



## Flexible Turbomaschinen stabilisieren das Stromnetz

ECOFLEX-turbo: Kraftwerksturbinen für ein Netz mit 80 Prozent erneuerbarem Strom weiterentwickeln



*Künftig müssen konventionelle Kraftwerke flexibler werden, um die schwankende Stromerzeugung der Erneuerbaren auszugleichen. Das erfordert modifizierte Gas- und Dampfturbinen. Diese müssen häufiger unter Teillast arbeiten, mehr An- und Abfahrzyklen überstehen und mit wechselnden Brennstoffen funktionieren. Die AG Turbo hat für diese neuen Rahmenbedingungen die Forschungs- und Entwicklungsziele im Programm ECOFLEX-turbo zusammengestellt.*

In thermischen Kraftwerken entziehen Dampfturbinen dem heißen Wasserdampf und Gasturbinen dem Heißgas Energie. Sie sind das Herzstück der Kraftwerke und ihr technisches Leistungsvermögen entscheidet wesentlich über Energieeffizienz, Einsatzprofil und Emissionswerte der Gesamtanlage. Turbinen wandeln die aufgenommene Energie mittels Generatoren in elektrischen Strom um. Gas- und Dampfturbinen sind bisher so ausgelegt, dass sie möglichst ohne plötzliche An- und Abschaltvorgänge und unter Vollast laufen sollen. Das begrenzt den Materialverschleiß. Im künftigen Stromnetz übernehmen konventionelle Kraftwerke aber neue Aufgaben. Sie sollen in erster Linie die schwankende Stromerzeugung der Windenergie- und Photovoltaikanlagen ausgleichen, um ein stabiles Netz zu gewährleisten. Das ist nur mit weiterentwickelten Turbinen möglich. Die müssen robuster, besser auf Teillastbetrieb, größere Frequenzschwankungen im Netz und wechselnde Brennstoffe ausgelegt werden. Gleichzeitig soll es bei Effizienz und Emissionen keine Rückschritte gegenüber heute geben.

Das aktuelle Forschungsprogramm ECOFLEX-turbo der AG Turbo listet unter den neuen Rahmenbedingungen im Netz die Entwicklungsziele der Turbinenforschung bis 2022 in über 100 Projekten auf. Seit mehr als 30 Jahren arbeiten in der AG die führenden deutschen Turbinenhersteller und über 20 Universitätsinstitute, auf die mehr als zwei Drittel der geförderten Projekte entfallen, zusammen, um

Dieses Forschungsprojekt wird gefördert vom

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

vorwettbewerblich grundlegende Fragestellungen gemeinsam zu erforschen. Dabei geht es sowohl um Neuanlagen als auch um die nachträgliche Ertüchtigung bestehender Turbinen. Bei Turbomaschinen gehören deutsche Hersteller auf dem Weltmarkt zu den führenden Anbietern mit einem Marktanteil von ca. 30 %.

### Teillast fordert Turbinen anders

Wenn bisher eine Turbine über längere Zeit unter Teillast oder Unterfrequenz arbeiten muss, gerät sie in den Randbereich ihres Auslegungsdesigns und überschreitet dieses phasenweise. Jeder dieser Vorfälle verkürzt die Lebensdauer der Komponenten. Auftretende Probleme sind beispielsweise unerwünschte Schwingungen und Vibrationen der Schaufeln, thermoakustische Phänomene und Störungen im Verdichter. Weiterhin nimmt die Effizienz der Anlage unter Teillast ab.

