

Der Stand der Strömungsforschung im Turbomaschinenbau

Autor(en): **Traupel, Walter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **98 (1980)**

Heft 10

PDF erstellt am: **06.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74064>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Der Stand der Strömungsforschung im Turbomaschinenbau

Von Walter Traupel, Zürich

Nachdem bei Stodola vor allem der thermodynamische Aspekt der Strömung in Turbomaschinen im Vordergrund stand, hat in den Dreissigerjahren eine neue Schule die Erkenntnisse und Versuchsmethoden der flugtechnischen Aerodynamik in den Turbomaschinenbau eingeführt. Das Problem der Fluidodynamik der Turbomaschine erwies sich aber als komplexer als irgendwer angenommen hatte. Alle Versuchsmethoden (ruhende Modelle, Versuchsmaschinen) haben ihre Begrenzungen, und es gibt keine, die allen Anforderungen gerecht würde. Theorien der Gitterströmung und der rotationssymmetrischen Durchfluss-Strömung sind im Laufe der Zeit in grosser Zahl entwickelt worden. Heute hat der Computer die Möglichkeiten solcher Untersuchungen ausserordentlich gesteigert, wobei vor allem die folgenden Verfahren zur Verfügung stehen: Stromlinienkrümmungsverfahren, Singularitätenmethode, Methode der finiten Elemente, Zeitschrittverfahren.

Die Versuchstechnik konnte unter Zuhilfenahme elektronischer Hilfsmittel sehr verfeinert werden, wobei der Computer die Möglichkeit der raschen Auswertung umfassenden Datenmaterials gibt. Die Lasermethode gestattet jetzt die Ausmessung von Geschwindigkeitsfeldern ohne Störung durch Sonden. Während wir heute in normalen Fällen in der Lage sind, Verluste recht treffsicher vorauszusagen, sind unsere Kenntnisse in weiten Gebieten noch lückenhaft, wie etwa die folgenden Stichworte andeuten mögen: Nassdampftrubine, gekühlte Gasturbine, Radialverdichter, Verhalten unter geänderten Betriebsbedingungen (Pumpgrenze!).

Dem thermischen Turbomaschinenbau stehen im Zusammenhang mit der Weltenergiesituation bedeutende Aufgaben bevor. Leider haben wir dabei nicht nur technische Probleme zu lösen, sondern politische Widerstände zu überwinden. Uns darf mit einer gewissen Zuversicht erfüllen, dass schliesslich die Tatsachen stärker sein werden als Ideologie. Wenn wir bedenken, was geschehen würde, wenn unsere Grosstechnik einfach zum Verschwinden gebracht würde, wird uns deutlich, dass wir unsere Arbeit auch vom ethischen Standpunkt aus bejahen dürfen.

Eindimensionale Betrachtungsweise

In der ersten Entwicklungsphase ist die *Strömungstheorie der thermischen Turbomaschinen* massgebend bestimmt worden durch *Aurel Stodola* (1859–1942). Die Dampfturbine war die erste Maschine, zu deren Auslegung eine Strömungstheorie benötigt wurde, welche die *Kompressibilität mitberücksich-*

tigte. Daher ist es nicht verwunderlich, dass bei Stodola der thermodynamische Aspekt, der ja mit der Kompressibilität aufs engste verbunden ist, absolut im Vordergrund steht. Was die Fluiddynamik im engeren Sinne betrifft, so stand Stodola im wesentlichen auf dem Boden der klassischen eindimensionalen Hydraulik. In den letzten Auflagen seines Buches finden sich zwar auch neuere, verfeinerte Betrachtungsweisen, doch stehen sie isoliert da und sind nicht in die übrige Theorie eingearbeitet. Das ist nicht als eine Kritik an Stodola aufzufassen. Vielmehr müssen wir bewundernd anerkennen, wieviel damals mit einfachen Mitteln erreicht werden konnte. Auch heute noch ist ja in unzähligen Fällen die eindimensionale Betrachtungsweise vollauf genügend und zweckmässig.

