

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 77 (1959)
Heft: 20

Artikel: Dampfturbinen von heute
Autor: Seippel, C.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-84254>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

fand mancher Gedankenaustausch seinen Fortgang. So etwa, wenn in einem Brief von *Max Planck* verschiedene Auffassungen über Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation diskutiert werden. — Und wie menschlich berührt es uns, wenn *Einstein* einem Brief an Stodola beifügt: «Ich habe eine interessante Idee in der allgemeinen Relativität gefunden. Hoffentlich hält sie stand; gewöhnlich stellt sich in solchen Fällen nach kurzer Zeit Kritik mit Katzenjammer ein.»

Aus der reifen Erfahrung eines Lebens heraus vermag Stodola schliesslich in seinen «Gedanken zu einer Weltanschauung» einen entscheidenden Schritt zu vollziehen. Er wagt es, im Suchen nach innermenschlicher Erkenntnis, die letzten Fragen nicht mehr der Wissenschaft seines Jahrhunderts, sondern der Schaukraft der grössten suchenden Geister der Menschheit zu stellen. Er wagt es, wie er sich ausdrückte: «Der Seele die Oberhoheit über den Intellekt einzuräumen». Und er spricht seine Ueberzeugung unmissverständlich aus: «Wenn wir unerschrocken aufrichtig bleiben, so müssen wir bekennen, dass der Intellekt, diese wunderbare Naturgabe, in dessen Dienst wir traten, dem wir unsere grössten genialsten Leistungen verdanken, doch nicht das Letzte und Höchste im Menschen ist.»

Mögen diese Formulierungen Stodolas auch vielen noch als illusionär erscheinen, ich glaube, dass unsere jetzt anstehende junge Generation (— die sich zwar, wenn überhaupt, viel zurückhaltender ausdrücken würde —) es wohl weiss, wie real heute das Faustrecht des Rationalismus innerlich überdauert ist.

Für Stodola, der die Grösse und das Begeisternde des naturwissenschaftlichen Denkens von Grund auf erlebt hatte, war es wohl nicht leicht, sich zu der Feststellung durchzuringen: «dass die Tiefe der Natur sich grösser erwiesen hat, als die Blickkraft des Intellektes». Solches zu erkennen und anzuerkennen fiel um so schwerer, als damit, wie Stodola sich ausdrückte, «ein Stück unserer Weltanschauung verloren ging, an das zu glauben ein innerer Zwang und eine tiefe Beruhigung war».

So können wir denn verstehen, wie sehr er sich verpflichtet fühlte, in seiner Rechenschaftsschrift noch einmal gründlich alle Erkenntnismöglichkeiten der modernen Physik, der Relativitätslehre und der Quantenphysik durchzuprüfen, ja auch die der Biologie und der Vererbungslehre, ehe er endgültig feststellte: «Angesichts solcher Sachlage ... führte mich stille Ueberlegung schon lange zu der ent-

schlussvollen, anscheinend stolzen Ueberzeugung: Wir sind nicht gezwungen, dem Druck vorzeitiger Folgerungen aus vergänglichen Formen der Naturgesetze zu weichen. Es ist uns erlaubt zu lauschen den noch in keine Formel gebannten Tönen und Gesetzen, die aus den tiefsten Gründen des Seelenlebens in Gestaltungen künstlerischer und ethischer Art leise oder feurig emporrauschen.»

Solch geheimem Fundus religiöser Bereitschaft war seine Zeit abhold. Diesem flüssigeren Element war nur zugelassen, sich zu verflüchtigen in sublimere Formbereiche der Dichtkunst und der Musik, oder sich auszukristallisieren in einer ethisch verfestigten Gehaltenheit.

Doch nun gelang Stodola der lösende Schritt aus diesem Bannkreis der Ratio. Und damit vermochte er noch einmal, und in vorgerücktem Alter, aus Bindungen seiner Zeit herauzuwachsen, um sich die Freiheit zuzubilligen, einer Rangordnung der Werte zu folgen, die seit je in ihm tief lebendig war. Denn seit je hatten ihm die Worte der grössten Geister der Menschheit — der grossen Dichter und Seher — ihren tiefen Gehalt und ihre ewigen Wahrheiten enthüllt. Doch unmittelbar noch ward er vom Letzten berührt in den unvergänglichen Werken der ihm so nahen Musik. Ihr war er schon in der Jugend entscheidend begegnet, wo er als 15jähriger an seine Eltern schrieb: «Auch die Musik fange ich an lieb zu gewinnen; ich fange an Vergnügen zu finden an dieser wahrhaft himmlischen Kunst, die ich erst jetzt verstehe.»

Er blieb mit ihr tief verbunden ein Leben lang, und noch im hohen Alter versenkte er sich in die Partituren der Meister, wobei er zwar einmal bekannte, dass «Partituren lesen doch noch anstrengender sei als Differentialgleichungen lösen.» Die Musik bezeichnete er als «den unmittelbaren Zugang zum Göttlichen», und er schrieb: «Das Geheimnisvollste birgt die Musik, weil sie das unaussprechbare, aus tiefsten Untergründen emporsteigende Sehnen und Ringen der Seelenkräfte zum Ausdruck bringt... Im schlichtesten Tonstück kann — wie in einem Feldblümchen — unnennbare Poesie zu uns sprechen». (Und als Beispiel nennt er hier das Ravennalied von *Schoeck*).

Die Werke der Grössten, *Bach* und *Beethoven* vor allem, die er in Stunden der Andacht auf seiner Hausorgel spielte und in Konzerten immer wieder in sich aufnahm, begleiteten ihn beglückend durch sein Leben und halfen, es zu einem wahrhaft erfüllten Dasein zu runden.

Dampfturbinen von heute

Von C. Seippel, Direktor der AG. Brown, Boveri & Cie., Baden

DK 621.165

1. Bemerkenswerte Anlagen

Wer die erstaunlichen Errungenschaften auf dem Gebiete des Dampf- und Gasturbinenbaues betrachtet, wird sich dankbar und mit Hochachtung des Mannes erinnern, der die theoretischen Grundlagen dieses bedeutsamen Zweiges der Maschinentechnik geschaffen und die Entwicklungen massgeblich beeinflusst hat. Ehrend gedenken wir heute, am hundertsten Jahrestag seines Geburtstages, *Aurel Stodola*. Ein Rückblick über die Entwicklung der Leistungen der am Beginn des Jahrhunderts von Parsons, Zoelli, De Laval erschaffenen Dampfturbinen zeigt das stürmische Fortschreiten dieser neuen Technik. An der Schweizerischen Landesausstellung von 1914 in Bern erregte eine Einheit von 5000 kW allgemeine Bewunderung. 1931 lieferten zwei Schweizerfirmen und eine französische Firma je eine Turbine von 50 000 kW in die Zentrale St. Denis bei Paris. Wenig später baute Brown Boveri eine Gruppe von 165 000 kW Nennleistung für das Dampfkraftwerk Hellgate in New York.

Der Dampfdruck, der lange Zeit am 20- bis 25-Atmosphären-Niveau geklebt hatte, schnellte 1924 bei einer originellen kleinen Vorschaltturbine auf 50 at hinauf, welche, so hoffen wir, nach 35 Jahren Dienst, ihren Weg in das zu gründende technische Museum in Winterthur finden wird.

Nur fünf Jahre später wurde eine Turbine mit 180 at Dampfdruck in Betrieb genommen (Bild 1). Sie war von einem Benson-Zwangsdurchlaufkessel gespiesen. Den Herstellern schwebte schon eine Anlage mit kritischem oder überkritischem Dampfdruck vor, welche erst viel später verwirklicht werden sollte.

Auch die Frischdampftemperatur trat ihren dornenvollen Aufstieg an; dornenvoll, denn während eine Drucksteigerung Probleme bringt, die sich einigermassen rechnerisch erfassen lassen, berühren die Erscheinungen bei hohen Temperaturen Gebiete der Chemie und der Metallurgie, die den Ingenieuren viele Rätsel aufgaben. Tabelle 1 hält einige Marksteine in der Entwicklung der Höchsttemperaturen fest.

Bild 2 zeigt Gehäuse und Rotor der im Jahre 1950 gebauten Gegendruckturbine von Escher Wyss für 600° C, geliefert an Emil Adolf, Reutlingen¹⁾. Diese Maschine hatte

Tabelle 1. Entwicklung der Höchsttemperaturen von Dampfturbinen

Jahr	1924	1927	1938	1947	1948	1950	1955
Temperatur °C	400	450	510	540	568	600	650

1) Näher beschrieben in SBZ 1957, Heft 4 und 5, S. 47 und 70.

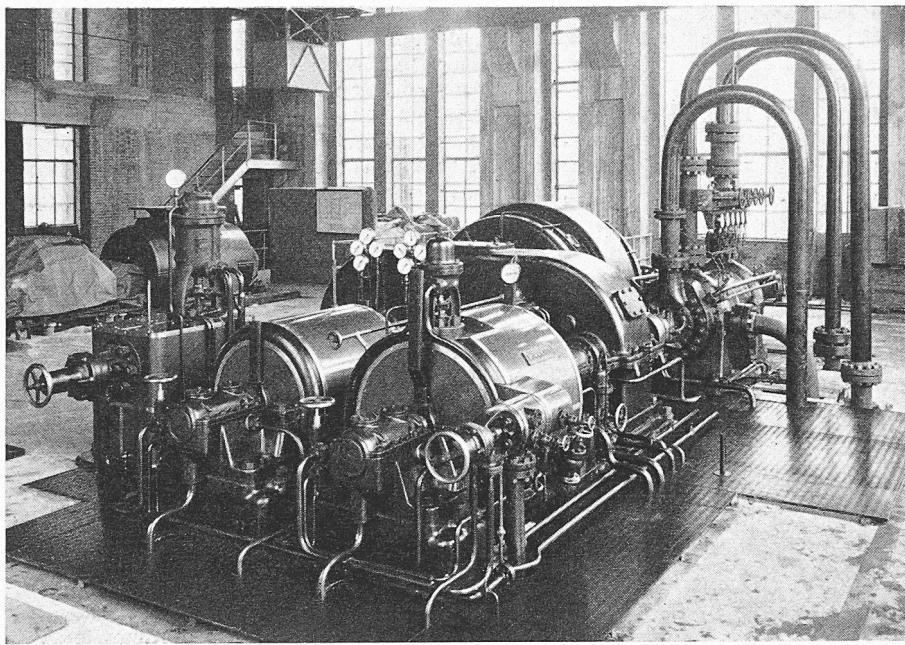


Bild 1. Erste Turbine für 180 at Druck von Brown Boveri aus dem Jahre 1929. Die Turbine treibt eine Speisepumpe und daneben einen Generator an.

