

# Heron ganz im Heute



Mit Turbokraft  
die Umwelt schonen

Von Dr.-Ing. Hartmut Krain

DLR-Versuchsverdichter  
radialer Bauart: Stufen-  
druckverhältnis 6:1,  
Umfangsgeschwindigkeit  
2.100 Kilometer  
pro Stunde.

Umweltfragen werden heute in der Öffentlichkeit mit wachsendem Interesse diskutiert. Überraschen mag dabei die Tatsache, dass bewährte Technologien durchaus zur Entschärfung der neuzeitlichen Probleme beitragen können. Dazu zählen Turbomaschinen. Das DLR arbeitet an der Fortentwicklung ihrer Bauart.

Turbomaschinen haben einen festen Platz in unserem Leben. Wir begegnen ihnen als Turbinen zur Energieerzeugung, aber auch zur Energieumwandlung, zum Beispiel als Verdichter zur Druckerhöhung und Förderung von Gasen. Die Energieumsetzung erfolgt in erster Linie über rotierende Laufräder, die dem kontinuierlich strömenden Gas die Energie zuführen (Verdichter) bzw. entziehen (Turbine). Grundlage des Prozesses sind die

Gesetzmäßigkeiten der Strömungsmechanik.

Eine der ersten dokumentierten Anwendungen stammt aus dem Jahre 60 n. Chr. und wird von Heron von Alexandria (griechische Herkunft) erläutert. Er beschreibt eine Dampfturbine in Form einer Kugel, die nach dem Rückstoßprinzip angetrieben wird. Wasser wird in dem unten liegenden Kessel erhitzt und verdampft.

Der Wasserdampf gelangt durch einen der tragenden Schenkel in die Kugel. Zwei entgegengesetzt gebogene Austrittsdüsen sind an der Kugel befestigt, die sie in Bewegung setzen, wenn der Dampf ins Freie entweicht. Heron beschreibt ebenfalls eine mit heißer Luft statt mit Wasserdampf betriebene Anlage. Bei ihr handelt es sich wahrscheinlich um eine der ersten Gasturbinenanwendungen, die vom Prinzip her zur

Energiegewinnung geeignet waren. Die frei werdende Energie konnte allerdings nur den Reibungsverlust decken. Die Abnahme von Nutzleistung, etwa zum Antrieb eines Generators oder Gebläses, stand damals noch nicht zur Debatte.

Die Römer haben als erste den praktischen Nutzen der Turbomaschine erkannt. Um 100 bis 200 n. Chr. verwendeten sie Wasserräder, um Korn zu mahlen. Um 1500 skizziert Leonardo da Vinci einen Rotor, der – in einem Kamin hängend – von aufsteigendem, heißen Gas angetrieben wird. Solche Maschinen werden anfangs allein durch Beobachtung und ohne aerodynamisches Hintergrundwissen entworfen. Erst um 1750 analysieren Leonard und Albert Euler Herons Dampf-Turbine und führen eine Reihe grundlegender Versuche durch, die schließlich im Jahre 1754 in die „Eulersche Turbomaschinengleichung“ münden. Sie wird Grundlage des Turbomaschinenbaus.

### Das Turbo-Prinzip ist alt, der Anspruch an die Verdichter neu

Moderne Gasturbinen sehen anders aus als Herons Gasturbine, basieren aber auf den gleichen Grundprinzipien: Ein Gas wird auf erhöhten Druck gebracht (Kompressor), unter Energiezufuhr erhitzt (Brennkammer) und anschließend expandiert (Turbine). Die von der Turbine abgegebene Leistung wird aufgeteilt. Sie dient zum Antrieb des Verdichters und die verbleibende „Nutzleistung“ wird zum Antrieb eines Generators, Rotors, Gebläses etc. verwendet.

Das Herzstück der modernen Gasturbine ist der Turbosatz, bestehend aus Kompressor und Turbine. Diese

Komponenten werden in der Praxis in unterschiedlichen Bauweisen gefertigt und können losgelöst voneinander betrieben werden.