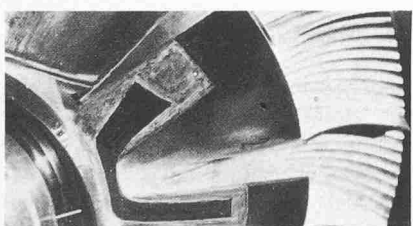
Strömungstechnische Betrachtung

In den Dreissigerjahren, also unmittelbar nach Stodolas Rücktritt im Jahre 1929, drang eine neue strömungstechnische Betrachtungsweise in den thermischen Turbomaschinenbau ein. Sie war dadurch gekennzeichnet, dass die Begriffe, Vorstellungen und insbesondere auch die *Versuchstechnik der flugtechnischen Aerodynamik* auf den Turbomaschinenbau übertragen wurden. Den Anfang hatte schon *Bauersfeld* im Was-

serturbinebau gemacht, indem er die *Tragflügeltheorie auf die Kaplan turbine* anwandte. In der Schweiz war es vor allem Ackeret, der bei seiner kurzen Tätigkeit bei Escher-Wyss und später als Lehrer und Forscher an der ETH dieses neue Konzept förderte. Bei BBC war *Claude Seippel*, damals ein junger Ingenieur, ein Exponent der neuen Schule. Eine seiner frühen Studien betraf den gegenseitigen Einfluss von Tragflügelprofilen in Gitteranordnung und bewegte sich in ähnlichen Gedankengängen wie eine bekannte Theorie von *Betz*. – Die neue Schule erkannte übrigens klar, dass die spezifisch fluiddynamischen Zusammenhänge, sofern man nur hinreichend weit unter der Schallgeschwindigkeit bleibt, gar nicht entscheidend von der Kompressibilität abhängen. Deshalb können Untersuchungen, die Inkompressibilität voraussetzen, nicht selten gute Dienste leisten.

Ein weiteres Kennzeichen der neuen Schule war die *dimensionsanalytisch korrekte Betrachtungsweise*. Sie führt u. a. dazu, Versuchsergebnisse *in Form von Relationen zwischen dimensionslosen Grössen* darzustellen, womit die korrekte Übertragung gegeben ist. Heute ist uns das selbstverständlich, weshalb es uns merkwürdig berührt, dass ein so erleuchteter Geist wie *Stodola* dies unbeachtet lassen konnte. Es zeigt dies, dass die *Wissenschaft nicht so vollkommen rational ist, wie es den Anschein haben mag. Unser Denken ist geprägt durch unsere geistige Umwelt*, und da kann uns das eine wesentlich erscheinen, während wir das andere übersehen. Deshalb kann niemand vermeiden, ein Kind seiner Zeit zu sein. – Bei der Durchsetzung des dimensionsanalytisch korrekten Vorgehens und der Einführung zweckmässiger dimensionsloser Kennzahlen ist bei BBC ebenfalls der Einfluss Seippels massgebend gewesen.

Wenn man gehofft hatte, rasch zu einem grundlegenden Verständnis der wichtigsten strömungstechnischen Zusammenhänge in der Turbomaschine vorstossen zu können, so erwies sich diese Hoffnung als *trügerisch*. Man musste vielmehr erleben, dass die Probleme umso komplizierter wurden, je tiefer man eindrang. Das hängt nicht zuletzt zusammen mit einer *fundamentalen Schwierigkeit*, der man in der *experimentellen Forschung im Turbomaschinenbau* begegnet. Man kann einerseits *Versuche an ruhenden Modellen* ausführen. Das hat den Vorteil, dass der versuchstechnische Aufwand verhältnismässig klein bleibt und dass man sich die messtechnischen Probleme sehr erleichtert. Eine detaillierte Ausmessung der massgebenden Charakteristika einer Strömung ist dabei durchaus möglich. Unvermeidlich unterscheiden sich aber die Bedingungen im *Versuch* von denen *in der auszuführenden Maschine*.

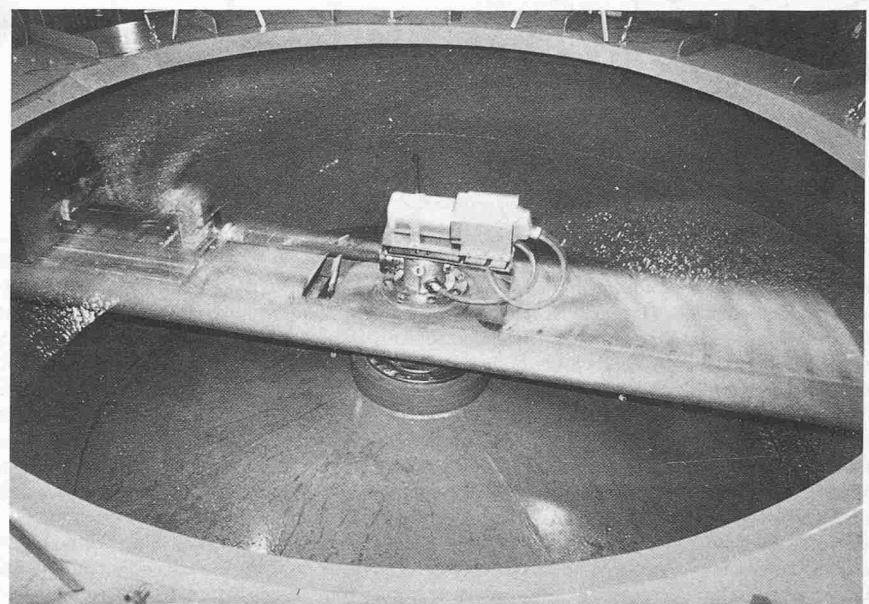


Dehnmessstreifen (DMS)

