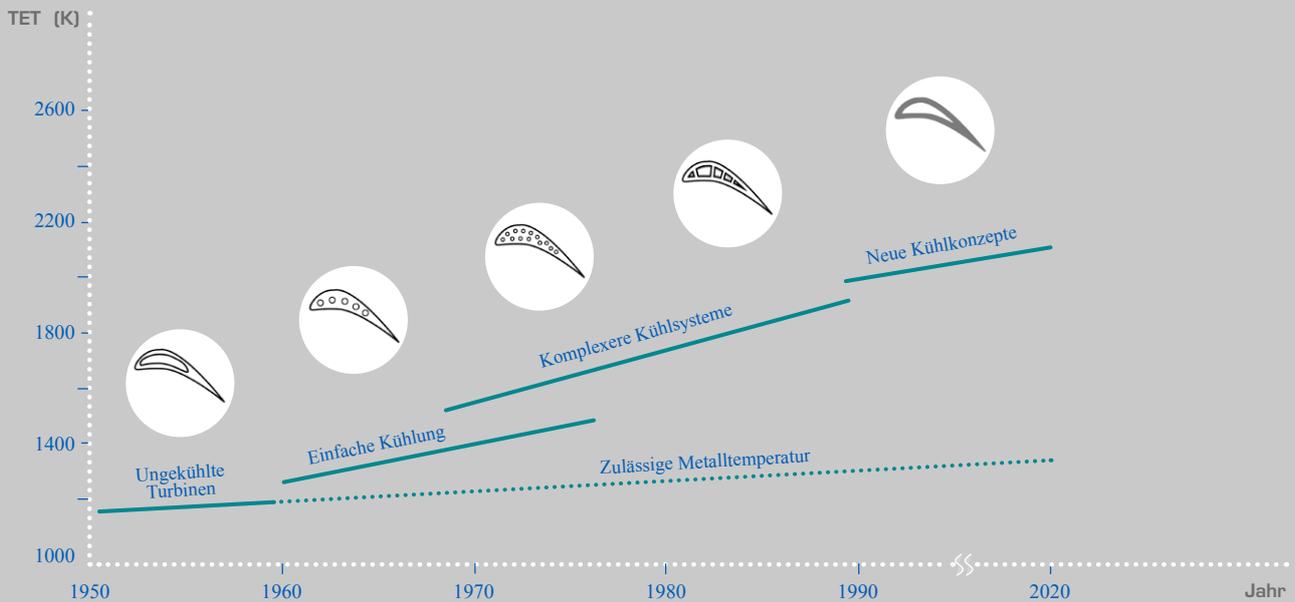
Ingenieure an der Leibniz Universität Hannover entwickeln Berechnungsmodelle, um mithilfe einer

geeigneten Gestaltung der Strömung und geeigneter Dämpfungsmaßnahmen zu einem stabilen Betrieb mit minimalen Schwingungen beizutragen. Dabei werden aerodynamische und mechanische Ansätze verfolgt. Zwei Teams um die Professoren Jörg Wallaschek, vom Institut für Dynamik und Schwingungen, und Jörg Seume, vom Institut für Turbomaschinen und Fluidodynamik, erarbeiten Rechenmodelle und überprüfen die Ergebnisse auf ihren Prüfständen.

Prof. Jörg Seume erläutert: „Es ist unser Ziel, die Schaufelschwingungen bei Volllast, Teillast sowie beim An- und Abfahren schon bei der Auslegung vollständig zu berücksichtigen.“ Dabei wird auch untersucht, wie sich die Eigenfrequenzen der verschiedenen Schaufeln gegenseitig beeinflussen und wie sich bei Lastwechseln in einem Kraftwerk diese Effekte durch eine angepasste Steuerung der Turbine beherrschen lassen. Dank der Rechenkapazität moderner Computer können die heutigen Simulationsrechnungen nahezu alle relevanten Parameter berücksichtigen.