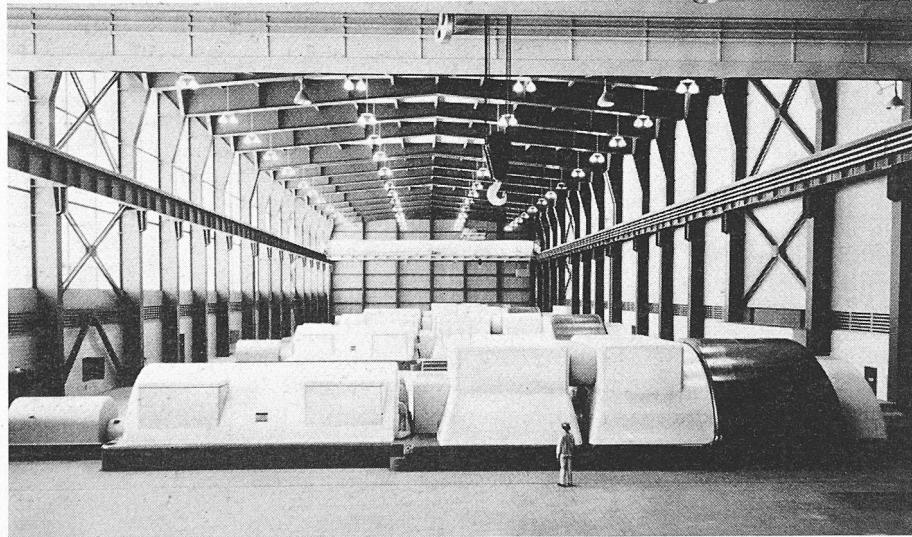
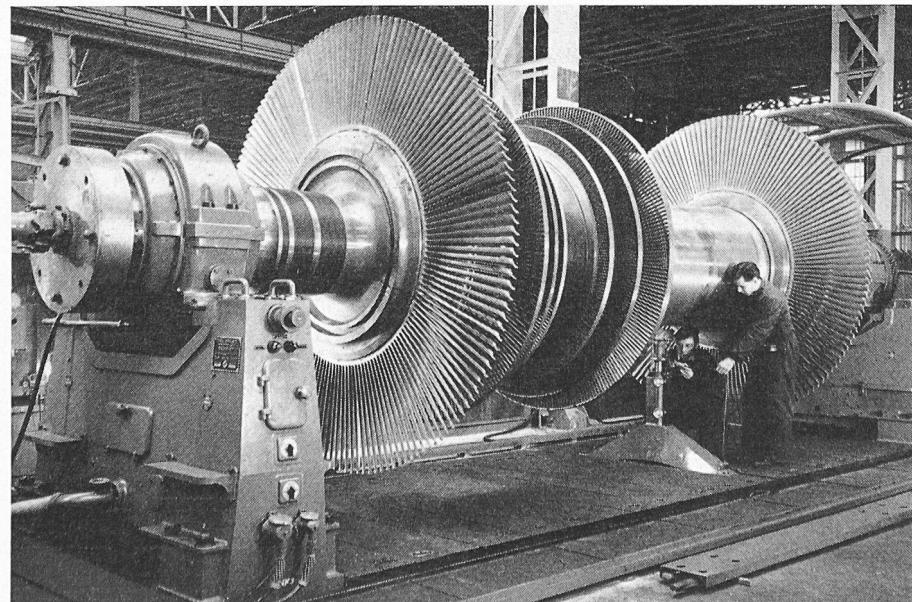


Bild 5. Colbert Station der Tennessee Valley Authority, USA, mit vier Einheiten von je 200 MW



im April dieses Jahres über 40 000 h Betrieb hinter sich. Brown Boveri baute 1954 eine Vorschaltgruppe ebenfalls für 600 ° C, jedoch verwendbar für ein Maximum von 620 bis 650 ° C. Sie befindet sich bei den Bayerwerken in Leverkusen im Betrieb.

Nun wollen wir einige ganz moderne Anlagen kurz beschreiben, welche durch irgendein Merkmal unser besonderes Interesse verdiensten. Als Erste sei die 125 MW-Einheit in der *Philo-Station* des American Electric Power Systems erwähnt. Das Werk ist im echtesten Sinn eine Pionier-Anlage, indem bewusst extreme Dampfverhältnisse gewählt wurden, als sie bei dieser Maschinengrösse noch wirtschaftlich wären. Diese sollten aber durch und durch erprobt sein, bevor man ganz grosse Anlagen bauen will. Der Kessel wurde von Babcock Wilcox, die Turbine von der General Electric Co. geliefert. Der Frischdampfdruck beträgt 310 at, liegt also über der kritischen Grenze, bei welcher sich das Wasser bei der Erwärmung im Kessel ohne Phasentrennung wie ein Gas zu überhitztem Dampf ausweitet. Die Frischdampftemperatur wurde zu 620 ° C festgesetzt; sie kann aber auf 650 ° C gesteigert werden. Der Dampf wird ein erstes Mal bei 80 at auf 568 ° C und ein zweites Mal bei 15 at auf 538 ° C nacherhitzt. Man frägt nach den Gründen dieser Abstufung der drei Temperaturen, denn die Temperatursteigerung der Zwischenüberhitzung bringt ebenso grossen Vorteil wie die der Ueberhitzung vor der ersten Stufe. Wohl sind die Zwischenüberhitzer-Rohrleitungen grösser im Durchmesser, jedoch nicht schwerer, weil die Drücke kleiner sind. Es ist dabei von Interesse festzustellen, dass später die gleiche Gesellschaft eine neue Grossmaschine mit drei gleichen Temperaturen von 568 ° C bestellt hat.

Bild 3 zeigt den Schnitt durch die Turbine der General Electric Co. Die Hochdruckturbine zeichnet sich durch die kugelige Form des äusseren Gehäuses aus, das aus ferritischem Stahl besteht. Zwei Rotoren wurden hergestellt, einer aus austenitischem und einer aus ferritischem Baustoff. Der Letztere wird durch geeignetes Zuführen von weniger hoch überhitztem Dampf gegen eine Uebersteigerung seiner Oberflächentemperatur über 550 ° C geschützt. Die Anwendung dieses Schutzschichtverfahrens ist im Gasturbinenbau üblich. Die Schaufeln sind aus 12prozentigem Chromstahl. Die Lagerzapfen der austenitischen Welle sind mit ferritischen Büchsen versehen, angeblich wegen schlechten Gleiteigenschaften des Austenites. Andere Firmen haben

Bild 6. ND-Läufer einer 115 MW-Turbine von Escher Wyss für die Anlage «Baudour»

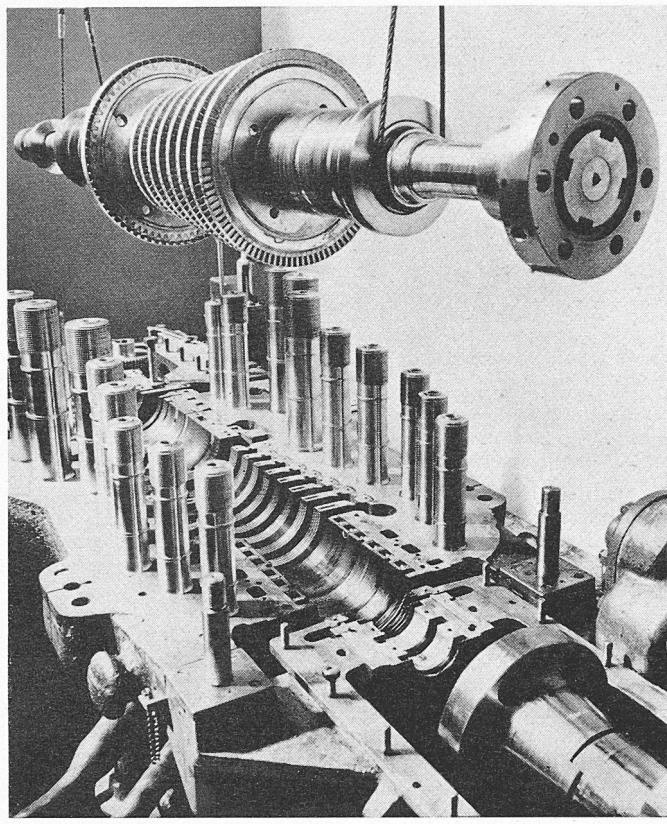


Bild 2. Hochtemperaturturbine von Escher Wyss für 100 at, 600 °C, 11 ata Gegendruck, 3000 kW bei 10 000 U/min.

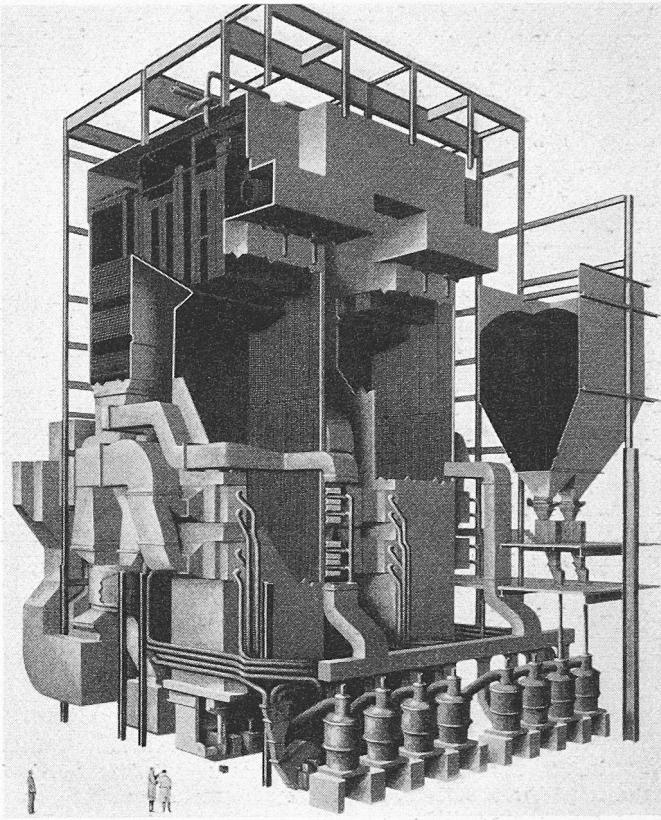


Bild 4. Modellansicht eines Kessels für überkritischen Druck von Sulzer-Combustion Engineering für die Anlage Eddystone. 2×350 MW, 372 at, 654 °C und doppelte Zwischenüberhitzung auf 568 °C

mit austenitischen Zapfen keine Schwierigkeiten gehabt. Die Frischdampfrohre sind in mehrere Stränge unterteilt, wie dies bei der oben erwähnten Turbine von 50 at aus dem Jahre 1924 schon der Fall war. Die Anlage steht seit Frühjahr 1957 im Betrieb. Wesentliche Störungen sind nicht bekannt. Ihr mittlerer Gesamt-Wirkungsgrad einschliesslich allen Hilfsbetrieben konnte während einer mehrmonatigen Betriebsperiode mit mehrmaligem Abstellen und Wiederauffahren zu 38,5 % ermittelt werden.

An europäischen Hochdruckanlagen ist diejenige der Chemischen Werke Hüls zu nennen, für welche Brown Boveri eine Vorschaltgruppe von 36 MW Leistung, 300 at Druck und 565 °C Dampftemperatur baut. Eine weitere

Grossanlage in den USA, die mit überkritischem Druck arbeitet, ist diejenige von *Eddystone*, welche im Verlaufe des Jahres 1959 in Betrieb kommen soll. Infolge des Verschwindens der Phasentrennung kommen keine Umlaufkessel in Frage, sondern nur Durchlaufkessel, von denen es zwei Bauarten gibt: *Benson* und *Sulzer*. *Eddystone* erhält zwei Kessel von je 907 t/h Leistung der Bauart *Sulzer — Combustion Engineering*, Bild 4²⁾. Die zwei Turbinen von 350 MW Leistung sind von *Westinghouse*.

Man darf aus diesen Spitzenanlagen nicht folgern, dass jede Grossanlage heute so extrem gebaut werde. Bei den meisten Werken ist für die Wahl des Systems und der

²⁾ Beschreibung s. SBZ 1956, Heft 29, S. 435.

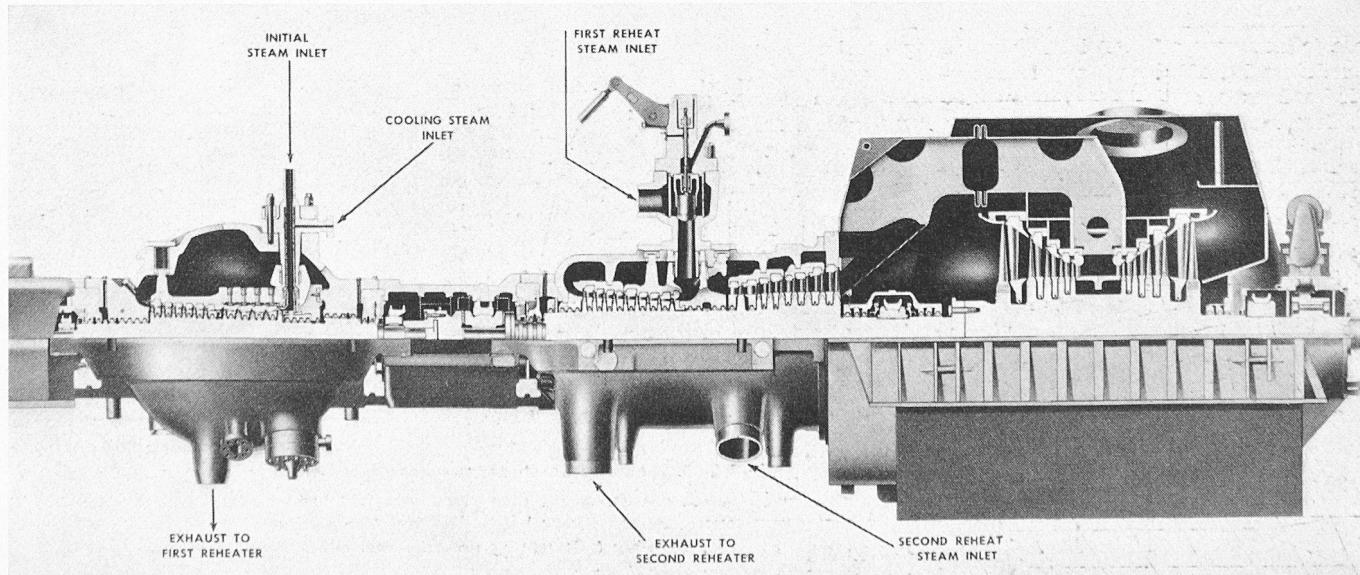


Bild 3. Schnitt durch eine Turbine für überkritischen Druck der General Electric Co.

