

# Agil in die digitale Zukunft

Digitalisierung und demografischer Wandel halten die Wirtschaft in Atem. Wie Unternehmen sich fit machen können für die Zukunft, wird an der TU Darmstadt erforscht.

## Neue Forschungsansätze

Im Rahmen der „Darmstädter Zukunftsstudie 2016“ wurden Mitarbeiter, Führungskräfte und Personalverantwortliche aus rund 1.000 deutschen Unternehmen, insgesamt rund 300 Auszubildende, Praktikanten und Studierende sowie 2.000 Mitarbeiter in acht Ländern mittels des „Future Work Navigators“ befragt. Seit 2014 erforscht die „Leap-in-Time GmbH“ als Spin-off der TU Darmstadt die Zukunft der Arbeitswelt und berät Unternehmen. Seit März 2016 betreibt sie in Darmstadt das „Future Innovation Lab“.

## Informationen

### Marketing und Personalmanagement

Prof. Dr. Ruth-Stock-Homburg  
Telefon: 06151/16-24466  
E-Mail:  
rsh@stock-homburg.de  
www.mup.wi.tu-darmstadt.de

— Von Jutta Witte

„Unternehmen, die auch in Zukunft erfolgreich sein wollen, müssen agil und schnell in ihren Absatzmärkten agieren und zugleich den Bedürfnissen verschiedener arbeitender Generationen gerecht werden“, erklärt Professorin Ruth Stock-Homburg, Leiterin des Fachgebiets Marketing und Personalmanagement der TU Darmstadt. Wenn Firmen sich nicht den neuen Rahmenbedingungen anpassen und für neue Geschäftsmodelle öffnen, laufen sie nach Ansicht der Ökonomin Gefahr, leistungsstarke Beschäftigte zu verlieren und dem „Dodoeffekt“ zum Opfer zu fallen, also trotz guter Ressourcen neuen Kontrahenten zu unterliegen und schließlich „auszusterben“.

**Die jüngste Studie** der Wirtschaftswissenschaftlerin zeigt, dass derzeit deutsche und japanische Unternehmen zu den Schlusslichtern in punkto Zukunftsfähigkeit gehören. An erster Stelle steht Indien, gefolgt von den USA. Das Mittelfeld bilden Südkorea, Brasilien, China und Russland. „Generell sollten Unternehmen ihre Hausaufgaben im Kerngeschäft machen und dieses effizient betreiben, aber gleichzeitig den Mut aufbringen, neue Arbeitskonzepte und Geschäftsmodelle zu erproben“, empfiehlt die Expertin. Ziel sei es, beide Welten am Ende zu integrieren.

**Ein zukunftsfähiges Unternehmen** zeichne sich dadurch aus, die vier Dimensionen „Zukunftsorientierung, Anpassungsfähigkeit, Gestaltungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit“ erfolgreich zu managen. Mit dem „Future Work Navigator“ haben Stock-Homburg und ihr Team ein Instrument entwickelt, das hieran anknüpft, die Zukunftsfähigkeit von Unternehmen in einem systematischen Prozess ermittelt und ihnen einen Leitfaden für ihre Weiterentwicklung an die Hand gibt.

**Der Future Work Navigator** – ein Fragebogen, den die Beteiligten auf ihrem Mobiltelefon bearbeiten können – fragt den Ist-Stand der Organisationen in



Professorin Ruth Stock-Homburg

Abbildung: Jakob Kaliszewski

den vier Dimensionen ab. „Es zeigt sich, dass alle Dimensionen die Reputation, die Innovativität und den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens beeinflussen“, sagt Stock-Homburg. Es genüge jedoch nicht, sich angesichts des gegenwärtigen Wandels nur auf eine Dimension zu fokussieren.

**Mit dem Instrument** wird auch danach gefragt, wie ein Betrieb die einzelnen Stellschrauben justiert, die mit über seinen künftigen Weg entscheiden. „Eine Querschnittsherausforderung ist dabei sicherlich, dass Unternehmen die neuen Möglichkeiten der Digitalisierung so nutzen, dass sie die Beschäftigten in ihrer Effizienz, Kreativität und Flexibilität unterstützen“, sagt Stock-Homburg. Unter den insgesamt acht definierten Gestaltungsbereichen hält sie die Themen Führung, Human Resources und Arbeitsplatzgestaltung für prioritär.

**So werde Führung** in Zukunft stark durch Vertrauen und das Coaching zunehmend eigenverantwortlicher Mitarbeiter geprägt. Zugleich seien Belegschaften immer diverser und heterogener. Die Personalabteilungen müssten sich darauf einstellen, dass es „nicht mehr den einen Arbeitnehmer“ geben werde. Ebenso vielfältig wie die Beschäftigten werden sich nach ihrer Einschätzung die Arbeitsorte für Wissensarbeit entwickeln. Drei mögliche Arbeitswelten der Zukunft werden künftig im Darmstädter „Future Innovation Lab“ ausgestellt und erprobt.