Künftig werden Turbinen häufiger unter Teillast arbeiten, schneller an- und abfahren und bei Netzfrequenzeinbrüchen das Leistungsdefizit in Bruchteilen von Sekunden ausgleichen müssen, je nachdem, wie es das Stromnetz erfordert. Dabei müssen sie sich trotz dieser Betriebsweise noch wirtschaftlich rechnen. Sie laufen dann auf Dauer in Betriebszuständen, die sie bisher beim An- und Abfahren möglichst zügig durchheilt haben. Dafür müssen Verdichter und Brennkammern robuster ausgelegt werden, um der wachsenden Zahl der Startvorgänge, Lastwechsel und Betriebszyklen standhalten zu können. Es werden u. a. neue Computerprogramme zur Analyse, Auslegung und dynamischen Simulation benötigt. Die Forscher möchten das reale Betriebsverhalten exakter vorausberechnen. Die Modelle sollen auch helfen, das Design von Komponenten und die Auslegungsverfahren zu verbessern. Damit reduzieren sie die zeitaufwendigen und teuren Experimente und Prototypen und ermöglichen ein gezielteres Arbeiten auf Testständen. Ziel ist, dass die Turbinen möglichst unter 50 %-Teillast sowie bei zyklischer Betriebsweise einen gleich hohen Wirkungsgrad erreichen wie unter Volllast.

Überschüssiger Strom aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen kann zur Gewinnung von Wasserstoff eingesetzt werden, um diesen beispielsweise dem Erdgas beizumischen. Die Turbinen müssen daher künftig einem Erdgas mit einem auf mindestens 10 % erhöhten Wasserstoffanteil gewachsen sein.

Das Programm ECOFLEX-turbo gliedert sich entlang der vier Teilbereiche: Verdichten, Verbrennen, Kühlen und die Expansion (Turbine).

### Der Verdichter macht den Druck

Verdichter sollen in Zukunft hohe Wirkungsgrade nicht nur bei Spitzenlast erbringen, sondern über einen möglichst breiten Arbeitsbereich ein stabiles Betriebsverhalten zeigen. Damit Turbinen künftig höhere Zyklen absolvieren können, müssen die Schadensmechanismen für einzelne Bauteile detaillierter erforscht werden. Daten bilden die Grundlage für eine bessere Modellbildung und leistungsfähigere Simulationsprogramme, die Lebensdauer verlängernde Maßnahmen ermöglichen. Ziele sind kürzere Entwicklungszeiten und komplexere Geometrien. Dabei wird die probabilistische Herangehensweise wichtiger. Mit ihr werden Komponenten auf Basis gesicherter Daten aus Modellen und Experimenten gezielt auf eine Mindestanzahl von z. B. Last- und Temperaturwechseln ausgelegt.

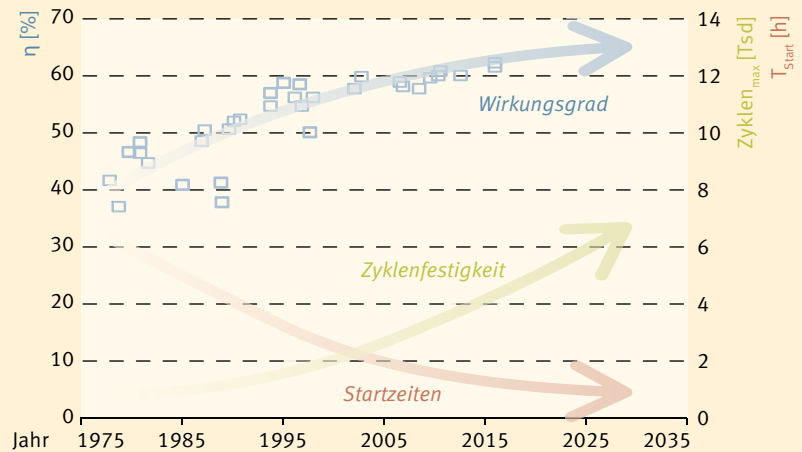


Abb. 1 Seit 1975 haben sich bei Kraftwerken mit Gas- und Dampfturbinen (GuD) der Wirkungsgrad ( $\eta$ ), die Startzeiten und die maximale Zyklfestigkeit erheblich verbessert.

Abb. 2 Computermodell einer Turbinenschaufel mit Temperaturverteilung (Blau = niedrige Temperatur; rot = hohe Temperatur).