Schwingungsmessungen an Turboladerschaufeln

Die Schwingungsbeanspruchung der Schaufeln von Turbomaschinen wird mit Dehnmessstreifen ermittelt. Solche Instrumente passen sich störungsfrei den Konturen an, haben ein gutes Auflösungsvermögen und halten Temperaturen bis 800 °C aus sowie Beschleunigungen bis 10³g stand. Zur Übertragung der Messsignale zur Auswertelektronik dienen mitrotierende Sender («Telemetrie»), die induktiv mit Strom versorgt werden.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass an ruhenden Modellen gewonnene Ergebnisse allein niemals eine treffsichere Auslegung von Maschinen erlauben. Am anderen Extrem steht der *Versuch mit der mehrstufigen Versuchsmaschine*, die der Ausführung möglichst genau nachgebildet ist. Damit können *zuverlässige Globalergebnisse* erhalten werden. Eine detaillierte Ausmessung führt indessen auf sehr schwierige messtechnische Probleme. Analyse und Interpretation der Versuchsergebnisse sind zudem stark erschwert und oft sehr unsicher. *Eine ideale Versuchstechnik, die alle unsere Wünsche erfüllt, existiert nicht, und wenn man dazu noch beachtet, wieviele Parameter bei der Auslegung einer Turbomaschine wählbar sind, erkennt man das Ausmass des Problems, vor dem man steht.*



Im Zentrum des rotierenden Propellers der Versuchsanlage ist die Videokamera (Bildmitte) montiert. Sie hält die Bewegung des Wassers fest, das die am äusseren Ende des Propellers fixierte Gasturbinschaufel (links) durchfliesst und an ihrer Hinterkante verlässt.

Theoretische Gutwicklungen

Die Theorie hat sich vor allem in zwei Richtungen entwickelt. Der eine Problemkomplex lässt sich mit dem Stichwort *Gittertheorie* kennzeichnen und umfasst ausser dem klassischen geraden Gitter auch allgemeinere geometrische Konfigurationen. Im englischen Sprachgebiet redet man heute auch allgemein von der «blade to blade»-Lösung. Das andere sind die *Theorien der sog. «räumlichen Strömung»*. Gemeint ist damit üblicherweise eine *rotations-symmetrische Näherung*, englisch als «throughflow-solution» bezeichnet. Das Ziel ist vor allem die Bestimmung der Geschwindigkeitsdreiecke in verschiedenen Radien. Die Überlagerung beider Lösungen liefert an sich eine echt dreidimensionale Strömung, die aber noch Rotationsflächen zu Stromflächen hat und damit selbst reibungsfrei nicht eine exakte Lösung sein kann.

Gittertheorien

Die Gittertheorien hatten durch Jahrzehnte hindurch fast ausschliesslich die ebene Potentialströmung des inkompressiblen Mediums zur Voraussetzung. Im wesentlichen gab es zwei Typen solcher Theorien, die *Singularitätenverfahren* und die, welche mit *konformer Abbildung* arbeiteten. Beide stammten aus dem Rüstzeug der *Tragflügeltheorie*, also der flugtechnischen Aerodynamik. Kompressibilitätseffekte versuchte man höchstens durch Korrekturrechnungen etwa nach der *Prandtl-Glauert'schen Regel* zu berücksichtigen. Selbst das 1965 erschienene Werk von *Scholz* über die Aerodynamik der Schaufelgitter steht noch vollständig auf diesem Boden. Über Gitterströmungen, die so nicht behandelt werden können – insbesondere auch bei höheren Machzahlen – gibt es nur allgemeine Hinweise, keine ausgebildeten Rechenverfahren. – Während