**Wissen Unternehmen, wo sie stehen**, treten sie in einen Benchmark mit anderen Organisationen und Branchen. Im letzten Schritt geht es dann um die Erprobung und Umsetzung neuer Konzepte und Strategien. Die Wirtschaft hierzulande stehe erst in den Startlöchern, so Stock-Homburg: „Aber sie hat die Brisanz des Themas erkannt.“

Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin und promovierte Historikerin.

Frühjahr 2016



## Impressum

**Herausgeber**  
Der Präsident  
der TU Darmstadt

**Redaktion** Stabsstelle  
Kommunikation und Medien  
der TU Darmstadt:  
Jörg Feuck (Leitung, Vi.S.d.P.)  
Ulrike Albrecht (Grafik Design)  
Patrick Bal (Bildredaktion)

**Gestalterische Konzeption**  
conclouso GmbH & Co. KG,  
Mainz

**Titelbild** Katrin Binner

**Druck** Frotscher Druck GmbH,  
Darmstadt  
gedruckt auf 100 g/m<sup>2</sup>  
PlanoScript, FSC-zertifiziert

**Auflage** 6.000  
**Nächste Ausgabe** 15. Juni 2016

**Leserservice**  
presse@pvw.tu-darmstadt.de

ISSN 2196-1506

Möchten Sie die nächste Ausgabe der hoch<sup>3</sup>FORSCHEN gerne in digitaler Form erhalten? Dann senden Sie bitte eine E-Mail an [presse@tu-darmstadt.de](mailto:presse@tu-darmstadt.de)



— **1 Management:** Was zukunftsfähige Unternehmen auszeichnet — **2 Elektrotechnik:** Sensoren eröffnen Chancen in der Biomedizin — **3 Flugzeugtriebwerke:** Turbinen auf dem Prüfstand — **4 Verbrennungstechnologie:** Maximale Effizienz mit Simulationsverfahren



# Elektromagnetische Sensoren treffen Biomedizin

*Sie öffnen Türen, parken Autos ein und ermitteln Füllstände – elektromagnetische Sensoren. Warum sollten sie nicht auch Moleküle, Zellen oder Tumore detektieren, untersuchen oder behandeln können? Das deutschlandweite Schwerpunktprogramm ESSENCE klärt diese Frage in zehn Teilprojekten.*

— Von Hildegard Kaulen

Hinter den Professoren Rolf Jakoby, Christian Damm und Ulrich Göringer liegen drei anstrengende Jahre. Den drei Koordinatoren des Schwerpunktprogramms ESSENCE ist es gelungen, Dutzende von Projektpartnern zu gewinnen und die Deutsche Forschungsgemeinschaft davon zu überzeugen, in den kommenden sechs Jahren bis zu zehn Millionen Euro in die Erforschung elektromagnetischer Sensoren für die Biomedizin zu stecken. Die Forscher betreten damit Neuland. Die beteiligten Wissenschaftler werden untersuchen, wie sich elektromagnetische Wellen im Mikro-, Millimeter- und Terahertz-Wellenbereich auf einzelne Moleküle, Zellen oder Zellverbände auswirken und welche Verwendungsmöglichkeiten sich daraus für die Lebenswissenschaften ergeben. Die Ideen reichen von der schnellen und berührungslosen Diagnostik am Krankenbett bis zur Therapie von Krebs- und Gefäßerkrankungen. Jakoby leitet an der TU Darmstadt das Institut für Mikrowellentechnik und Photonik, Damms Schwerpunkt am Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik sind Terahertz-Sensoren, Göringer gehört zum Fachbereich Biologie.

**Die Idee entstand vor drei Jahren.** Damals untersuchten Professor Damm, Dr. Martin Schüßler und Dr. Margarita Puentes, wie die elektromagnetischen Wellen spezieller Sensorstrukturen mit künstlichen Geweben wechselwirken. Und sie registrierten messbare Unterschiede zwischen den verschiedenen Geweben. „Wir haben uns natürlich sofort gefragt, ob ein elektromagnetischer Sensor auch Krebszellen, resistente Bakterien oder Biomoleküle zuverlässig erkennen kann“, sagt Jakoby. „Das Potenzial wäre enorm“. Den Elektrotechnikern war aber auch von Anfang an klar, dass dieses Potenzial nur in enger Kooperation mit Medizinern und Biologen ausgelotet werden kann. Deshalb ist das Schwerpunktprogramm grundsätzlich interdisziplinär ausgerichtet.