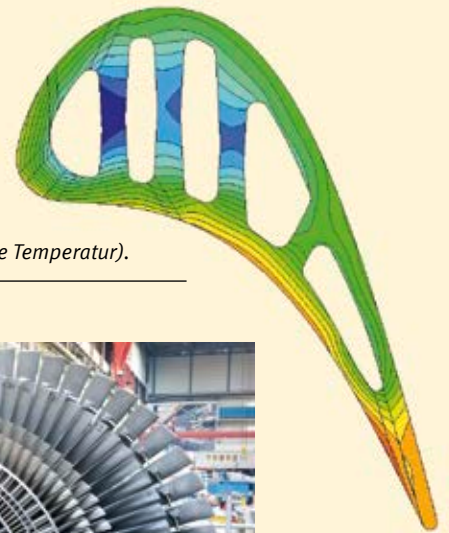


Abb. 3 Eine einhäusige Industrie-Dampfturbine zur Stromerzeugung mit einer Leistung von 80 MW

Weiterhin möchten die Forscher das tatsächliche Strömungsverhalten und die im Teillastbetrieb erhöhten Schwingungsamplituden zuverlässiger vorhersagen sowie neue Möglichkeiten der Strömungsführung und Schwingungsdämpfung erproben. Damit lassen sich dann die Verlustquellen bestimmen und reduzieren. ECOFLEX-turbo umfasst im Teilbereich „Verdichten“ 30 Vorhaben.

### Wechselnde Energieträger effizient verbrennen

Ein Arbeiten unter Teillast und häufigere Lastwechsel bedeuten für die Verbrennung in einer Gasturbine, dass der Massenstrom des Brenngases und der Wirkungsgrad bei nahezu gleich hoher Temperatur in der Brennkammer sinken. Auch unerwünschte thermoakustische Phänomene treten häufiger auf. Dabei gehen die Schwingungen der Verbrennung auf die Brennkammer über, führen so zu vorzeitiger Materialermüdung und verursachen Lärm. Ein weiterer Belastungsfaktor sind die raschen Temperaturwechsel. Ziele der sieben Projekte im Teilbereich „Verbrennen“ sind, ein neues System zur Verbrennungsabstufung zu entwickeln sowie Gasturbinen mit höheren Reserven gegen thermische Belastungen und thermoakustische Phänomene auszustatten. Damit soll auch eine kurzzeitige Überlastung möglich werden, wenn die Turbine zur schnellen Frequenzstabilisierung im Strom-



### Verdichten

**Kooperationspartner\*:** MTU Aero Engines AG, RWTH Aachen, DLR – Institut für Antriebstechnik und die Hochschule der Bundeswehr.  
**Laufzeit:** 1.12.2016–28.02.2019

Detaillierte experimentelle Untersuchung des Turbulenz- und Transitionsverhaltens in einem Verdichter. Dazu werden hochpräzise Messungen von Turbulenz, Transition und Sekundärströmungseffekten durchgeführt. Die Ergebnisse sollen gleichermaßen den wissenschaftlichen wie technischen Kenntnisstand erweitern und in verbesserte Simulationsprogramme münden. Die untersuchten Phänomene sind einer der limitierenden Faktoren bei der Vorhersage von Strömungen im Teillastbereich.

### Verbrennen

**Kooperationspartner\*:** Siemens AG, TU München, TU Berlin  
**Laufzeit:** 1.06.2017–31.10.2019

Verbrennungssystem für die nächste Gasturbinengeneration – flüssige Brennstoffe. Ziel ist, durch ein verbessertes Verbrennerdesign und eine höhere Brenneranzahl künftig weniger Kühlluft zu benötigen und  $\text{NO}_x$ -Emissionen abzusenken. Gesucht wird eine einfache Brennstoffeindüsung, die den Brennstoff homogen über den Durchmesser verteilt, kurze Mischlängen und Zeiten erreicht und unempfindlich gegen zeitliche Fluktuationen der Zuströmung ist.

### Kühlen

**Kooperationspartner\*:** Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG, TU Darmstadt  
**Laufzeit:** Das Projekt befindet sich in Vorbereitung.