Dr. Alexander Wiedermann arbeitet bei MAN Diesel & Turbo SE und ist in der AG Turbo Sprecher des Bereichs Expansion. „Ich erwarte bis zum Ende des Jahrzehnts einen sicheren, robusten und hocheffizienten Betrieb von Gas- und Dampfturbinen auch bei Teillast und beschleunigten Lastwechseln.“





Die wachsenden Anforderungen an die Kühlstrategien bei zunehmender Turbineneintrittstemperatur [TET] (Quelle: GLR TU Darmstadt)

# In heißen Turbinen kühlen

Hohe Temperaturen verbessern den Wirkungsgrad, erfordern aber die Kühlung von Bauteilen

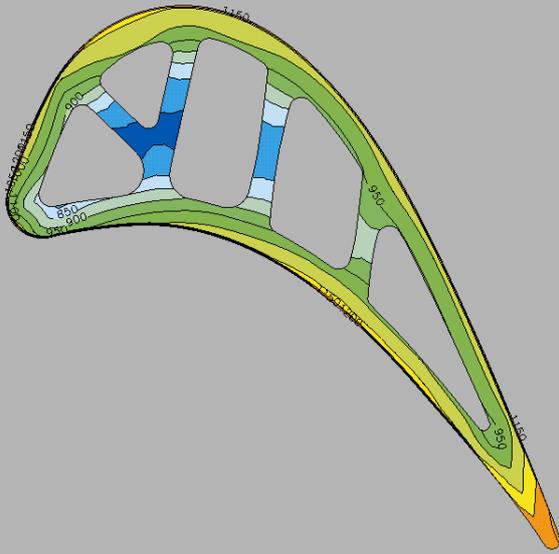
Die Steigerung der Leistungsfähigkeit einer Gasturbine erfordert eine Anhebung des Temperatur- und Druckniveaus. Lag bei stationären Anlagen die Eintrittstemperatur des heißen Gases vor 20 Jahren bei 1.250 °C, so beträgt sie derzeit rund 1.500 °C und soll bis zum Ende des Jahrzehnts 1.600 °C erreichen. In diesen Turbinen stellt die erste Schaufelreihe, direkt am Ausgang der Brennkammer eine besonders kritische Zone dar. Hier liegt die Gastemperatur in einem Bereich, der deutlich jenseits des Schmelzpunkts der verwendeten Metalllegierungen liegt, aus denen die Komponenten gefertigt sind. Um unter diesen Bedingungen bestehen zu können, werden neben Bauteilen aus Nickelbasis-Legierungen, die speziell für hohe Temperaturen

entwickelt worden sind, an kritischen Bauteilen keramische Beschichtungen zur Wärmedämmung und ausgeklügelte Kühlstrategien eingesetzt. Außerdem müssen die inneren Bereiche der Gasturbine, die Rotorwellen und Lager, gegenüber Heißgaseinbruch abgedichtet werden.

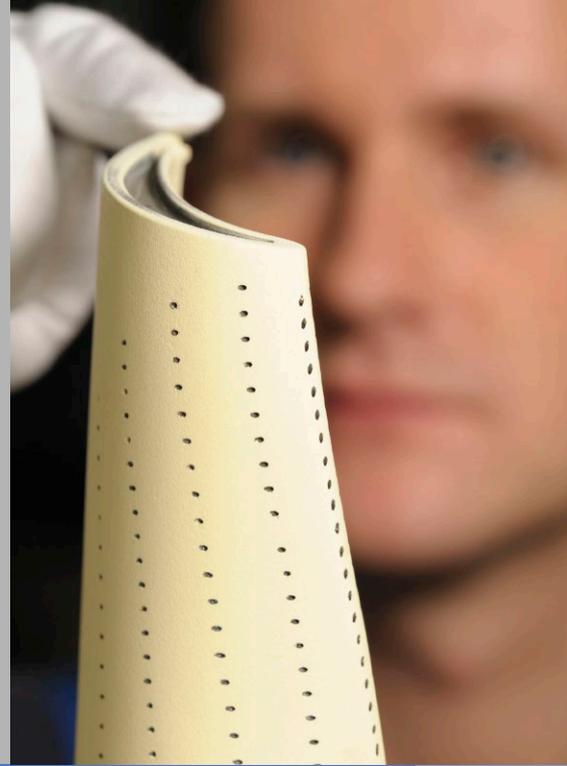
Etwa 20 % der vom Verdichter komprimierten Luft wird an der Brennkammer vorbeigeführt und in der Turbine für Dichtungs- und Kühlzwecke benötigt. Die bei der Verdichtung dieser Luft aufgewandte Energie kann nur zum Teil wieder zurückgewonnen werden und vermindert deshalb den Wirkungsgrad der Gasturbine. Für effizientere Gasturbinen bedeutet das, Kühlluft soll möglichst sparsam eingesetzt werden und die Zufuhr in die Gasströmung darf die Arbeit der Turbinenschaufeln nicht behindern, sondern soll sie möglichst unterstützen. Die etwa 500 Grad warme Kühlluft durchströmt dabei die thermisch belasteten Bauteile in Kanälen und Hohlräumen oder tritt über Dichtungsspalte aus. Besonders wichtig ist die sogenannte Filmkühlung. Hier tritt die Luft aus vielen kleinen Bohrungen in den Schaufeln aus und umhüllt diese mit einem hauchdünnen Luftfilm wie ein Schutzhandschuh. Durch derartige Methoden gelingt es beispielsweise, die tatsächliche Metalltemperatur der ersten Schaufeln auf deutlich unter 1.000 °C zu reduzieren. So ist ein stabiler Langzeitbetrieb möglich.