*„Kann ein elektromagnetischer Sensor auch Krebszellen oder resistente Bakterien zuverlässig erkennen? Das Potenzial wäre enorm.“*

**Was macht elektromagnetische Sensoren** so interessant für die Lebenswissenschaften? Sie funktionieren ohne Drähte, berührungslos, und messen in Echtzeit. Es müssen auch keine biologischen Marker mehr verwendet werden. Die Messung beruht auf der Wechselwirkung zwischen dem elektromagnetischen Feld des Sensors und den zu untersuchenden Stoffen, Geweben oder Zellen. Krankes Gewebe weist zum Beispiel einen anderen Wassergehalt auf als gesundes Gewebe. Das wird von dem elektromagnetischen Sensor als Änderung des hochfrequenten Signals registriert. Jakoby und sein Team setzen auf Mikrowellen, weil deren Frequenzen zwischen 300 Megahertz und 300 Gigahertz liegen. „Wir interessieren uns für diesen Frequenzbereich, weil Wasser, Proteine und Biomoleküle ausgeprägte elektromagnetische Eigenschaften in diesem Mikrowellenbereich haben“, sagt Jakoby. „Wasser hat zum Beispiel eine Absorptionslinie bei 22 Gigahertz. Deshalb müsste dieser Frequenzbereich für Sensoren besonders prädestiniert sein.“

**Das Schwerpunktprogramm fördert** zehn Teilprojekte bundesweit. Drei davon werden maßgeblich von der TU Darmstadt mitgestaltet. Zusammen mit Professor Thomas Vogl von der Universitätsklinik Frankfurt am Main entwickelt Jakoby einen dualen Mikrowellen-Applikator, der Tumore in der Leber erkennen und behandeln soll. Vogl ist Radiologe und Direktor des Instituts für Diagnostische und Interventionelle Radiologie. Das Besondere an dem Applikator sind seine beiden Betriebsarten. Er wird eine Diagnose- und eine Therapiefunktion haben, zwischen denen hin und her geschaltet werden kann. Dazu wird eine neuartige, kleine Mikrowellen-Sonde minimalinvasiv in die Leber geschoben werden. Die Tumoren sollen zuerst mit niedriger Leistung detektiert und dann durch das Umschalten auf eine höhere Leistung erhitzt und abgetötet werden – ohne dass dafür die Position des Mikrowellen-



Abbildung: Katrin Binner

Applikators geändert werden muss. Für Vogl ist es auch wichtig, dass das System mit dem Kernspintomographen kompatibel ist, damit der Therapieerfolg in Echtzeit überprüft werden kann.

**Für diese Form der Therapie,** die Thermoablation genannt wird, gibt es bereits einen Vorreiter. Allerdings arbeitet dieser mit Radiowellen, nicht mit Mikrowellen. Es erhitzt die Tumoren mit weitaus höherer Leistung und ist auch nicht in der Lage, sie zu identifizieren. Das Mikrowellensystem, an dem Vogl und Jakoby arbeiten, hätte wegen der beiden Betriebsarten und der Kompatibilität mit dem Kernspintomographen einen deutlichen Mehrwert für die Patienten. In den kommenden drei Jahren sollen umfassende Tests mit verschiedenen Mikrowellen-Sonden an Phantomen, gesundem und krankem Gewebe gemacht werden und optimale Frequenzbereiche für die Unterscheidung der Zellen identifiziert werden. Diese Untersuchungen wird Carolin Reimann durchführen. „Wir werden zuerst eine Referenzdatenbank anlegen, damit wir sicher sind, dass wir die feinen Unterschiede auch tatsächlich messen können“, erklärt Reimann. „Wir hoffen, dass wir bis zum Ende der Förderung einen funktionsfähigen und zuverlässigen Prototyp haben werden. Im Moment stehen wir noch am Anfang.“

**Dr. Martin Schüßler betreut** ein weiteres Teilprojekt, an dem Professor Thomas Schwartz und Dr. Bastian Rapp vom „Karlsruhe Institute of Technology“ beteiligt sind. Die Projektpartner wollen

mit einer noch zu entwickelnden Hochfrequenzmesstechnik und Mikrofluidik Erreger in Biofilmen analysieren. Diese entstehen beispielsweise auf Implantaten und Kathetern. Die Projektpartner werden zunächst Inventur in den Biofilmen machen und die Bakterien über ihr Genom identifizieren. Im nächsten Schritt soll überprüft werden, ob sich die Genomdaten mit den Hochfrequenzdaten korrelieren lassen. „Wir hoffen, dass wir die Biofilme mit der Hochfrequenzmesstechnik scannen und so ihre Zusammensetzung bestimmen können“, sagt Schüßler. „Vielleicht lassen sich die Keime dann auch mit der Hochfrequenztechnik unschädlich machen, denn jedes Objekt, das Wasser enthält, kann mit Mikrowellen erhitzt werden“.

