

Wie der axiale Turboverdichter laufen lernte

Zu Anfang des 20. Jahrhunderts beginnen Dampfturbinen wegen ihrer Möglichkeiten, größere Leistungen für stationäre Antriebe zur Verfügung zu stellen, in diesem Anwendungsgebiet der Dampfmaschine den Rang streitig zu machen. Gasturbinen existieren zwar schon in den Köpfen von Ingenieuren und auf dem Papier, jedoch sind die Maschinen von F. Stolze in Berlin (1900-1904), Aegidius Elling in Norwegen (1903) sowie René Armengoud und Charles Lemâle in Paris (1905-1906) nicht so gebrauchsfähig, dass sie sich als Antrieb schon durchsetzen können. Der Hauptgrund für die anfänglichen Schwierigkeiten liegt dabei an niedrigen Wirkungsgraden der verfügbaren Turboverdichter. So wird die erste Gasturbine (Holzwarth-), die kommerziell angeboten wird, pulsierend durch Ventile mit Brennluft gespeist und arbeitet mit explosionsartiger Verbrennung, vergleichbar einem Kolbenmotor. Erfolgreiche Turbokompressoren für die kontinuierliche Verdichtung von Luft und Gasen werden in dieser Zeit nach dem Patent des Franzosen Auguste Rateau gebaut (1899), der mit radial von der Nabe zum Außenrand durchströmten Läufern bei der Verdichtung die Fliehkraft wirken lässt, um ein Rückströmen in Folge des Gegendrucks zu verhindern. Nach diesem Prinzip haben sich Zentrifugalpumpen und -kompressoren bis heute in industriellen Anwendungen behauptet (Abbildungen 1 bis 3). So waren auch die mit Zentrifugalverdichtern ausgestatteten Gasturbinen von Elling und Armengoud-Lemâle die ersten, die eine Leistungsabgabe an der Maschinenwelle erreichten.



Abbildung 1:
33-stufiger Zentrifugalverdichter von 1910: $10\,000\text{m}^3/\text{h}$ Durchsatz bei 1bar Eintrittsdruck, Austrittsdruck 7bar, [1]



Abbildung 2
3-stufiger Getriebe-Zentrifugalverdichter von 1993, der die doppelte Fördermenge auf den gleichen Enddruck verdichtet, wie die Maschine aus Abbildung 1, [1]

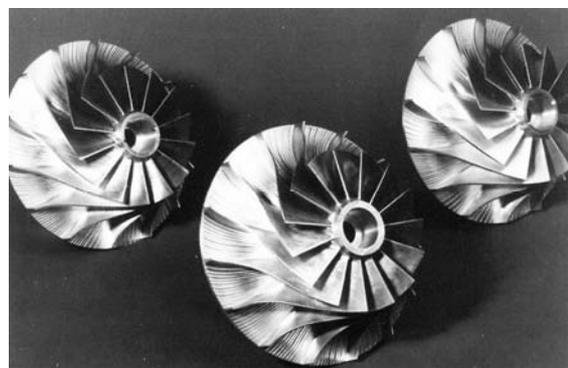


Abbildung 3
3 Laufräder des Getriebe-Zentrifugalverdichters aus Abbildung 2, [1]

Der aufkeimende Gedanke

Mit axial durchströmten Dampfturbinen verkauft der Engländer Charles A. Parsons erfolgreiche Antriebsmaschinen seit 1884 und unternimmt auch im Jahre 1900 den Versuch, einen axial durchströmten Turbokompressor zu testen, gibt dieses Vorhaben aber wegen ungenügender Ergebnisse auf. Parsons ist nicht der einzige, dem dieser Gedanke beim Anblick seiner schräg gestaffelten Schaufeln in den Rädern seiner Dampfturbinen nach Überdruck-Bauart kommt. Unter den Besuchern der Welt-Energie-Konferenz 1924 in London sind auch der 36-jährige Georges Darrieus, der seit 12 Jahren in der Compagnie Eléctro-Mécanique (CEM) bei Paris tätig ist, und der gleichaltrige Jean von Freudenreich, der bei der Firma Brown Boveri & Cie (BBC) in Baden bei Zürich an thermischen Turbomaschinen arbeitet. Beide sind von ihren Firmen, die zusammengehören, an die Konferenz abgeordnet worden. Auf der technischen Ausstellung sehen sie die geöffnete Dampfturbine Parsons' mit ihrer Schaufelstellung von ca. 45° Staffelung für einen Reaktionsgrad von 0,5, d.h. die Hälfte der Entspannung des Dampfes findet im Laufrad, die andere Hälfte im Leitrad statt. (Abbildung 4)