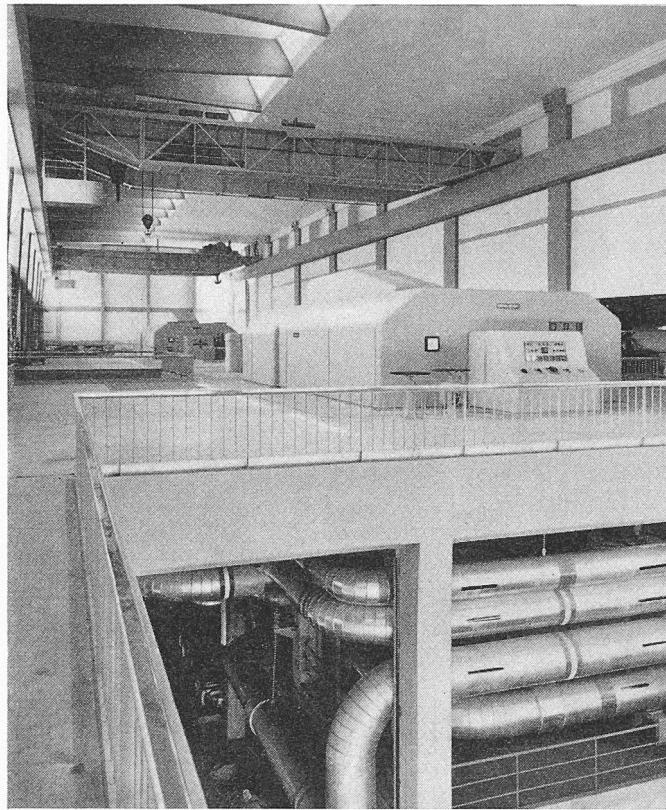


Bild 7. Maschinensaal des thermischen Kraftwerk Santa Barbara, Italien, mit zwei Einheiten von Brown Boveri von je 125 MW

Hauptdaten die Gesamtwirtschaftlichkeit massgebend. Diese ist heute bemerkenswert hoch. Trotz des Erfolges der Philo-Anlage hat das American Electric Power System eine neue Grossmaschine von 450 MW Leistung für etwas tieferen Druck (247 at) und merklich tiefere Temperatur (568°C) für die Anlage Philip Sporn bestellt. Bild 5 zeigt den Maschinensaal des Colbert Steam Plant, eines Standardwerkes des riesigen Systems der Tennessee Valley Authority in den USA. Dort sind vier Einheiten zu 200 MW der General Electric installiert; der volle Ausbau wird zehn Gruppen umfassen. Bei 127 at, 568°C / 568°C / 0,05 at Vakuum erreicht die Turbine einen thermischen Wirkungsgrad von 43,8 %, die Gesamtanlage von 36,7 %. Die Kosten des Werkes betrugen, alles inbegriffen, 131 Dollars pro kW; diese Zahl liegt wesentlich tiefer als jene, die vor einigen Jahren in ähnlichen Werken bekanntgegeben wurde.

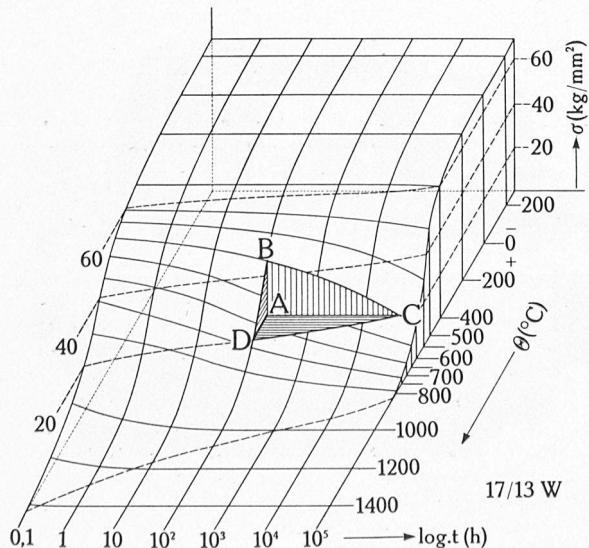


Bild 8 (links). Zeitstandfläche des warmfesten Stahles, Marke 17/13 W
 σ Bruchbeanspruchung, t Bruchzeit (log. Maßstab), θ Temperatur

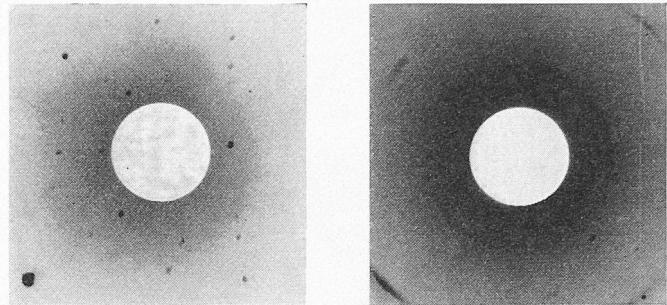


Bild 10. Beispiel aus der Mikrostruktur-Forschung der Kriechvorgänge. Laue-Diagramme bei Beginn (links) und am Ende (rechts) des Kriechvorganges

a) Scharf abgezeichnete Einzelreflexe: Der Kristall hat keine feststellbaren elastischen Verspannungen und es ist keine Aufteilung in eine Substruktur zu beobachten

b) Die Laue-Interferenzen sind stark verschwommen oder gar nicht mehr sichtbar. Statt dessen treten Debye-Scherrer-Ringsegmente auf, die aber ebenfalls nicht scharf abgezeichnet sind. Das Kristallgitter ist stark gestört; es bestehen nur noch sehr kleine Bereiche mit einheitlicher Kristallstruktur

Auf Bild 6 ist der dreiflügelige ND-Läufer einer Grossdampfturbine von Escher Wyss für die Anlage «Baudour» zu sehen, die 115 MW bei 3000 U/min leistet und mit Frischdampf von $165 \div 170$ ata, $595 \div 600^{\circ}\text{C}$ sowie mit Zwischenüberhitzung auf $565 \div 570^{\circ}\text{C}$ arbeitet. Endlich zeigt Bild 7 den Maschinensaal der komplett von Brown Boveri gebauten Anlage Santa Barbara bei Florenz von 2×125 MW Leistung.

2. Mechanische Probleme des Turbinenbaues

a) Festigkeit der Baustoffe bei hohen Temperaturen

So lange die Temperaturen noch mässig waren, hatte man lediglich darauf zu achten, dass die Beanspruchung keines Maschinenteiles die Streckgrenze erreicht. Bei hohen Temperaturen ist die Bruchgefahr nicht mehr von einem Parameter allein abhängig, sondern von deren drei. Es sind dies die mechanische Beanspruchung σ , die Temperatur θ und die Belastungszeit t .

Das Fliessen eines Zugstabes, das bei mässigen Temperaturen nach Ueberschreitung der Streckgrenze wieder zur Ruhe kommt, macht bei hohen Temperaturen einem ständigen, langsamem Kriechen Platz. Der Bruch tritt je nach Beanspruchung nach Stunden, Tagen oder Jahren auf. Stodola macht in einem Gutachten über die Holzwarth-Gasturbine, das er im Jahre 1928 erstattete, auf diesen Sachverhalt aufmerksam. Auf Grund der spärlichen Informatio-

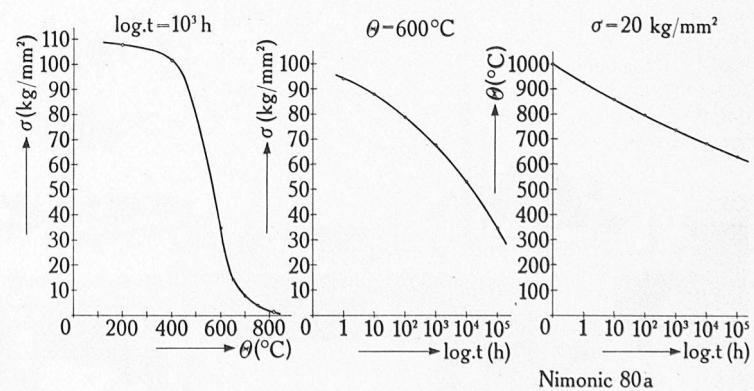


Bild 9. Schnitte durch die Zeitstandfläche
links: σ - θ -Kurve für eine bestimmte Bruchzeit
Mitte: σ - $\log t$ -Kurve bei best. Temperatur
rechts: θ - $\log t$ -Beziehung für eine best. Beanspruchung

nen, die ihm damals zur Verfügung standen, berechnete er die langfristige Dehnung der Turbinenschaufeln unter Annahme einer zeitlich unveränderlichen Dehngeschwindigkeit, die, wie wir heute wissen, nicht besteht. Namentlich wusste man damals noch nicht, dass Stahl bei hoher Temperatur und Dauerbeanspruchung oft bei einer wesentlich kleineren Dehnung bricht als im kalten Zustand. Diese Tatsache ist unerwartet und folgenschwer, denn lokale Spannungsspitzen, wie sie bei Querschnittsübergängen leicht vorkommen können, bauen sich nicht in harmloser Weise ab, sondern führen zum Bruch.

Wir können die Bruchenschaften eines Stahles durch eine Fläche in einem räumlichen Koordinatensystem darstellen, bei dem auf den drei Axen die Zeit t , die Temperatur Θ und die Beanspruchung σ aufgetragen sind, Bild 8. Wir wollen sie *Zeitstandfläche* nennen. Eine bestimmte Beanspruchung, die bei einer bestimmten Temperatur während einer bestimmten Zeit wirkt, wird durch einen Raumpunkt A dargestellt. Liegt A vom Koordinatenursprung aus gesehen diesesseits der Fläche, so hält der Stahl, liegt er jenseits, so bricht er. Die Fläche neigt sich von hinten nach vorn, was die Abnahme der Festigkeit mit zunehmender Temperatur kennzeichnet, bis sie am Schmelzpunkt in die Horizontalalebene $\sigma = 0$ übergeht. Sie neigt sich aber auch von links nach rechts, was das Zeitstandsverhalten, d.h. die Abnahme der Bruchbeanspruchung mit zunehmender Zeit zeigt. Wenn ein Punkt auf der «sicheren» Seite der Fläche liegt, kann man entweder von einer «Beanspruchungsreserve AB» oder von einer «Zeitreserve AC» oder von einer «Temperaturreserve AD» sprechen. Man könnte ferner irgendeine «kombinierte» Reserve definieren, die durch den Abstand des Punktes A von der Bruchfläche zu kennzeichnen wäre. Es ist ohne Verzicht auf Allgemeinheit auch möglich, statt σ , Θ , t einfache oder zusammengesetzte Funktionen dieser Größen als Koordinaten zu wählen, beispielsweise die Zeit in logarithmischem Maßstab aufzutragen, wie es im Bild geschehen ist.

Durch die Zeitstandfläche lassen sich verschiedene Schnittebenen legen (Bild 9). Ebenen parallel zur σ - Θ -Koordinatenebene schneiden σ - Θ -Kurven bei konstanter Lebensdauer von z.B. 10^4 , 10^5 h aus. Diese Kurven braucht der Konstrukteur, der Maschinen für eine bestimmte Lebensdauer entwirft. Schnitte parallel zur σ - $\log t$ -Ebene schneiden σ - $\log t$ -Kurven bei konstanter Temperatur heraus. Das sind die üblichen Zeitstandskurven. Endlich stellen horizontale Schnitte Θ - $\log t$ -Beziehungen bei konstanter Beanspruchung dar; diese werden uns noch beschäftigen.