**In einem weiteren Teilprojekt** werden Damm und Göringer zusammen mit Professor Heinrich Kurz von der AMO mbH in Aachen einen neuartigen Sensor zur Detektion von afrikanischen Trypanosomen entwickeln. Diese Parasiten lösen die Schlafkrankheit aus, die unbehandelt zum Tode führt. Deshalb ist eine frühe Detektion der Parasiten im Blut essentiell. Bisher gibt es kein Verfahren, das unter den schwierigen Bedingungen vor Ort und ohne Labordiagnostik funktioniert. Diese Lücke wollen die Wissenschaftler mit einem elektromagnetischen Sensor im Terahertz-Frequenzbereich schließen. Von dem Schwerpunktprogramm wird man einiges erwarten können.

*Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin und promovierte Biologin.*

## Informationen

### Fachgebiet

### Mikrowellentechnik

Prof. Dr.-Ing. Rolf Jakoby

Telefon: 06151/16-28430

E-Mail:

jakoby@imp.tu-darmstadt.de

www.essence.tu-darmstadt.de



# Mehr Effizienz, weniger Schadstoffe

*Klare Ziele: 90 Prozent weniger Stickoxide und 75 Prozent weniger CO<sub>2</sub> in der Luft. Flugzeugtriebwerke müssen effizienter und umweltfreundlicher werden. Dies geht nur mit neuen Verbrennungstechnologien und einem stark verbesserten, fortschrittlichen Turbinen-Design. Wie Brennkammer und Turbine gemeinsam optimiert werden können, untersuchen die TU Darmstadt und Rolls-Royce im Forschungszentrum „Combustor and Turbine Aerothermal Interaction“.*

— Von Hildegard Kaulen

Turbinenprüfstand der Superlative: Am „Large Scale Turbine Rig“ (LSTR) richten Wissenschaftler vom Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe der TU Darmstadt Triebwerksturbinen auf die Verbrennungstechnologien der Zukunft aus. In der Versuchsanlage kann man aufrecht stehen – die Triebwerksturbine des LSTR in der Maschinenhalle der Universität ist fast doppelt so groß wie eine real ausgeführte Turbine. Der bislang in dieser Form weltweit einzigartige Turbinenprüfstand nimmt insgesamt drei Räume ein. Die Turbine im Zentrum mutet an wie eine riesige Zigarre, umgeben von Schläuchen und Kabeln. Diese bilden ein Netz aus insgesamt 800 Druck- und 200 Temperaturmessstellen. Die Primärluft für die Turbine wird über eine Rohrleitung aus einem Nebenraum zugeführt, die Luft für das Kühlsystem dem Abluftstrang entnommen und in einen dritten Raum abgeleitet. Dort wird sie auf einen höheren Druck verdichtet und schließlich als Sekundärluft der Turbine zur Verfügung gestellt. Das Ganze arbeitet als ebenso effizientes wie flexibles geschlossenes System.

„Wir brauchen diese Skalierung für einen optimalen Zugang in die Messgebiete“, erklärt Professor Heinz-Peter Schiffer, Leiter des Fachgebiets Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe, kurz: GLR. Im Moment drehen sich die Experimente am LSTR im Rahmen des Forschungszentrums „Combustor and Turbine Aerothermal Interaction“ (CTI) um die für die Weiterentwicklung moderner Triebwerke entscheidende Schnittstelle zwischen Brennkammer und Turbine. Im Fokus steht dabei die aerodynamische und thermische Interaktion zwischen den beiden Komponenten. Denn neue Konzepte wie die so genannte Magerverbrennung, bei der der Luftanteil im Treibstoffgemisch am Eintritt in die Brennkammer deutlich höher ist als bei konventionellen Brennkammern, können zwar die Entstehung von Schadstoffen deutlich verringern, verändern aber auch das Strömungsfeld und die Temperaturverteilung am Übergang zur Turbine.

Schon bei herkömmlichen Verbrennungsverfahren ist sie enormen thermischen und mechanischen

Belastungen ausgesetzt. Bis zu 400 Kelvin heiß ist der Luftstrom am Beginn des Hochdruckverdichters, der die Luft bis zur Brennkammer immer weiter komprimiert. Nach der Verbrennung trifft sie mit rund 1800 Kelvin auf die erste Statorreihe der Turbine. Das liegt deutlich über der Schmelztemperatur der verwendeten Materialien und erfordert für einen sicheren Flug ein komplexes Kühlsystem: „Die Nabe und die Spitze der Rotoren sind dabei die kritischsten Stellen“, erklärt Schiffer. Senkt man allerdings die Temperaturen, so reduziert sich der Wirkungsgrad des Triebwerks und der Treibstoffverbrauch steigt. Auch die Fliehkraft, welche auf die rotierenden Komponenten der Turbine wirkt, müssen die Ingenieure mit berücksichtigen. Dies alles richtig auszutarieren ist eine ziemliche Gratwanderung.