Dr. Dirk Hilberg arbeitet bei Rolls-Royce Deutschland und ist in der AG Turbo Sprecher des Bereichs Kühlung. „Ich erwarte bis zum Ende des Jahrzehnts erheblich verbesserte Auslegungsmethoden für weiter optimierte Kühlsysteme, die auch den Teillastbetrieb berücksichtigen. Damit werden noch höhere Prozesstemperaturen für effizientere Gasturbinen möglich, die unter flexibleren Bedingungen eingesetzt werden können.“



Computermodell einer Turbinenschaufel mit Temperaturverteilung (blau – kalt; rot – heiß)  
(Quelle: Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG)



Schutzschichten für Rekordturbine  
(Quelle: Siemens AG)

## Kühlluft gezielt lenken

Von Anfang an hat sich die Kühl- und Dichtungstechnologie der Gasturbine als Voraussetzung für die bisher erreichten Verbesserungen des Wirkungsgrads kontinuierlich weiterentwickelt. Dies gilt unverändert für die in der Zukunft notwendigen Effizienzsteigerungen. Um die Maschinen auf die schnelleren Lastwechsel und die häufigeren Teillasten durch den sich wandelnden Strommarkt einzustellen, müssen auch die Kühlstrategien angepasst werden. Durch den vermehrten Teillastbetrieb wachsen die Zeiten mit rasch wechselnden Betriebsparametern. Dr. Dirk Hilberg, Koordinator des Bereichs Kühlung in der AG Turbo, umreißt die Entwicklungsziele: „Für die Zukunft sollen auch auf den Teillastbetrieb optimierte Kühlsysteme entwickelt werden, die mit einem möglichst geringen Luftdurchsatz auskommen und so kostengünstige, robuste und langlebige Gasturbinen ermöglichen.“

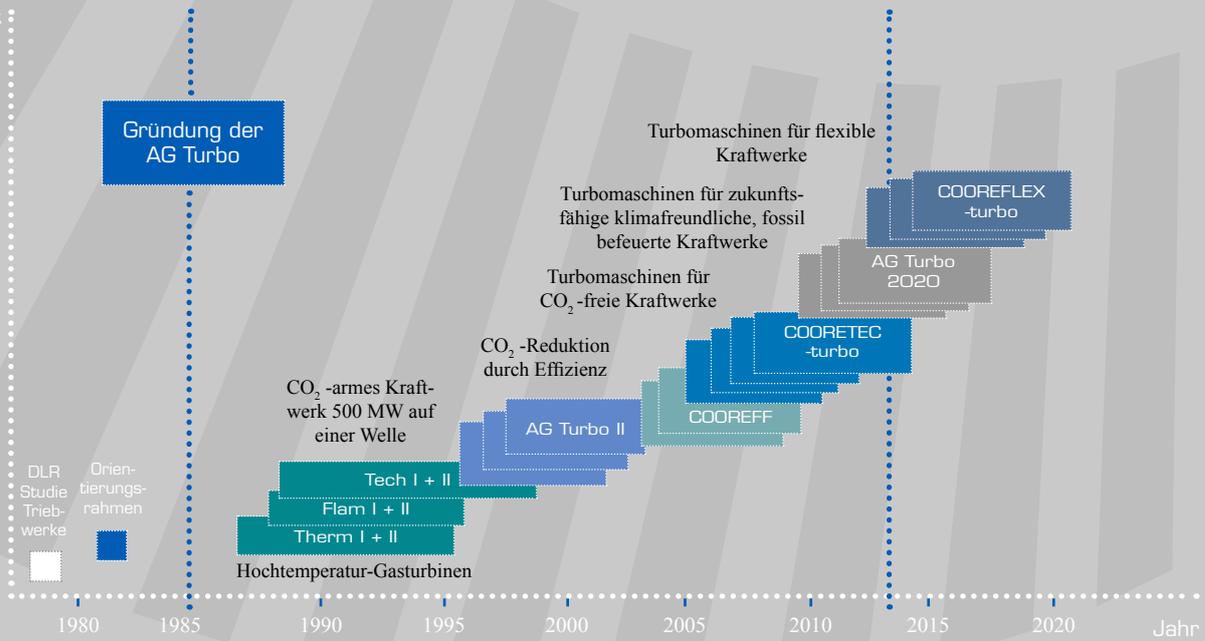
Neben Forschungsprojekten, die Verbesserungen an einzelnen Bauteilen untersuchen, treten Komponenten übergreifende Themen immer mehr in den Vordergrund. Somit sollen zukünftig nicht mehr nur die Einzelkomponenten einer Turbine separat verbessert werden, sondern die Gasturbine als Ganzes eine Optimierung durchlaufen. Dazu leisten Simulationsrechnungen einen wichtigen Beitrag, die immer besser die wechselseitigen Einflüsse aller Komponenten abbilden können.