Auch v.Freudenreich und Darrieus kommen auf den Gedanken, das Turbinenprinzip auf Kompressoren anzuwenden. Beide wissen nicht, dass Parsons bereits 1900 mit diesem Versuch keinen Erfolg hat, diesen Versuch aber auch mit zugestaffelten Laufreihen und aufgestaffelten Leitreihen unternommen hat, (Abbildung 5)

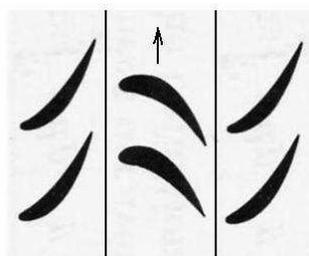


Abbildung 4
Schaufeln einer Überdruck-Dampfturbine, die als gedanklicher Katalysator für die Idee des Axialverdichters gewirkt haben.

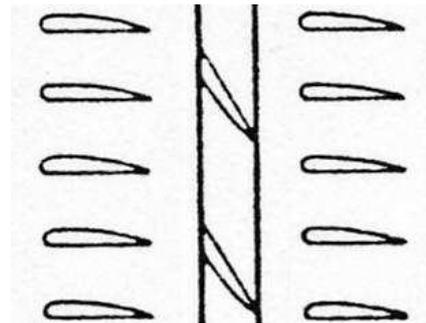


Abbildung 5
Schaufelplan des erfolglosen axialen Versuchsverdichters von Parsons aus dem Jahre 1900

Eine Aufzeichnung Darrieus' auf einem Skizzenblatt vom 26. April 1924 belegt, dass er seine Überlegungen auf Ergebnisse der Tragflügeltheorie aufbaut. Eine weitere Akte datiert vom 25. November 1925 und zeigt eine mehrstufige Anordnung mit einer Folge von gegenläufigen Schaufelreihen, konzentrisch angeordnet, in der er die Stufen zentrifugal durchströmen lässt, ähnlich der Ljungström-Turbine.

Ein erster vierstufiger Versuchsverdichter

Im Jahre 1926 beginnen im BBC-Werk Baden bei Zürich die Arbeiten für einen kleinen axialen Versuchsverdichter, von dem kaum Unterlagen überliefert sind. Ein Blatt von Darrieus stammt vom Juli 1926, enthält aber andere Zahlen als die Versuchsausführung. Die ersten Schaufeln sind unverwunden und bestehen aus gleichen, symmetrisch angeordneten, Lauf- und Leitreihenprofilen, die für alle Stufen identisch sind und zwischen einer Rotorwelle von 430mm und einem Zylindergehäuse von 530mm Innendurchmesser arbeiten. Ein Eintritts-Leitgitter bereitet die Strömung für die

erste Laufreihe vor. Eine nachgeschaltete Leitreihe, die eine axiale Abströmung vorgeben soll, wird wieder entfernt, da sie angeblich nichts nütze. Die Ergebnisse der ersten Beschau felung werden 1927 von dem damals 23-jährigen Walter Girsberger unter Versuchslabor-Bericht Nr. TFVL 602 zusammengestellt und enttäuschen. Die Auslegung beruht auf Tragflügelerfahrungen. Die älteste verfügbare Unterlage dazu ist eine Veröffentlichung von 1922 und stammt aus einer Anwendung in Kaplan-Wasserturbinen, deren Anströmung nahezu frei von Fluktuationen ist. Nach Durchlaufen einiger Schaufelreihen im Axialverdichter ist die Strömung aber nicht mehr homogen, und es entstehen Zweifel, ob sich die Profile in den hinteren Stufen noch wie bei Tragflügeln verhalten. Die ersten Messungen führen zu der Extrapolation, dass nach einer 7.Stufe keine Druckerhöhung mehr erreichbar ist. Das nährt Zweifel an der Durchführbarkeit des Vorhabens. Wohl wegen der unverwundenen Schaufelblätter und daraus verursachter falscher Anströmung ist die gemessene Geschwindigkeitsverteilung sehr unregelmäßig. 1931 fällt doch die Entscheidung, eine neue Beschau felung zu bauen. Inzwischen ist Claude Seippel 1928 von einem mehrjährigen USA-Aufenthalt (1923-1928) zu BBC nach Baden zurückgekehrt.