Die Nachfrage nach Turbomaschinen und insbesondere nach Kompressoren wächst Ende des 19. Jahrhunderts, als mit dem industriellen Aufschwung ein erhöhter Bedarf an Druckluft entsteht. Impulse zur Weiterentwicklung dieser Maschinen kommen auch heute noch aus unterschiedlichen Richtungen. Relativ neu – und teilweise sehr speziell – sind die Anforderungen an Verdichter, die in fortschrittlichen, umweltfreundlichen Kraftwerken eingesetzt werden sollen.

### Wirkungsgrad rauf, Brennstoffverbrauch runter

Die Verbrennung fossiler Energieträger heizt bekanntlich unseren Planeten auf. Die konventionelle Stromversorgung mit Hilfe fossiler Energieträger ist hier neben dem Verkehr und der Heizung mit zirka 35 Prozent ein Hauptverursacher. Denn auf diesem Wege gelangen große Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) in die Atmosphäre. Strategien zur Minderung oder sogar Verhinderung dieses Ausstoßes sind gefragt.

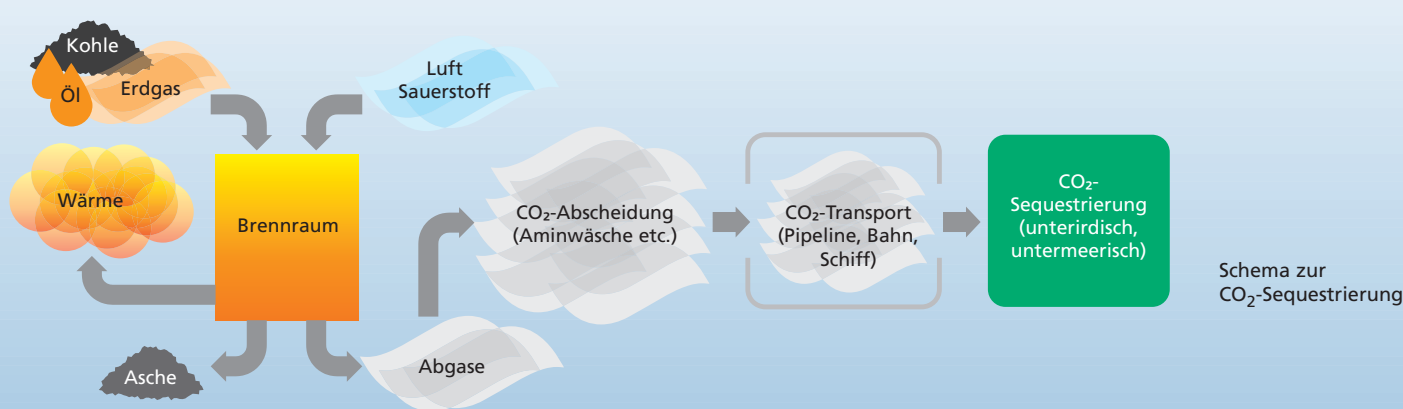
Eine Effizienzsteigerung fossil befeuerter Kraftwerke kann zu einer Minderung der  $\text{CO}_2$ -Problematik beitragen. Der mittlere Wirkungsgrad bestehender Kohlekraftwerke liegt augenblicklich bei zirka 32 Prozent. Er kann bis zum Jahre 2020 mit moderner Technik auf etwa 50 Prozent

angehoben werden. Turbomaschinen spielen in diesem Zusammenhang eine entscheidende Rolle. Durch Änderung der Prozessführung, zum Beispiel in Form von kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozessen (GuD), an denen Turbomaschinen entscheidenden Anteil haben, werden 60 Prozent Wirkungsgrad angestrebt. Solche Wirkungsgrade sind allerdings nur zu erreichen, wenn die Turbo-komponenten (Verdichter, Turbine) der beteiligten Gasturbinen hoch entwickelt sind. Hier eröffnen sich Wege, die Umwelt zu schonen. Mit Wirkungsgradsteigerungen geht bei gleicher Leistungsabgabe eine Minderung des Brennstoffeinsatzes einher. Das spart einerseits Ressourcen und trägt andererseits zu einer geringeren Belastung der Umwelt bei. Verhindert wird die  $\text{CO}_2$ -Emission damit aber nicht. Deshalb gewinnen Konzepte an Bedeutung, die eine Abtrennung des Treibhausgases  $\text{CO}_2$  noch im Kraftwerk und eine für die Atmosphäre neutrale Deponierung zum Ziel haben.