## Wechselwirkungen in der Hochdruckturbine

Ein Forschungsprojekt an der Technischen Universität Darmstadt ist den Auswirkungen der Strömung aus

der Brennkammer auf die erste Schaufelreihe der sich anschließenden Turbine auf der Spur. Projektleiter Prof. Heinz-Peter Schiffer vom Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe erläutert das Vorhaben: „In unseren Rechenmodellen für Turbinen müssen wir unbedingt die thermischen und aerodynamischen Austrittsbedingungen der Brennkammer als wichtige Randbedingung stärker berücksichtigen.“ Dabei geht es u. a. um die ungleichmäßigen Temperaturfelder, den Geschwindigkeitsdrall und die Turbulenzen des Gases, wenn es aus der Brennkammer kommend auf die erste Reihe der Schaufeln trifft.

Die Ergebnisse werden dazu beitragen, sowohl Schaufelprofile verlustärmer zu gestalten als auch die Schaufelkühlsysteme bedarfsgerechter auszulegen. Da in den Turbinen das Temperaturniveau kontinuierlich angehoben wird, wächst auch die Notwendigkeit, die Strömungsverhältnisse und die Temperaturverteilung präziser zu prognostizieren. Mit den Ergebnissen wird der Wirkungsgrad einer Gasturbine weiter verbessert, weil bisherige Verluste vermieden werden.



# Gemeinsam forschen

## Nur kontinuierliche Forschung kann die Energiemarkt- und klimapolitischen Herausforderungen meistern

Turbomaschinen sind sehr leistungsstark, werden in vielen Kraftwerken und Flugzeugen eingesetzt und sind über viele Stunden pro Jahr in Betrieb. Jede kleine Verbesserung im Detail hat große Auswirkungen auf die Energiebilanz einer Volkswirtschaft. Hinzu kommt, dass sich viele deutsche Kraftwerke auf die Endphase ihrer Lebensdauer hin bewegen und in den nächsten Jahren durch Neuanlagen ersetzt werden müssen. Daher ist die Kraftwerksforschung ein wichtiger Ansatz in der Energiepolitik und Energieforschung der Bundesrepublik Deutschland. Das Energiekonzept der Bundesregierung fordert, dass flexible Kohle- und Gaskraftwerke die Reserve- und Ausgleichsleistungen bereitstellen müssen, um bei einem hohen Anteil erneuerbaren Stroms die Netzstabilität zu gewährleisten und die Stromversorgung zu allen Zeiten sicherzustellen. Das aktuelle Energieforschungsprogramm zählt die Forschung an Turbomaschinen zu den strategisch wichtigen Förderbereichen. Das ist verbunden mit einer engen Zusammenarbeit zwischen der COORETEC-Initiative, die die Forschungen zu effizienten Dampf- und Kombikraftwerken, den Vergasungstechnologien sowie der CO<sub>2</sub>-Abtrennung koordiniert, und der AG Turbo. Die durch das Programm erzielten Verbesserungen bei Energieeffizienz und Umweltschutz verfügen durch den 30 %-igen Weltmarktanteil deutscher Firmen über einen großen Hebel. International gehören Turbomaschinen aus Deutschland zur technologischen Spitzenklasse.