Abbildung 6

Claude SEIPPEL, 1922-1923 und 1928-1965 bei BBC Brown Boveri & Cie in Baden bei Zürich als Diplomingenieur tätig, ist der maßgebliche Wegbereiter der erfolgreichen Axialverdichtertechnik, [Bild: Brown Boveri Hauszeitung 3/1980]



In den USA arbeitet er zuvor in dem Ingenieurbüro von E.H. Sherbondy in Cleveland, Ohio, an Drehmomentwandlern, wie sie später in Automatikgetrieben von Kraftfahrzeugen Verwendung finden. Gestützt auf Tragflügelmessungen von Eiffel in Paris und bei NACA (National Advisory Committee for Aeronautics, dem Vorgänger der NASA) planen sie, einen Axialkompressor für die Aufladung großer Automotoren zu bauen. Aus dem Auftrag wird jedoch nichts, und Claude Seippel kehrt in die Schweiz zurück.

Die zweite vierstufige Versuchsbeschau felung

In der neuen Versuchsbeschau felung streben die Ingenieure an, eine besser geordnete Strömung zu erreichen, in dem sie die Lauf- und Leitschaufeln nicht mehr in gleichartigen Profilen symmetrisch zueinander anordnen. Sie beschließen die Strömung axial aus jeder Stufe austreten zu lassen, und das über die gesamte Höhe des Schaufelblattes. Die Laufschaufeln werden so verwunden, dass die Axialgeschwindigkeit längs der Höhe konstant bleiben soll. Damit entfällt auch die Notwendigkeit einer vor- und einer nachgeschalteten Leitreihe (Abbildung 7). Mit 83% Strömungswirkungsgrad erreichen die Ergebnisse erheblich bessere Werte (BBC-Bericht TFVL 902 vom 24. Mai 1932) und liefern die Erkenntnis, dass die Strömung sich durch die Stufen hindurch nicht verschlechtert. Damit ist der Weg frei für eine kommerzielle Anwendung. Weiteren Versuchen an der ersten Beschau felung mit größerer Profilkrümmung und enger gepackten Schaufeln ist kein Erfolg beschieden, so dass die nächsten Maschinen wieder mit undeformierten Tragflügelprofilen ausgestattet werden.

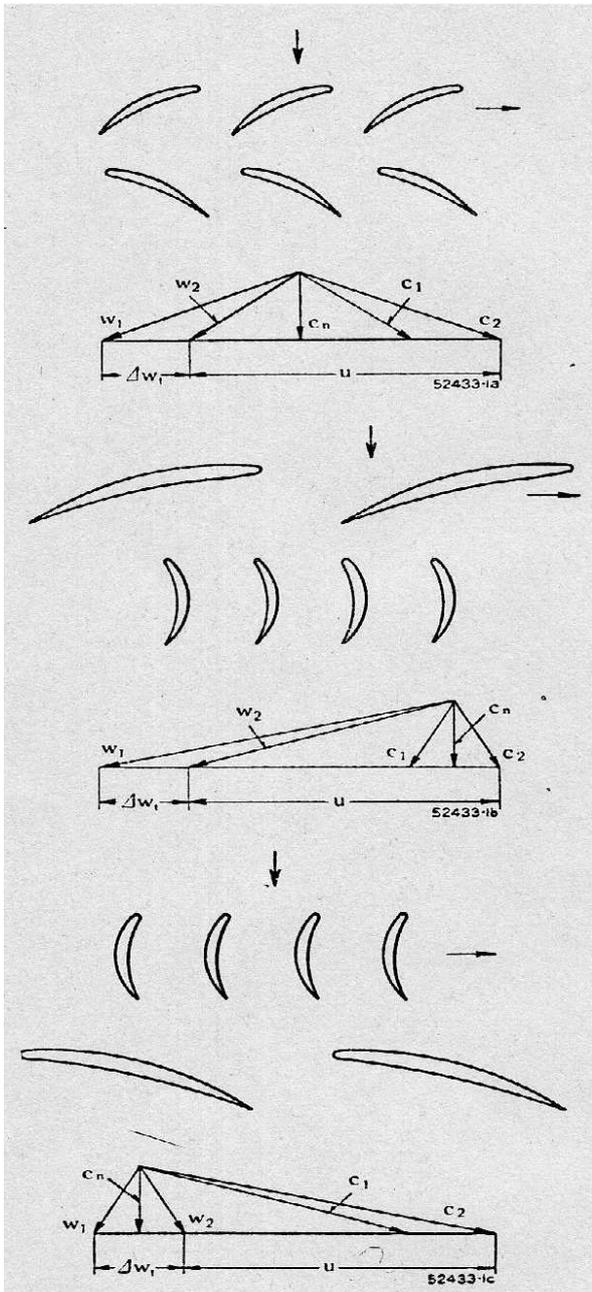


Abbildung 7
 Gebläse-Beschaufelungen und zugehörige Geschwindigkeitsdreiecke.
 w_1, w_2 = Relative Ein- und Austrittsgeschwindigkeit in Laufreihe.
 c_1, c_2 = Absolute Ein- und Austrittsgeschwindigkeit in Leitreihe.
 c_n = Normalkomponente. Δw_t = Tangentiale Umlenkung.
 u = Umfangsgeschwindigkeit
 a) Reaktion 0,5. b) Reaktion 1. c) Reaktion 0, [3, Abb.7].

Der erste industrielle Einsatz

Walter G. Noack, ein schöpferischer Erfindergeist seiner Zeit, entwickelt den druckgefeuerten Dampferzeuger bei BBC, der unter dem Namen "Velox-Kessel" Verbreitung findet. In Fortsetzung seiner Arbeiten an der Holzwarth-Explosionsturbine mit intermittierender Verbrennung legt er den Velox-Kessel mit Gleichraumverbrennung aus. Angeregt durch die lästigen Betriebsgeräusche einer Holzwarth-Turbine in der Nachbarschaft gelingt es den Ingenieuren vom Versuchslabor (Jean von Freudenreich, Curt Niehus, Hans Pfenninger, Claude Seippel), den Direktor und seinen Stellvertreter (Adolf Mayer, Paul Faber) von der Eignung des Axialverdichters als Mittel zur Druckaufladung des Velox-Kessels zu überzeugen. Die Herren gehen das Risiko ein und so erhält die Bestellung Nr.72862 vom 18. Februar 1932 der Société Métallurgique de Normandie für die Hochofenanlage in Mondeville einen gichtgasgefeuerten Dampfkessel von 12t/h Dampfleistung je einen Axialverdichter für Brennluft und einen für Gichtgas. Deren Ausführung lehnt sich wenig an den 4-stufigen Versuchsverdichter an und wird mit 4 verschiedenen Beschaufelungen erprobt, um Erfahrungen zu sammeln: 1.) Reaktionsgrad 1; 2.) höhere Axialgeschwindigkeit; 3.) Reaktionsgrad 0,5; 4.) Reaktionsgrad größer 1. Mit Reaktionsgrad 0,5 kommt der beste Wirkungsgrad wegen geringerer Strömungsumlenkung, jedoch erlaubt Reaktionsgrad 1 den höheren Druck zu fahren. Probleme bietet jeweils der heiße Zustand der Maschine, da die Volumenzunahme des Gases höheren Gegendruck erzeugt und die Strömung mit lautem Knall zurückschlägt (Verdichterpumpen). Eine zur Sicherheit zu den 10 Stufen vorgesehene 11.Stufe im Axialverdichter schafft Abhilfe und bewahrt die Anlage davor, ein unrühmliches Ende auf dem Schrotthaufen zu nehmen.