Aero-/Thermaluntersuchung von Schaufelspitzenkonfigurationen für kompakte Turbinen mit hoher Leistungsdichte. Genau wie bereits bei Flugzeugturbinen ist durch die Flexibilisierung im Kraftwerkssektor ein Trend zu kleineren, kompakten Turbinen zu erwarten. Diese kleineren Gasturbinen lassen sich flexibler im Verbund und auch dezentraler einsetzen. Untersucht werden das aerodynamische Verhalten der kompakten Schaufeln und die Möglichkeiten für deren effiziente Kühlung.

### Expansion

**Kooperationspartner\*:** MAN Diesel & Turbo SE, Siemens AG, TU Darmstadt, TU Dresden, Universität Duisburg-Essen  
**Laufzeit:** 1.07.2017–31.12.2020

Untersuchungen von Wärmeübergang in Dampfturbinenkomponenten. Es gibt drei voneinander unabhängige Teile. Untersucht werden: Variable Geometrien von Turbinenseitenräumen. Die korrekte Erfassung der Kondensations- und Verdampfungsvorgänge in Turbinenseitenräumen unter Nassdampfbedingungen. Der Wärmeübergang in realer Dampfturbine mit dem Ziel einer verbesserten Auslegung des Turbinengehäuses für den flexiblen Teillastbetrieb.

### Abb. 4 Charakteristische Projektbeispiele aus den vier Teilbereichen

\* Weitere Kooperationspartner ohne Projektbeispiel: **Industriepartner:** General Electric  
**Universitäten:** Bochum, Cottbus, Hannover, Karlsruhe, Kassel, Niederrhein, Stuttgart, Trier, Wuppertal sowie Helmut-Schmidt-Universität und Hochschule für Angewandte Wissenschaft Hamburg  
**Technische Universitäten:** Braunschweig, Kaiserslautern  
**Institute:** Bundesanstalt für Materialforschung Berlin, DLR- Institut für Verbrennungstechnik Stuttgart, DLR-Institut für Antriebstechnik in Berlin, Göttingen, Köln, Fraunhofer-Institut Freiburg

netz außerhalb ihrer Auslegungsparameter arbeitet. Gleichzeitig müssen Brennkammern so ausgelegt werden, dass sie mit verschiedenen gasförmigen und flüssigen Energieträgern funktionieren. Besonders wichtig ist, künftig auch Brenngase mit einem variablen Wasserstoffgehalt verarbeiten zu können. Eine so aufgerüstete flexible Gasturbine stellt eine Schlüsselkomponente für Power-to-X-Konzepte dar.

### Kühlen: Jenseits des Schmelzpunkts arbeiten

Zu den heutigen, hohen Wirkungsgraden von Turbinen haben maßgeblich die in der Vergangenheit angehobenen Turbineneintrittstemperaturen beigetragen. Mittlerweile liegt die Temperatur des Gases deutlich über dem Schmelzpunkt der hochwarmfesten, metallischen Werkstoffe der Schaufeln. Keramische Beschichtungen sowie ausgeklügelte Kühlsysteme für Komponenten machen das möglich. Die Luft durchströmt die Bauteile, tritt durch Spalten und Poren aus und legt sich als schützender Film über besonders beanspruchte Teile. Der Kühlluftbedarf senkt jedoch den Wirkungsgrad der Gesamtanlage und soll daher möglichst niedrig sein.

In 19 Forschungsprojekten im Teilbereich „Kühlen“ geht es u. a. um ein besseres Verständnis der komplexen Strömungen in den Hohlräumen der Turbine, eine wirksamere Abdichtung der verschiedenen Schaufelsysteme

## Den Turbo zünden

Turbomaschinen stecken in Kraftwerken, Flugzeugen und in Pipelines zum Transport von Gasen. Am Beispiel einer Gasturbine lässt sich der Aufbau vereinfacht beschreiben. Es gibt drei Sektoren: den Verdichter (Komprimierung der angesaugten Luft), die Brennkammern (hier zündet das Gemisch aus Brennstoff und Luft) und die Expansion, auch Turbine genannt (hierin dehnt sich das heiße, unter Überdruck stehende Gas aus). Das Gas durchströmt die hintereinander angeordneten Schaufelräder, baut dabei Druck ab und überträgt Leistung vom Heißgas auf die rotierende Turbomaschine. Ein Teil dieser Leistung (ca. 40–50 %) wird zum Antrieb des Verdichters benötigt und der Rest wird beispielsweise in Kraftwerken genutzt, um Stromgeneratoren anzutreiben. Der Wirkungsgrad einer Turbine steigt mit höherem Druck im Verdichter und einer höheren Temperatur bei Eintritt des Gases in die Expansion. Abb. 1 zeigt die Entwicklung der Leistungsdaten seit 1985.

