



# Kleine Wirbel mit großer Wirkung

**Innovative Verdichter für effektivere Gas- und Dampfkraftwerke**

von Georg Philipp Kröger

Die Bedeutung der Energie für das tägliche Leben wird uns vor allem dann bewusst, wenn sie einmal nicht verfügbar ist. Fällt der Strom aus, sinkt die Lebensqualität binnen Kurzem. Es wird dunkel, wenn nicht gerade Tageslicht herrscht, warmes Wasser wird zum Luxusgut und die gewohnten Kommunikationsmittel stehen nur sehr eingeschränkt zur Verfügung. Von der industriellen Produktion ganz zu schweigen. Wohlstand und Leistungsfähigkeit einer Nation hängen ganz entscheidend von der Versorgung mit universeller und allgemein verfügbarer Energie ab. Der Energieträger Strom erfüllt diese Voraussetzungen fast perfekt. Strom lässt sich in äußerst vielfältiger Weise einsetzen und mit angemessenen Verlusten fast augenblicklich transportieren.

In Deutschland wurden 2006 über 90 Prozent des Strombedarfs durch Kraftwerke gedeckt, die thermische Energie in Strom umwandeln. Während die großen Nuklear- und Kohlekraftwerke den Grundbedarf decken, werden die flexibleren Gas- und Dampfkraftwerke (GuD-Kraftwerke) hauptsächlich im Regellastbetrieb gefahren, um den zusätzlichen Netzbedarf tagsüber sicher zu decken.

Trotz großer Unterschiede bei Brennstoff und technischer Ausführung ist das Prinzip der Energiewandlung in allen thermischen Kraftwerken gleich: Chemisch gebundene Energie wird bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen wie Kohle oder Erdgas oder bei der nuklearen Spaltung in thermische Energie umgewandelt. Über ein Arbeitsmedium wird die thermische Energie in einer Turbine

in mechanische Energie überführt. Schließlich wandelt ein Generator die mechanische Energie in elektrische Energie um.

In der jüngeren Vergangenheit haben vor allem die kombinierten Gas- und Dampfkraftwerke stark an Bedeutung gewonnen. Sie zeichnen sich besonders durch hohe Effizienz und Umweltverträglichkeit sowie ein großes Maß an Flexibilität aus. Wie deren Herzstück, die Gasturbine, noch effektiver arbeiten kann, erforschen Wissenschaftler des DLR-Instituts für Antriebstechnik in Köln.

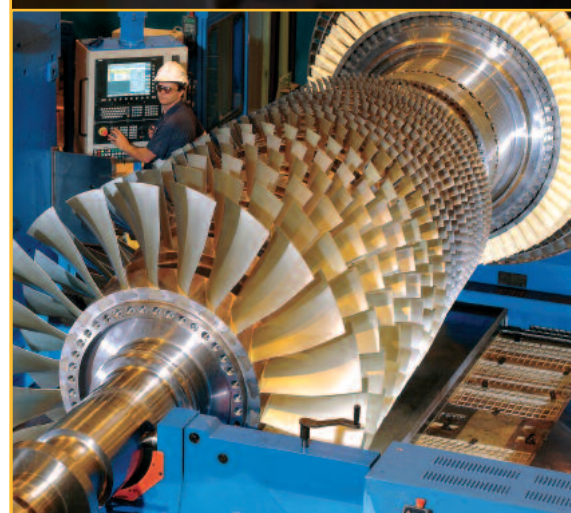
Das Institut für Antriebstechnik des DLR beschäftigt sich im Bereich Verdichtertechnologie hauptsächlich mit der Steigerung des aerodynamischen Wirkungsgrades bei Rotoren und Statoren. Zur Simulation der sehr komplexen dreidimensionalen Strömung wird das hauseigene Simulationsverfahren TRACE ([www.trace-portal.de](http://www.trace-portal.de)) verwendet. Zur Untermauerung der numerischen Ergebnisse stehen dem Institut jeweils ein Prüfstand für Radial- und Axialverdichter sowie ein Gitterwindkanal zur Verfügung.

Der Ingenieur, der einen solchen Verdichter auslegt, kann selbst bei größter Erfahrung nicht alle Parameter und deren Einflüsse überblicken. Um Entwicklungszeiten zu reduzieren und gleichzeitig das mögliche Verbesserungspotential auszuschöpfen, wurde in den letzten Jahren im Institut für Antriebstechnik ein automatischer Optimierungsalgorithmus entwickelt. Dieser Optimierungsalgorithmus erzeugt neue Rotor- und Statorschaufeln sowie passende Gehäuseverläufe.