Es fragt sich, ob sich über die Zeitstandsfäche irgendwelche allgemeine Aussagen machen lassen, ob sie irgendwelche allgemeinen Gesetzen gehorcht. Die Amerikaner Larson und Miller³⁾ glaubten als Erste die Frage in beschränktem Maße bejahen zu können. Sie stellten fest, dass die Veränderungen im Stahl, welche zum Bruch führen, ähnlichen Gesetzen folgen wie etwa Kristallbildung, Aushärtung und dgl. Der langsame Zerstörungsvorgang besteht darin, dass fortwährend in molekularem Maßstab bald da bald dort kleine plötzliche Veränderungen stattfinden: Potentialschwellen werden überschritten, «Moleküllkomplexe aktiviert». Man denke sich den Vorgang etwa wie das Reissen einzelner Drähtchen in einem dicken Zugkabel. Das Fortschreiten solcher Vorgänge bei gegebenen Kräften ist nach einem Exponentialgesetz temperaturabhängig, nämlich proportional der Größe $e^{k\Theta/\epsilon}$ wo k die Potential-Schwellenhöhe und ϵ die Boltzmannsche Konstante bezeichnen. Larson und Miller folgern daraus, dass die Beziehung zwischen Temperatur und Zeit (Bild 9, rechts) bei konstanter Spannung (in einer von L.S. Dzung verwendeten Schreibweise)

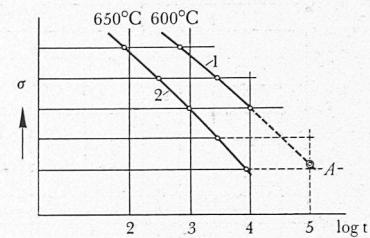
$$(1) \quad \Theta \log (ct) = \Theta^*(\sigma)$$

lauten muss, wobei Θ^* eine Funktion nur der Spannung (mit der Dimension einer Temperatur) und c im Prinzip auch eine Funktion von σ ist. Man stellt jedoch empirisch fest, dass man für eine Stahlsorte mit einem Festwert rechnen kann, welcher sogar von Stahl zu Stahl wenig variiert. \log ist der dekadische Logarithmus.

³⁾ F.R. Larson and James Miller. A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses «Trans. ASME» 74 (1952), S. 765.

Bild 11. Extrapolation von Zeitstandsmessungen

1 Zeitstandkurve bei $600^\circ C$, bekannt bis 10 000 h
2 Zeitstandkurve bis $650^\circ C$, bekannt bei 10 000 h
A Zeitstandwert bei $600^\circ C$ nach 100 000 h erhalten einerseits durch die Verlängerung der Kurve 1, anderseits durch die Verlängerung des horizontalen Abstandes zwischen 1 und 2



Ist die Kritik, welcher der Larson Millersche Ansatz vielerorts begegnet, gerechtfertigt? Zunächst ist es vorsichtig, ihn zum Vergleich benachbarter Punkte der Zeitstandfläche heranzuziehen und ihn nicht auf entfernte Bezirke anzuwenden. Zu diesem Zweck schreiben wir die Gleichung (1) in Differenzenform.

$$(2) \quad -\frac{\Delta \Theta}{\Delta \log t} = \frac{\Theta^2}{\Theta^*}$$

Die linke Seite drückt das Mass der Temperaturerhöhung $\Delta \Theta$ aus, welches nötig ist, um die Lebenszeit um einen Faktor 10 zu verkürzen ($\Delta \log t = -1$). Dieses Mass lässt sich leicht auf Scharen von Zeitstandskurven abgreifen und liegt für warmfeste Stähle meistens in den Grenzen zwischen 40 und $60^\circ C$. Von einer guten Erfüllung des Ansatzes (2), welcher verlangt, dass dieses Mass bei gegebener Spannung proportional Θ^2 sei, kann man nicht sprechen. Wir müssen zugeben, dass wir den Kriechmechanismus im einzelnen physikalisch noch nicht genügend genau kennen. Er ist ja nicht einfach, sondern spielt sich in komplexer Weise in den Kristallgittern und in den Korngrenzen ab, wie die interessanten Untersuchungen zeigen, die mit Röntgen- und Elektronenstrahlen von Epprecht, Widmer u.a. an der ETH gemacht wurden, Bild 10. Die Metallproben sind in keiner Weise homogen. Möglicherweise überlagern sich verschiedene Zeitgesetze. Der Larson-Millersche Ansatz, namentlich in der differenziellen Form (2) bleibt aber als empirischer Ansatz bestehen. Die Größe $-\Delta \Theta / \Delta \log t$ verändert sich jedenfalls nicht sprungweise; sie eignet sich gut für Inter- und Extrapolationen.

Will man beispielsweise innerhalb 10 000 h möglichst zuverlässige Auskunft über die wahrscheinliche Bruchgrenze eines Stahles nach 100 000 h bei $600^\circ C$ erhalten, so führt man zwei Versuchsserien durch, die eine bei $600^\circ C$, die andere bei $650^\circ C$ (in Bild 11 durch kleine Kreise bezeichnet, durch die ausgezogene Kurven gelegt sind), extrapoliert einerseits die $600^\circ C$ Zeitstandkurve von 10 000 auf 100 000 h, bestimmt anderseits den Abstand ($\Delta \log t / \Delta \Theta$) der beiden Zeitstandskurven und extrapoliert auch diesen. Somit zielt man aus zwei Richtungen auf den gesuchten Punkt A, welcher dadurch viel zuverlässiger ermittelt wird, als wenn man nur bei einer Temperatur gemessen hätte.

Die Bruchzeit bei gegebener Beanspruchung und Temperatur ist von Probe zu Probe verschieden. Die Bruchzeiten verschiedener Proben aus dem selben Walzstab können um einen Faktor 2 streuen, Proben einer und derselben Stahlsorte, von verschiedenen Herstellern zu verschiedenen Zeiten geliefert, um einen Faktor 10! Die Zeitstandfläche Bild 8 stellt den Mittelwert der gemachten Proben dar. Es ist wichtig, über die Streuung der Festigkeit Bescheid zu wissen, insbesondere die Beanspruchungen zu kennen, bei denen die Wahrscheinlichkeit eines Bruches 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} usw. beträgt. Werte mit geringer Wahrscheinlichkeit statistisch zu bestimmen, brauchen Tausende von Langzeitproben, die praktisch nicht zu bewältigen sind. Um sie trotzdem zu schätzen, trägt man die gemessenen Bruchzeiten ($\log t$) in monotoner Reihenfolge über einer Abszisse auf, deren Skala von 0 bis 100 % nach der Gaussischen Wahrscheinlichkeitsfunktion verzerrt und in so viele gleiche Abschnitte geteilt ist, als Proben vorliegen (Bild 12). In einem solchen Diagramm erscheint jede Gaussche Verteilung als eine Gerade. Wenn die gemessene Punktfolge nicht auf einer Geraden liegt, so kommt damit die Abweichung der wirklichen

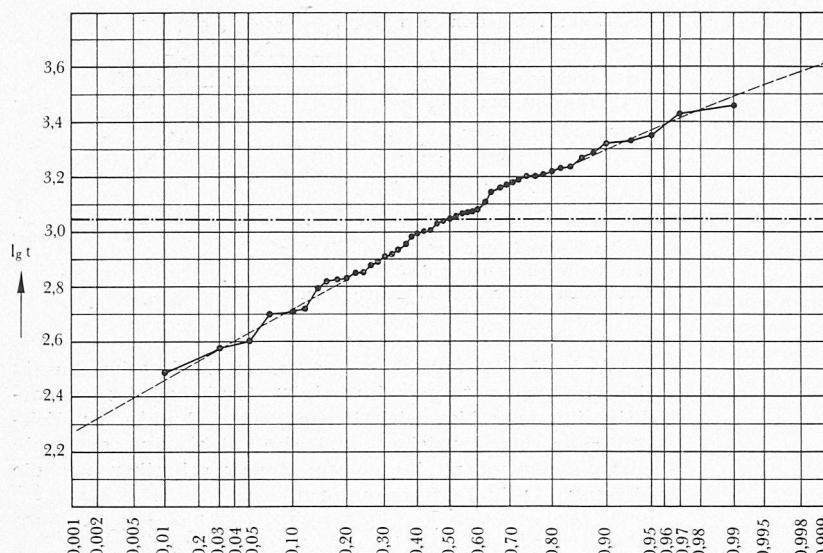


Bild 12. Streuung der Bruchzeiten. Etwa 50 Proben von Stahl T 17/13 W aus verschiedenen Lieferungen, $\sigma = 25 \text{ kg/mm}^2$, $\Theta = 650^\circ \text{C}$

Verteilung von einer Gausschen zum Ausdruck. Man setzt also in keiner Weise eine Gaussche Verteilung voraus, wohl aber (zu Recht oder Unrecht), dass man die gefundene Punktfolge ein Stück weit in das Gebiet geringer Wahrscheinlichkeit verlängern darf.

Tabelle 2 zeigt für einen typischen warmfesten Stahl, wie die Bruchwahrscheinlichkeit bei einer und derselben Belastungszeit mit sinkender Beanspruchung abnimmt.

Wenn man den Sicherheitskoeffizienten eines Maschinenteiles auf die Mittelwerte der gemessenen Festigkeitszahlen bezieht, so muss man die Streubreite abziehen und diese Breite um so grösser wählen, je kleiner die Anzahl Proben ist⁴⁾. Die Herabsetzung der zulässigen Beanspruchungen, die daraus folgt, ist sehr lästig. Um sie zu verringern, ist es empfehlenswert, eine Auswahl dadurch zu treffen, dass man jede Lieferung prüft und die schlechten Proben ausscheidet. Dazu sind aber nach heutiger Ansicht mindestens 1000stündige Proben nötig, während man früher glaubte, mit 35 Stunden auszukommen.

b) Festigkeitsprobleme in Turbinen

Die Festigkeitsberechnung der Turbinen soll zwei Fragen klären, nämlich 1. die Übertragung der Messungen am Probestab auf die betreffenden Maschinenteile und 2. die Ermittlung der Beanspruchungen im Betrieb. Oft sind die

⁴⁾ H. Zschokke. Statistische Auswertung der Ergebnisse von Zeitstandversuchen als Grundlage zur Festlegung von Mindestwerten «Arch. Eisenhüttenwesen» 28 (1957), Heft 11.

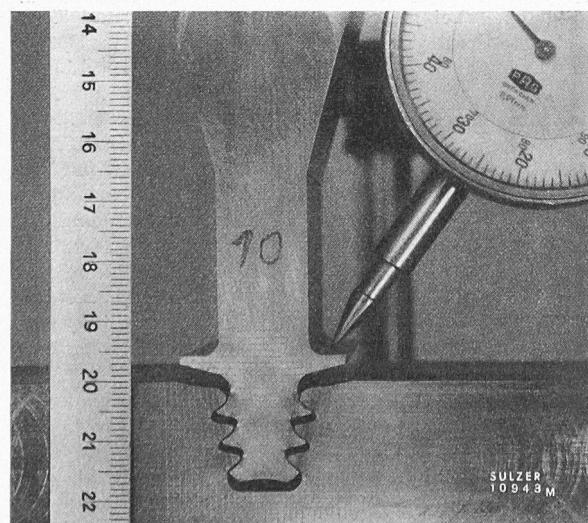


Bild 14 (links). Ausreissversuch am Modell eines Schaufelfusses nach Dr. W. Siegfried

Beanspruchungen in den Maschinen nicht einzig wie am Probestab, sondern mehraxig. Die Bruchgesetze mehraxig beanspruchter Teile müssen zunächst im Laboratorium erforscht werden. Bild 13 zeigt als ein Beispiel unter vielen einen Ermüdungsversuch an einem Rohr, das in Längsrichtung durch eine Wechselspannung mit überlageter ruhender Spannung und überdies tangential, also senkrecht dazu durch eine Gleitkraft beansprucht ist. Auch Zeitstandsversuche mit mehraxigen Spannungen sind vielfach ausgeführt worden. Auf Grund der dabei gewonnenen Erkenntnisse darf man heute feststellen, dass die Wirkung mehraxiger Spannungszustände einigermassen bekannt ist. Trotzdem ist es nötig, bei komplizierten, rechnerisch oft nicht erfassbaren Formen Proben an wirklichen Bauelementen vorzunehmen (Bild 14).

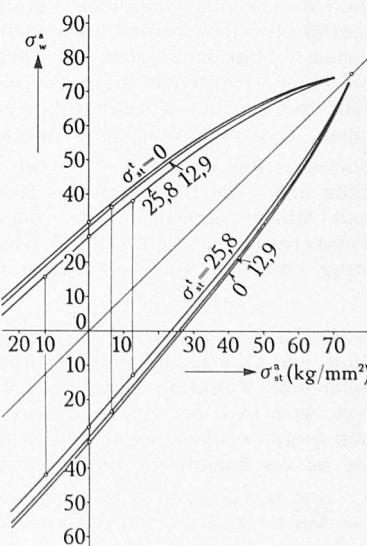
Mit den Beanspruchungen durch Fliehkräfte und Drücke (mit denen sich Stodola sehr viel beschäftigt hat) wollen wir uns hier nicht befassen, sondern nur mit Wärmespannungen im instationären Betrieb, wie sie insbesondere beim Anheizen und Anfahren einer Maschine vorkommen. Die vom Dampf

bestrichenen Metallwände erwärmen sich rasch, die entfernten langsam. Misst man die Temperaturdifferenzen beim Anfahren einer Maschine, so stellt man fest, dass sie zuerst rasch zunehmen, nach ein bis zwei Stunden ihr Maximum erreichen und dann abklingen. Wärmespannungen sind zwar bei weitem nicht so gefährlich wie etwa solche, die von Fliehkräften oder Dampfdrücken verursacht werden, denn wenn sie die Fliess- oder Kriechgrenze erreichen, werden sie von selber abgebaut. Trotzdem muss man sie durch eine vernünftige Betriebsführung in zulässigen Grenzen halten, da sonst die Baustoffe der Maschine durch wiederholte Deformationen ermüden könnten. Meistens schreibt man Höchstwerte des zeitlichen Temperatur- oder Lastgradienten vor. Nun sind aber die zeitlichen Gradienten gar kein direktes Mass für die Beanspruchungen. Vielmehr sind es die räumlichen Gradienten, und diese sind von der «Vergeschichte» der Turbine während den vorangegangenen 10 bis 20 Stunden abhängig. Außerdem hat man die zeitlichen Gradienten auch nicht immer ganz in der Hand. Es ist da-

Tabelle 2. Bruchwahrscheinlichkeit W einer Probe in Abhängigkeit vom Verhältnis ε der Beanspruchung der einen Probe zur mittleren Bruchbeanspruchung aller Proben

ε	1	0,90	0,83	0,77	0,73
W	0,5	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
gemessen					extrapoliert

Bild 13 (rechts). Wechselfestigkeit mit Vorspannung
 σ_w^a Wechselbeanspruchung
 σ_{st}^a Vorspannung (Zug) parallel zu σ_w^a
 σ_{st}^t Vorspannung (Zug) senkrecht zu σ_w^a



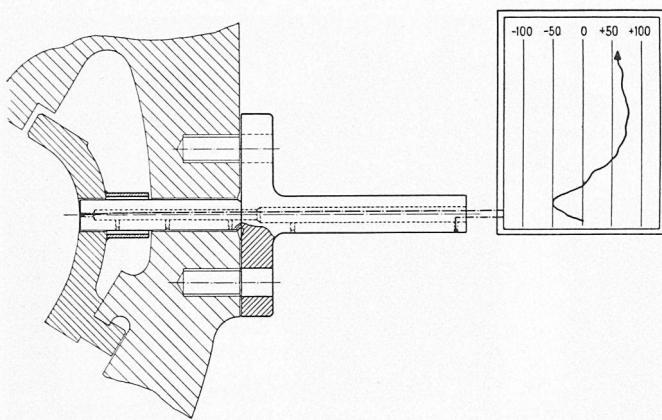


Bild 15. Temperatursonde zur Kontrolle des Belastungstemplos einer Turbine

her von Vorteil, an einer in die Turbinenwand gesteckten Temperatursonde (Bild 15) eine für das Verhalten der Turbine charakteristische Temperaturspanne abzugreifen und auf ein Instrument zu übertragen. Die ganze Kunst der Betriebsführung beschränkt sich dann darauf, eine rote Marke auf diesem Instrument nicht zu überschreiten. Dies kann man ohne weiteres einem Regler überlassen.

Bild 16 veranschaulicht das Anfahren und Beladen einer Turbine von 60 MW Leistung nach einem Wochenendstillstand von 33 Stunden. Beachtenswert ist, dass beim Hochfahren der Turbine der Dampf kälter war als die Maschine. Die Sonde schlug negativ aus. Dies ist verpönt. Vorschrift ist, den Dampf so lange umzuleiten, bis er mindestens so warm ist wie die Maschine. In Wirklichkeit war der Vorfall durchaus harmlos. Der negative Ausschlag beschränkte sich auf -50°C und schlug ins Positive um, sobald sich die Dampftemperatur 400°C näherte. Die Turbine wurde mit 1,5 MW pro Minute beladen, nachdem die Dampftemperatur auf 500°C gestiegen war (so lange hätte man nicht zu warten brauchen). Als dann die Sonde 75°C erreicht hatte, wurde die Belastungszunahme auf rd. 0,5 MW pro Minute verlangsamt. Das Bild zeigt den Vergleich der Sondenanzeige mit der Dehnungsdifferenz zwischen Stator und Rotor. Man sieht, dass die Sonde ein wirksames Warnmittel darstellt, um das Streifen des Rotors beim Anfahren zu vermeiden.

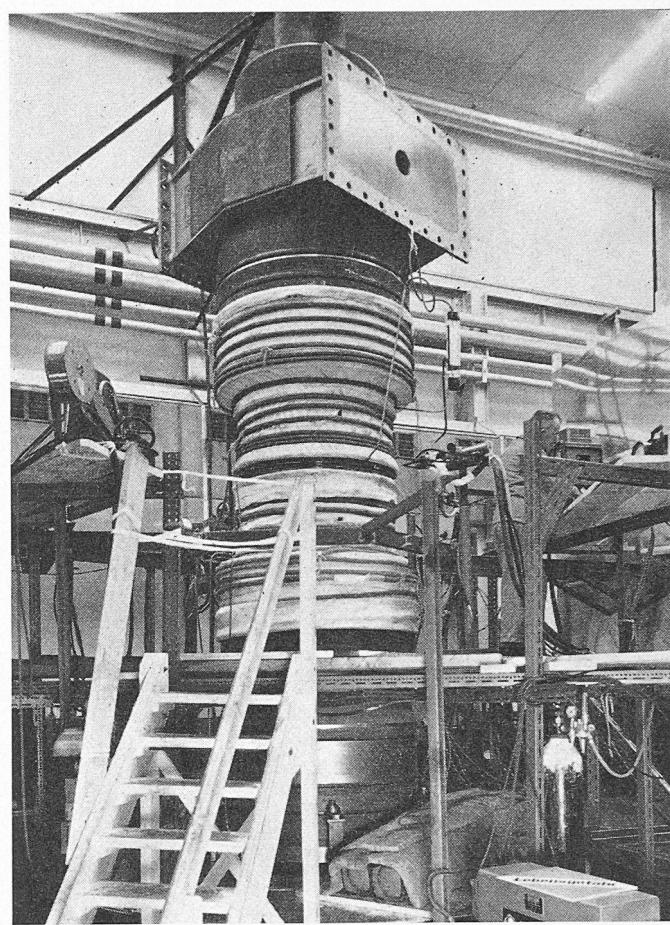


Bild 17. Schweißung einer Turbinenwelle unter Schutzgas und mit induktiver Heizung auf hohe Temperatur

Neben der Wahl des Materials sind die Herstellungsverfahren von entscheidender Bedeutung für die Sicherheit der Maschinen. Als Beispiel nennen wir das *Schweißen* hochbeanspruchter Turbinenrotoren. An sich ist nicht einzusehen, weshalb das Erstarren eines flüssigen Metalls zwischen zwei Stahlteilen nicht ebenso gute Verbindungen geben sollte, wie

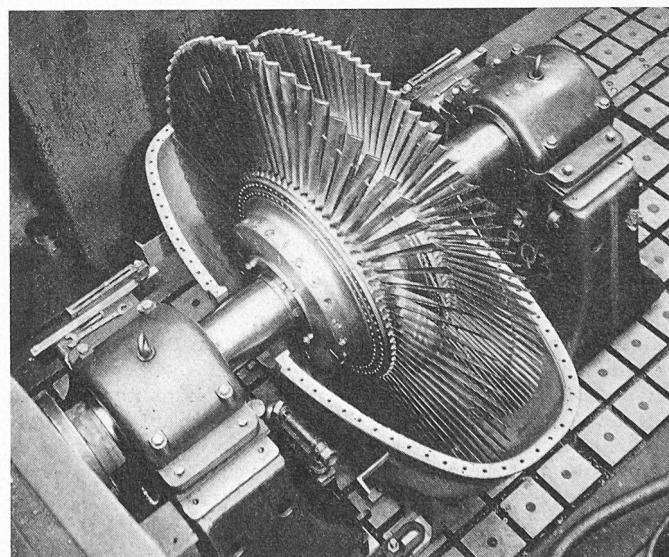
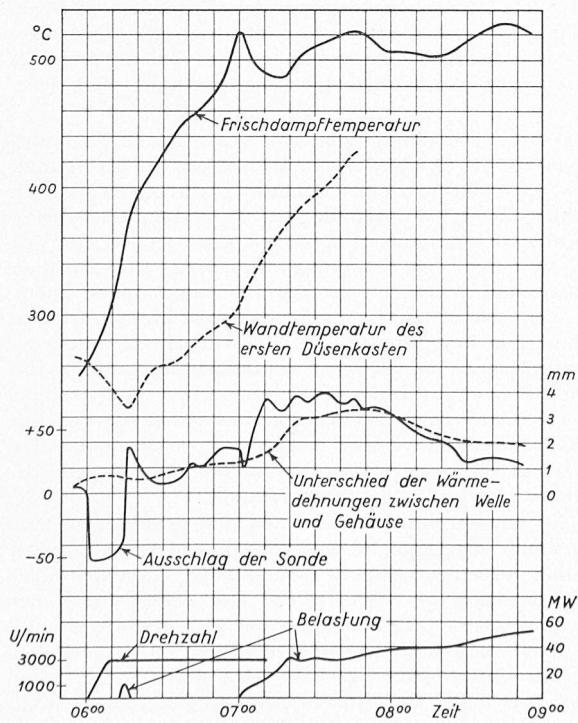


Bild 18. Schleudern der kompletten Endstufe einer Turbine von 37 MW bei 3600 U/min. Die Räder werden in einem Vakuumgehäuse in der Schleudergrube auf 20 % Ueberdrehzahl gebracht. Maschinenfabrik Oerlikon

Bild 16 (links). Anfahren und Beladen einer Turbine unter Kontrolle einer Temperatursonde nach 33 h Stillstand



Bild 19. Folgen des Berstens eines elektrischen Turborotors in der Schleuderkammer. Die Wicklungen des Rotors kleben an allen Wänden

wenn die zwei Teile aus einem Stück bestehen würden. Doch sind viele Umstände beim Schweißen zu beachten: die Kontraktion der Metalle beim Erstarren und Abkühlen, die grossen Temperaturdifferenzen zwischen benachbarten Stellen und die hohen Spannungen, die dabei auftreten; ferner die chemische Wechselwirkung zwischen dem Schweissmetall und dem Baustoff der zu verbindenden Teile, sowie zwischen Atmosphäre und Schweissmetall, weiter die Diffusion von Kohlenstoff und anderen Stoffen in den erhitzen Zonen, die Härte- und Anlasserscheinungen. Unlegierte, duktile Stähle liessen sich in diesen Beziehungen sehr vieles gefallen, aber die Notwendigkeit, legierte, ja hochlegierten Stahl im Turbinenbau und im Kesselbau zu schweissen, stellt schwierige Aufgaben. Diese sind heute für die meisten Stähle restlos gelöst. Die Stücke werden durch Induktion auf mehrere hundert Grad vorgewärmt. Der Lichtbogen wird in eine Schutzgasatmosphäre gehüllt. Es wäre unmenschlich, unter solchen Bedingungen von Hand schweissen zu wollen. Automaten besorgen dies genauer und besser (Bild 17). Ueberdies verfügen wir über Prüfmethoden: Durchleuchtung mit Röntgenstrahlen und Gammastrahlen künstlich radioaktiver Präparate, Betatron-Prüfung, Ultraschall-Echo, welche nach der Schluss-Wärmebehandlung sehr zuverlässige Kontrollen der fertigen Schweissnähte erlauben.

Zur Qualitätsprüfung gehört auch der Lauf mit Ueberdrehzahl in der Schleudergrube. Die Maschinenfabrik Oerlikon schleudert komplett beschaukelte Niederdruckräder in einer Schleudergrube, Bild 18, die unter Vakuum gehalten wird, um die Antriebsleistung und die erzeugte Wärme zu verringern. Wie gross die Verantwortung der Ingenieure ist, welche für die Sicherheit einer Konstruktion einzustehen haben, ist aus Bild 19 zu ersehen, das die Ueberreste eines in der Schleudergrube explodierten elektrischen Rotors zeigt. Der Unfall, der sich im Jahre 1929 ereignete, war die Folge eines Materialfehlers in einem grossen Schmiedestück. Er stärkte den Wunsch, schwere Rotoren aus kleinen

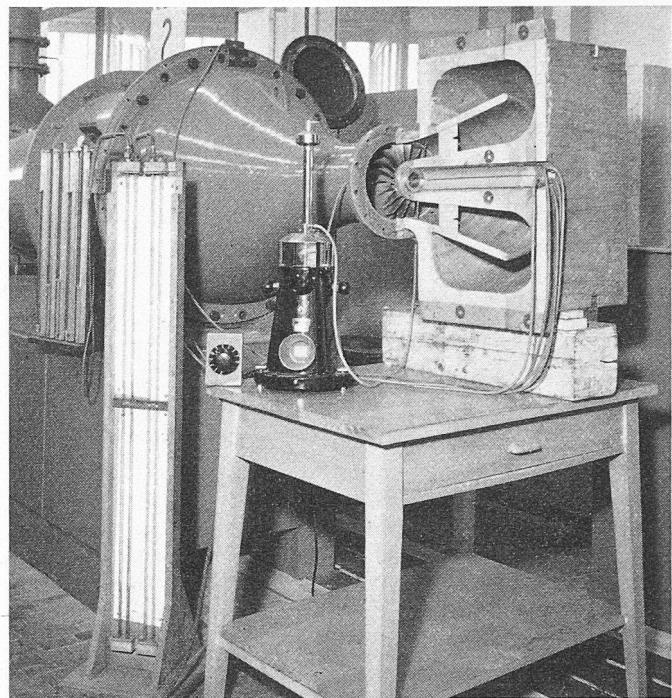


Bild 20. Forschung an Strömungselementen. Hier wird beispielsweise der Einfluss eines Eintrittsdralles auf den Verlust eines Diffusors geprüft

ren, gut durchgeschmiedeten und leichter kontrollierbaren Teilen zusammenzusetzen.

3. Strömungsprobleme bei Turbinen

Wenn wir uns in die Zeit Stodolas zurückversetzen, so staunen wir über die Spärlichkeit und Unzulänglichkeit der damaligen Ergebnisse der experimentellen Strömungsforschung. Kaum würde man es heute unternehmen, die Verluste eines Schaufelgitters aus den Differentialgleichungen der Grenzschicht integrieren zu wollen, wie Stodola es in meisterhafter Art tat. Er verfügte über kein Strömungslaboratorium, wie es Ackeret später an der ETH schuf. Die Firmen experimentierten an kleinen Modellen mit ungenügenden, aber trotzdem kostspieligen Dampfmengen. Vom Flugwesen her kam später die Anregung, im Windkanal systematisch zu arbeiten und die Modellgesetze zu ermitteln, welche die Uebertragung der Ergebnisse auf die Maschinen gestatten. Können wir, die wir nun über diese Laboratorien verfügen, uns rühmen, alle Zusammenhänge der Strömungen in unseren Maschinen erkannt zu haben? Kaum!

Die heutige Forschung geht im wesentlichen nach drei Richtungen vor: 1. Systematische Messungen an Strömungselementen: Einzelschaufeln, Schaufelgittern, Krümmern, Labyrinthen und dgl. im Windkanal. 2. Systematische Messungen an Modellturbinen. Es ist nie ganz sicher, ob Versuche an Modellen von Strömungselementen auf Turbinen übertragbar sind. Versuche an Turbinen sind daher unentbehrlich. Am besten benutzt man besondere Modellturbinen, an welchen man systematisch die gewünschten konstruktiven und betrieblichen Grössen verändern kann. 3. Erforschung der Feinstruktur der Strömungen, der Grenzschichten, der Turbulenz usw., bei welcher das Rüstzeug des modernen Experimentalphysikers beigezogen werden muss. Die Bilder 20, 21, 22 geben Einblick in die genannten drei Hauptrichtungen der Strömungsforschung.

Aus der Unzahl von theoretischen und praktischen Problemen sei hier lediglich die Systematik der Schaufelgitter etwas näher erörtert. Eine Turbinenstufe entsteht durch Hintereinanderschalten eines festen und eines drehenden Schaufelkranzes. Es fragt sich, ob die Eigenschaften eines Schaufelgitters unabhängig von der Kombination mit dem zugeordneten Gitter sind, ob sich also die Eigenschaften einer Stufe aus denen der einzelnen Gitter summieren lässt.

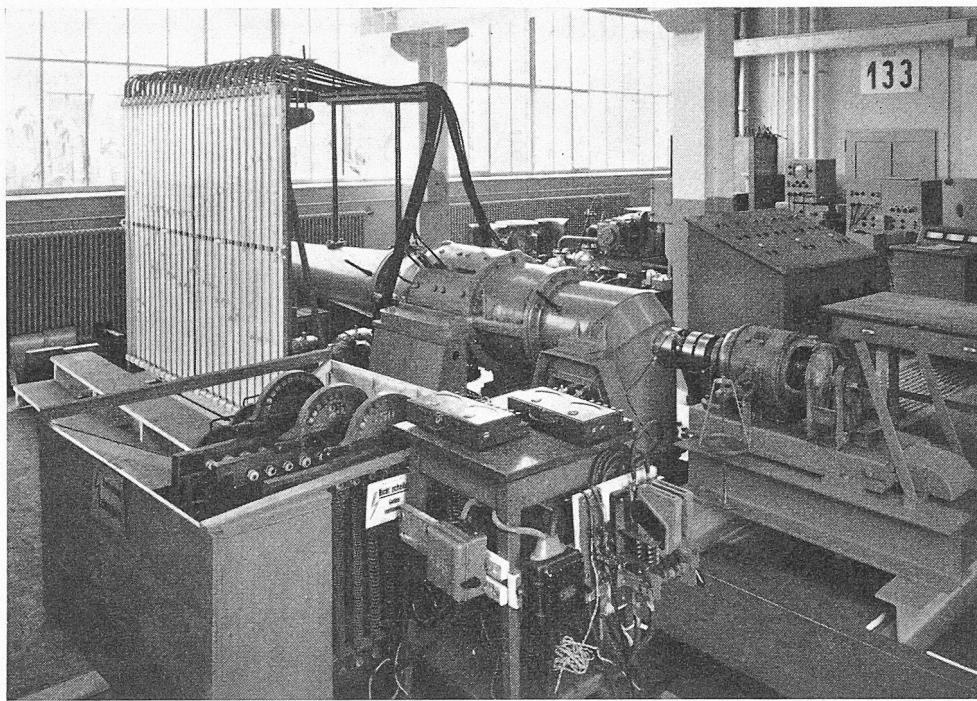


Bild 21. Forschung an Modellturbinen

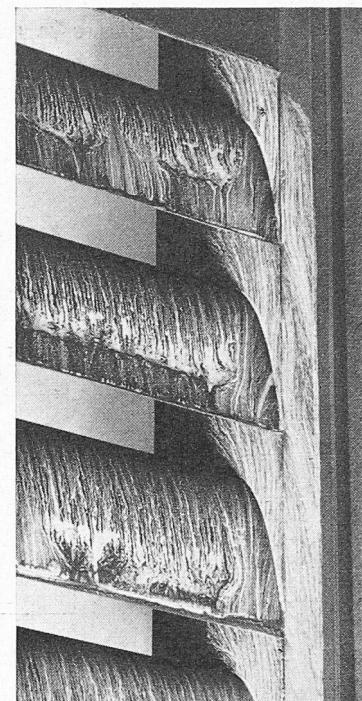


Bild 22. Erforschung der Feinstruktur der Strömungen, Sichtbarmachung der Grenzschichtströmungen

Sollte dies der Fall sein, so wäre es sinnvoll, sich mit den Kennwerten der einzelnen Gitter zu befassen. Diese Frage konnte durch systematische Versuche bejaht werden, wenigstens was mehrstufige Turbinen anbetrifft. Es zeigte sich ferner, dass sich ein Gitter als Lauf- oder Leitgitter hinsichtlich der für Turbinen massgebenden Eigenschaften praktisch gleich verhält. Man kann Leit- und Laufgitter miteinander vertauschen und erhält innerhalb der Messgenauigkeit gleiche Stufeneigenschaften. Das gilt aber, wie gesagt, nur für mehrstufige Turbinen oder für «Repetierstufen», bei denen sich die Strömungsgeschwindigkeiten von Stufe zu Stufe wiederholen. Wie man das Betriebsverhalten einer Turbinen-Stufe durch dimensionslose Kennzahlen ausdrückt, welche man gewinnt, indem man Strömungsgeschwindigkeiten und Gefälle mit der Umfangsgeschwindigkeit

keit in Beziehung bringt, könnte man dies auch für die Gitter tun. Da aber die Umfangsgeschwindigkeit eine Beziehung zwischen zwei Gittern ausdrückt, ist sie für die Aufstellung von Gitterkennzahlen nicht brauchbar.

Nach Bidard empfehlen wir für Gitter, welche die Normalkomponente c_n der Geschwindigkeit unverändert lassen (das ist bei allen Turbinenstufen außer der allerletzten der Fall), folgende Kennzahlen

$$m \equiv \frac{c_{\infty t}}{\Delta c_t} \quad n \equiv \frac{c_n}{\Delta c_t}$$

wobei die Geschwindigkeitssymbole aus Bild 23 hervorgehen. Trägt man in einem Kartesischen Koordinatensystem n als Abszisse und m als Ordinate auf (Bild 24) und verbindet man einen Punkt P mit den Ordinatenpunkten $m = +0,5$,

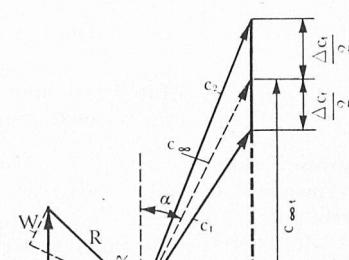
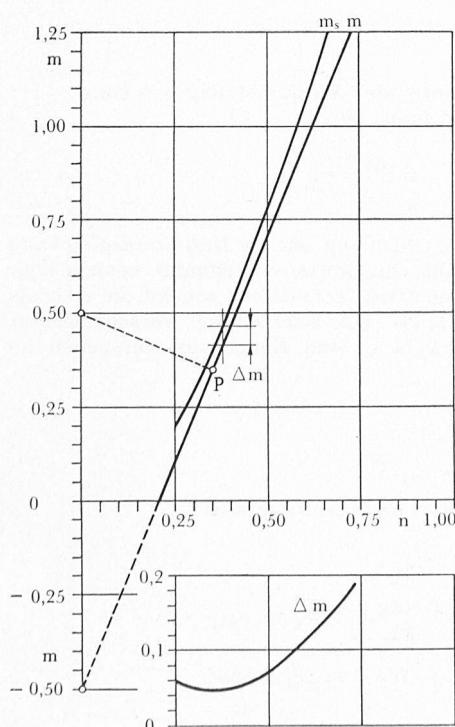


Bild 23. Geschwindigkeit und Kräfte-Diagramm eines Schaufelgitters

Bild 24 (links). Kennzahlen eines Schaufelgitters

$$\begin{aligned} n &= c_n / \Delta c_t \\ m &= c_{\infty t} / \Delta c_t = H / \Delta c_t^2 \\ \Delta m &= \Delta H / \Delta c_t^2 \\ m_s &= H_s / \Delta c_t^2 \end{aligned}$$

Bild 25 (rechts). Lage typischer Gitter im $m-n$ -Diagramm

1. Tragflügel-turbine, 2. Reaktions-turbine, 3. Aktionsrad, 4. Axial-kompressor

a Gitter für kleine Schluckfähigkeit,
b Gitter für grosse Schluckfähigkeit

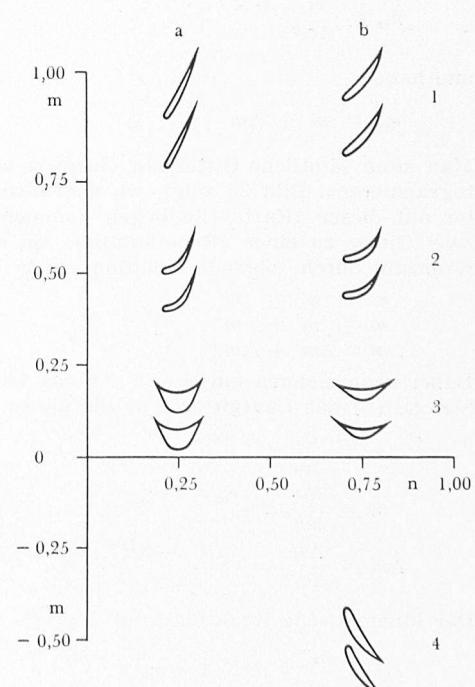
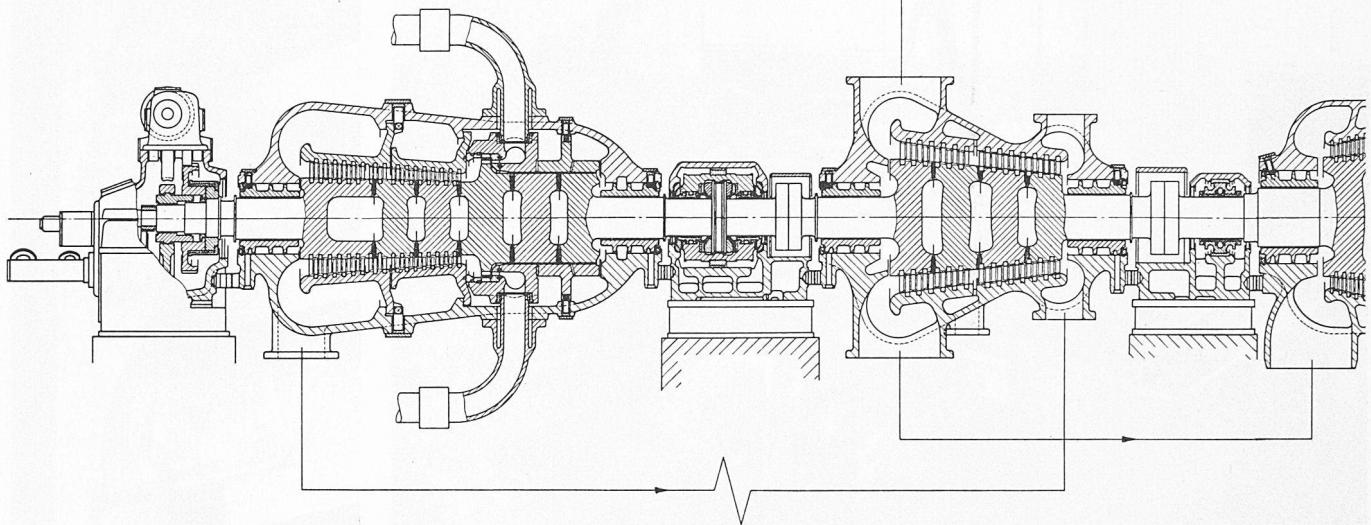


Bild 27. Schnitt durch die 200/230 MW Turbine bestimmt für die Stadt Los Angeles



und $m = -0,5$, so erhält man ein Abbild des Geschwindigkeitsdreiecks. Diese Kennzahlen sind also sehr anschaulich und erleichtern das Rechnen. Wir definieren ferner eine Verlustkennziffer

$$\Delta m \equiv \frac{\Delta H}{(\Delta c_t)^2}$$

Wäre die Geschwindigkeitsumsetzung verlustlos, so hätte das Druckgefälle den Wert

$$H = \frac{\Delta p}{\rho} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = \frac{c_{2t}^2 - c_{1t}^2}{2} = c_{\infty t} \Delta c_t$$

Somit ist auch

$$m = \frac{H}{\Delta c_t^2}$$

Ist $H_s = H + \Delta H$ das wirkliche statische Druckgefälle, so definieren wir

$$m_s \equiv \frac{H_s}{\Delta c_t^2}$$

und haben

$$m_s = m + \Delta m$$

Man kann sämtliche Gitter auf einem $m-n$ -Diagramm «kartographieren». Bild 25 zeigt, wo verschiedene typische Gitter auf dieser «Karte» zu liegen kommen. Verbindet man zwei Gitter zu einer «Repetierstufe», so erhält man deren Kennzahl durch folgende Additionsregeln

$$n = n' = n''$$

$$m = m' + m''$$

$$\Delta m = \Delta m' + \Delta m''$$

Dabei kennzeichnen ein Strich (') das Leitgitter und zwei Striche (") das Laufgitter. Für die ganze Stufe ist

$$n \equiv \frac{c_n}{\Delta c_t}$$

$$m \equiv \frac{u}{\Delta c_t} = \frac{c_{\infty t'} + c_{\infty t''}}{\Delta c_t}$$

$$\Delta m \equiv \frac{\Delta H}{\Delta c_t^2} = \frac{\Delta H' + \Delta H''}{\Delta c_t^2}$$

Der kinematische Reaktionsgrad⁵⁾ ergibt sich als

$$r_K = \frac{m'}{m} \quad 1 - r_K = \frac{m'}{m}$$

⁵⁾ W. Traupel: Thermische Turbomaschinen, S. 172.

Dieses Additionsverfahren führt zu Ergebnissen, die mit dem Experiment gut übereinstimmen.

Die Verlustkennzahl, die wir oben gewählt haben, ist zwar sehr praktisch; aus ihrem Zahlenwert lässt sich aber kein direktes Qualitätsurteil über das Gitter fällen. Die Güte eines Einzelflügels wird durch seine Gleitzahl, das Verhältnis Widerstand/Auftrieb, $s = C_w/C_A$ ausgedrückt. Es ist naheliegend, auch beim Gitter den Verlust mit dem Umlenkmaß des Gitters in Beziehung zu bringen und durch eine Gleitzahl auszudrücken. Die Gleitzahl eines Gitters hängt nach der klassischen Tragflügeltheorie durch folgende Gleichung mit dem Gitterverlust zusammen:

$$\Delta H = s \frac{c_{\infty}^2}{c_n} \Delta c_t$$

Für starke Umlenkungen ist auch diese Zahl nicht zweckmäßig. Man kann aber die starke Umlenkung in eine Summe elementarer schwächer Umlenkungen zerlegen und die Gleichung für H_v in differentieller Form schreiben:

$$dH_v = s \frac{c^2}{c_n} dc_t$$

Integriert man sie unter der Voraussetzung $s = \text{const}$, $c_n = \text{const}$, so erhält man (für $s \ll 1$)

$$\Delta H = \bar{s} \frac{c_{\infty t}^2 + \frac{1}{12} (\Delta c_t)^2}{c_n} \Delta c_t$$

Betrachten wir diese Gleichung als die *Definitionsgleichung einer Verlustzahl* \bar{s} , die wir «mittlere Gleitzahl» nennen können, so gilt sie vorbehaltlos. Tatsächlich scheint sie sich als ein zweckmäßiges Mass zur Beurteilung verschiedenster Schaufelgitter zu erweisen. Man findet aus Versuchen an

⁶⁾ Diese Formel gilt für $s \ll 1$, genau lautet sie

$$\Delta H = s \frac{c_{\infty}^2}{c_n - s c_{\infty t}} \Delta c_t$$

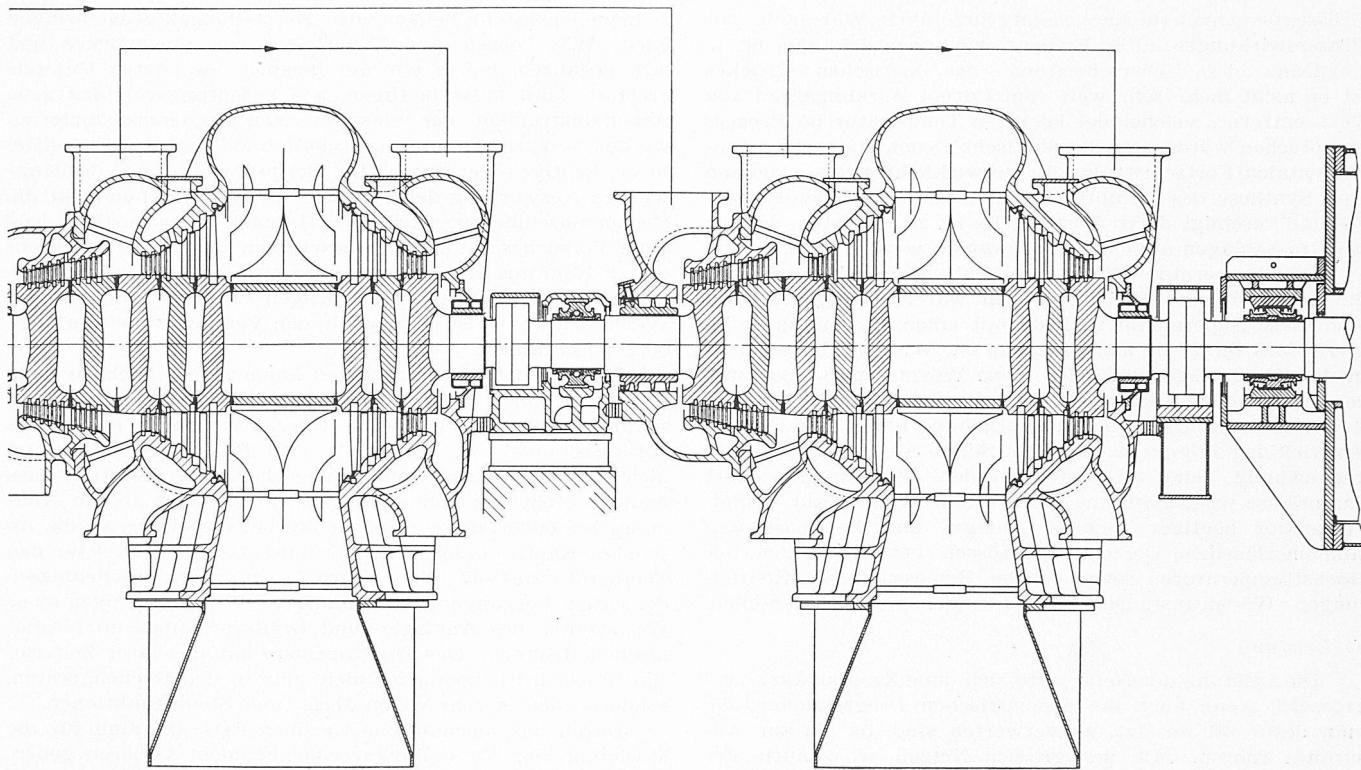
Man leitet sie aus Bild 23 ab, indem man setzt:

$$\Delta H = \frac{\Delta p}{\rho} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

$$\Delta p = \frac{N}{F_{ax}} = \frac{T \cot \gamma}{F_{ax}} = c_n \Delta c_t \cot \gamma$$

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = c_{\infty t} \Delta c_t = c_n \Delta c_t \cot \alpha$$

$$s \equiv \tan(\gamma - \alpha)$$



Modellturbinen für sehr verschiedenartige Schaufelgitter Zahlenwerte von $\bar{s} = 0,03$ bis $0,04$.

Der Ausdruck für ΔH lässt sich mit unseren Gitterkennzahlen wie folgt anschreiben:

$$\Delta m = \bar{s} \frac{n^2 + m^2 + \frac{1}{12}}{n}$$

Die Beziehung zwischen der Gleitzahl und den Verlusten ξ einer Stufe (ξ bezieht sich auf diejenigen Verluste, die mit der Umlenkung im Gitter zusammenhängen) lautet:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{\Delta H}{u \Delta c_t} = \\ &= \frac{1}{\nu} \left[(s' + s'') v^2 + s'(1 - r_K) + s'' r_K + \frac{1}{12} (s' + s'') \mu^2 \right] \end{aligned}$$

wo $v = \frac{c_n}{u}$, $\mu = \frac{\Delta c_t}{u}$

Zur Rechtfertigung dieser vielleicht sehr theoretisch anmutenden Aeusserungen ist darauf hinzuweisen, dass die Einflüsse, denen die Strömung in Turbinen untersteht, sehr vielfältig sind, und es absolut ausgeschlossen ist, sie rein experimentell durchzuprobiere. Die Kombination der Variablen führt zu astronomischen Zahlen der nötigen Messungen. Man ist daher darauf angewiesen, Gesetzmässigkeiten herauszufinden, um die Lücken unserer Experimente zu überbrücken. Dazu gehört das Festlegen von Kennzahlen, welche mehrere Variable vereinigen und damit die Zahl der Freiheitsgrade, mit denen zu experimentieren ist, herabsetzen.

4. Ausblick

Die Schlussfolgerungen, welche sich aus der Betrachtung der heutigen Lage auf dem Turbinenbau ergeben, sind folgende:

a) Druck und Temperatur

Der Wirkungsgrad einer thermischen Maschine wird, wie der zweite Hauptsatz lehrt, durch die Temperatur begrenzt, bei welcher das Arbeitsmittel die Wärme erhält. Diesen Grenz-Wirkungsgrad, der nur in einer verlustlosen Maschine erreicht würde, nennen wir den «Prozesswirkungsgrad». Er beträgt

$$\eta_p = \frac{1}{Q} \int \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) dQ$$

wo Q die zugeführte Wärme, T_0 die Temperatur des Kühlwassers und T die Temperatur des Speisewassers bzw. Dampfes bedeutet, bei der die Wärmezufuhr erfolgt ⁷⁾.

In Bild 26, das die Arbeitsbedingungen in der Anlage «Eddystone» wiedergibt, ist die Carnot-Grösse $1 - T_0/T$ in Funktion der dem Arbeitsmittel zugeführten Wärme dargestellt (Skala links). Die zugehörigen Temperaturen können an der Skala rechts abgelesen werden. Der Mittelwert dieser

⁷⁾ s. Brown, Boveri-Mitteilungen vom Okt. 1950

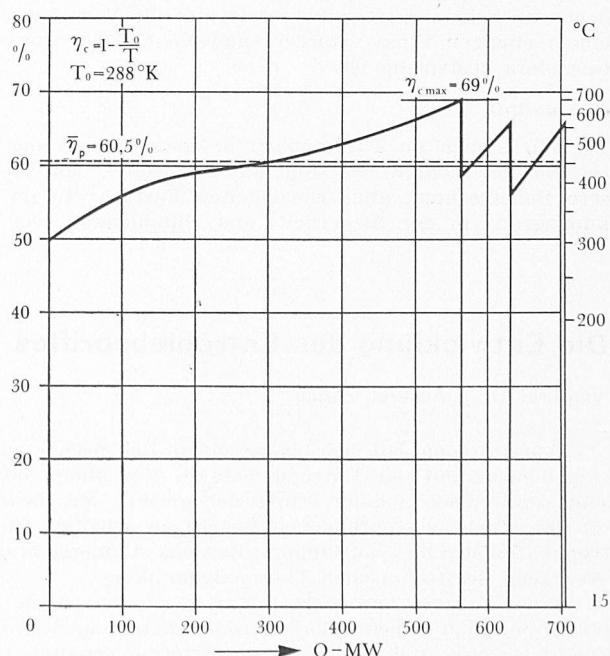


Bild 26. Q - η_c Diagramm der Anlage Eddystone für überkritischen Druck. Die Ordinate zeigt den verfügbaren Anteil $\eta_c = 1 - T_0/T$ der auf der Abszisse eingetragenen Wärmezufuhr im Kessel

Grösse, berechnet für die gesamte zugeführte Wärme, ist der Prozesswirkungsgrad η_p . Er liegt, wie ersichtlich, über 60 %.

Dank der Ueberschreitung des kritischen Druckes ist er nicht mehr sehr weit vom Carnot-Wirkungsgrad von 69 % entfernt, welcher der höchsten Temperatur im Prozess entsprechen würde. Der überkritische Druck stellt einen fundamentalen Fortschritt dar. Er verwirklicht gewissermassen eine Synthese des Dampfturbinen- und Gasturbinen-Prozesses und vereinigt deren Vorteile. Es ist zu erwarten, dass er bei Grossanlagen allgemein angewendet werden wird.

Die Temperatur könnte man heute noch weiter erhöhen; die dazu nötigen Stahllegierungen wären verfügbar. Doch sind diese Superstähle so hoch mit edlen Bestandteilen legiert, dass ihr Preis nicht tragbar ist. Wir sind heute nicht in der Zwangslage, um *jeden Preis* Wärme sparen zu müssen und werden es dank der Atomenergie auch in absehbarer Zeit nicht sein. Die Temperaturerhöhung hängt also von der Entwicklung *billiger* warmfester Stähle ab, von denen aber gegenwärtig keine angeboten werden. Ueberhaupt gehört das präzise wirtschaftliche Denken und Rechnen zur Grundkonzeption heutiger Technik. Anlage- und Betriebskosten sind unerlässliche Berechnungsgrössen beim Festlegen der Höchsttemperaturen sowie bei der Bemessung von Rohrleitungen, Wärmeaustauschern und manchen Maschinenteilen.

b) Leistung

Die Leistung der Netze wird sich ohne Zweifel stark vergrössern, wenn auch die geometrischen Progressionen, die man dafür oft ansetzt, zu verwerfen sind, da sie zur Absurdität führen. Mit den grossen Netzen wird auch der Wunsch nach grösseren Einheiten wach. Man spricht allen Ernstes von Zentralen mit 4 bis 16 Mio kW Gesamtleistung in Einheiten von bis zu 1 Mio kW.

Würde man die Drehzahl von 3000 U/min auf 1500 oder gar 1000 senken, so könnte man die Leistung praktisch ohne Grenze steigern. Die Modellgesetze ergeben aber bei den kleineren Drehzahlen zwangsweise höhere Gewichte pro Leistungseinheit, weshalb die modernen Grossmaschinen heute fast ausschliesslich mit 3000 U/min laufen (in Amerika entsprechend der Netzfrequenz mit 3600 U/min). Bei sehr grossen Einheiten werden viele, ja fast alle Organe verdoppelt oder vermehrfacht. Man darf sich füglich fragen, ob nicht die Grenze sich nähert, bei der man mit Vorteil eine Gruppe in zwei vollständige Einheiten trennt, die zwar in bezug auf Kontrolle und Instrumentierung gekuppelt sind, um den Betrieb zu vereinfachen, im Störungsfall aber getrennt werden können. Dies gilt besonders für Atomenergieanlagen, bei denen noch kein extrem dichter Dampf die Verarbeitung in einem einzigen Fluss erfordert und wo ein Betriebsausfall besonders kostspielig ist.

c) Qualität

Wir stehen im Turbinenbau in einer Periode der *Vertiefung* der Technik. Es steht ausser Zweifel, dass die bessere Beherrschung aller Einzelheiten Fortschritte im Wirkungsgrad, in der Sicherheit und Handlichkeit der Ma-

schinen sowie ein Senken der Herstellungskosten bringen wird. Wie Theorie und Experiment zusammenwirken und sich ergänzen, haben wir am Beispiel des letzten Kapitels erörtert. Man muss beifügen, wie bedeutungsvoll das neue Arbeitsinstrument der elektronischen Rechenmaschinen zu werden verspricht. Zunächst schalten sich solche Hilfsmittel in die heutigen Verfahren ein. Beispielsweise wird die langwierige Auswertung der Versuche an Modellturbinen für die Rechenmaschine programmiert. Hernach ist es möglich, jede neue Versuchsserie sofort auszuwerten und von den Ergebnissen Kenntnis zu nehmen, bevor man an der Versuchseinrichtung irgend etwas ändert. Zeigen sich Unklarheiten oder Widersprüche, so ist es möglich, den Versuch zu wiederholen oder zu ergänzen.

Die neuen Rechenmaschinen können aber auch zu ganz neuen Verfahren führen. Es gibt Fälle, bei denen sie sich sogar an Stelle des Versuchs einschalten lassen (allerdings vorläufig nicht, wo Turbulenz eine Rolle spielt). Das ist nicht so befremdend, wenn man sich vergegenwärtigt, dass manche Modellversuche nicht viel anders sind als ein Analogie-Rechenverfahren. Man denke beispielsweise an die im zweiten Kapitel beschriebene Temperatursonde, welche den Temperaturzustand einer Turbine aus den Geschehnissen der nahen Vergangenheit «integriert». Wir sind Zeugen eines Wettstreites des Analogie- und Digitalprinzipes im mechanischen Rechnen. Das Digitalprinzip hat in letzter Zeit riesige Fortschritte gemacht, nicht nur in den Rechengeräten, sondern auch in sehr vielen Mess- und Steuerfunktionen.

Durch das mechanische Rechnen darf der Sinn für die Mechanik, das Vorstellungsvermögen, nicht verloren gehen. Die Verbindung genauer Information und schöpferischer Intuition beim Konstrukteur am Zeichenbrett bleibt die Grundlage eines erfolgreichen Maschinenbaues.

d) Unsere Industrie

Es gibt zu denken, dass als eindrucksvolle Beispiele moderner Kraftwerkpraxis amerikanische Anlagen hier gezeigt werden könnten. Es ist eine Tatsache, dass unsere Kollegen jenseits des Atlantiks, begünstigt durch die Breite ihres Marktes und die Grosszügigkeit ihres Kundenkreises, Grossartiges geleistet haben. Angesichts dieser Tatsache erfüllt es uns mit grosser Befriedigung, dass sich eine grosse kalifornische Elektrizitätsgesellschaft für den Kauf zweier Brown Boveri-Turbinen von 200/230 MW entschloss. Wir sind also nicht ausgespielt. Aber nur ein zielbewusstes, von klarem Denken geleitetes Schaffen kann unsern Ruf erhalten. Unsfern übertriebenen Partikularismus müssen wir beiseite legen und die Zusammenarbeit unter Firmen und mit der Hochschule, die bereits einige Gebiete umfasst, erweitern. Die Amerikaner haben Pilot-Dampfkraftwerke für überkritischen Druck und in breitester Weise auch solche Anlagen auf dem Gebiete der Atomenergie gebaut. Für die Schweiz ist es ein Gebot der Selbsterhaltung, ähnliches auch zu tun. Mögen öffentliche Hand und Privatwirtschaft — keines kann es allein — sehr bald vom Wort zur Tat schreiten!

Die Entwicklung des Entropiebegriffes

Von Prof. Dr. J. Ackeret, Zürich

DK 536.75

Aurel Stodola hat sich bis zu seinem Lebensende auf das eingehendste mit der Entropie befasst. Vor allem hatte er seine zahlreichen Schüler erfolgreich gelehrt, mit diesem ja oft als schwierig empfundenen Begriff zu arbeiten. Die Entropietafel ist schon seit längerer Zeit das ständig gebrauchte Werkzeug des technischen Thermodynamikers.

Was ihn aber besonders tief bewegte, waren die mehr philosophischen Aspekte der Entropie, dieser eigentümlichen Zustandsgrösse, die nicht wie die Energie erhalten bleibt, sondern ständig wächst und die das wissenschaftliche Mass eines unerbittlichen «running down» des Universums darstellt. Seinem idealistischen Wesen war der Gedanke, dass schliesslich die Welt sich in ein höchstens noch lauwarmes

Grab verwandeln sollte, unerträglich, und mit ergreifenden Worten hatte er sich am Schluss der vierten Auflage seines einzigartigen Lehrbuches gegen diese Vorstellung gewandt. Freilich war er sich ganz klar, dass die Physik zu seiner Zeit noch keinen Ausweg gefunden hatte, der zu besseren Hoffnungen konkreten Anlass gegeben hätte, und dass man mit billigen philosophischen Gedankenspielereien nicht auskommt.

Heute ist die Situation insofern verändert, als die theoretische Physik grosse Umwälzungen erfahren hat und in der Kosmologie anscheinend nicht weniger grosse Überraschungen bevorstehen. Und so mag heute in verstärktem Masse gelten, was Stodola in dem erwähnten Schlusswort