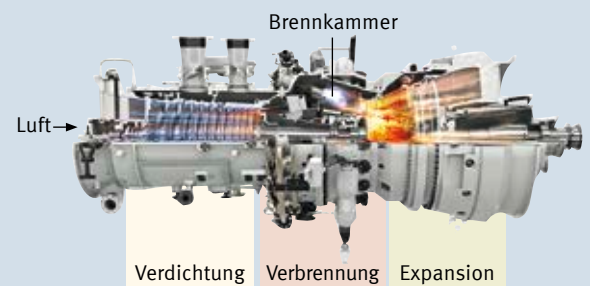


Abb. 5 Gasturbine mit den Sektoren Verdichtung, Verbrennung und Expansion

und einen höheren Schutz von Rotorwelle und Lagern gegen Heißgaseinbrüche. Ein weiterer Ansatz zur Optimierung ist, Bauteile im 3-D-Druckverfahren mittels Lasersintern zu fertigen. Das Verfahren würde komplexere und effizientere innere Bauteilstrukturen für neue Kühlsysteme ermöglichen. Weiterhin untersuchen die Forscher, welche Möglichkeiten Bauteile aus keramischen Faserverbundwerkstoffen bieten.

### Expansion: Wo sich Energie entfaltet

Die Effizienz der Expansion hängt u. a. davon ab, dass der heiße Dampf (Dampfturbine) bzw. das heiße Gas aus der Brennkammer (Gasturbine) unter hohem Druck möglichst präzise auf die in mehreren Reihen hintereinander angeordneten Schaufelreihen strömt. Dabei wird das strömende Gas durch Einbauten im Gehäuse und auf der Welle in Richtung und Geschwindigkeit gelenkt. Bei den 38 Projekten zu Gas-, Dampf- und Industriegasturbinen im Teilbereich „Expansion“ stehen zwei Aspekte im Vordergrund: Das Entwicklungstempo zu beschleunigen und die neuen Technologien zügiger bei Bestandsanlagen zum Einsatz zu bringen.

Für die künftigen Netzanforderungen ist ein besseres Verständnis der instationären Vorgänge und der Wechselwirkungen zwischen Strömung und Komponenten erforderlich. Weitere Themen sind die Entwicklung kleinerer, dezentral einsetzbarer Turbinen für die Kraft-Wärme-Kopplung. Diese lassen sich mit vorhandenen kommunalen und industriellen Anlagen vernetzen und zu einem smarten Netz ausbauen. Auch geothermische und solarthermische Kraftwerke nutzen und benötigen optimierte Aggregate.



## Turbomaschinen und Power-to-X-Konzepte

Bis 2050 soll Strom in Deutschland zu 80 % aus erneuerbaren Quellen stammen. Zur Netzstabilisierung und in Zeiten geringer Leistung aus regenerativen Kraftwerken werden konventionelle Kraftwerke mit Turbomaschinen weiterhin benötigt. Sie kommen auch verstärkt in geothermischen und solarthermischen Kraftwerken zum Einsatz. Die Projekte in ECOFLEX-turbo beschreiben den Forschungsbedarf, um die Turbinentechnik auf die Anforderungen des künftigen Stromnetzes weiterzuentwickeln.