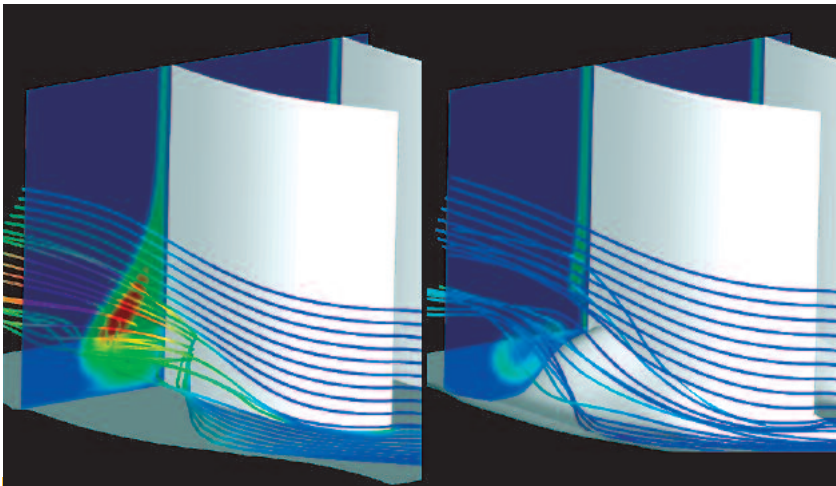
## Funktionsweise von Turboverdichtern

In einer Gasturbine werden zwei Drittel der Energie, die als kinetische Energie in der Turbine zur Verfügung steht, im Verdichter dazu eingesetzt, einen möglichst großen Druckaufbau zu realisieren. In Kraftwerksgasturbinen werden ausschließlich Axialverdichter verwendet, das heißt, die Luft durchströmt den Verdichter in Achsenrichtung. Axialverdichter bestehen wie auch Axialturbinen hauptsächlich aus aufeinander folgenden Reihen von Laufschaufeln (Rotoren) und Leitschaufeln (Statoren).

Die Laufschaufeln werden über die Welle von der Turbine angetrieben und führen dem Arbeitsmedium Luft kinetische Energie zu. Da die Laufschaufeln zueinander in Richtung der Achse einen offenen Diffusor bilden, wird die kinetische Energie der Strömung in den Rotoren gleichzeitig teilweise in statischen Druck umgesetzt. Hinter den Laufschaufeln besitzt die Strömung noch eine unerwünschte Geschwindigkeitskomponente in Richtung der Rotordrehung. In den Leitschaufeln wird die Strömung wieder in die axiale Richtung umgelenkt und dabei weiter verzögert, so dass in den Statorschaufeln ein weiterer statischer Druck aufgebaut wird. Um das gewünschte Gesamtdruckverhältnis zu erreichen, werden mitunter sehr viele Rotor-Stator-Kombinationen, die auch Verdichterstufen genannt werden, hintereinander geschaltet.



Gasturbinenläufer mit Verdichterschaufeln im Vordergrund und Turbinenschaufeln im Hintergrund



Numerische Stromlinien an einem Statorgitter, links original, rechts optimiert (blau eingefärbt – Strömungszonen mit geringen Verlusten, gelb bis rot – Strömung mit wachsenden Verlusten und Ablösung)

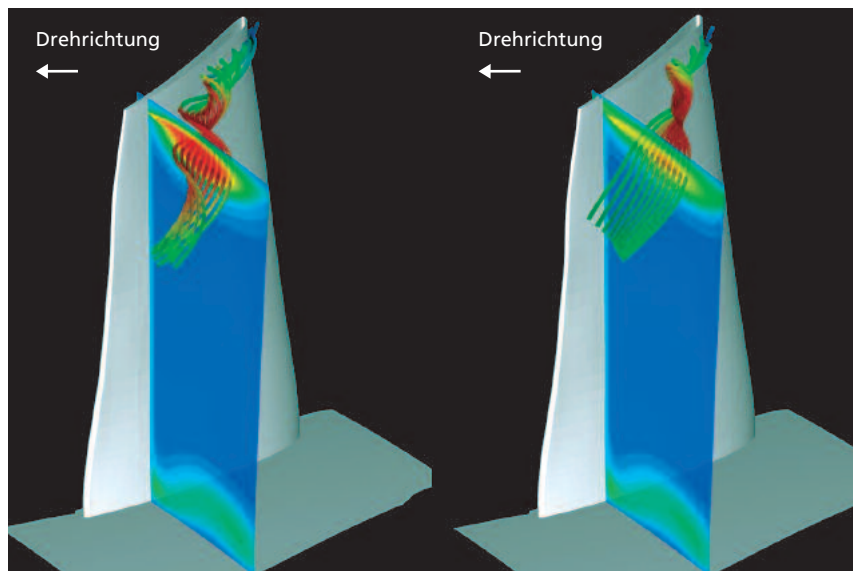
Anschließend wird, ebenfalls automatisch, eine Simulation der Verdichterströmung mit den neu erzeugten Verdichterschaufeln und Gehäusekonturen durchgeführt. Die aerodynamische Bewertung durch den Optimierer schließt sich an die Strömungssimulation an, wobei mehrere Zielgrößen bewertet werden können. Von erfolgreichen Verdichterschaufeln und Gehäusekonturen wird der Parametersatz, zum Beispiel die Konfigurationen mit hohem Wirkungsgrad, weitergegeben, ähnlich wie in der Tier- oder Pflanzenzucht. So werden nach und nach der Problemstellung angepasste, optimierte Verdichterschaufelformen entwickelt, weshalb das Vorgehen auch als Evolutionsstrategie bezeichnet wird. Dabei können die Problemstellungen vielfältig sein. Die Bandbreite reicht von der Detailbetrachtung ausgewählter Strömungsphänomene bis zur Neuauslegung ganzer Verdichterstufen.

Ein aktuelles Forschungsprojekt im Institut für Antriebstechnik beschäftigt sich mit der Formgebung der Nabenseitenwand bei Verdichterleitschau-

feldern. Normalerweise bilden rotations-symmetrische Flächen die Nabengrenzung der Verdichterleitschaufeln. Bei verschiedenen Betriebszuständen des Verdichters treten unterschiedliche Belastungsniveaus der Leitschaufeln auf. Wie jede andere Maschine auch

besitzt der Verdichter einer Turbomaschine einen Arbeitsbereich, in dem ein stabiler Betrieb gewährleistet ist. Gelangt man durch ein hohes Belastungsniveau an die Stabilitätsgrenze, macht sich das bei der Umströmung der Leitschaufel bemerkbar: Die Strömung verwirbelt und löst ab, das heißt, sie folgt nicht mehr der Schaufelkontur. Das hat zur Folge, dass verwirbelte Strömung durch Reibung höhere Verluste verursacht und den „gesunden“ Teil der Strömung behindert, wodurch schließlich die Energieübertragung abgebrochen wird.

Um diese unerwünschte Unordnung im Strömungsfeld des Stators zu verhindern, wurde am Institut für Antriebstechnik der Ansatz verfolgt, keine glatten Schaufel- und Gehäusewände für das Stator-Design zu verwenden. Stattdessen wurde eine komplexe dreidimensionale Geometrie für das Nabengehäuse und die Schaufelwand entwickelt, der die



In dieser Abbildung ist der statische Druck in der Austrittsebene einer Laufschaufel dargestellt. Links bei der Originalschaufel ist ein deutliches Druckverlustgebiet im Gehäusebereich zu erkennen (gelber Bereich mit stark verwirbelten Stromfäden). Im rechten Teil der Graphik konnten durch Änderung der Gehäusekontur das Druckminimum und die Verwirbelung deutlich reduziert werden.

## Das Gas- und Dampfkraftwerk

Strömung wesentlich besser folgen kann. Durch diese Formgebung entsteht ein Strömungsfeld mit deutlich kleinerer Verwirbelung und somit auch geringeren Verlusten.

Maßgeblichen Einfluss auf den Gesamtprozess hat auch der Rotorspalt im Gehäusebereich. Durch die kleine Lücke, die zwischen der Blattspitze der sich drehenden Laufschaufel und dem Gehäuse existiert, strömt kontinuierlich Luft. Sie erzeugt eine starke Verwirbelung, was entsprechende Verluste zur Folge hat. Wie man diese so genannten Spaltverluste verringern kann ist seit Jahren unter Turbomaschinenexperten eine heiß diskutierte Frage. Verbesserungsansätze reichen von der Änderung der Profilierung im Blattspitzenbereich bis zur komplexen Gestaltung des Gehäuses im Bereich der Laufschaufel, was auch „Casing Treatment“ genannt wird. Das DLR-Institut für Antriebstechnik versucht mit Hilfe des 3D-Optimierers die Spaltverluste im Blattspitzenbereich des Rotors deutlich zu verringern.

Mit beiden Entwicklungen kann zur Wirkungsgradsteigerung des Verdichters und der gesamten Gasturbine beigetragen werden. Das Institut für Antriebstechnik leistet mit der aktuellen Forschung im Bereich Turbomaschinen einen wichtigen Beitrag zur effizienten Nutzung der vorhandenen knappen Ressourcen und zur Schonung der Umwelt.

### Autor:

Georg Philipp Kröger ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Antriebstechnik, Abteilung Fan und Verdichter, und forscht auf dem Gebiet der Randzonenoptimierung von Verdichterschaufeln für stationäre Gasturbinen.

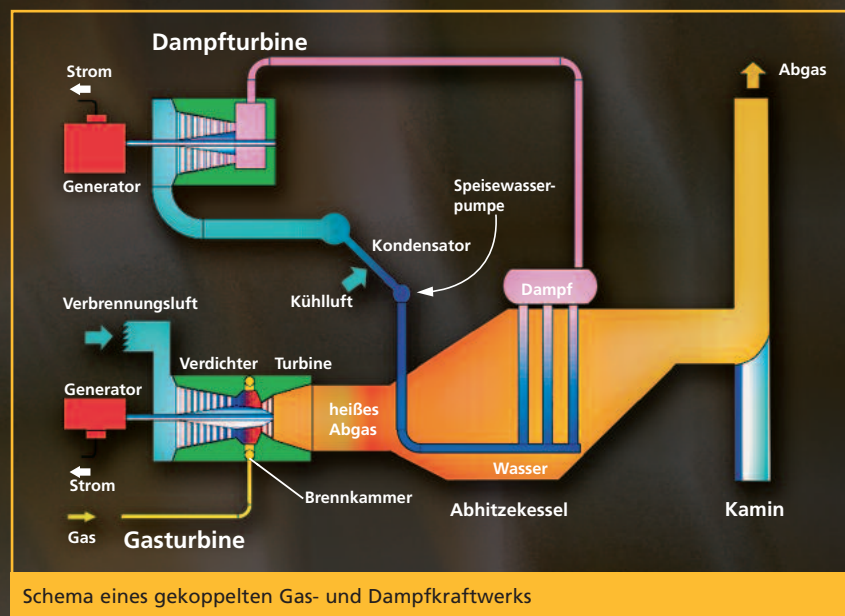
In der Gasturbine, deren Arbeitsmedium Umgebungsluft ist, wird die angesaugte Luft zunächst im Kompressor verdichtet. Das Erhitzen der Luft erfolgt in der integrierten Brennkammer. Meist werden hierbei Erdgas oder Flüssigbrennstoffe wie zum Beispiel Kerosin als Brennstoff verwendet. Anschließend wird die Luft in der Turbine sozusagen wieder entspannt. Die Rotationsenergie der Turbine wird über eine Welle auf den Turboverdichter (Kompressor) und den Generator übertragen.

Etwa zwei Drittel der Energie aus der Turbine werden im Verdichter dazu benötigt, die Luft auf den gewünschten Druck zu verdichten, während ein Drittel der Energie im Generator zu Strom umgewandelt wird.

Die Abgase am Turbinenausstritt besitzen immer noch eine Temperatur von ca. 550 Grad Celsius (°C) und können somit dazu verwendet werden, Wasser, das die Speisewasserpumpe mit großem Druck beaufschlagt, in einem so genannten Abhitzedampferzeuger oder Abhitzekessel zu verdampfen und den Dampf weiter zu erhitzen. Dadurch kühlt sich das Abgas der Gasturbine auf etwa 150 °C ab und wird nach der Rauchgasreinigung schließlich aus dem Kamin an die Umwelt

abgegeben. Der überhitzte Dampf wird einer Dampfturbine zugeführt, die wiederum über eine Welle mit einem Generator verbunden ist. Durch die Nutzung des Abgases der Gasturbine im Dampfprozess kann der Gesamtwirkungsgrad dieser Kombinationskraftwerke auf bis zu 60 Prozent gesteigert werden. Optional können aus dem Dampfkreislauf auch Prozessdampf für die chemische Industrie oder Fernwärme ausgekoppelt werden. Ein weiterer großer Vorteil von Gasturbinenkraftwerken ist die hohe Flexibilität im Betrieb. GuD-Kraftwerke der neuesten Generation benötigen nur etwa eine Stunde Zeit, um unter Volllast zu laufen, während bei Kohle- oder Nuklearkraftwerken etliche Stunden vergehen, bis die volle Leistungsfähigkeit erreicht wird. Damit eignen sich GuD-Kraftwerke sowohl für das Abfangen von Leistungsspitzen im Netz als auch für den Dauerbetrieb bei maximalem Wirkungsgrad.

Im Fokus der Forschung stehen heute die Steigerung des Wirkungsgrads der Gesamtmaschine und der einzelnen Komponenten sowie die Reduktion des Schadstoffausstoßes und die Verbesserung der Schnellstartfähigkeit der Maschine. Auch die flexible Bedarfsanpassung ist Ausgangspunkt vieler Forschungsarbeiten.



Schema eines gekoppelten Gas- und Dampfkraftwerks