Kühlung rotierender Gasturbinschaufeln

Gasturbinen – das sind erdgebundene Flugzeug-Strahltriebwerke – werden seit Jahren zum Antrieb von Stromgeneratoren verwendet. In der Schweiz gibt es erst wenige solcher Gasturbinen-Kraftwerke, die meisten davon in der Industrie; sie sind jedoch ein wichtiger Exportartikel. In der Gasturbine wird Luft durch Verbrennen von Öl oder Gas auf Temperaturen um 1000 Grad Celsius erhitzt, worauf sie mit grosser Geschwindigkeit die Brennkammer durch eine Düse verlässt und Energie an die Turbine abgibt. Je heisser die Luft, desto besser wird der Brennstoff ausgenützt. Steigt die Temperatur aber über 1000 Grad, müssen die Schaufeln der Turbine gekühlt werden, damit sie nicht schmelzen. Dies geschieht mit kalter Luft,

die von der Achse her durch Kanäle in der hohlen Schaufel strömt und schliesslich an der hinteren Schaufelkante austritt. Die Strömung der Luft wird von der enormen Fliehkraft der rotierenden Turbine beeinflusst. Deshalb kann die günstigste Form und Lage von Kanälen und Austrittsöffnungen nur in betriebsechter Rotation ermittelt werden; allerdings genügen dabei normale Temperaturen und Wasser statt Luft als Kühlmittel, um die Strömung sichtbar zu machen. Die Ingenieure lassen dazu eine Videokamera und einen Radiosender mitrotieren. Die Kamera vermittelt ein Bild vom Ausströmen des Wassers, der Sender überträgt die Messwerte von Strömungsgeschwindigkeit, Druck usw., die von Sonden registriert werden.

einer jahrzehntelangen Entwicklung ist insbesondere ein Einfluss fast vollständig übersehen worden, nämlich der *Einfluss der Konvergenz oder Divergenz der Meridianstromlinien*. Eine Methode war allerdings schon seit sehr langem bekannt, die für engstehende Schaufeln alles berücksichtigen konnte, Kompressibilität und Stromlinienkonvergenz oder Divergenz, sofern nur quasiebene Strömung vorausgesetzt werden konnte: die *Netzmethode*. Sie wurde ursprünglich im hydraulischen Maschinenbau angewandt, dort natürlich inkompressibel, konnte aber leicht für kompressible Strömung verallgemeinert werden. Richtig angepackt, liefert diese mühsame Zeichnerei überraschend gute Resultate. – Sonst aber blieb es dem Computer-Zeitalter vorbehalten, die Beschränkungen abzuwerfen, die selbst den mathematisch anspruchsvollsten Gittertheorien durch die Jahrzehnte hindurch anhafteten.

Theorie der räumlichen Strömung

Die Theorie der räumlichen Strömung ging zunächst aus von der einfachen Lösung der *Wirbelfluss-Strömung*, die der Wasserturbinenbau übrigens stets als selbstverständlich vorausgesetzt hatte. Der thermische Turbomaschinenbau konnte sich indessen mit dieser Lösung nicht begnügen, da sie Bedingungen an die Gestaltung der Schaufelung stellt, die in vielen Fällen zu einer Verteuerung führen würde, ohne Vorteile zu bringen. Allgemeinere Ausführungsformen hat man anfänglich teilweise durch die sog. «actuator disc»-Theorie zu erfassen versucht, welche die Schaufelkränze durch Flächen gebundener Wirbel ersetzt. Diese Idealisierung ging aber doch zu weit.

Die meisten in der Folgezeit entwickelten Theorien sind, soweit sie nicht sehr spezielle Voraussetzungen treffen, vom «streamline-curvature»-Typ. Man for-

muliert dabei direkt die verschiedenen massgebenden Gesetze und insbesondere in radialer Richtung das Bewegungsgesetz. In dieses geht die Gestalt der Meridianstromlinien ein, die im allgemeinen auf iterativem Wege erhalten wird. Dieser ganze Problemkreis hat *Seippel* immer wieder beschäftigt, auch während der langen Zeit, da er die Leitung der sämtlichen thermischen Abteilungen von BBC innehatte. Wiederholt hat er selbst theoretische Studien durchgeführt. Eine davon führte auf den folgenden, besonders bemerkenswerten Zusammenhang. Wenn man eine Meridianstromlinie so transformiert, dass der lokale Radius in Funktion der Zeit aufgetragen wird, die ein Fluidteilchen braucht, um von einer Ausgangsebene an den betrachteten Ort zu gelangen, so entsteht eine Kurve von der Gestalt der elastischen Linie eines Balkens. Selbstverständlich sind dabei vereinfachende Voraussetzungen gemacht; insbesondere sind Radialkräfte der Schaufeln vernachlässigt. Sobald man die Bewegungsgleichung nur in Kontrollebenen zwischen den Schaufelkränzen formuliert, hat man damit einen besseren Anhaltspunkt als mit anderen, willkürlichen Annahmen. Die so aufgebaute Theorie hat sich denn auch als leistungsfähig erwiesen. – Der Computer gestattet es heute, noch weiter zu gehen und auch in Kontrollflächen zu rechnen, die die Schaufelkränze schneiden. Damit können auch die Radialkräfte der Schaufelkränze berücksichtigt werden.

Ganz allgemein hat ja das Aufkommen des Computers sowohl unsere theoretischen als auch unsere experimentellen Möglichkeiten in einem ausserordentlichen Masse gesteigert. Für strömungstheoretische Rechnungen verfügen wir teilweise über weitgehend ähnliche oder gar gleichartige Rechenverfahren, ob es sich nun um das «Blade-to-Blade-Problem» oder um das «Throughflow-Problem» handelt. Beide werden auch kombiniert, und auch *echte dreidimensionale Theorien* rücken in den Bereich der Möglichkeiten. In der Hauptsache sind die folgenden Typen von Theorien bedeutsam geworden:

Stromlinien-Krümmungsverfahren

Man berechnet unmittelbar das Stromlinienbild, indem man die massgebenden Gesetze formuliert und ein ursprünglich angenommenes Stromlinienbild so lange iterativ verändert, bis es alle Bedingungen hinreichend genau erfüllt.

Singularitätenverfahren

Man bringt Singularitäten an den Begrenzungswänden und im allgemeinen auch im Strömungsraum an und bestimmt ihre Verteilung so, dass alle Grenzbedingungen und die physikali-



Die Methode der Laser-Doppler-Anemometrie wurde in einer Demonstration mit Hilfe eines gewöhnlichen Ventilators (im Bild links vorne) veranschaulicht. Rechts neben der Laser-Apparatur (Bildmitte) ist die Auswertelektronik aufgebaut.

Laser-Doppler-Anemometrie

Moderne Dampfturbinen enthalten auf einer Welle mehrere Schaufelkränze («Propeller») hintereinander. Dieser Rotor wird vom Turbinengehäuse eng umschlossen. Der Dampf strömt in Längsrichtung durch dieses «Rohr» und setzt die Propeller in Bewegung. Dabei entstehen hinter und zwischen den Propellern Wirbel, welche die Strömung beeinträchtigen. Je ungestörter aber die Strömung, desto mehr Energie wird vom Dampf auf die Propeller übertragen und damit mehr Strom in einem Kraftwerk erzeugt. Mehr Energie versuchen die Ingenieure auch aus dem Dampf zu ziehen, indem sie die Profile der «Propellerflügel» (Turbinenschaufeln) verbessern. Mit neuen Profilen ändert sich aber auch die Strömung. Stellt man jedoch ein Messgerät, zum Beispiel einen geeigneten Windmesser (Anemometer), in die Turbine, so stört dieses selbst die Strömung. Einen Ausweg bietet die Verbindung von Laserlicht nach dem Prinzip des Verkehrsradars. Dieser beruht auf der Beobachtung, dass ein herannahendes Rennauto höher tönt als ein weg-fahrendes. Die Erklärung (zuerst vom österreichischen Physiker Doppler gegeben): Bei der Annäherung gelangen je Sekunde mehr Schallwellen an unser Ohr als

beim Wegfahren – die Frequenz ist erst höher und dann tiefer. Aus diesem Unterschied, der um so grösser ist, je schneller das Auto fährt, lässt sich die Geschwindigkeit berechnen. Es spielt dabei keine Rolle, ob das Auto selbst der «Sender» ist oder ob es Schall- oder Radarwellen reflektiert. Die Turbineningenieure verwenden allerdings weder Motorgeräusch noch Radarwellen; beides setzt nämlich voraus, dass das Messobjekt so gross ist wie eben ein Auto. Im Turbinenversuch wird jedoch mit staubfeinen Teilchen aus Magnesiumoxid operiert. Diese sind klein genug, um von der Dampfströmung mitgerissen zu werden, ohne zu stören. Auf einen beliebigen Punkt der Strömung wird nun das Laserlicht konzentriert, und jedesmal, wenn ein Teilchen diesen Punkt passiert, reflektiert es das Laserlicht. Wie beim Rennauto oder beim Verkehrsradar hat das reflektierte Licht aber eine andere Frequenz, die von der Geschwindigkeit und Richtung des Teilchens abhängt. Das Messen der Frequenz und das Ausrechnen der Geschwindigkeit besorgt – wie bei der Polizei – der Computer. Führt man die Messung an vielen Punkten durch, so ergibt sich ein genaues Bild der Strömung.

schen Bedingungen erfüllt werden. Das hier bei BBC gebräuchliche Verfahren von *Ribaut* ist von diesem Typ. Grosse Genauigkeit wird dadurch erzielt, dass die Geschwindigkeit in jedem Punkt durch eine Integration über das ganze Feld gewonnen wird.

Verfahren der finiten Elemente

Diese Methode ist ursprünglich für Festigkeitsprobleme entwickelt worden, konnte aber auch auf andere Gebiete übertragen werden. Das Strömungsfeld wird in Zellen geeigneter Geometrie –

eben finite Elemente – eingeteilt. Für diese werden die massgebenden Sätze formuliert. Das führt auf ein riesiges Gleichungssystem, dessen Lösung das gesamte Strömungsfeld liefert.

Zeitschrittverfahren

Dieses Verfahren wurde bei BBC in letzter Zeit durch Novak mit Erfolg eingeführt. Auch hier wird das Strömungsfeld in geeignete Zellen eingeteilt. Der Gedanke des Verfahrens ist der folgende. In kompressibler Strömung entspricht jedes beliebige Geschwindigkeitsfeld, das nur die Grenzbedingungen erfüllt, einem möglichen Momentanzustand innerhalb eines instationären Vorganges. Also geht man von einem angenommenen Geschwindigkeitsfeld aus und berechnet nun den asymptotischen Übergang zum stationären Zustand, indem man schrittweise um kleine Zeitintervalle weiterschreitet. – Das Verfahren hat den besonderen Vorzug, sich für *transsonische Vorgänge* gut zu eignen. Verdichtungsstöße werden bei dem asymptotischen Übergang von selbst erhalten und kommen an den richtigen Ort zu liegen. Wenigstens gilt dies für schwache Verdichtungsstöße.

Computeranwendung und Versuchstechnik

Die experimentellen Möglichkeiten sind dadurch ausserordentlich gesteigert, als der Computer äusserst umfangreiches Datenmaterial rasch zu verarbeiten vermag. Häufig kann ja der Computer unmittelbar an die Versuchseinrichtung angeschlossen werden, so dass die Auswertung mit dem Versuch zusammen laufend erfolgt. Ausserdem beeinflusst die hochentwickelte *Elektronik* die Versuchstechnik selbst, da wir heute in der Lage sind, Signale von äusserst raschen Veränderungen aufzunehmen und zu analysieren. Man denke auch an solche Hilfsmittel wie *Kulite-Druckaufnehmer*. Ganz neue Möglichkeiten zur Ausmessung von Geschwindigkeitsfeldern eröffnen in neuster Zeit die *Laser-Methoden*. Sie vermeiden die Störung der Strömung durch das Einführen von Sonden. Relativströmungen in rotierenden Laufrädern können so ausgemessen werden. Dazu wären früher mitrotierende Sonden notwendig gewesen, deren Möglichkeiten aber aus naheliegenden Gründen eng berent sind. Selbstverständlich sind solche Messungen äusserst aufwendig und kommen daher nur in Frage für sehr detaillierte Einzeluntersuchungen grundlegender Art.

Für den Ingenieur ist natürlich die Frage entscheidend, was wir nun mit all diesen theoretischen und experimentellen Hilfsmitteln leisten können, d. h. also: *Wie weit gelingt es uns, das Verhal-*

ten auszuführender Maschinen richtig vorauszusagen? Das ist ein derart komplizierter Fragenkomplex, dass man die Situation höchstens in Umrissen charakterisieren kann. Es kann wohl etwa das Folgende gesagt werden.

Die *Verluste normaler mehrstufiger Schaufelungen können heute mit beachtlich guter Treffsicherheit vorausgesagt werden*. Das etwas unbestimmte Wort «normal» besagt dabei, dass keine besonderen Bedingungen vorliegen, wie sehr hohe Machzahlen, ungewöhnliche geometrische Anordnungen etc. Diese Verlustbestimmung beruht auf jahrzehntelanger systematischer Empirie. Wir sind nicht etwa in der Lage, ausgehend von den erwähnten Theorien diese Verluste grenzschichttheoretisch zu bestimmen. Das gelingt allenfalls für die Profilverluste. In die Grenzschichttheorie gehen stets irgendwelche empirische Ansätze ein, und diese werden unzuverlässig, sobald man den Erfahrungsbe-

reich überschreitet, der bei der Aufstellung dieser Ansätze vorlag. Man kann sagen, dass z. B. mit Heissdampf arbeitende HD- und MD-Teile von Dampfturbinen heute mit sehr guter Sicherheit ausgelegt werden können und dass dort praktisch wohl etwa der optimale Wirkungsgrad erreicht ist.

In einem Punkt ist allerdings die Situation selbst unter «normalen» Bedingungen ganz *unbefriedigend*: *Das Problem einer einigermaßen einfachen und treffsicheren Vorausbestimmung der Abströmwinkel ist nicht gelöst*. Merkwürdigerweise scheint man erst in neuerer Zeit allgemein darauf aufmerksam geworden zu sein, wie unsicher unsere herkömmlichen Methoden hier sind, und dies, nachdem wir seit einem halben Jahrhundert Gittertheorie treiben.

Ungelöste Probleme

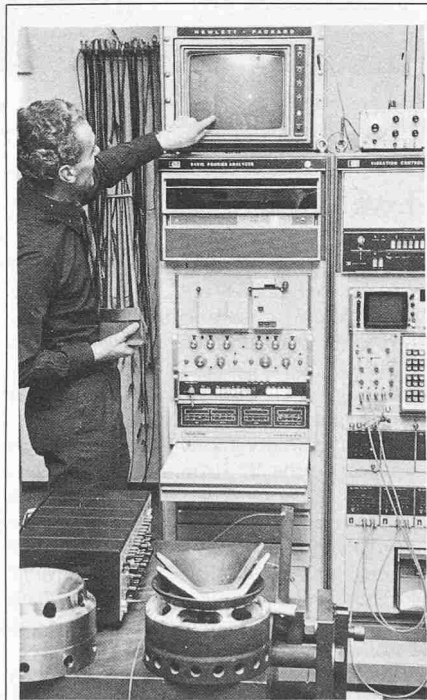
Der Katalog der Probleme, die nur teilweise gelöst sind, ist leider sehr gross. Einige kurze Hinweise mögen dies beleuchten: Über die *Strömung der Nassdampfturbine* wissen wir zwar sehr viel mehr als etwa in den Fünfzigerjahren, z. B. durch die theoretischen Arbeiten von Gyarmathy, die er durch experimentelle Arbeiten bei BBC untermauert hat. Bei den ND-Turbinen sind wir jetzt in der Lage, die Nässeverluste vorzuberechnen, vorerst aber noch nicht bei den HD-Turbinen.

Die Berechnungsunterlagen für *gekühlte Gasturbinschaufelungen* sind naturgemäss unvollständiger und unsicherer als für ungekühlte Schaufelungen. Wenn man beachtet, wie kompliziert die Strömung in der ungekühlten Maschine schon ist, dann muss man bei der gekühlten einfach in noch höherem Masse bereit sein, auf einen Perfektionismus zu verzichten.

Beim *Axialverdichter* verfügen wir über keine theoretisch strenge Methode zur Auslegung transsonischer Stufen. Trotzdem gelingt die Auslegung solcher Maschinen relativ gut. Man hätte hier eigentlich eher grössere Schwierigkeiten erwarten können.

Der *Radialverdichter* hat in neuerer Zeit vermehrt das Interesse der Forscher auf sich gezogen. Ich denke etwa an das FVV-Forschungsvorhaben, das aber dringend eine Fortsetzung verlangt, da der ganze Problemkomplex des Überganges der Laufradströmung in den Diffusor noch zu klären ist.

Unbefriedigend ist die Situation bezüglich der *Vorausberechnung des Verhaltens unter geänderten Betriebsbedingungen*. Unsere empirischen Unterlagen darüber sind lückenhaft. Insbesondere sind wir nicht in der Lage, eine Pumpgrenze einigermaßen treffsicher vor auszurechnen.



Modal-Analyse von Eigenschwingungen

Eine Turbinenschaufel ist elastisch und einseitig eingespannt, also eine «Feder» – wegen ihrer komplexen Form allerdings mit komplexem Eigenschwingungsverhalten, dessen genaue Kenntnis für die Entwicklung von vibrations- und lärmarmen Konstruktionen wichtig ist. Bestimmt wird dieses Verhalten, indem ein Hammer die Schaufel an Referenzpunkten mit einem bestimmten Kraftspektrum erregt und ein Akzelerometer das resultierende Schwingungsspektrum aufzeichnet. Mittels Computeranalyse werden aus den beiden Spektren für jede Eigenfrequenz die Schwingungsamplituden der Messpunkte errechnet und – vergrössert und verlangsam – auf dem Bildschirm anschaulich gemacht.

Entwicklungsaufgaben

Dieser ganz summarische Überblick zeigt schon, dass der Strömungsforschung im Turbomaschinenbau bestimmt die Arbeit nicht auszugehen wird. Die sehr hochentwickelte Versuchstechnik und die leistungsfähigen Rechenverfahren, die wir besitzen, benötigen wir tatsächlich dringend. Rein technisch gesehen, steht ja der Turbomaschinenbau vor mannigfachen Entwicklungsaufgaben *angesichts der prekären Weltenergiesituation*. Zu den Sattdampfturbinen für Leichtwasserreaktoranlagen werden sich wohl bald *Maschinen für schnelle Brüter* gesellen müssen, denn die Ausnutzung der Uranvorkommen erfordert diesen Schritt.

Hochtemperatur-Reaktoranlagen werden möglicherweise mit *Helium-Gasturbinen* arbeiten. Die Notwendigkeit, die fossilen Brennstoffe optimal auszunutzen, wird voraussichtlich auf *sehr hohe Dampfdrücke und doppelte Zwischenüberhitzung* führen. Ob man wiederum in den Temperaturbereich 600–650 °C vorstossen wird, bleibe dahingestellt.

Auf der *Kesselseite* bahnt sich eine Entwicklung an, die möglicherweise zu einer Revision der früheren Wirtschaftlichkeitsrechnungen führt. Die *Fließbettverbrennung* ergibt derart kleine Überhitzerflächen, dass der Verwendung teurerer Werkstoffe für die Überhitzer nichts mehr im Wege steht. Auch die *Korrosionsprobleme* scheinen dabei weitgehend eliminiert zu werden. Wenn es dann noch gelingt, Turbinenkonstruktionen zu finden, die mit *minimalem Aufwand an austenitischem Stahl* auskommen, entsteht u. U. doch

wieder eine Lösung optimaler Wirtschaftlichkeit. – Weiter ist die *Kombination Dampfturbine-Gasturbine* im Vordringen, und man wird daher bestrebt sein, die *Prozesstemperaturen der Gasturbinen weiter zu erhöhen*. Die dann notwendige *Intensivierung der Kühlung* zieht eine ganze Kette von Problemen nach sich: Strömung, Wärmeübergang, Festigkeit und konstruktive Probleme. Anlagen für Strom- und Wärmeproduktion – Prozesswärme, Heizwärme, Meerwasserentsalzung – müssen sich in grösserem Umfang einführen, was entsprechend angepasste Turbinenkonstruktionen erfordert.

Wenn man heute von diesen Dingen redet, beschleicht einen sofort das Gefühl, dass die *technischen Probleme gar nicht das Schwierigste* sein werden, sondern dass wir uns ganz grossen *politischen Widerständen* gegenübersehen. Das gilt vorab für die Kernkraftwerke, beschränkt sich aber keineswegs auf diese. Der Entrüstungssturm gegen die Kernkraftwerke zielt im Grunde genommen auf die *Grosstechnik* überhaupt – sozusagen über Nacht sind wir in die Situation gekommen, dass man uns geradezu als Feinde der Menschheit hinstellt. Es ist manchmal niederschmetternd, wie wir überhaupt kein Gehör finden, was immer wir tun oder sagen. Wenn es gewiss unter diesen Gegnern der Nukleartechnik und der Grosstechnik überhaupt ehrliche Idealisten gibt, muss man sich doch fragen, ob sie die treibende Kraft sind. Denn hier wird mit einem derartigen Raffinement die Wahrheit entstellt, dass diese Dinge unmöglich alle in guten Treuen gesagt werden.

Wir haben indessen doch *Grund zu einer gewissen Zuversicht*, und zwar des-

halb, weil man niemals mit Ideologie erfolgreich gegen naturgegebene Tatsachen angehen kann. Der Ersatz eines Teiles des Erdöls durch andere Energieträger wird unvermeidlich sein. Sollte aber diese *Technikfeindlichkeit* noch längere Zeit anhalten, so werden akute Schwierigkeiten auftreten. Mit Worten und einigen Sonnenkollektoren werden diese nicht zu beheben sein. – Es soll damit nicht die Nutzung der Sonnenenergie in Bausch und Bogen verworfen werden. Nur der Vorstellung, es sei damit alles zu machen, muss man entgegen treten. – Man wird erkennen, dass ohne die Grosstechnik nicht auszukommen ist, mindestens dann nicht, wenn wir nicht bereit sind, in Armut und Primitivität zurückzufallen.

Das besagt nicht, dass unsere Welt, in der die Technik eine so grosse Bedeutung gewonnen hat, eine heile Welt sei. Wenn sie es aber nicht ist, so liegen die Wurzeln im Bereich des Geistigen. Die *geistigen Orientierungslosigkeit der Menschen* wird aber sicher nicht durch die Struktur unserer Energietechnik bestimmt. Wie die Menschen geistig auf eine schwere Notsituation – die sich einstellen könnte – reagieren werden, kann niemand wissen. Indessen kommt es niemandem zu, den Mitmenschen der Not zu überlassen, weil ihn das ja möglicherweise zu sich selbst zurückbringen könnte. Das ist nicht unsere Sache. Wir haben die Pflicht, das in unserer Macht stehende zu tun, materielle Not zu vermeiden. Dazu aber trägt auch unsere Grosstechnik bei.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. W. Traupel, Institut für thermische Turbomaschinen, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.