Die Magerverbrennung, bei der 70 Prozent der verdichteten Luft am Eintritt des Brennraums zusammen mit dem Brennstoff eingedüst werden, stellt die Wissenschaftler vor neue Herausforderungen. Sie führt dazu, dass in der so genannten Eintrittstraverse, dem Übergang von der Brennkammer zur Turbine, das Verbrennungsgas mit einem starken Drall auf die Turbine prallt, und dass sich Zustandsgrößen wie Druck, Temperatur und Geschwindigkeit ungleichmäßig verteilen: „Mittlerweile hat man erkannt, wie hoch die Verluste sein können, wenn man diese Inhomogenität bei der Auslegung der Turbine nicht berücksichtigt“, sagt Schiffer. Bis zu 1,5 Prozent an Wirkungsgrad gingen in diesem Fall verloren. Das klingt zunächst einmal marginal, ist es aber nicht, wenn man in Rechnung stellt, dass ein Hersteller bis zu zehn Jahre braucht, um den Wirkungsgrad um nur ein Prozent zu erhöhen.

„Man kämpft hier um jedes Zehntelprozent, das man am Ende gewinnt oder zumindest nicht verliert“, sagt Schiffer. „Entscheidend ist also, die Bedingungen an der Eintrittstraverse genau zu kennen“. Mit Blick auf die neue Verbrennungstechnologie sieht der Experte vor allem zwei Stellschrauben: Hier die Verbesserung des Wirkungsgrads der Turbine durch Minimierung der Verluste, dort die Anpassung des Kühlsystems an die veränderten Bedingungen.



Abbildung: Rolls-Royce Deutschland

Als Partner des CTI-Forschungszentrums setzen die GLR-Wissenschaftler mit ihren Versuchen am „Large Scale Turbine Rig“ dort an, wo die Forschungsarbeiten der Numeriker und Simulationsexperten vom Fachgebiet „Energie- und Kraftwerkstechnik“ (EKT) zu den Reaktionen in der Brennkammer enden. Neben Basismessungen, etwa zur Bestimmung des Wirkungsgrads der Turbine, gehen die Forscher auch Details auf den Grund und prüfen unter anderem, wie gut die Kühlung der Schaufeln funktioniert. Hierfür ist die Beschauelung umfangreich instrumentiert: Über kleine Sichtfenster am Turbinengehäuse kann eine Infrarotkamera die Temperaturverteilung der beheizten Endwand aufnehmen. Über deren Temperatur, die Temperatur der Luft und die in die Endwand eingebrachte Wärme können so der Wärmeübergang und die Effektivität des Kühlfilms in diesem Bereich bestimmt werden.

„Man kämpft um jedes Zehntelprozent, das man am Ende gewinnt oder zumindest nicht verliert.“

Die Versuchsanlage ist zudem sehr flexibel. So können die Spitzen der Turbinenschaufeln mit ihrer unterschiedlichen geometrischen Gestaltung nach dem Baukastenprinzip gewechselt werden – „ein sehr ausgeklügeltes System“, findet Schiffer. Entwickelt haben es drei Studierendengenerationen im Rahmen von Bachelor- und Masterarbeiten. Sechs Doktoranden haben hier schon ihre Versuche durchgeführt. Einen Tag braucht es, um die Anlage für den jeweiligen Untersuchungszyklus zu konfigurieren. Hierzu gehört auch die Einrichtung der 16 Drallerzeuger, die ringförmig vor der Turbine angebracht sind. Sie sind notwendig, weil die Experimente ohne echte Verbrennung ablaufen. Mit Hilfe der Drallerzeuger simulieren die Wissenschaftler die unter unterschiedlichen

Bedingungen entstehenden Geschwindigkeits- und Druckverteilungen am Austritt der Brennkammer beziehungsweise am Eintritt in die Turbine.

Insgesamt drei Jahre haben die GLR-Experten gebraucht, um das Rig für die Versuche rund um die Brennkammer-Turbinen-Interaktion unter den Bedingungen der Magerverbrennung startklar zu machen. „Heute können wir zwischen jeder Schaufelreihe die Verteilung von Druck und Geschwindigkeit messen und verfolgen, wie der ganze Prozess sich vom Eintritt der Luft bis zu ihrem Austritt entwickelt“, berichtet Schiffer. „Wir wollen uns sukzessive vom Eintritt in die Turbine bis zur letzten Schaufelreihe vorarbeiten.“

Mit den Experimenten am Rig können seine Wissenschaftler überprüfen, wie zuverlässig die Auslegungswerkzeuge sind, die ihr Industriepartner entwickelt hat. Sie können erklären, warum sich bestimmte Zustände an welcher Stelle verschlechtern oder verbessern und am Ende konkrete Empfehlungen an den Hersteller für die Weiterentwicklung und das Produktdesign der zukünftigen Triebwerke geben: „Wir geben Impulse für Veränderungen“, betont der GLR-Leiter. Erprobt wurden Magerbrennkammern bislang nur in einem Kerntriebwerk, das in einer Großversuchsanlage betrieben wurde. Als nächstes soll eine solche Brennkammer in einem Versuchsflugzeug vom Typ Boeing 747 in einem von vier Triebwerken mitfliegen. Bis zum Einsatz der neuen Technologie in Passagierflugzeugen dürften nach Einschätzung des Experten mindestens noch fünf Jahre vergehen.

Testauswertung am Prüfstand „Large Scale Turbine Rig“.

## Informationen

**Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe**  
Prof. Dr.-Ing. Peter Schiffer  
E-Mail: schiffer@glr.-tu-darmstadt.de  
www.glr.-tu-darmstadt.de

**Fachgebiet Energie- und Kraftwerkstechnik**  
Prof. Dr.-Ing. Johannes Janicka  
E-Mail: janicka@ekt.-tu-darmstadt.de  
www.ekt.-tu-darmstadt.de



# Mehr Effizienz, weniger Schadstoffe

*Die Weiterentwicklung von Flugzeugtriebwerken funktioniert nicht ohne neue Simulationsverfahren. Das Fachgebiet für Energie- und Kraftwerkstechnik der TU Darmstadt zeigt, was die Numerik beitragen kann.*

## University Technology Center (UTC)

Das Forschungszentrum „Combustor and Turbine Aerothermal Interaction“ (CTI) ist eines von 31 University Technology Centers (UTC), die Rolls-Royce weltweit in Kooperation mit renommierten Universitäten betreibt. Seit seiner Gründung 2006 wurden hier insgesamt 28 Promotionsprojekte betreut sowie rund 50 Bachelor- und Masterarbeiten geschrieben. Das CTI will die Erreichung eines der Kernziele der Luftfahrtindustrie – die deutliche Reduzierung des Brennstoffeinsatzes und des Schadstoffausstoßes – mit vorantreiben. Seitens der TU Darmstadt sind die Fachgebiete Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe (GLR) und Energie- und Kraftwerkstechnik (EKT) Partner des Rahmenvertrages mit Rolls-Royce. In die Forschungskoope-ration sind über Einzelprojekte auch das Institut für Reaktive Strömungen (RSM) sowie das Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau (IMS) eingebunden. Bei der Fertigung von Bauteilen für den Triebwerksturbinenprüfstand „Large Scale Turbine Rig“ arbeitet das Forschungszentrum mit lokalen kleinen und mittleren Unternehmen zusammen. Als UTC-Spin Off wurde 2013 die TurboScience GmbH als Ingenieurdienstleister im Bereich Turbomaschinen gegründet. Im UTC-Netzwerk arbeiten weltweit 600 Menschen, rund 400 Veröffentlichungen gehen pro Jahr aus UTC-Forschungsarbeiten hervor, zehn Prozent der jährlichen Rolls-Royce-Patente entstehen in diesem Forschungsverbund. [www.glr.tu-darmstadt.de/glr\\_forschung/utc/index.de.jsp](http://www.glr.tu-darmstadt.de/glr_forschung/utc/index.de.jsp)

**Umwelt- und Effizienzanforderungen** treiben die Optimierung von Flugzeugtriebwerken weiter voran. Immer mehr rücken dabei die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten in den Fokus. Ohne komplexe numerische Simulationen, die im Vorfeld beschreiben, wie ein technisches System sich verhält und damit wichtige Orientierungsdaten für dessen Weiterentwicklung liefern, können Hersteller wie Rolls-Royce diese Potenziale allerdings nicht heben. Am Fachgebiet für Energie und Kraftwerkstechnik (EKT) dreht sich alles um Zahlen, Gleichungen und Algorithmen. Die Wissenschaftler kombinieren sie immer wieder neu, um sie dann von Computern durchrechnen zu lassen. Das, was später die Entwickler und Techniker in die Praxis bringen wollen, müssen sie vorab möglichst präzise absichern. Als Teil des Forschungszentrums „Combustor and Turbine Aerothermal Interaction“ (CTI) nehmen Professor Johannes Janicka und sein Team derzeit vor allem die Vorgänge in der Brennkammer und an deren Übergang zur Turbine unter die Lupe: „Wenn es uns gelingt, die Wechselwirkungen an diesem Übergang zu beschreiben, kommen wir einen großen Schritt weiter“, erklärt der EKT-Leiter.

**Ziel ist ein Simulationsmodell**, das zum einen die Interaktion zwischen Flamme, Turbulenzen und Kraftstoff in der Brennkammer abbildet, zum anderen aber auch das Verhalten und die Eigenschaften der Flammenwand am Übergang zur Turbine – und dies idealerweise in einem einzigen numerischen System. Ein ganzes Konglomerat von Vorgängen, die alle miteinander in Verbindung stehen, fließt in die Berechnungen ein: chemische Reaktionen mit Auswirkungen auf Temperatur, Emissionen und Teilchenkonzentration, physikalische Vorgänge wie die Strömung und nicht zuletzt das Verhalten des in die Brennkammer eingespritzten Kerosins. „Um all das in einer Simulation zu erfassen, brauchen wir ein ganzes Set an Differentialgleichungen, die selbst ein Computer manchmal nur annähernd lösen kann“, erklärt Janicka.

**Was dies bedeutet**, zeigt ein Blick auf die Treibstoff-Injektion in die Brennkammer. Sie führt zu Reaktionen zwischen den Kerosintropfen und der Luft aus dem Verdichter, zwischen den Tropfen untereinander und im Übergang vom flüssigen in den

gasförmigen Zustand. Um auch bei solch komplexen Vorgängen möglichst realitätsnahe Vorhersagen treffen zu können, vereinfachen die Wissenschaftler die Vorgänge und berücksichtigen in ihren Modellen nur die wichtigsten Variablen. Zehn bis 20 bleiben in der Regel am Ende übrig. Dann verringert sich der Aufwand des zu berechnenden Problems. Dieses dreidimensionale Strömungsfeld wird in einige dutzend Millionen Punkte aufgeteilt. Der Computer berechnet dann die Zusammenhänge zwischen diesen Punkten.

*„Wir brauchen ein ganzes Set an Differentialgleichungen, die selbst ein Computer manchmal nur annähernd lösen kann.“*

*„Wir bilden die Wirklichkeit in einem reduzierten System ab“, sagt Janicka. Einige Tage oder auch Wochen kann eine Simulation dauern. Doch der Aufwand lohnt sich. Numerik und Simulationen sind auch deswegen so wichtig, weil sie der Industrie komplizierte, langwierige und teure*

Experimente ersparen: „Der Trend geht dahin, möglichst viel am Rechner vorher zu bestimmen“, erklärt der Experte. Von seinen rund 30 Mitarbeitern sind derzeit sechs in Rolls-Royce-Projekte eingebunden: „Wir erstellen praktisch die Toolbox, die das Unternehmen für seine Entwicklungsarbeit braucht“. Die Codes, deren Entwicklung hier erfolgt, werden zunächst durch Vergleiche mit experimentellen Arbeiten des Instituts für Reaktive Strömungen und Messtechnik (RSM) der TU Darmstadt verifiziert und dann in der Technologieabteilung von Rolls-Royce weiter genutzt.

**Ohne Forschungen**, wie sie derzeit am EKT laufen, wären die Verbrennungsverfahren der nächsten Generation, die das Unternehmen gerade entwickelt, nicht denkbar. Die Verbrennung in Flugzeugturbinen verläuft nach dem Prinzip der so genannten Fett-Mager-Verbrennung. Eine RQR (Rich-Quench-Lean)-Brennkammer besteht aus drei Zonen: in der ersten kommt die im Verdichter komprimierte Luft mit einem Druck von rund 50 bar an; das Kerosin wird über eine Düse tropfenförmig eingespritzt. Weil sein Anteil im Gemisch hoch ist, spricht man von einer „fetten Mischung“. In der zweiten Zone wird zusätzliche Luft aus Löchern in der Brennkammerwand zugeführt, bis in der dritten Zone schließlich eine magerere Flamme mit einem niedrigeren Kerosinanteil brennt. Das Verfahren ist gut für die Flamme, die so über alle Flugphasen hinweg kontrolliert brennt und für einen sicheren Flug sorgt. Es produziert allerdings auch erhebliche Mengen Ruß und CO in der Primärzone

und am Übergang zum mageren Gemisch auch viel Stickoxid.