## Die Forschungsarbeit trägt Früchte

Während der 25-jährigen Tätigkeit der AG Turbo haben sich Turbinen und Kompressoren technisch erheblich weiterentwickelt. Seit 1980 hat sich die Größe einer stationären Gasturbine kaum verändert. Damalige Maschinen leisteten dabei 85 MW, während heutige auf 300 MW kommen, d. h., ihr Wirkungsgrad konnte erheblich gesteigert werden. Die Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) konnten um 90 % reduziert werden. Die Entwicklung weiterer zentraler Parameter wie Gaseintritts-Temperatur und Wirkungsgrad zeigt die folgende Tabelle:

	1985	2010	Ziel 2020
<b>Netto Wirkungsgrade - Volllast</b>			
Gaskraftwerk	30%	40%	42%
Steinkohle Dampfkraftwerk	38%	46%	50%
Braunkohle Dampfkraftwerk	34%	43%	50%
Gaskombikraftwerk	45%	60%	63%
<b>Erreichbare Minimallast</b>			
Dampfkraftwerk		35 – 40 %	30 %
Gaskombikraftwerk		30 – 50 %	30 %
Gasturbinen-Eintrittstemperatur	1.250 °C	1.500 °C	1.600 °C
NO <sub>x</sub> -Emissionen	250 ppm	< 25 ppm	< 25 ppm

Fortschritte bei Gas- und Dampfturbinen in den letzten 25 Jahren und Ziele für 2020



Die Forscher hinter den Projekten der AG Turbo im Herbst 2013

Ein Erfolgsfaktor liegt in einer branchenübergreifenden Zusammenarbeit zwischen Kraftwerksherstellern und Triebwerksbau. Besonders in den Anfangsjahren verfügten Flugzeugturbinen – beispielsweise bei den Kühlkonzepten – bereits über Erfahrungen, von denen die Entwicklung der stationären Turbinen profitieren konnten. Die AG Turbo koordiniert grundlegende, aber anwendungsnahe Forschungsprojekte zu Turbinen in Deutschland. Dabei kooperieren Industrie, Forschungseinrichtungen und Hochschulen und tauschen sich über die Ergebnisse aus. Durch die öffentlichen Fördermittel werden diese zukunftsweisenden und mit erheblichen technischen Risiken verbundenen Forschungsvorhaben ermöglicht. Damit werden Kompetenzen gebündelt und Doppelforschung vermieden. Über die Jahre des Bestehens der AG Turbo sind mehr als 160 Millionen Euro öffentliche Forschungsmittel und Beiträge der Industrie in gleicher Höhe in die Forschung an Turbomaschinen geflossen. Etwa die Hälfte davon ging an Hochschulen und wissenschaftliche Einrichtungen. Rund 300 Promotionen erfolgten dort im Zusammenhang mit Projekten der AG Turbo. Die Mittel haben es auch ermöglicht, an den Universitäten praxisnahe Forschungsinfrastruktur auszubauen, wie Teststände, Versuchsanlagen und moderne Messtechnik.

## Der Markt ändert sich

Heute fordert der sich wandelnde Strommarkt in Deutschland die Turbinenforscher erneut heraus. Neben einer höheren Effizienz und Umweltfreundlichkeit rückt der Wirkungsgrad unter Teillast immer stärker in den Vordergrund. Zusammenfassend geht es bei der aktuellen Forschung um Verfahren, die durch häufigere Teillast beeinflussten Strömungen und verursachten Schwingungen

in den Griff zu bekommen, das Komponentendesign zu optimieren, Kühlkonzepte zu verbessern sowie neue Materialien, leistungsfähigere Simulationsprogramme und Prognoseinstrumente zu entwickeln. Auch künftig sollen die Stickoxid-Emissionen niedrig, aber Wirkungsgrad, Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer der Anlagen möglichst maximiert werden. Eine hohe technische und wirtschaftliche Effizienz ist besonders im Hinblick auf den Weltmarkt vonnöten. Der globale Strombedarf wird nach allen Prognosen in den kommenden Jahrzehnten besonders in den Schwellen- und Entwicklungsländern und durch die Zunahme der Weltbevölkerung stark wachsen. Derzeit und voraussichtlich auch in Zukunft kommt der weit überwiegende Teil dieses Stroms aus fossil befeuerten Kraftwerken. Für den internationalen Klimaschutz werden weltweit die erneuerbaren Energien zügig weiter ausgebaut. Stromsparende Technologien werden ihren Marktanteil vergrößern. Die dritte Säule ist der Einsatz hocheffizienter, CO<sub>2</sub>-armer Kraftwerkstechnik. Nur mit einem Zusammenspiel dieser Faktoren lassen sich die energie- und klimapolitischen Ziele erreichen.

Dr. Gerd Pohnsner arbeitet bei Alstom Power GmbH und ist dort verantwortlich für nationale Förderprogramme und die wissenschaftliche Zusammenarbeit mit Hochschulen und Forschungszentren in Deutschland. „Der Forschungsverbund zwischen Wissenschaft und Industrie durch die AG Turbo ist auch für die nächsten Jahre ein unverzichtbarer Eckpfeiler für fortschrittliche Kraftwerkstechnik aus Deutschland.“



# „Wir müssen den Kraftwerkspark an die Zukunft anpassen“

Ein Gespräch mit Dr. Georg Menzen, Leiter des Referats „Energieforschung Projektförderung“ im Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und Dr. Dirk Goldschmidt, Vorsitzender der Programmleitung der AG Turbo.

14

## Welche Ziele verfolgt das Bundeswirtschaftsministerium mit der Kraftwerksforschung?

**Menzen:** Wir brauchen auch in Zukunft eine sichere, bezahlbare und umweltfreundliche Energieversorgung in Deutschland. Dabei gilt es, die ambitionierten Ziele der Energiewende zu erfüllen, sprich, die Effizienz und den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien zu steigern, dabei die Klimaschutzziele einzuhalten und gleichzeitig die Nutzung der Kernenergie zu beenden.

Diese von der Bundesregierung beabsichtigte Energiewende bedeutet einen grundlegenden Umbau unserer Versorgungsstrukturen und ist international ohne Vorbild. Deutsche Firmen der Kraftwerkstechnik sind auf vielen Exportmärkten Technologieführer. Um diesen Technologiestand zu erhalten bzw. weiter auszubauen, fördert die Bundesregierung als einen Schwerpunkt der Energieforschung die Entwicklung von Kraftwerkstechnologien. Ziel der Maßnahmen ist, innovative Technologien aus diesem Bereich sowohl für den heimischen Markt als auch den Export weiter zu entwickeln.

## Vor welchen Herausforderungen steht die AG Turbo angesichts der Energiewende?

**Goldschmidt:** Bis mindestens zur Mitte dieses Jahrhunderts werden Turbomaschinen eine tragende Säule unserer Stromversorgung sein. Sie tragen dazu bei, die Netze zu stabilisieren. Eine veränderte Versorgungsstruktur mit einem steigenden Beitrag erneuerbarer Energien bedeutet zwangsläufig, dass Turbomaschinen entsprechend weiterentwickelt werden müssen.

## Worin genau besteht die Verbindung zu den erneuerbaren Energien?

**Menzen:** Die Bundesregierung hat in ihrem Energie-

konzept als Ziele festgeschrieben, bis 2050 den Primärenergiebedarf zu halbieren und den Anteil des Stroms aus erneuerbaren Energien auf 80 % zu erhöhen. Die Integration des erneuerbaren Stroms ins Netz ist schwierig. Wegen der schwankenden Einspeisung steigen nicht nur die Anforderungen an das Netz, sondern auch an die konventionellen Kraftwerke. Sie müssen deutlich flexibler werden, um die Schwankungen im Netz auszugleichen. Daher brauchen wir auch in Zukunft möglichst effiziente konventionelle Kraftwerke auf Basis von Gas und Kohle. Nur so wird sich die Versorgungssicherheit auch auf Dauer garantieren lassen.

**Goldschmidt:** Ich möchte für die technische Seite noch etwas hinzufügen. Diese Lastschwankungen im Netz entstehen insbesondere, wenn große Motoren mit hohen induktiven Anteilen, also Blindleistung, anfahren. Turbomaschinen mit ihrem hohen Gewicht im Rotor sind ideal geeignet, solche Schwankungen auszugleichen. Wir müssen die rotierenden Massen im Netz halten.

## Herr Menzen, wo liegen für Sie die Prioritäten bei der Forschung an Turbomaschinen?

**Menzen:** Für die Energieforschung steht die Flexibilität im Mittelpunkt. Dabei ist vor allem ein möglichst hoher Wirkungsgrad auch im Teillastbereich wichtig. Wir hoffen, dass dabei der Wirkungsgrad der Kraftwerke das gleiche Niveau wie unter Vollast erreicht.

**Goldschmidt:** An Turbomaschinen für kleine Lasten bei unverändert hohen Wirkungsgraden arbeiten wir bereits. Wir wollen weiterhin beim eingesetzten Brennstoff flexibler werden und das An- und Abfahren der Anlagen beschleunigen können. Auch die Möglichkeit, Wasserstoff als Speichermedium für überschüssigen Strom zu nutzen, ist für Turbomaschinen interessant.



Dr. Georg Menzen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) und Dr. Dirk Goldschmidt (Vorsitzender der Programmleitung der AG Turbo)

### Mit COOREFLEX-turbo beginnt gerade eine neue Phase in der AG Turbo. Was haben Sie vor?

**Goldschmidt:** In der AG Turbo arbeiten rund 30 Partner aus der herstellenden Industrie, klein und mittleren Zulieferfirmen sowie aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen bei der vorwettbewerblichen Forschung zusammen. Gemeinsame technische Probleme sollen kooperativ gelöst werden. Wir planen für die nächsten fünf Jahre etwa 100 Einzelprojekte mit einem Gesamtvolumen von 66 Mio. Euro.

### Welche Ziele liegen Ihnen dabei besonders am Herzen?

**Goldschmidt:** Wir haben unsere Arbeiten in die vier Teilbereiche Verdichtung, Kühlung, Expansion und Verbrennung unterteilt. Bei der Verdichtung stehen für uns die bereits erwähnte Steigerung des Wirkungsgrades und der Stabilität bei kleineren Minimallasten im Vordergrund. Wir dürfen dabei auch die Langlebigkeit der Anlagen nicht aus dem Blick verlieren. Um auf diesem Gebiet Fortschritte zu erzielen, arbeiten wir an einer verbesserten Modellierung der Aerodynamik. Wir benötigen auch neue und verbesserte Brennerkonzepte. Ein Weg, um eine Verbrennung auch bei kleinen Lasten stabil zu halten, ist die sogenannte Stufung. Das heißt, wir teilen den Brenner in verschiedene Sektoren, die sich einzeln regeln und abschalten lassen. So kann man auch bei kleinen Lasten einen Brenner ökonomisch und schadstoffarm betreiben. Wichtige Hinweise auf eine verbesserte Effizienz der Kühlung erhoffen wir uns von besseren Modellen und Berechnungsverfahren. Es geht um ein detaillierteres Verständnis des Wärmeabtransports durch die Kühlluft an den Schaufeln sowie um deren Auslegung und Schwingungsverhalten. Das sind entscheidende Faktoren, um unter den geschilderten Netzanforderungen die Lebensdauer der Anlagen zu optimieren.

Übrigens lassen sich auch die alten Kraftwerke schnell an- und abfahren. Im Vergleich zum bisher üblichen Betrieb mit langen Phasen der Vollast, würde das aber zu stark auf Kosten der Lebensdauer gehen. Genau das wollen wir mit neuen Technologien und Konzepten ändern.

### Welche Auswirkungen haben diese Entwicklungen auf den Kraftwerkspark?

**Goldschmidt:** Der jetzige Kraftwerkspark wurde nicht für die aktuellen Anforderungen konzipiert. Es ist eine große Chance, dass bei einem beträchtlichen Teil des bestehenden Kraftwerksparks bald das Ende der Betriebsdauer erreicht sein wird und damit ohnehin Modernisierungen anstehen. Für die Zukunft müssen wir zu Anlagen kommen, die unter den veränderten Marktbedingungen wirtschaftlich betrieben werden können.

**Menzen:** Ich teile diese Einschätzung. Forschung und Entwicklung im Bereich der Kraftwerkstechnologien waren in den letzten Jahrzehnten ein Schwerpunkt der Energieforschung. Die bisher unterstützten Forschungsmaßnahmen sind sehr erfolgreich gewesen und lieferten einen wesentlichen Beitrag zur Technologieführerschaft deutscher Unternehmen und Forschungseinrichtungen im weltweiten Vergleich. Ich bin daher zuversichtlich, dass die AG Turbo auch ihre neuen ehrgeizigen Ziele erreichen wird.

## Zwei Forscherinnen im Porträt

**Dr. Corina Höfler** arbeitet am Institut für Thermische Strömungsmaschinen des Karlsruhe Instituts für Technologie (KIT). Seit Dezember 2013 leitet sie die Forschungsgruppe „Komponentenentwicklung“.

**Beate Wörz** arbeitet am Institut für Strahlantriebe und Turboarbeitsmaschinen an der RWTH Aachen. Dort ist sie mit dem Schwerpunkt numerische Simulationen in der Arbeitsgruppe Kühlsysteme tätig und schreibt an ihrer Dissertation.

### Frau Dr. Höfler und Frau Wörz, woran arbeiten Sie gerade?

**Höfler:** Unser Institut entwickelt Komponenten und Strategien für eine höhere Effizienz und mehr Flexibilität von Gas- und Dampfturbinen. In meiner Arbeitsgruppe steht die Optimierung des Luft- und Ölsystems im Vordergrund. Konkret arbeiten wir z. B. an neuen Dichtungskonzepten, um deren vorzeitigen Verschleiß und die Leckagen zu minimieren.

**Wörz:** Meine Kollegen und ich forschen an Kühlsystemen für Gasturbinenschaufeln. Wir wollen diese Systeme optimieren und die Modellierung noch stärker der Praxis nachbilden. Wir können mit leistungsstarken Simulationsprogrammen Geometrien im Rechner optimieren, ohne dafür kostenintensive Prototypen einsetzen zu müssen. Mit derartigen Instrumenten werden die Vorhersagen der tatsächlichen Strömungsverhältnisse in einer Turbine realitätsnäher und dies ermöglicht die Entwicklung verbesserter Maschinen.

### Wie sind Sie zur Turbinenforschung gekommen?

**Höfler:** Technik hat mich von Kindheit an fasziniert. Ich wollte verstehen, was sich hinter den Dingen verbirgt. Meine Eltern förderten dieses Interesse sehr. Nach dem Abitur war klar, dass meine Zukunft in der Technik liegt. Während des Studiums interessierten mich dann die Strömungsmaschinen und die Verbrennungstechnologien besonders. Die Kombination beider Themen sind die thermischen Turbomaschinen, mein jetziges Arbeitsgebiet.

**Wörz:** Auch bei mir lag der Schwerpunkt während der Schulzeit auf Naturwissenschaften und Technik. Niemand war überrascht, dass ich nach dem Abitur begann, Maschinenbau zu studieren. Im Verlauf des Studiums habe ich mich auf die Energietechnik und die Turbomaschinen als besonders vielseitiges Fachgebiet spezialisiert und bin dabei geblieben.

### Was begeistert Sie an Ihrem Forschungsgebiet?

**Höfler:** Bis heute fasziniert mich der komplexe Aufbau und die Leistung von Turbomaschinen. Die Technik beruht auf vielen verschiedenen physikalischen Effekten und unsere Aufgabe ist, diese aufeinander abzustimmen und deren Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Mich motiviert, diesen Zusammenhängen auf den Grund zu gehen und die Stellschrauben zu bedienen, um die Maschinen noch besser zu machen. Als Mitarbeiterin einer Universität schätze ich auch die internationale Zusammenarbeit sehr. Oft komme ich von Veranstaltungen mit vielen neuen Ideen zurück.

**Wörz:** Für mich machen drei Aspekte den Hauptreiz aus: Das Zusammenwirken von Thermodynamik und Strömungsmechanik ist komplex und das Forschungsgebiet ist abwechslungsreich. Die enge Zusammenarbeit zwischen numerischer und experimenteller Forschung ermöglicht innovative Ansätze. Den offenen Gedanken- und Meinungs austausch über Ländergrenzen hinweg erlebe auch ich als wertvolle Bereicherung meiner Arbeit.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Herausgeber:

AG TURBO  
Wissenschaftliche Koordinierungsstelle  
Deutsches Zentrum für Luft- und  
Raumfahrt e.V. (DLR)  
Meike Zens  
www.ag-turbo.de



### Redaktion:

Redaktion KraftwerkForschung.info  
FIZ Karlsruhe GmbH - Büro Bonn  
Christina Geimer, Uwe Milles  
redaktion@kraftwerkforschung.info  
www.kraftwerkforschung.info



KRAFTWERK  
FORSCHUNG

Stand: August 2014