### Abscheidung und Transport von Kohlendioxid

Der Ausstoß von Treibhausgasen bei der Verbrennung fossiler Energieträger treibt den Klimawandel voran. Laut EU-Beschluss vom März 2007 soll der Anteil dieser Gase bis zum Jahre 2020 EU-weit um 20 Prozent unter den Wert von 1990 gesenkt werden. Gleichzeitig soll der Anteil erneuerbarer Energien am europäischen Energiemix auf 20 Prozent steigen. Die Abtrennung von  $\text{CO}_2$  vom Abgas noch im Kraftwerk und die anschließende Speicherung in geologischen Formationen werden zu einer Schlüsseltechnologie, ohne sie sind die gesteckten Ziele kaum zu erreichen. Die aufgezeigte Strate-





Schema zur CO<sub>2</sub>-Sequestrierung

gie – oft auch als „Sequestrierung“ bezeichnet – wird auch im internationalen Rahmen und von Kohle produzierenden Schwellenländern wie Indien, China und Südafrika interessiert verfolgt. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) entsteht bei der Verbrennung fossiler Energieträger in mehr oder weniger großem Umfang. Die Zusammensetzung der Abgase hängt vom gewählten Verfahren ab. Besonders reines CO<sub>2</sub> im Abgas erhält man bei einer Verbrennung in reinem Sauerstoff (OxyFuel-Verfahren). Diese Technik hat allerdings auch ihren Preis, der in erster Linie durch die Erzeugung des Sauerstoffs im großtechnischen Stil bedingt ist. Gedacht wird an die herkömmliche Luftzerlegung unter hohem Druck (Linde-Verfahren) und an die Membrantechnologie, mit der bei Temperaturen oberhalb von 850 Grad Celsius reiner Sauerstoff aus der Atmosphäre getrennt werden kann. Kraftwerke auf dieser Basis erfordern zur Gewinnung und zum Transport des Sauerstoffs die Entwicklung modifizierter Verdichter.

Bei Verbrennung in natürlicher Luft treten im Abgas weitere Verunreinigungen auf, die vor dem Abtransport des CO<sub>2</sub> separiert werden müssen. Für dieses als „Carbon Capture and Storage (CCS)“ bezeichnete Verfahren bietet sich weltweit die Speicherung im Untergrund an. In Deutschland stehen für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung ehemalige Erdgasfelder sowie tief gelegene, nicht abbaubare Kohleflöze und Salzformationen zur Verfügung.

Vorteilhaft sind auch sehr tief liegende (1.000 bis 4.000 Meter), mit Salzwasser gefüllte geologische Schichten (salinare Aquifere), die durch ihre Formation gegenüber der Umwelt abgeschlossen sind. Speicher dieser Art sind weltweit nur begrenzt verfügbar. Deshalb wird die neue Technologie auch nur zeitlich begrenzt anwendbar sein. Wenn der gesamte CO<sub>2</sub>-Ausstoß deutscher Kraftwerke nach dieser Strategie entsorgt würde, liegt für Deutschland die Schätzung bei 70 bis 100 Jahren.

Zur Entsorgung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> gibt es derzeit zwei Szenarien:

1. Das CO<sub>2</sub> wird über Pipelines zu den Endlagern transportiert und dann unter hohem Druck in die Endlager eingebracht.
2. Das CO<sub>2</sub> wird direkt nach der Abscheidung im Kraftwerk verflüssigt, mit Schiffen zu den Endlagern transportiert und eingepumpt.

Hier ist zu berücksichtigen, dass in großen Industrienationen wie Deutschland große Mengen zu entsorgen sind und dass die zur Verflüssigung des Kohlendioxids erforderlichen Drücke sehr hoch sein müssen (110 bar). Der Aufwand, angefangen bei der Gewinnung des reinen CO<sub>2</sub> aus dem Abgas bis hin zur Entsorgung, ist deshalb beträchtlich und nur zu rechtfertigen, wenn effizient und umweltfreundlich gearbeitet wird. Die Herstellung von reinem Sauerstoff, die Abscheidung des CO<sub>2</sub> aus dem Abgas, der Abtransport und die Verflüssigung des CO<sub>2</sub> verschlin-

gen sehr viel Energie und sind kostspielig. Schätzungen gehen dahin, dass der Energieaufwand für diesen Prozess zwischen 10 und 20 Prozent des Energieaufwands für das Gesamtkraftwerk liegt. Sehr pessimistische Schätzungen kommen sogar zu dem Resultat, dass sich der Strompreis verdoppeln würde. Das Kraftwerk würde damit zwar umweltfreundlicher, aber letztlich weniger effizient.

Die aktuelle Diskussion zeigt, dass die Akzeptanz der neuen Technologie nicht ungeteilt ist. Sie wird aber steigen, je geringer der Aufwand wird. Etwa die Hälfte des Mehraufwands an Energie und ein großer Teil der zusätzlichen Investitionskosten werden von den benötigten Kompressoren verschlungen. Wenn es gelingt, diese Komponenten kostengünstiger herzustellen und sich die Betriebskosten dank besserer Wirkungsgrade verringern, wird die Bereitschaft wachsen, die neue Technologie anzunehmen. Die Turbomaschine wird dazu aber in einigen Bereichen zu modifizieren und den neuen Anforderungen anzupassen sein.

### Mehrstufige Radialverdichter

Verfahrenstechnisch werden die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus den Verbrennungsgasen und die Entsorgung dieser Rückstände im Mittelpunkt stehen. Im Fall des OxyFuel-Prozesses geht der Verbrennung eine Luftzerlegung auf hohem Druckniveau für große Volumenströme voraus. Für die Ver-

flüssigung des in großen Mengen aus dem Abgas abgetrennten CO<sub>2</sub> werden ebenfalls hohe Drücke benötigt. Große Mengen CO<sub>2</sub> sind durch Pipelines zu transportieren.

Für all diese Prozesse werden geeignete Turbokompressoren benötigt. Um das geforderte hohe Gesamtdruckniveau zu erreichen, kommen mehrstufige, einwellige Radialverdichter zum Einsatz. Die benötigte Verdichterleistung solcher Anlagen liegt bei bis zu 20 Prozent der Kraftwerksbruttoleistung, sodass die Betriebs-, aber auch die Investitionskosten des Verdichterstrangs einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten dieser Kraftwerke ausmachen. Kostengünstigere Verdichter können damit einen spürbaren Beitrag zu besserer Wirtschaftlichkeit leisten. Insbesondere die erforderlichen Radialverdichter mit ihren heute noch vergleichsweise niedrigen Wirkungsgraden, die darüber hinaus oft recht voluminös und teuer sind, haben energetische und wirtschaftliche Potenziale, die erschlossen werden können. Die Reduktion von Fertigungs- und Betriebskosten dieser Verdichter erfordert erhöhte Entwicklungsanstrengungen.

Für einstufige Verdichter mit sehr hohen Stufendruckverhältnissen liegen beim DLR solche Erfahrungen bereits vor. Eine sehr kompakt zu bauende Radialverdichterstufe ist hier bereits für Luft erfolgreich getestet worden. Stufendruckverhältnisse um 6:1 erfordern Umfangsgeschwindigkeiten um 2.100 Kilometer pro Stunde am Radaustritt, was den Einsatz hoch belastbarer Werkstoffe voraussetzt. Mit den hohen Umfangsgeschwindigkeiten des Laufrads gehen hohe Strömungsgeschwindigkeiten in den Strömungskanälen der Stufe einher.

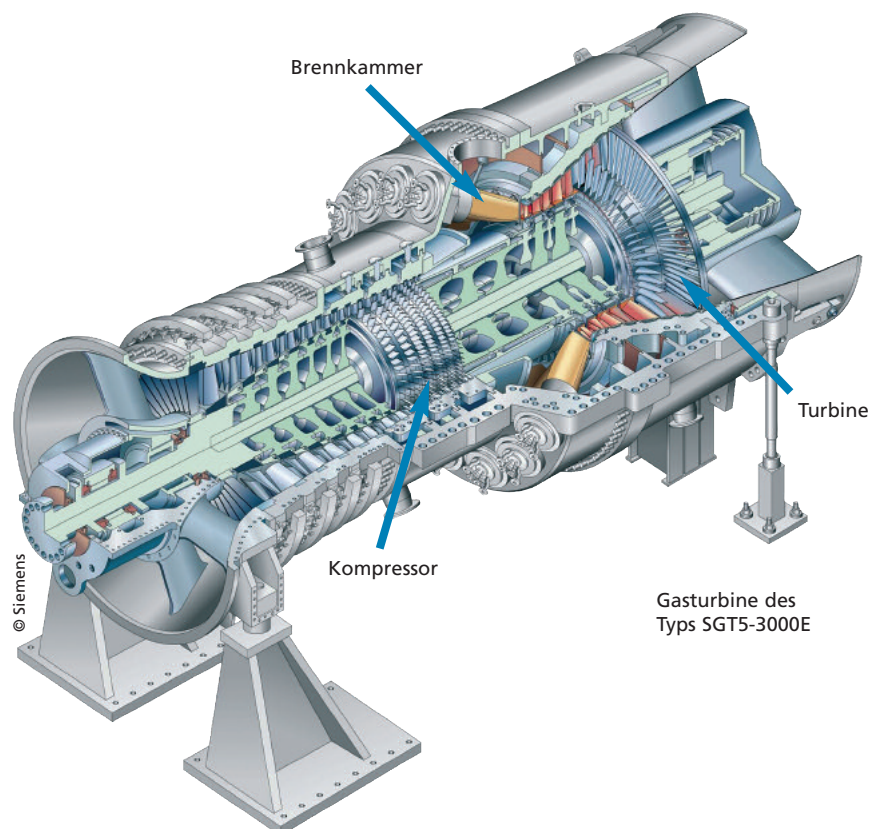
Sie verursachen Überschallströmungen im Lauf- und Leitrad, die mit Verdichtungsstößen, Wirkungsgrad einbußen und Lärmentwicklung verbunden sind. CO<sub>2</sub> hat andere Stoffeigenschaften als Luft, wodurch sich die Überschallproblematik im Vergleich zu Luft verschärft. Lauf- und Leitrad werden durch ein Gehäuse gegenüber der Umwelt abgedeckt.

Um gute Wirkungsgrade zu erreichen, darf der Spalt zwischen dem rotierenden Rad und dem Gehäuse nicht zu groß sein. Der DLR-Versuchsverdichter hat eine Auslegungsdrehzahl von 50.000 Umdrehungen pro Minute, der Spalt zwischen Laufrad und Gehäuse beträgt zirka 0,5 Millimeter. Heron von Alexandria würde staunen, denn an solche Betriebsbedingungen wird er bei seiner Erfindung nicht gedacht haben. Bei der Einführung der neuen Kraftwerkstechnik werden so hoch belastete Verdichter zunächst nicht im Vordergrund stehen. Sie können aber den Weg für die Weiterentwicklung fortschrittlicher, stationärer Kraftwerksverdichter weisen und ebnen.

Mit den heute verfügbaren, dreidimensionalen Rechenmethoden und optischen Messtechniken lassen sich Strömungsabläufe in den mit Überschall durchströmten Kanälen solcher Verdichter sichtbar machen, die sich früher einem Zugang entzogen. Dadurch sind Wirkungsgradsteigerungen und kompakte Bauweisen möglich, die zu Einsparungen an Betriebs- und Anschaffungskosten und letztlich zur Entlastung der Umwelt beitragen. Kurz- und mittelfristig werden die gesteckten umweltpolitischen Ziele nur erreichbar sein, wenn die Frage nach „Turbomaschinen und Umwelt“ nachdrücklich mit „Ja“ beantwortet und das hinter diesem Thema immer wieder auftauchende Fragezeichen durch ein eindeutiges Ausrufezeichen ersetzt wird.

**Autor:**

Dr.-Ing. Hartmut Krain ist am DLR-Institut für Antriebstechnik zuständig für Forschung und Entwicklung von Radialverdichtern.



Gasturbine des Typs SGT5-3000E