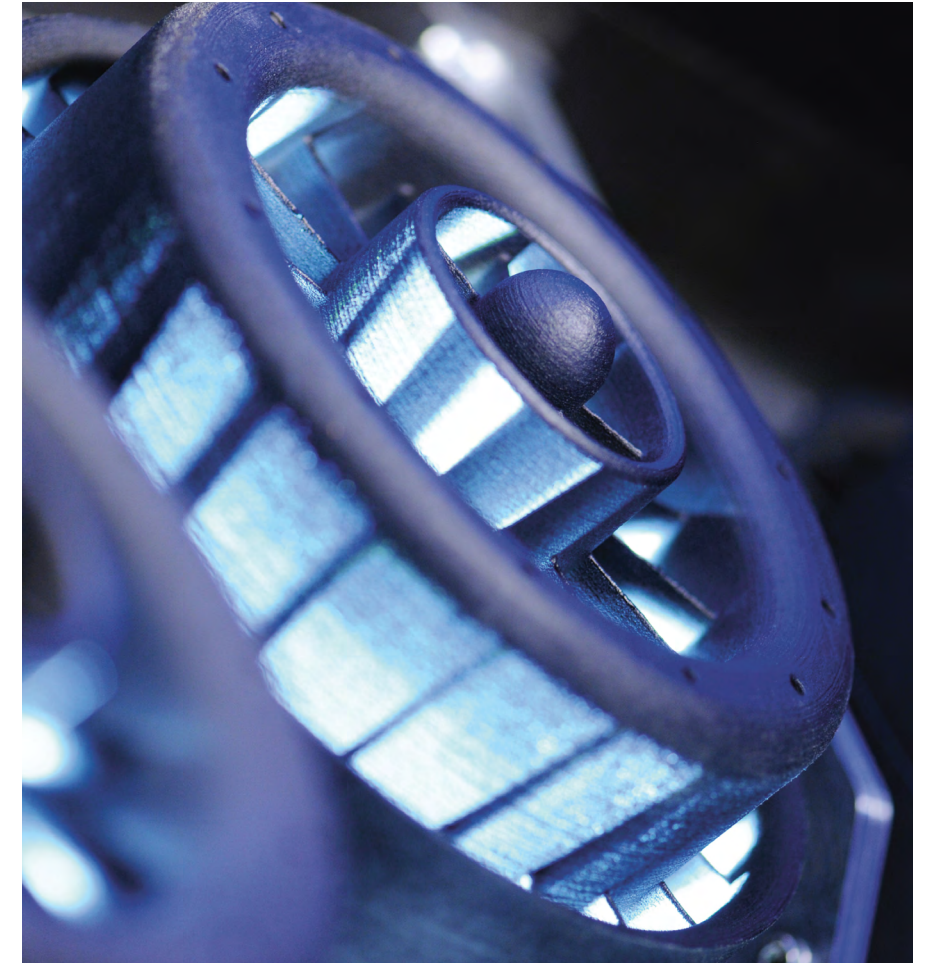
**Abgemildert wird dieser Effekt**, wenn die so genannten stöchiometrischen Punkte, an denen die höchsten Temperaturen entstehen, möglichst schnell überschritten werden. Grundsätzlich lässt sich das Problem allerdings nur mit einem völlig neuen Verbrennungssystem – der Magerverbrennung. Wenn das Gemisch direkt nach dem Verdichter einen Luftüberschuss enthält, können lokale Temperaturspitzen gar nicht erst entstehen. In der Folge sinkt die Temperatur in der Brennkammer und es entsteht weniger Stickoxid.

**Aber wie stabilisiert man eine Flamme** unter solchen Bedingungen? Dies ist die Herausforderung, welche die Numerik-Experten und ihre Kollegen vom Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrt (GLR), die das Thema experimentell erforschen, gemeinsam lösen wollen. Denn die Magerverbrennung erfordert ein neues Brennkammer-Design. Hierfür müssen die EKT-Wissenschaftler ein neues Modell entwickeln und die im Moment noch getrennten Berechnungen für Brennkammer und Turbine zu einer Simulation zusammenführen.

**Dies ist schwierig**, weil die instabilen Flammen, die bei diesem Verfahren entstehen, deutlich dünner sind als bei einer Fett-Mager-Verbrennung. Hier herrschen andere Temperaturen und Geschwindigkeiten. Verwirbelungen treten in neuer Form und Intensität auf. Gebraucht werden feinere numerische Gitterstrukturen, um das Problem zu erfassen. Hinzu kommt, dass derzeit Verdichter und Turbine auf der einen Seite und Brennkammer auf der anderen Seite mit einer unterschiedlichen Software berechnet werden, weil an beiden Stellen ein unterschiedlicher Druck herrscht.

**Die Experten haben dieses Problem** im ersten Schritt gelöst, indem sie den bereits bestehenden Auslegungscodex „PRECISE-UNS“ so weiterentwickelt haben, dass beide Komponenten nun einheitlich mit kompressiblen Methoden berechnet werden können. „Es ist zwar immer noch ein Verbrennungscodex“, sagt Janicka, „aber so können wir die Turbine jetzt in unsere Berechnungen einbeziehen“. Ziel sei es jedoch, irgendwann ein Flugzeugtriebwerk als komplettes System zu simulieren.

*Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin und promovierte Historikerin.*



Strömungsdraht-Erzeuger am Turbineneintritt des „Large Scale Turbine Rig“.