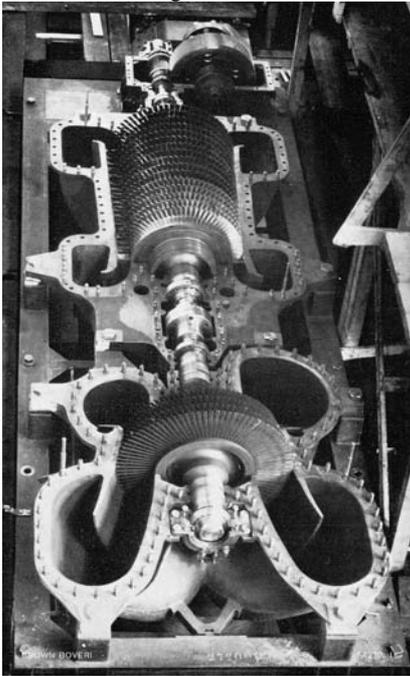


Abbildung 8
Der Axialverdichter zur Aufladung einer der ersten Velox-Dampfkessel wird durch eine 4-stufige Gasturbine mit Reaktionsbeschau-
felung angetrieben. Die kinetische Energie am Austritt wird bereits in einem Diffusor zu-
rückgewonnen [4, Abb.12]

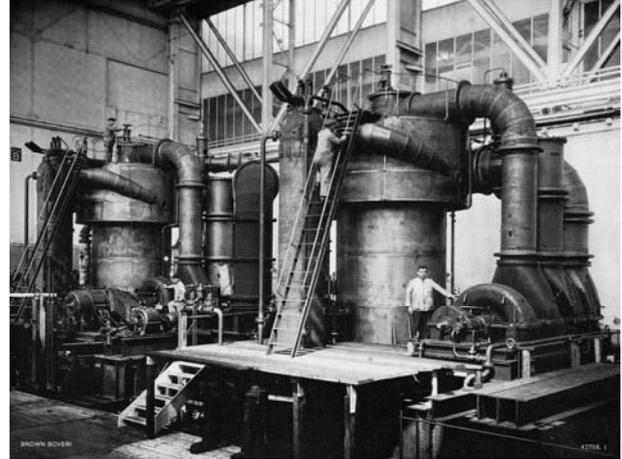


Abbildung 9
Zwei Velox-Kessel während der Montage bei Brown Boveri im Jahre 1936, [4, Abb.13].

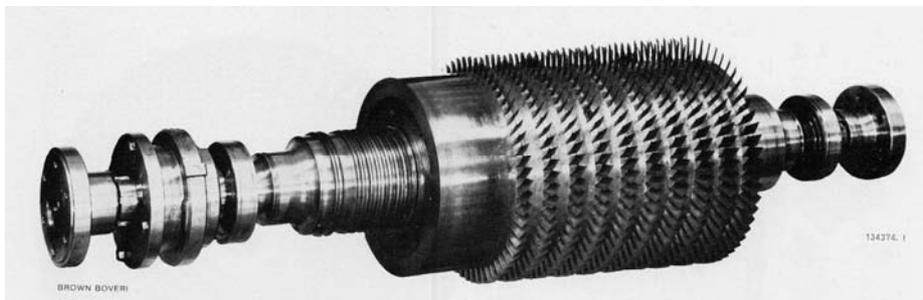


Abbildung 10
Rotor des 10-stufigen Axialverdichters, den Brown Boveri Anfang der 30er Jahre in Baden
(Schweiz) entwickelt. Der Temperaturanstieg pro Stufe liegt bei ca.8°C, [4, Abb.11 S.6]

Das Gesetz für die Schaufelverwindung über der Blatthöhe

Als Verwindungsgesetz für die Beschau-
felung mit Reaktionsgrad 1 wird am Schaufelaustritt die Gasumfangsgeschwindigkeit auf die halbe Schaufelumfangsgeschwindigkeit gesetzt. Für Reakti-
onsgrad 0,5 wird dort in der symmetrisch gestaffelten Beschau-
felung die Gasumfangsgeschwindigkeit null gesetzt. Darrieus empfiehlt in einem französischen Patent zur Beschau-
felung mit Reakti-
onsgrad 1/2, die Strömung am Eintritt durch 3 bis 4 Stufen höheren Reaktionsgrades auf die dahinter-
liegenden Stufen vorzubereiten. Otto Zweifel, nach 1945 Professor an der ETH Zürich, empfiehlt
das später in Form einer Vor-Laufreihe. Heute besteht die Erkenntnis, am besten die relative An-
ström-Machzahl am Eintritt des ersten Laufrades mit einer Vorleitreihe zu senken, in den Eintritts-
stufen von höherem Reaktionsgrad (0,7) auf niedrigeren (0,5) in den Folgestufen überzugehen und
zum Austritt hin den Reaktionsgrad wieder anzuheben (1). Unter heutigen Bedingungen hält sich

die damit verbundene Bearbeitungszeit für ungleichmäßige Stufenauslegung in vertretbarem Rahmen und wird deshalb auch zunehmend angewendet.

Die Tragflügelprofile werden ersetzt

Jakob Ackeret kommt 1931 als Leiter des aerodynamischen Instituts von der Firma Escher-Wyss zur ETH Zürich. Beim Bau seiner beiden Windkanäle kommen Axialverdichter von BBC als Luftversorgung erstmals mit neuen Göttinger Profilen (G 265) zum Einsatz, die für den Betriebsbereich des Windkanals günstigeren Widerstandsverlauf bieten. In diesem Zusammenhang entsteht 1934 an der ETH Zürich mit der Dissertationsschrift von Curt Keller: "Axialgebläse vom Standpunkt der Tragflügeltheorie" die erste veröffentlichte Literatur zum BBC-Axialverdichter.

In der folgenden Zeit findet der Axialverdichter Verbreitung in den Anlagen mit Velox-Kessel und ab 1939 in den neu entstehenden stationären Gasturbinen als Wellenantrieb. Auf der Grundlage der Dissertation von C.Keller beginnen auch andere Firmen mit Arbeiten am Axialverdichter im Rahmen ihrer Gasturbinenentwicklungen. Darunter sind auch Escher-Wyss und Sulzer, die zu dieser Zeit noch direkte Konkurrenten von BBC sind. Wegen des größeren Luftdurchsatzes bei kleiner Stirnfläche verdrängt der Axialverdichter schließlich auch weitgehend den Radialverdichter, mit dem die Gasturbine ihren Ausgang bei den Luftfahrtantrieben genommen hat.

Mit der gezielten Weiterentwicklung in kleinen, wohlüberlegten technologischen Schritten ist so über die Jahre ein Fortschritt erreicht worden, ohne die täglichen Anforderungen des Marktes an die Wettbewerbsfähigkeit aus den Augen zu verlieren.

Literatur:

- [1] PGW Turbo
Festschrift "100 Jahre in Leipzig, 1898-1998". Schiele PGW Turbomaschinen GmbH, Klingenstr.16-18, D-042249 Leipzig.
- [2] Darrieus, Georges
Hommage au Dr Claude Seippel. S.2-4 in: Festschrift "Dr.h.c. Claude Seippel zum 70.Geburtstag", Sonderdruck Schweizerische Bauzeitung aus dem 88.Jahrgang 1970.
- [3] Seippel, Claude
Die Entwicklung der Brown Boveri-Axialverdichter. Brown Boveri Mitt. 27(Mai 1940)5, 108-113.
- [4] Pfenninger, H.
The Evolution of the Brown Boveri Gas Turbine. Publication presented to the visitors to the International Gas Turbine Conference and Products Show of the American Society of Mechanical Engineers, Zurich, March 13-17, 1966. [Brown Boveri Print 3217E-II.9(3.66)]
- [5] Keller, Curt
Axialgebläse vom Standpunkt der Tragflügeltheorie. Dissertation ETH Zürich 1934.
- [6] Eckardt, D.; Rufli, P.
Advanced Gas Turbine Technology: ABB/BBC Historical Firsts. ASME 01-GT-395 (New Orleans 2001) und J.Eng.Gas Turbines Power 124(July2002)3, 542-549.

H. Stoff, Ruhr-Universität Bochum, Lst. Fluidenergiemaschinen, der Autor dankt Herrn T. Zaba für Beiträge aus Unterlagen C. Seippels.

Erschienen in: "In-Touch-Magazin" Ausgabe 2005, S.14-17, Zeitschrift des Absolventenvereins der Fakultät für Maschinenbau an der Ruhr-Universität Bochum; www.rub.de/in-touch.