Die Forschung arbeitet mit den Power-to-X-Technologien bereits an neuen Ansätzen. Hierunter fallen alle Verfahren, temporäre Überschüsse erneuerbaren Stroms zu speichern oder in andere Energieformen zu überführen. Ein bekanntes Beispiel ist Power-to-gas. Dabei wird mit Wasserelektrolyse Wasserstoff erzeugt und durch zugeführtes Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in Methan überführt. In der Turbinenforschung geht es aber bereits um weitergehende Konzepte. Die direkte Nutzung des Wasserstoffs – ohne den Umweg über Methan – bietet einen deutlich höheren Wirkungsgrad.

Bereits heute ist es ein Entwicklungsziel, Turbinen für ein Erdgas auszulegen, dem ein höherer Anteil Wasserstoff beigemischt worden ist. Langfristiges Ziel ist die Entwicklung von Turbinen, die mit reinem Wasserstoff arbeiten. Das wäre ein Schritt weg von einer Energieversorgung auf Basis von Kohlenwasserstoffen, bei der CO<sub>2</sub> frei wird, hin zu einer auf Grundlage von Wasserstoff, bei der nur noch reines Wasser emittiert wird.

Die Turbinenforschung ist ein Teil des Forschungsnetzwerks Flexible Energieumwandlung, das sich Ende Februar 2017 gegründet hat. Hier arbeiten Forschungsinstitutionen und Firmen aus den Bereichen der konventionellen Kraftwerkstechnik, der solarthermischen Kraftwerke und der großen thermischen Speicher gemeinsam an Zukunftsstrategien: Großkraftwerke mit höherer Flexibilität auszustatten, neuartige Großspeicher zu entwickeln, den Einsatz von Wasserstoff in Kraftwerksprozessen umfassend zu erforschen und Solarkraftwerke vor allem wirtschaftlich zu optimieren. Perspektiven zu einer höheren Energieeffizienz bietet auch eine verbesserte Sektorkopplung der konventionellen Kraftwerke mit dem Verkehrssektor oder der Chemieindustrie. Ziel ist, synthetische Treibstoffe und chemische Grundstoffe zu erzeugen. Mit der Flexiblen Energieumwandlung nahm das siebte Forschungsnetzwerk seine Arbeit auf. Dieses komplettiert die bestehenden zu Gebäuden und Quartieren, Systemanalyse, Stromnetze, Erneuerbare Energien, Biomasse sowie Industrie und Gewerbe.

## Projektbeteiligte

» **Programmkoordination:** AG Turbo, Wissenschaftliche Koordinierungsstelle: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Köln, Sabrina Costantini, [sabrina.costantini@dlr.de](mailto:sabrina.costantini@dlr.de)

## Links und Literatur

- » [www.ag-turbo.de](http://www.ag-turbo.de)
- » <https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/flexible-energieumwandlung>
- » <http://kraftwerkforschung.info>

## Mehr vom BINE Informationsdienst

» Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter [www.bine.info/Projektinfo\\_07\\_2017](http://www.bine.info/Projektinfo_07_2017)

*BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter [www.bine.info/abo](http://www.bine.info/abo)*

## Impressum

**Projektorganisation**  
Bundesministerium  
für Wirtschaft und Energie (BMWi)  
11019 Berlin

Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Erik Busche  
52425 Jülich

**Förderkennzeichen**  
03ET7090H, 03ET7091A, 03ET7090J,  
03ET7091N, 03ET7091W, 03ET7092N,  
03ET7092I, 03ET7090M, 03ET7092L,  
03ET7092M

**ISSN**  
0937-8367

**Herausgeber**  
FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut  
für Informationsinfrastruktur GmbH  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

**Autor**  
Uwe Milles

**Urheberrecht**  
Titelbild und Abb. 5: Siemens AG  
Abb. 1: AG Turbo  
Abb. 2: Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG  
Abb. 3: MAN Diesel & Turbo SE

Eine Verwendung von Text und  
Abbildungen aus dieser Publikation ist  
nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion  
gestattet. Sprechen Sie uns an.

## Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?  
Wir helfen Ihnen weiter:

**0228 92379-44**  
**[kontakt@bine.info](mailto:kontakt@bine.info)**

**BINE Informationsdienst**  
Energieforschung für die Praxis  
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185-197  
53113 Bonn  
[www.bine.info](http://www.bine.info)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages