

Zeitschrift: Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik
Herausgeber: Verein für wirtschaftshistorische Studien
Band: 75 (2003)

Artikel: Aurel Stodola (1859-1942) : Wegbereiter der Dampf- und Gasturbine
Autor: Lang, Norbert
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1095656>

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

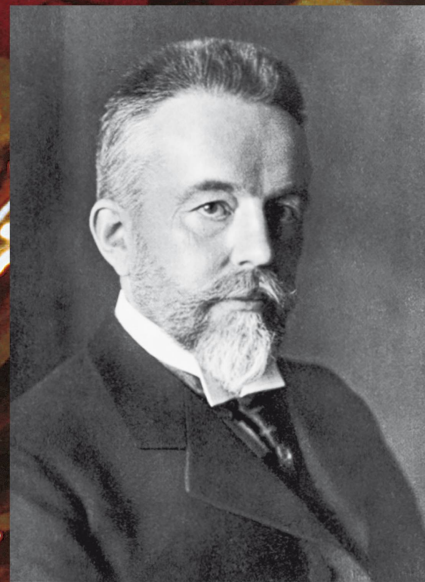
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media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

Download PDF: 25.04.2026

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

pioniere

Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik



Prof. Dr. A. Stodola

AUREL STODOLA 1859–1942
WEGBEREITER
DER DAMPF- UND GASTURBINE

Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik

- 1 Philippe Suchard (vergriffen)
- 2 J. J. Sulzer-Neuffert, H. Nestlé,
R. Stehli, C. F. Bally, J. R. Geigy
- 3 Joh. Jak. Leu (vergriffen)
- 4 Alfred Escher
- 5 Daniel Jeanrichard
- 6 H. C. Escher, F.-L. Cailier, S. Volkart,
F. J. Bucher-Durrer (vergriffen)
- 7 G. P. Heberlein, J. C. Widmer,
D. Peter, P. E. Huber-Werdmüller, E. Sandoz
- 8 W. Wyssling, A. Wander, H. Cornaz
- 9 J. J. Egg, D. Vonwiller (vergriffen)
- 10 H. Schmid, W. Henggeler, J. Blumer,
R. Schwarzenbach, A. Weidmann
- 11 J. Näf, G. Naville, L. Chevrolet, S. Blumer
- 12 M. Hipp, A. Bühler, E. v. Goumoens,
A. Klaesi
- 13 P. F. Ingold, A. Guyer-Zeller, R. Zurlinden
- 14 Dr. G. A. Hasler, G. Hasler (vergriffen)
- 15 F. J. Dietschy, I. Gröbli, Dr. G. Engi
- 16 Dr. E. Dübi, Dr. K. Ilg (vergriffen)
- 17 P. T. Florentini, Dr. A. Gutzwiller,
A. Dätwyler (vergriffen)
- 18 A. Bischoff, C. Geigy, B. La Roche,
J. J. Speiser
- 19 P. Usteri, H. Zoelly, K. Bretscher
- 20 Caspar Honegger
- 21 C. Cramer-Frey, E. Sulzer-Ziegler,
K. F. Gegauf
- 22 Sprüngli und Lindt
- 23 Dr. A. Kern, Dr. G. Heberlein, O. Keller
- 24 F. Hoffmann-La Roche, Dr. H. E. Gruner
- 25 A. Ganz, J. J. Keller, J. Busch
- 26 Dr. S. Orelli-Rinderknecht,
Dr. E. Züblin-Spiller
- 27 J. F. Peyer im Hof, H. T. Bäschlin
- 28 A. Zellweger, Dr. H. Blumer
- 29 Prof. Dr. H. Müller-Thurgau
- 30 Dr. M. Schiesser, Dr. E. Haefely
- 31 Maurice Troillet
- 32 Drei Schmidheiny (vergriffen)
- 33 J. Kern, A. Oehler, A. Roth
- 34 Eduard Will
- 35 Friedrich Steinfels
- 36 Prof. Dr. Otto Jaag
- 37 Franz Carl Weber (vergriffen)
- 38 Johann Ulrich Aebi
- 39 Eduard und Wilhelm Preiswerk
- 40 Johann Jakob und Salomon Sulzer
- 41 5 Schweizer Brückenbauer
- 42 Gottlieb Duttweiler (vergriffen)
- 43 Werner Oswald
- 44 Alfred Kern und Edouard Sandoz
- 45 Johann Georg Bodmer (vergriffen)
- 46 6 Schweizer Flugpioniere (vergriffen)
- 47 Welte-Furrer (vergriffen)
- 48 Drei Generationen Saurer
- 49 Ernst Göhner
- 50 Prof. Dr. Eduard Imhof (vergriffen)
- 51 Jakob Heusser-Staub
- 52 Johann Sebastian Clais
- 53 Drei Schweizer Wasserbauer
- 54 Friedrich von Martini
- 55 Charles E. L. Brown und Walter Boveri
- 56 Philippe Suchard
- 57 Brauerei Haldengut
- 58 Jakob und Alfred Amsler
- 59 Franz und August Burckhardt

Norbert Lang

Aurel Stodola (1859–1942)

**Wegbereiter
der Dampf- und Gasturbine**

**Die Herausgabe dieses Bandes wurde ermöglicht durch Beiträge und
Abnahmegarantien von**

Aurel-Stodola-Fonds an der ETH Zürich

ALSTOM Power (Schweiz) AG, Baden

ABB Schweiz AG, Baden

Sulzer AG, Winterthur

© Copyright 2003 by Verein für wirtschaftshistorische Studien.

Alle Rechte vorbehalten.

Herausgegeben vom Verein für wirtschaftshistorische Studien,
Weidächerstrasse 66, 8706 Meilen.

Herstellung: R + A Print GmbH, 8752 Näfels.

ISBN 3-909059-26-0

Inhalt

Einleitung	7
Faszination Gasturbine – Stodola, der grosse Meister – Puzzlesteine zu einer Biografie – Dank	
Elternhaus, Jugend und Ausbildung	9
Stodolas Heimat – Das Elternhaus – Jugend – Studium und erste Praxisjahre – Basis für die Karriere	
Professor in Zürich	15
Vom Polytechnikum zur ETH – Die mechanisch-technische Abteilung – Die Lehrplanreform von 1897 – Das Maschinenlabor – Beitrag zur Regelungstheorie – Stodolas Methodik – Die Mathematik als Werkzeug des Ingenieurs	
Die altbewährte Kolbendampfmaschine	23
Kleiner physikalischer Exkurs – Die Entwicklung der Kolbendampfmaschine – Die atmosphärische Dampfmaschine – Watt und seine Nachfolger – Schweizer Dampfmaschinen – Carnot begründet die Thermodynamik – Stodola und die Dampfmaschine – Ein neues Tätigkeitsfeld?	
Der Triumphzug der Dampfturbine	33
Vorläufer der Dampfturbine – Der Durchbruch – BBC nimmt den Dampfturbinenbau auf – Ein Vortrag wird zum Fachbuch – Wachsender Markt für Dampfturbinen – Die «Bibel» des thermischen Turbomaschinenbaus – Führende Schweizer Unternehmen	
Verbrennungsmotor und Turboaufladung	47
Stodola und der Verbrennungsmotor – Von der Pulvermaschine zum Gasmotor – Otto- und Dieselmotor – Anfänge der Motorenaufladung – Alfred Büchi und die Turboaufladung – Das Büchi-Syndikat und der BBC-Turbolader	
Verschlungene Wege zur Gasturbine	57
Einige Vorläufer – Stodola und die Gasturbine – Die Holzwarth-Gasturbine – Stodola als Gutachter – BBC steigt in den Gasturbinenbau ein – «Velox»-Dampfkessel und Axialverdichter – Die Gleichdruck-Gasturbine	
Stodola als Lehrer und Mensch	67
Die Abschiedsvorlesung – Stodolas Weltanschauung – Humanitäres und soziales Wirken – Stodola im Urteil seiner Schüler – Einbürgerung, Auszeichnungen und Abwerbeversuche – Letzte Lebensjahre und Tod – Nachrufe	

Epilog

77

Turbomaschinenbau in der Schweiz nach 1945 – Dampfturbinen – Dieselmotoren und Aufladung – Gasturbinen – Der Konzentrationsprozess in der schweizerischen Maschinenindustrie – Niedergang

Chronologie

84

Wichtigste Quellen und Literatur sowie Bildnachweis

86



Aurel Stodola bei Abnahmeversuchen an der ersten Gleichdruck-Gasturbine bei BBC Baden 1939

Einleitung

«Die Stellung Stodolas unter den Maschineningenieuren war die einer unbestrittenen Autorität. Er genoss in einer seltenen Weise die Achtung seiner Fachgenossen, und zwar nicht nur seiner unzähligen ehemaligen Schüler, sondern auch aller derjenigen, die in irgend einer Weise an der Entwicklung der neuzeitlichen Kraftherzeugungstechnik beteiligt waren.»

Henri Quiby

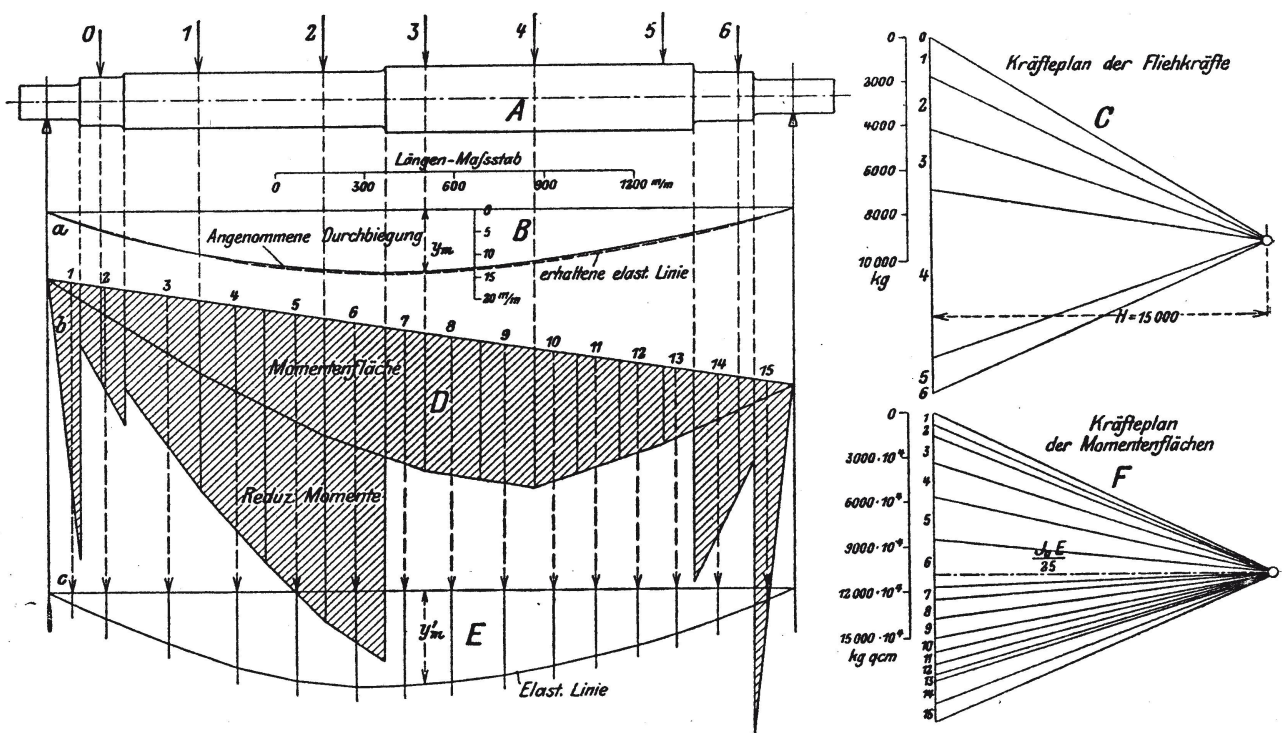
Faszination Gasturbine

Vor fünfzig Jahren habe ich erstmals einen Turbolader zu Gesicht bekommen. Im Rahmen meines Betriebspraktikums führte ich Unterhaltsarbeiten an einem Saurer-Dieselmotor durch. Am Auspuffrohr des Motors war eine kompakte Maschine angeflanscht. Diese nutzte einen Teil der im Abgas enthaltenen Energie, um dem Dieselmotor verdichtete Luft zuzuführen. Die Leistung erhöhte

sich dadurch um etwa 30 Prozent. Gerne hätte ich damals herausgefunden, wie dieser Apparat aufgebaut war. Der Werkmeister warnte mich jedoch davor, die plombierten Gehäuse-schrauben zu öffnen. Das Wunderwerk durfte nur von der Herstellerin Brown Boveri & Cie. AG (BBC) gewartet werden. Eher beiläufig erfuhr ich, dass die kleine Turbine im Betrieb sagenhafte 50 000 Umdrehungen pro Minute erreichte!

Um die Mitte der 1950er-Jahre stellte die Fachpresse erstmals Gasturbinen als zukünftige Antriebsquelle für Personen- und Nutzfahrzeuge vor. Für mich als Student des Maschinenbaus war dies der Anlass, als Semesterarbeit eine Kleingasturbine zu entwerfen. Diese Aufgabe führte zu interessanten, für mich teilweise neuartigen Berechnungen, beispielsweise

Grafisches Verfahren von Stodola zur Ermittlung der kritischen Drehzahl einer Welle



von Strömungsverlusten, Wärmespannungen, kritischen Drehzahlen und Beanspruchungen rotierender Scheiben. Auf meine Bitte um Hilfestellung legte mir der Dozent ein dickes, in schwarzes Leinen gebundenes Buch auf den Tisch mit dem Titel «Dampf- und Gasturbinen». Verfasser war ein gewisser Aurel Stodola.

Stodola, der grosse Meister

Nachdem ich meine Tätigkeit als Entwicklungsingenieur in der Gasturbinen-Abteilung bei Brown Boveri aufgenommen hatte, konnte ich eines Tages an der Konstruktionsitzung der thermischen Dienstbereiche teilnehmen. An die damals diskutierten Themen kann ich mich nicht mehr erinnern. Ein kleines Vorkommnis hinterliess bei mir jedoch einen bleibenden Eindruck: An einer Wand des Sitzungszimmers entdeckte ich eine gerahmte, etwas vergilbte Fotovergrösserung. Das Bild zeigte einen würdigen älteren Herrn mit Melone, Brille, Bart, weissem Stehkragen und schwarzem Gehrock, der sich interessiert einer Maschine zuwandte. Als ich nach der Sitzung vor dem Bild stehen blieb, um es genauer zu betrachten, kam Direktor Seippel auf mich zu und klärte mich auf: «Das ist Professor Stodola. Obschon dieser Mann schon lange gestorben ist, können wir immer noch von ihm lernen. Er war unser grosser Meister!» Die Bedeutung dieser Aussage habe ich erst später begriffen.

Puzzlesteine zu einer Biografie

Dreissig Jahre später, aus BBC war inzwischen ABB geworden, wurde ich

mit der Betreuung des Firmenarchivs betraut. Im Rahmen dieser Tätigkeit stiess ich auf Nachlässe mehrerer ehemaliger Stodola-Schüler und -Mitarbeiter, die bei BBC tätig gewesen waren. Ferner entdeckte ich Briefe von und an Stodola. Sämtliche Ausgaben von Stodolas Dampf- und Gasturbinenbuch waren vorhanden, und es fanden sich Aufsätze und Expertisen aus Stodolas Feder. Zudem enthält das Archiv einen umfangreichen Bestand an Fachliteratur sowie eine Fotosammlung aus hundert Jahren thermischem Turbomaschinenbau.

Als der Herausgeber der Buchreihe «Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik», Fritz Hauswirth, mit der Bitte an mich herantrat, einen Band über Stodola zu verfassen, sagte ich gerne zu. Obschon ich den Dampf- und Gasturbinenpionier Aurel Stodola nicht persönlich gekannt habe, faszinieren mich sein immenses Wissen, seine Persönlichkeit und seine Ausstrahlung auf die Fachwelt. Ich hoffe, die vorliegende biografische Studie werde dazu beitragen, dass der Geist Stodolas auch kommenden Techniker-Generationen Vorbild und Ansporn bleibt!

Dank

Allen Fachkollegen, die mir mit Ratschlägen und Informationen behilflich waren, danke ich herzlich. Mein besonderer Dank gilt Professor Dr. Georg Gyarmathy, der mich zu dieser Arbeit ermuntert und mir freundlicherweise die Notizen seiner Recherchen im Stodola-Archiv der ETH überlassen hat.

Elternhaus, Jugend und Ausbildung

*Aurel Stodola als Student am Polytechnikum in Zürich 1880
(Bild ETH)*



Stodolas Heimat

Verschiedene Quellen bezeichnen Stodolas Herkunft mit Ungarn. Dies ist nur bedingt richtig: Bis zu seiner Einbürgerung in Zürich war Aurel Stodola Slowake. Seit dem Jahr 1001 gehörte die Slowakei zum Königreich Ungarn. Von 1526 bis 1918 war das Land als Provinz Oberungarn Teil des Habsburgerreiches. Nach dem so genannten österreichisch-ungarischen Ausgleich von 1867 und der Etablierung der k. u. k. Doppelmonarchie mit zwei getrennten Verfassungen unterstand die Slowakei der ungarischen Regierung. 1919 wurde sie Teil des neuen tschechoslowakischen Staates. Während des Zweiten Weltkriegs erhielt die Slowakei unter deutscher Besetzung den Status eines «Freistaates». Durch die Sowjetunion erneut «befreit», wurde sie 1945 in die kommunistisch gelenkte Tschechoslowakei integriert. Seit dem 1. Januar 1993 ist die Republik Slowakei ein auto-

nomer Staat. Das Land hat heute 5,5 Millionen Einwohner. Mit rund 49 000 Quadratkilometern ist seine Fläche nur wenig grösser als die der Schweiz. Hauptstadt ist Bratislava (ehemals Pressburg), etwa 60 Kilometer östlich von Wien an der Donau gelegen.

Ähnlich wie die Schweiz war die gebirgige Slowakei ursprünglich agrarisch geprägt. Heute ist sie jedoch stark industrialisiert. Die Industrialisierungswelle begann mit dem Bergbau. In der Mittelslowakei baute man seit dem 15. Jahrhundert Gold-, Silber- und Kupfererze ab. 1763 wurde in Schemnitz (Banska Stiavnica) die erste Bergbauschule des Habsburgerreiches eingerichtet, deren Ruf weit über die Grenzen des Landes ausstrahlte. Und am gleichen Ort war 1724 eine der ersten Dampfmaschinen ausserhalb Englands in Betrieb genommen worden. Es handelte sich um eine atmosphärische Balanciermaschine Newcomen'scher Bauart. Sie diente zum Entwässern der Bergwerksstollen. Vorher hatten die Schöpfwerke mit Muskelkraft betrieben werden müssen. Wegen nachlassender Ergiebigkeit wurde der Erzabbau gegen Ende des 18. Jahrhunderts aufgegeben. Ein Bergbaumuseum in Schemnitz hält diese längst vergangene Epoche noch heute lebendig. Schemnitz und das umliegende ehemalige Bergbaurevier sind 1993 von der UNESCO als Weltkulturerbe ausgezeichnet worden.

Das Elternhaus

Stodolas Eltern stammten aus kleinbäuerlichen Verhältnissen. Der



Vater, Andreas Stodola (1822–1898), hatte das Handwerk des Ledergerbers erlernt. Zusammen mit einem Partner namens Joseph Kovac gründete er in Sankt Nikolaus in der Liptau (Liptovsky Mikulas) einen Gerbereibetrieb, der sich im Laufe der Zeit zu einem mittelgrossen Produktionsunternehmen für Lederwaren entwickelte. St. Nikolaus liegt am Fusse der Niederen Tatra, am Oberlauf des Flusses Waag (Vah). Es ist der längste Binnenfluss der Slowakei. Er mündet bei Komorn (Komarno) in die Donau. In den 1970er-Jahren wurde die Waag unterhalb von St. Nikolaus zu einem Speichersee für die Stromerzeugung aufgestaut. Mit dem rund 20 Quadratkilometer grossen «Liptauer Meer» gelang es, die Attraktivität dieser Region für den Sommertourismus zu steigern.

Im 19. Jahrhundert war die Gegend um St. Nikolaus ein Zentrum für Gerberei und Lederverarbeitung. Ursprünglich hatten kleinere Handwerksbetriebe mit zwei bis drei Arbeitern und Lehrlingen die Tierhäute zu Leder verarbeitet und daraus auch Schuhe und Stiefel gefertigt. Die Handwerker zogen mit Pferdefuhrwerken auf die Märkte und boten dort ihre Produkte zum Verkauf an. Der Bau der Eisenbahnlinie von Kaschau nach Oderberg (Kosice–Bohumin) im Jahre 1873 erweiterte den Absatzkreis für Lederwaren erheblich. Das Gerbe-

reigewerbe nahm einen beträchtlichen Aufschwung. Zunehmend wurden Rohhäute importiert und die Lederprodukte auch in anderen Provinzen des Habsburgerreiches vertrieben.

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts begann sich in den protestantischen Kreisen der Slowakei Opposition gegen die katholische Dominanz des Habsburgerreiches zu formieren. Das aufkeimende slowakische Nationalbewusstsein erhielt zusätzliche Nahrung mit dem Entstehen einer eigenen Schriftsprache und Literatur. 1848 wurden auch in der Gegend von St. Nikolaus Forderungen laut nach demokratischen Reformen und stärkerer politischer Autonomie. Alle Bestrebungen für grössere Eigenständigkeit scheiterten jedoch. In der Folge emigrierten viele Slowaken nach Westeuropa und in die Vereinigten Staaten. Ob Andreas Stodola diese Oppositionsbewegung unterstützt hat, wissen wir nicht. Neben der slowakischen beherrschte er auch die deutsche Sprache. In den slawischen, ungarischen und böhmisch-mährischen Provinzen der Monarchie war dies ein gewisses Privileg. Im habsburgischen Vielvölkerreich war Deutsch Amtssprache und Kommandosprache des Heeres. Andreas Stodola war nicht nur sprachkundig, sondern auch bele-sen. Er besass eine Bibliothek, in der neben Büchern in tschechischer und

*Oben links:
Der Liptauer Stausee
und das Tatragebirge*

*Oben rechts:
Wohn- und Gewerbe-
häuser (aus dem
19. Jh.) in der Nähe
von Aurel Stodolas
Geburtsort*

Ludwig von Tetmajer (1850–1905), Gründer der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, besuchte wie Stodola die Realschule in Kaschau.

slowakischer Sprache auch Werke deutschsprachiger Autoren vertreten waren. Ferner gehörte Vater Stodola dem Ältestenrat der protestantischen Kirchgemeinde an. Aurel Stodolas Mutter, Anna Kovac (1836–1912), war die Schwester von Joseph Kovac, dem Geschäftspartner ihres Ehemannes.

Jugend

Aurel Boleslav Stodola wurde am 10. Mai 1859 in St. Nikolaus in der Liptau geboren. Aurel war der zweite von vier Söhnen. Mit seinem um zwei Jahre jüngeren Bruder Emil Miloslav, der später Rechtsanwalt wurde, blieb er zeitlebens in Kontakt. Der kleine Aurel war ein aufgewecktes und begabtes Kind. Schon früh zeigte er lebhaftes Interesse für seine Umwelt und alles Neue, besonders aber für technische Einrichtungen. Er verfügte über ein phänomenales Gedächtnis, und das Lernen fiel ihm leicht. Die Eltern bemühten sich, ihre Söhne gut ausbilden zu lassen. Aurel Stodola verbrachte die ersten Schuljahre in seiner Heimatgemeinde St. Nikolaus. Als er zehnjährig geworden war, schickten ihn seine Eltern für ein Jahr zu Verwandten nach Nehre (Strazky) in der Zips, um Deutsch zu lernen. Diese Gegend – im slowakischen Nordosten, zur Grenze gegen Polen gelegen – war vom 11. bis zum 13. Jahrhundert durch deutsche Einwanderer besiedelt worden. Florierendes Handwerk und reger Handel förderten die Gründung prosperierender Städte. Bis heute prägen gotische Bauten und eine mächtige Burganlage aus dem 12. Jahrhundert die Region Zips. Diese Region blieb bis zum Ersten Weltkrieg eine mehrheitlich deutschsprachige Enklave.

Nach Abschluss der Grundschule besuchte Aurel Stodola die Realschulen in Leutschau (Levoca) und Kaschau (Kosice). Schon als Gym-



nasiast war Stodola ausserordentlich ehrgeizig. Er zählte stets zu den besten Schülern. 1876 bestand er, erst siebzehnjährig, die Matura mit Auszeichnung. An der Realschule in Kaschau hatte zehn Jahre zuvor auch Stodolas späterer Professorenkollege Ludwig von Tetmajer (1850–1905) die Reifeprüfung abgelegt. Der aus der Zips stammende Tetmajer war Gründer und erster Direktor der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA [siehe «Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik», Band 66]. Stodolas Lieblingsfächer waren Mathematik und Musik. Mit seinem Bruder Emil spielte Aurel oft vierhändig Klavier. Neben der deutschen Sprache erlernte Stodola auch Französisch und Englisch.

Studium und erste Praxisjahre

Nach der Matura nahm Stodola das Studium an der polytechnischen Schule in Budapest auf. Von dort schrieb er seinen Eltern: «Ich bin tätig ohne Rast und könnte es auch zu etwas bringen, wäre mein Gedächtnis besser und meine Natur nicht so widerspruchsvoll angelegt, dass die Be-

gierde des Wollens immer dem Vermögen Können weit vorauseilt, so dass ich nie mit etwas befriedigt werde.» Nach Abschluss des ersten Studienjahres erhielt Stodola als Anerkennung für herausragende Leistungen ein Stipendium. Dieses ermöglichte es ihm, sein Studium in Zürich fortzusetzen. Stodola immatrikulierte sich zuerst an der Universität, trat aber 1878 an das Eidgenössische Polytechnikum über, um Maschinenbau zu studieren. Zu seinen Lehrern gehörten: Albert Fliegner (1842–1928) für Mechanik und theoretische Maschinenlehre, Georg Veith (1821–1903) für Maschinzeichnen und Konstruktion sowie Rudolf Escher (1848–1921) für mechanische Technologie.

1881 erhielt Stodola in Zürich das Maschineningenieurdiplom mit Auszeichnung. Anschliessend leistete er in der Heimat den obligatorischen Militärdienst. Das nach Studienabschluss damals übliche zweijährige Berufspraktikum absolvierte Stodola in der Maschinenfabrik der königlichen ungarischen Staatsbahnen in Budapest. 1883 immatrikulierte sich Stodola für ein Semester an der Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg. Unter anderem hörte er dort Vorlesungen des Philosophen Paul Deussen, des Physikers Hermann von Helmholtz und des Physiologen Emil du Bois-Reymond.

Eine Brandkatastrophe in Stodolas Heimatstadt St. Nikolaus zog 1883 auch das väterliche Geschäft stark in Mitleidenschaft. Aurel reiste unverzüglich nach Hause, um dem Vater beim Wiederaufbau des Unternehmens behilflich zu sein. Schliesslich war er Ingenieur und verfügte über Kenntnisse der Mechanisierung. In einem Bewerbungsbrief berichtete Stodola: «1883 begab ich mich nach meinem Heimatort, um die Projektierung

und vollständige Bauausführung einer Lederfabrik mit Maschinenantrieb für die Firma Kovac & Stodola zu übernehmen. Mit dem Gedanken brechend, die mir angebotene technische Leitung dieser Fabrik zu übernehmen, wendete ich mich nachher wieder der maschinentechnischen Laufbahn zu.» Die neue Fabrik wurde moderner und bedeutend grösser konzipiert als die frühere. Zum Antrieb der Verarbeitungsmaschinen installierte man an Stelle des Wasserrades eine Dampfmaschine.

Da sich die Nachfrage für Lederprodukte bald darauf abschwächte, konnten die beträchtlichen Investitionskosten für die modernisierte Fabrik nur ungenügend amortisiert werden. Dadurch geriet das Familienunternehmen zunehmend in finanzielle Bedrängnis. Es war gezwungen, sich zu verschulden und musste in eine Aktiengesellschaft umgewandelt werden. Als Folge einer länger andauernden Wirtschaftskrise geriet die Firma Kovac & Stodola 1912 in Konkurs. Vater Andreas Stodola erlebte den Untergang des von ihm mitbegründeten Unternehmens nicht mehr; er war bereits 1898 verstorben.

Basis für die Karriere

1884 fuhr der 25-jährige Aurel Stodola nach Paris, um seine Französischkenntnisse zu vertiefen. Er schrieb sich als Student an der Sorbonne ein und arbeitete parallel dazu als Volontär in der Maschinenfabrik Hermann-La Chapelle in einem Pariser Vorort. Seinem Bruder Emil berichtete er: «Du wirst neugierig sein, wie ich in Paris dreieinhalb Monate gelebt habe. Ich habe mich mit der Philosophie eingelassen [...] Hierzu hat die Gesellschaft eines Juristen und eines Theologen eingewirkt, mit welchen ich häufig über philosophische Fragen gesprochen habe.» Stodola

verbrachte auch einen kurzen Sprachaufenthalt in London. Noch im gleichen Jahr erhielt er eine Anstellung als Konstrukteur in der Böhmischo-mährischen Maschinenfabrik in Prag. Wenig später wechselte er zur Maschinenfabrik AG, vormals Ruston & Co. Dieses ebenfalls in Prag ansässige, renommierte Unternehmen produzierte unter anderem Wasserturbinen, Kompressoren und Dampfmaschinen. Die Erzeugnisse genossen einen ausgezeichneten Ruf. Als erstes Unternehmen im Habsburgerreich verwendete die Firma Ruston bei ihren Dampfmaschinen eine vom Amerikaner Henry Corliss entwickelte Drehschiebersteuerung. Stodola lernte hier eine Reihe hervorragender Fachkollegen kennen. Wie Stodola wurden mehrere von ihnen später Hochschuldozenten. So Rudolf Doerfel, A. Radovanovic und Franz Prasil.

In diesem anregenden Umfeld erhielt Stodola Gelegenheit, sich in die grundlegenden Disziplinen des Maschinenbaus zu vertiefen. Zu seinen Aufgaben gehörte die Berechnung und Konstruktion von Dampfmaschinen und Kolbengebläsen. Dabei erwarb Stodola ausgeprägte Fertigkeiten in der zeichnerischen Darstellung der Maschinenteile und in der mathematischen Analyse komplexer physikali-

scher Vorgänge. Bewusst oder unbewusst begann er, sich Elemente seiner später legendär gewordenen Arbeits- und Lehrmethodik anzueignen. Diese basierte auf der Verknüpfung von Theorie, Erfahrung und schöpferischer Intuition. Diese Methodik sollte ihm später von grossem Nutzen sein, als es darum ging, für neuartige technische Problemstellungen praktikable Lösungsansätze zu erarbeiten. Sie stellte eine wichtige Komponente seiner Fachdidaktik dar und trug massgeblich zu seinem Erfolg als Hochschullehrer bei.

1887 heiratete Aurel Stodola in St. Nikolaus in der Liptau die drei Jahre jüngere Darina Palka (1862–1935). Seine Ehefrau, mit der er zwei Jahre verlobt gewesen war, stammte ebenfalls aus einer Gerberfamilie der Region. Das frisch vermählte Paar liess sich in Prag nieder, wo die beiden Töchter zur Welt kamen. Die Erstgeborene, Helene Anna (1889–1928), blieb unverheiratet und wählte kurz vor ihrem vierzigsten Lebensjahr den Freitod. Die jüngere Tochter, Olga Emma (1891–1969), heiratete den drei Jahre jüngeren Curt Krause, einen aus Deutschland stammenden Pathologen.

Im März 1892 erhielt Aurel Stodola überraschend Nachricht aus Zürich:

*Unten links:
Das Ehepaar Aurel
und Darina Stodola
kurz nach der Über-
siedlung nach Zürich
(Bild ETH)*

*Unten rechts:
Stodolas Töchter:
links Olga und rechts
Helene (Bild ETH)*

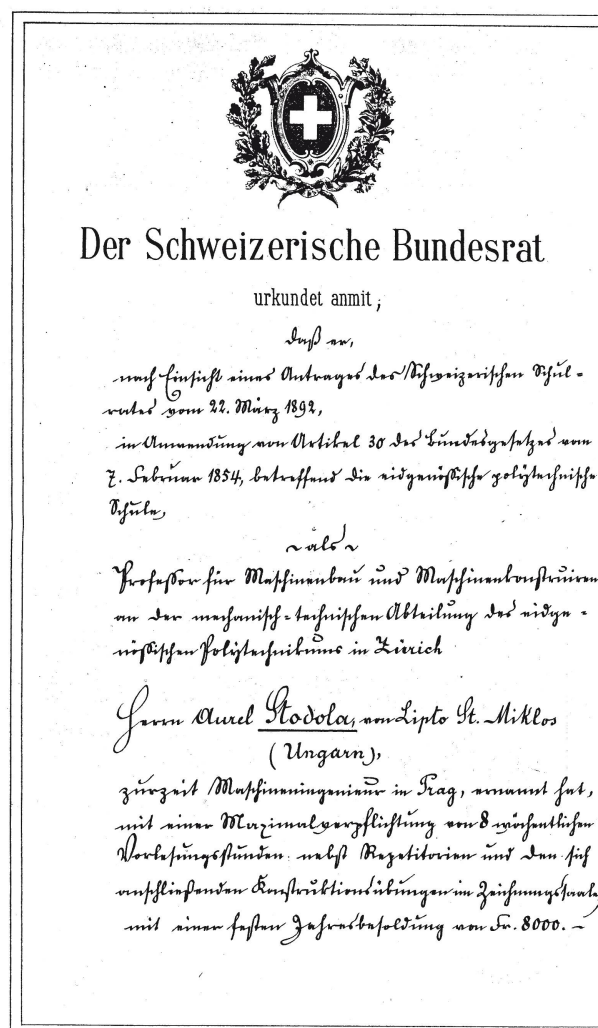


Schulratspräsident Hermann Bleuler (1837–1912) teilte dem 33-jährigen Ingenieur mit, dass er auf den Lehrstuhl für Maschinenbau und Maschinenkonstruktion an der mechanisch-technischen Abteilung des Eidgenössischen Polytechnikums berufen worden sei. Zur Bestätigung traf zwei Wochen später die Ernennungsurkunde des Schweizerischen Bundesrates ein. Dieses Dokument präzisiert Stodolas Anstellungsbedingungen: «... mit einer Maximalverpflichtung von 8 wöchentlichen Vorlesungsstunden nebst Repetitorien und den sich anschließenden Konstruktionsübungen im Zeichnungssaal; mit einer festen Jahresbesoldung von Fr. 8000.– nebst dem durch das jeweilige Reglement festgesetzten Anteil an den Schulgeldern und Honoraren der Zuhörer, sowie mit der Verpflichtung zum Eintritt in die Versicherungstiftung der Lehrerschaft des Polytechnikums bei der schweizerischen Rentenanstalt; mit Anstellung auf 10 Jahre und mit Festsetzung des Amtsantrittes auf 1. Juli 1892...»

Stodolas hervorragende Leistungen als Student am Polytechnikum waren nicht vergessen worden. Seit seinem Weggang von Zürich hatte er weiterhin Kontakte zu ehemaligen Lehrern und Kommilitonen gepflegt. Der spätere Präsident des ETH-Schulrates, Arthur Rohn (1878–1956), äusserte sich später einmal über Stodolas Wahl: «Die Auskünfte, die vor seiner Wahl eingeholt wurden, liessen seine ausgezeichnete Weiterentwicklung vorausahnen.» Für Stodolas Berufung ist wohl die Empfehlung des Prager Professors Rudolf Doerfel (1855–1938) entscheidend gewesen. Doerfel war ein Pionier des Heissdampfes und der Präzisionssteuerung bei Dampfmaschinen und kannte Stodola von der gemeinsamen Tätigkeit bei der Firma Ruston.

Zunehmender Studentenandrang an der mechanisch-technischen Abteilung des Polytechnikums, eine bevorstehende Erweiterung des Lehrplans und die Verlängerung der Studierendauer machten eine Aufteilung des Lehrstuhls für Maschinenkonstruktion auf zwei Professuren nötig. An derthalb Jahre nach Stodola wurde auch sein Landsmann und ehemaliger Arbeitskollege Franz Prasil (1857–1929) an das Polytechnikum berufen. Während sich Stodola auf den thermischen Maschinenbau konzentrierte, wurden Prasil die hydraulischen Maschinen anvertraut. Dieses Dozentenduo hat in den über dreissig Jahren seines Wirkens in Zürich sowohl das Renommee der Eidgenössischen Technischen Hochschule wie auch das der gesamten schweizerischen Maschinenindustrie entscheidend mitgeprägt.

Ernennungsurkunde
des Schweizerischen
Bundesrates für Aurel
Stodola (Bild ETH)



Professor in Zürich

*Aurel Stodola zu Beginn seiner Lehrtätigkeit am Polytechnikum in Zürich
(Bild ETH)*



Vom Polytechnikum zur ETH

Das 1855 eröffnete Eidgenössische Polytechnikum in Zürich ist ein Kind des 1848 gegründeten Schweizerischen Bundesstaates. Die wachsende Bedeutung der Technik verlangte eine Hochschule für die künftige technisch-wissenschaftliche Elite. Das Konzept orientierte sich an der während der Französischen Revolution geschaffenen Ecole Polytechnique in Paris. Das Zürcher Polytechnikum genoss von Anfang an einen hervorragenden Ruf. Die Schule war durch den Geist des liberalen Aufbruchs und durch herausragende Professoren geprägt. Später berühmt gewordene Persönlichkeiten wie Jacob Burckhardt, Rudolf Clausius, Carl Culmann, Franz Reuleaux, Gottfried Semper und Anton Zeuner gehörten dem Lehrkörper der ersten Stunde an. Den Gründervätern lag sehr viel daran, Ingenieure heranzubilden, die fähig waren, wissenschaftlich-analyti-

sches Denken mit der «hohen Kunst» des technischen Gestaltens zu vereinen.

Bei ihrer Eröffnung umfasste die Schule sechs Abteilungen: die Bau- schule (Architektur), die Ingenieur- schule (Strassen-, Eisenbahn-, Brücken- und Wasserbau), die mecha- nisch-technische Schule (Maschinen- bau), die chemisch-technische Schule, die Forstschule sowie die philoso- phisch-staatswissenschaftliche Abtei- lung. Die Studiendauer betrug anfänglich bloss vier Semester, wurde aber bald auf sechs und 1892 auf sieben Semester ausgedehnt. 1930 wur- de sie um ein weiteres Semester auf- gestockt. Bis 1924 waren aus den ursprünglich sechs Abteilungen suk- zessive deren zwölf geworden.

1864 bezog das Polytechnikum das auf einer Geländeterrasse über der Stadt gelegene klassizistische, von Gottfried Semper (1803–1879), dem Professor für Architektur, konzipierte Hauptgebäude. Wegen wachsender Studentenzahlen, verlängerter Stu- diendauer und weil im einen Gebäu- deflügel die Zürcher Universität bis 1913 Gastrecht genoss, wurden die Platzverhältnisse bald prekär. Des- halb erstellte man für einzelne Fach- disziplinen noch vor der Jahrhundert- wende separate Annexbauten: 1886 das Chemiegebäude, 1890 das Physik- gebäude, 1891 die Materialprüfungs- anstalt und 1900 das Maschinenlabor- gebäude. 1909 erhielt das Polytechni- kum das Promotionsrecht zuerkannt, und 1911 erfolgte die Umbenennung in Eidgenössische Technische Hoch- schule (ETH).



Der Semperbau, das Hauptgebäude des Eidgenössischen Polytechnikums in Zürich, um 1890 (Bild ETH)

Die mechanisch-technische Abteilung

Zwangsläufig bauen spezifisch maschinentechnische Disziplinen auf mathematischen und physikalischen Grundlagenfächern auf. Die ersten drei Studiensemester waren deshalb schwergewichtig der Erarbeitung der mathematisch-physikalischen Basis gewidmet. Grundkenntnisse für den Maschinenbau vermittelten die Werkstoffkunde, die Formgebung der Metalle und die Maschinenelemente. Strömungslehre, Thermodynamik und Messtechnik ergänzten das technische Fundament. Das Fach Maschinenkonstruktion, also das eigentliche technische Gestalten, wurde durch Vorlesungen und anschliessende Übungen vermittelt. Entsprechend der möglichen Vertiefungsrichtungen war es unterteilt in hydraulische, thermische und elektrische Maschinen. Später kamen für alle Richtungen noch entsprechende Laborstunden hinzu.

Als Stodola seine Professur antrat, existierte noch kein Maschinenlaboratorium. Er war einer der aktivsten Befürworter einer solchen Institution. Allerdings hatte Stodola kaum damit gerechnet, dass ihn seine neue Aufgabe derart stark belasten würde. 1892 schrieb er seinem Bruder: «Ich

bin 25 Stunden per Woche beschäftigt, davon 8 Stunden Vortrag, das übrige Übungen... Wenn ich geglaubt habe, hier in Zürich einen Ruhepunkt zu finden, so habe ich mich getäuscht. Nicht einmal die Zukunft der Familie ist gesichert.» Seine Besoldung war, gemessen am Arbeitsaufwand, offensichtlich nicht gerade üppig. Stodola rechtfertigte sich einmal, dass er auf eine nebenamtliche Tätigkeit als Gutachter unbedingt angewiesen sei, da er eine Familie zu ernähren habe. Erst gegen Ende seiner Lehrtätigkeit war Stodola finanzieller Sorgen enthoben.

Die Lehrplanreform von 1897

Am Zürcher Polytechnikum war es sowohl für die Dozentschaft als auch für den direkt dem Bundesrat verantwortlichen Schulrat Pflicht, die vermittelten Lehrinhalte stets den neuesten Entwicklungen und Erfordernissen anzupassen. Jedes Verharren wäre ein Rückschritt gewesen. 1894, knapp zwei Jahre nach Stodolas Aufnahme der Lehrtätigkeit, beauftragte der Schulrat die Dozenten der mechanisch-technischen Abteilung, eine Neubewertung der Unterrichtsfächer und eine Reorganisation der Studienpläne vorzunehmen. Daraus sollte dann eine optimale Verteilung

der Lehrinhalte auf die verfügbaren Dozenten abgeleitet werden. Stodola legte einen eigenen Programmwurf zur Diskussion vor. Dabei lag ihm besonders daran, im Lehrplan die neuesten Entwicklungstendenzen sowohl des thermischen und hydraulischen Kraftmaschinenbaus als auch des Elektromaschinenbaus gebührend zu berücksichtigen.

Mit dem ab dem Studienjahr 1896/97 gültigen Lehrplan erhielt Stodola folgende Fächer und Wochenstunden zugeteilt (noch ohne Laborübungen):

5. Semester:

Dampfmaschinen-Steuerungen	2
Übungen und Repetitorium	2
Dampfmaschinen-Regulatoren	2

6. Semester:

Dampfmaschinenbau	4
Repetitorium	1
Maschinenkonstruktion	12

7. Semester:

Maschinenkonstruktion	6
-----------------------	---

Später kamen Vorlesungen und Übungen über Gas- und Petrolmotoren hinzu. Ab 1904 hielt Stodola Vorlesungen über Dampfturbinen und

ein fakultatives Kolleg über «Neuere Erfindungen auf dem Gebiet der Wärmekraftmaschinen». Nachdem Stodola den klassischen Dampfmaschinenbau an einen Kollegen abgetreten hatte, konzentrierte sich seine Lehrtätigkeit ab 1911 vermehrt auf breiter abgestützte Vorlesungen und Übungen in technischer Wärmelehre sowie auf die Berechnung, Konstruktion und Weiterentwicklung der Wärmekraftmaschinen.

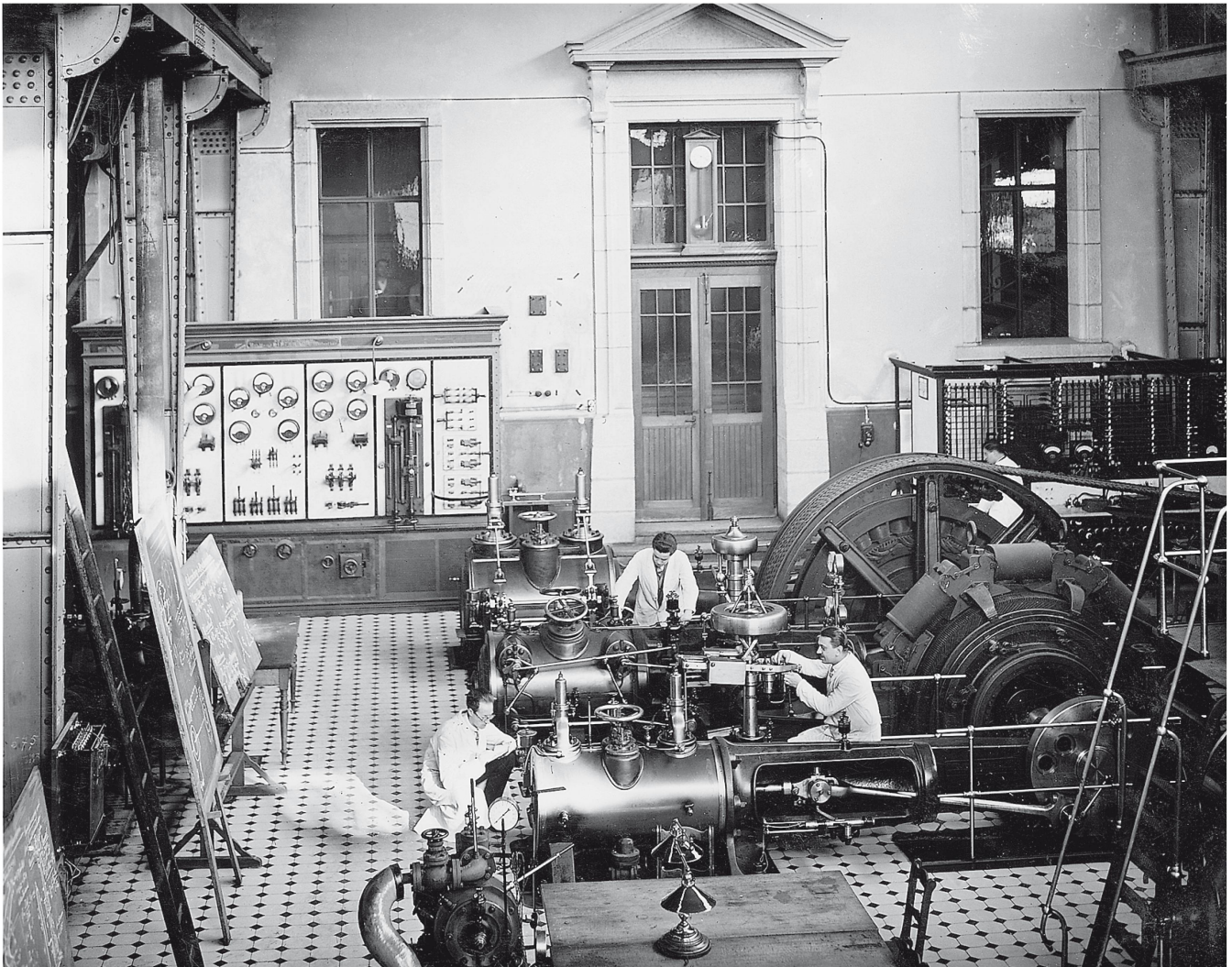
Das Maschinenlabor

Eine praxisbezogene Ausbildung der Maschineningenieure bedurfte noch in anderer Hinsicht dringend einer Vertiefung: Es genügte nicht mehr, die Konstruktionsübungen allein auf Berechnungen und zeichnerische Entwürfe zu beschränken. Damit die angehenden Ingenieure im betrieblichen Umfeld Beobachtungen und Messungen an Maschinen und ihren Bestandteilen durchführen konnten, wurde umgehend ein entsprechend ausgestattetes Laboratorium benötigt. Da im Hauptgebäude die Schulräume voll ausgelastet waren, sollte ein Neubau sowohl Zeichensäle als auch zeitgemäss ausgerüstete Laborplätze mit allen wichtigen Maschinengattungen enthalten. 1897 genehmigte das eidgenössische Parlament die beantragten Kredite, sodass mit dem Bau begonnen werden konnte. Das Laborgebäude wurde in der Nähe des Semper'schen Hauptbaus, zwischen der Clausius- und der Sonneggstrasse, errichtet. 1898 schrieb Stodola seinem Bruder: «Ich bin durch ein Übermass an Arbeit niedergedrückt, die uns durch den Bau des Laboratoriums aufgebürdet wird.»

Ab Herbst 1899 konnten im Neubau die Konstruktionssäle und im Sommer 1900 die Maschinenhalle bezogen werden. Im thermischen Teil wurde das neue Labor mit Dampfma-

Das Maschinenlaboratorium kurz nach der Fertigstellung im Jahr 1900. Im Turm befindet sich das Wasserreservoir für hydraulische Versuche. Der Kamin im Vordergrund gehört zum Kesselhaus. (Bild ETH)





schinen, Verbrennungsmotoren, einer Kältemaschine und einer Dampfturbine ausgestattet. Hauptmaschine war eine liegende Dreizylinder-Verbund-Dampfmaschine, gekuppelt mit einer 75-kW-Thury-Gleichstrom-Maschine. Die Hoch- und Niederdruckteile stammten von Sulzer, der abkoppelbare Mitteldruckteil von Escher Wyss. Ausserdem gehörten eine stehende Zweizylinder-Verbund-Maschine von Escher Wyss für einen Dampfdruck von 20 bar sowie eine raschlaufende Zweizylinder-Verbund-Maschine Bauart Brown von der Maschinenfabrik Oerlikon zur Ausstattung. Die Verbrennungsmotoren waren mit zwei Exemplaren vertreten, einem 5-PS-Petrolmotor Fabrikat Deutz und einem 10-PS-Gasmotor von Escher Wyss. Stodolas zukünftiges Hauptge-

biet war damals lediglich durch eine 10-PS-Laval-Dampfturbine vertreten.

Die Laborübungen mit der Protokollierung und Interpretation der Messergebnisse gaben den Studenten Gelegenheit, den in den Vorlesungen gebotenen Lehrstoff zu vertiefen. Zusätzlich konnten damit Kenntnisse und Fertigkeiten im praktischen Umgang mit Maschinen erworben werden. Mit diesem zusätzlichen Pensum war Stodola bis zum Äussersten belastet. Wenn man in Betracht zieht, dass er im Zeitraum von 1893 bis 1910 rund zwanzig teilweise umfangreiche Fachaufsätze und Ausstellungsberichte verfasst und nicht weniger als vier Auflagen seines Dampfturbinen-Lehrbuches herausgegeben hat, wird verständlich, dass Stodola mit seinen Kräften in keiner Weise haushälte-

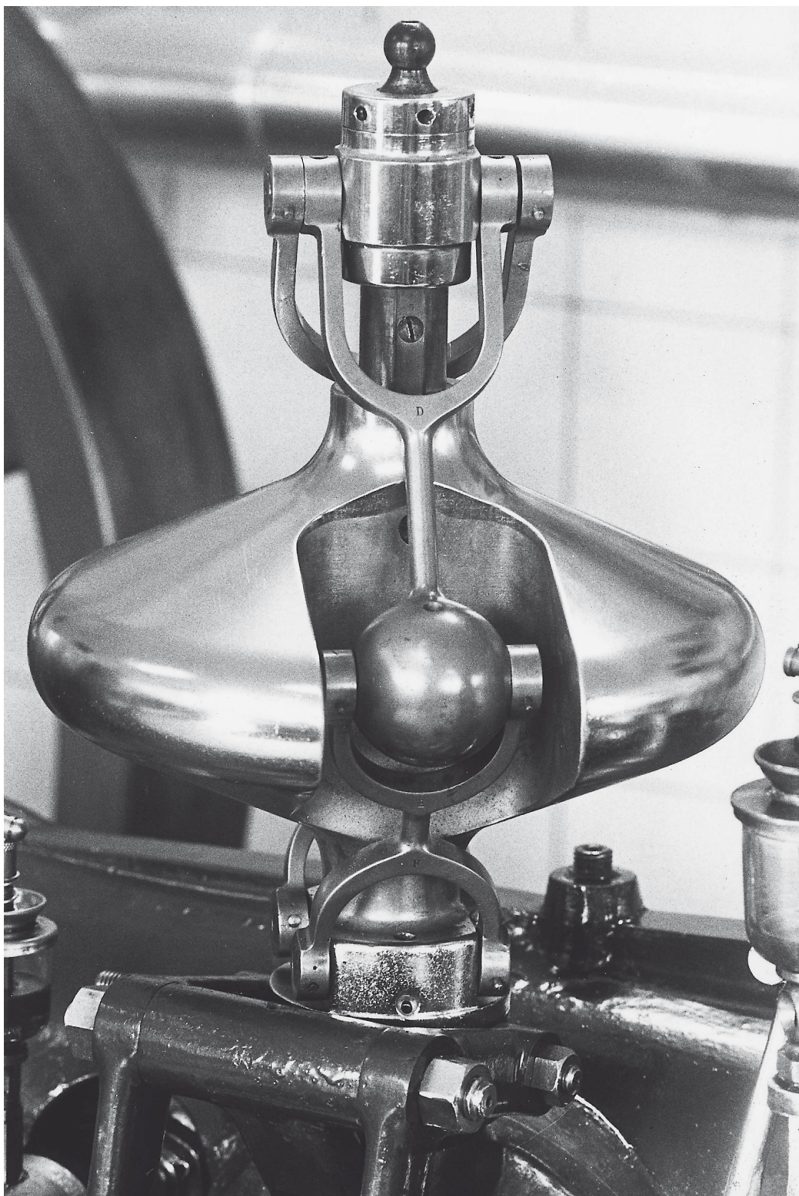
Studenten bei Versuchen an der Dreizylinder-Dampfmaschine im Maschinenlabor (Bild ETH)

risch umging. Seinem Bruder Emil klagte er 1907: «Diesen Winter habe ich ständig an der Grenze permanenten Kopfwehs gearbeitet, immer nur aufgehört, wenn es gerade kam.» Und 1911: «Auch mit meiner Gesundheit bin ich nicht zufrieden, vor allem mit der jetzigen Leistungsfähigkeit, welche rapid abnimmt. Offenbar habe ich mich im Kampfe um die Stellung dauernd überbeansprucht.»

Beitrag zur Regelungstheorie

Stodola begann schon kurz nach seinem Amtsantritt 1892 mit seiner langen Reihe wissenschaftlicher Publikationen. Er schrieb hauptsächlich für die «Zeitschrift des Vereins Deut-

*Fliehkraftregler einer
Sulzer-Dampfmaschine
aus dem Jahre
1900*



scher Ingenieure» (VDI) und für die «Schweizerische Bauzeitung», das Fachorgan des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins. 1893 erschien in der letztgenannten Zeitschrift Stodolas Abhandlung «über die Regulierung der Turbinen». Obschon hydraulische Maschinen nicht Gegenstand seines Lehrauftrages waren, analysierte er in diesem Aufsatz grundlegend den Ablauf der Vorgänge bei der automatischen Regulierung von Hochdruck-Wasserturbinen. Drehzahlregler kommen auch bei Dampfmaschinen und -turbinen zur Anwendung. Sie haben die Aufgabe, unabhängig von der Belastung die Drehgeschwindigkeit der Kraftmaschine auf einen vorgegebenen Wert einzuregeln und sie innerhalb eines eng begrenzten Bereiches konstant zu halten. Bei Maschinen, die elektrische Generatoren antreiben, werden nur minimalste Frequenzabweichungen toleriert.

Das Prinzip der Drehzahlregelung ist seit über zweihundert Jahren bekannt. Im grundlegenden Patent von 1788 hatte James Watt für seine Dampfmaschine erstmals einen so genannten Fliehkraftregler vorgesehen. Ähnliche Geräte waren im Mühlenbau gebräuchlich. Ein Fliehkraftregler enthält um eine Achse rotierende, beweglich angelenkte Schwungmassen. Diese tendieren bei steigender Drehzahl unter Wirkung der Fliehkraft dazu, sich von der Drehachse zu entfernen. Dabei verschieben sie eine Muffe, die diese Bewegung über ein Hebelsystem auf ein Ventil überträgt. Das Ventil drosselt die Energiezufuhr (Dampf- oder Wasserstrom), und entsprechend öffnet es sie bei sinkender Drehzahl wieder. Für grosse Stellkräfte, etwa zur Verstellung des Leitapparates oder der Düse einer Turbine gegen den Dampf- oder Wasserdruck, genügt die Fliehkraft allein nicht. Es

braucht dazu besondere Kraftverstärker, so genannte Servomotoren. Die Verstärkung erfolgt mit mechanischer, hydraulischer, pneumatischer oder elektrischer Hilfe. Klassische Turbinenregler verfügen über ölhydraulische Servomotoren. Moderne Turbinenanlagen werden meistens elektronisch geregelt und überwacht.

Stodolas Methodik

Stodola ging vereinfachend von einem trägheitslosen Regulator mit unendlich grosser Energie aus, welcher auf jede Geschwindigkeitsänderung der Turbine augenblicklich reagiert, also in extrem kurzer Zeit Gleichgewicht herstellt. Stodola begründete dies damit, dass «die Praxis eine Anzahl von [Regulator-]Typen geschaffen hat, denen man eine fast ideale Vollkommenheit zusprechen muss». Im Weiteren stellte Stodola fest:

1. Zur Verstellung des Steuerungsmechanismus (Ventil oder Schieber) gegen den Wasserdruck ist eine bedeutende Kraft erforderlich.
2. Jede Veränderung des Abflusses übt auf die in Bewegung befindliche Wassermasse eine Rückwirkung aus, die Druckschwankungen in der Zuleitung erzeugt.

Stodola wies nach, dass jeder Regelungsvorgang einer mehr oder weniger stark gedämpften Schwingung eines gekoppelten Systems entspricht. Das Optimum im Betrieb besteht einerseits im möglichst raschen Ansprechen der Regulierung und andererseits im Vermeiden eines Überschwingens. In dieser frühen Arbeit entwickelte Stodola seine später als didaktisch mustergültig beurteilte Methode, durch bestimmte Vereinfachungen ein Problem berechenbar zu machen. Damit gewann er Erkennt-

Steuerungen und Regulatoren der Dampfmaschinen

nach den Vorlesungen von Prof. Dr. A. STODOLA.

Herausgegeben vom

Akadem. Maschinen-Ingenieurverein

Zürich.

Als Manuskript gedruckt. — Alle Rechte vorbehalten.

ZÜRICH

Buchdruckerei J. F. Kobold-Lüdi
1911

Titelblatt der Vorlesung Stodolas über Steuerungen und Regulatoren der Dampfmaschinen

nisse über funktionale Zusammenhänge. Schrittweise eliminierte er dann die Vereinfachungen und erfasste möglichst alle Einflussgrößen, um Regeln für die Dimension der einzelnen Anlagekomponenten und ihr Zusammenwirken abzuleiten. Diese Arbeit Stodolas war grundlegend für die Entwicklung einer allgemein gültigen Regelungstheorie.

Stodola hielt auch Vorlesungen über die Regulatoren von Dampfmaschinen und verfolgte die Entwicklungen auf diesem Gebiet mit grossem Interesse. 1899 publizierte er in der VDI-Zeitschrift einen Aufsatz über neuere amerikanische Drehzahlregler, so genannte «Inertie»-[Trägheits-]Regulatoren.

Die Mathematik als Werkzeug des Ingenieurs

1897 hielt Stodola am ersten internationalen Mathematiker-Kongress in Zürich ein viel beachtetes Referat zum Thema «Die Beziehungen der Technik zur Mathematik». Der Vortrag wurde ebenfalls in der «Schweizerischen Bauzeitung» abgedruckt. Darin sind erste Ansätze zu Stodolas Arbeitsprogramm der nächsten Jahre erkennbar. Er skizzierte einige Ideen, die er später realisiert hat. Weiterhin finden sich darin Vorschläge zur Lehrplanreform und zur Verlängerung der Studierendauer für Maschineningenieure am

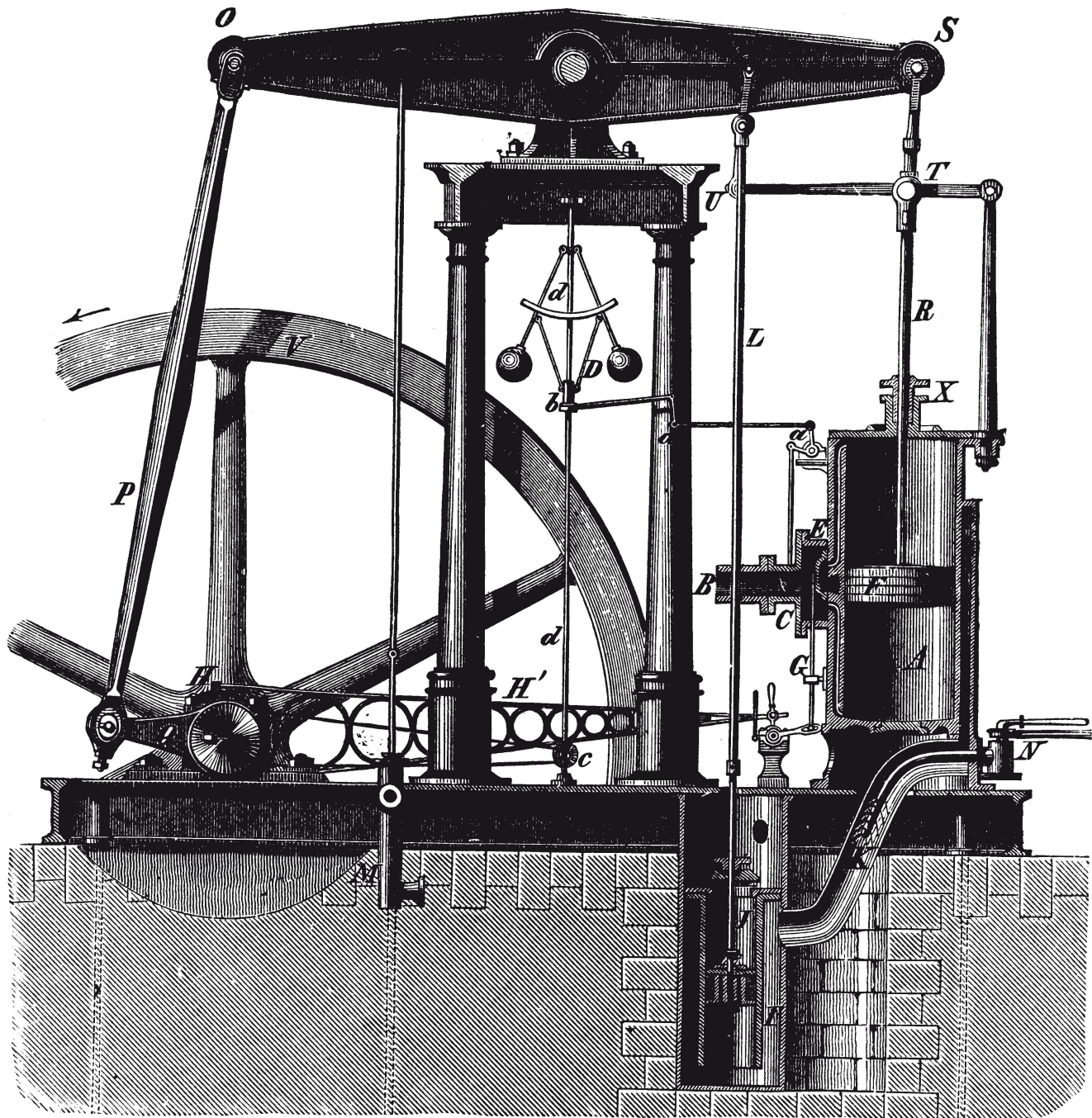
Aurel Stodola im Jahre 1914



Prof. St. A. Stodola

Polytechnikum: «Reine Anschauungskraft hat zur Erfindung der Gasmachine geführt, die einen neuen Markstein in der Geschichte der Wärmemotoren bedeutet. Doch erst in allerletzter Zeit, da schon tausende von Motoren der Industrie Dienste leisteten, unternahm es die Wissenschaft, die Vorgänge im Gasmotor zu erklären. Die Überzeugung von der Notwendigkeit und Erspriesslichkeit einer genaueren mathematischen Behandlung technischer Probleme durch den Ingenieur ist insbesondere unter der jüngeren Generation viel verbreiteter, als mancher ältere Fachgenosse zugeben möchte. Andererseits ist auch die Befähigung zu solcher Tätigkeit unter den praktischen Ingenieuren heute in viel grösserem Masse vorhanden, als man vor einem Jahrzehnt vorausgesetzt hätte. Zu dieser Behauptung gelange ich aufgrund aufmerksamer Beobachtungen der Praxis; sie führen mich dazu, auch die Frage des mathematischen Unterrichtswesens an den technischen Hochschulen zu erörtern.»

Gemäss Stodolas Auffassung ist die Mathematik für jeden Ingenieur eine grundlegende und notwendige Wissenschaft. Dieser könne sich «Tag für Tag weniger dem Zwang entziehen, den Gütegrad, den Konsum seines Motors etc. etwa auf 1 % genau zu garantieren und den Kaufpreis der Maschine auf einen Schilling oder Heller genau anzugeben. [...] Nur auf dem Boden der exakten Wissenschaften, für welche wieder die Mathematik der Lebensnerv ist, entspringt für uns eine einwandfreie Erkenntnis».



Doppeltwirkende Balancier-Dampfmaschine mit Drehzahlregler von James Watt um 1800

Die altbewährte Kolbendampfmaschine

Kleiner physikalischer Exkurs

Dampf, genauer Wasserdampf, ist der gasförmige Zustand des Wassers. Dieser Zustand wird erreicht durch Energiezufuhr in Form von Wärme, also durch Erhitzen. Dies geschieht beispielsweise beim Kochen von Tee-wasser. Beim Verdampfen dehnt sich das Volumen aus. Wissenschaftlich exakt: Der Abstand der Wassermoleküle vergrößert sich. Verdampft ein Liter Wasser unter normalem Luftdruck vollständig, so entsteht ein Dampfvolumen von 1700 Litern. Wird Wasser in einem verschlossenen Gefäss verdampft, ohne dass der Dampf sich ausdehnen kann, so erhöht sich mit zunehmender Temperatur auch der Druck. Um eine Explosion des Gefässes zu verhindern, muss die Druckerhöhung durch ein Sicherheitsventil begrenzt werden. Dies ist sowohl beim Dampfkochtopf als auch bei Dampflokomotiven und bei stationären Dampfkesseln der Fall. Die über die zugeführte Wärme im Dampf gespeicherte Energie lässt sich mit einer Maschine teilweise in mechanische Arbeit umwandeln. Dazu gibt es prinzipiell zwei verschiedene Möglichkeiten:

1. Der Dampfdruck übt in einem Zylinder eine Kraft auf einen beweglichen Kolben aus. Der Kolben überträgt die Kraft auf eine Kurbel und erzeugt so ein Drehmoment (Prinzip der Kolbendampfmaschine).
2. Der Dampfdruck entspannt sich durch eine Düse mit enger Öffnung. Es entsteht ein Dampfstrahl mit hoher Strömungsgeschwindigkeit. Wird dieser auf ein Schaufel-

rad geleitet, bewirkt er eine rasche Drehung des Rades (Prinzip der Dampfturbine).

Die Entwicklung der Kolbendampfmaschine

«Hier ist sie, die vortrefflichste aller Maschinen! Es gibt keine andere, deren Mechanismus dem der Lebewesen näher käme. Ursache ihrer Bewegung ist die Wärme. Diese erzeugt in ihren Röhren eine Zirkulation, gleich derjenigen des Blutes in den Adern, mit Ventilen, die sich im richtigen Zeitpunkt öffnen und schliessen. So atmet sie selbstständig in regelmässigem Rhythmus und gewinnt daraus alles, was sie zur Erhaltung ihrer Arbeitskraft braucht.» Derart fasziniert beschrieb 1739 der französische Ingenieur Bernard Forest de Bélidor (1697–1761) seine erste Begegnung mit einer Dampfmaschine. Tatsächlich hatte der Mensch mit der Dampfmaschine erstmals eine Energiequelle erschlossen, die – von Flussläufen und Windströmungen unabhängig – Mühlen, Textilfabriken, Walz- und Sägewerken oder anderen Arbeitsmaschinen die nötige Antriebskraft zu liefern vermochte. Die neue Maschine ist in einem mehrere Jahrhunderte dauernden Prozess Schritt für Schritt entwickelt worden. Dabei waren Umwege, Sackgassen und Rückschläge nicht zu vermeiden. Viele Einzelphänomene mussten zu einem Gesamtbild vereinigt und auf ein tragfähiges wissenschaftliches Fundament gestellt werden.

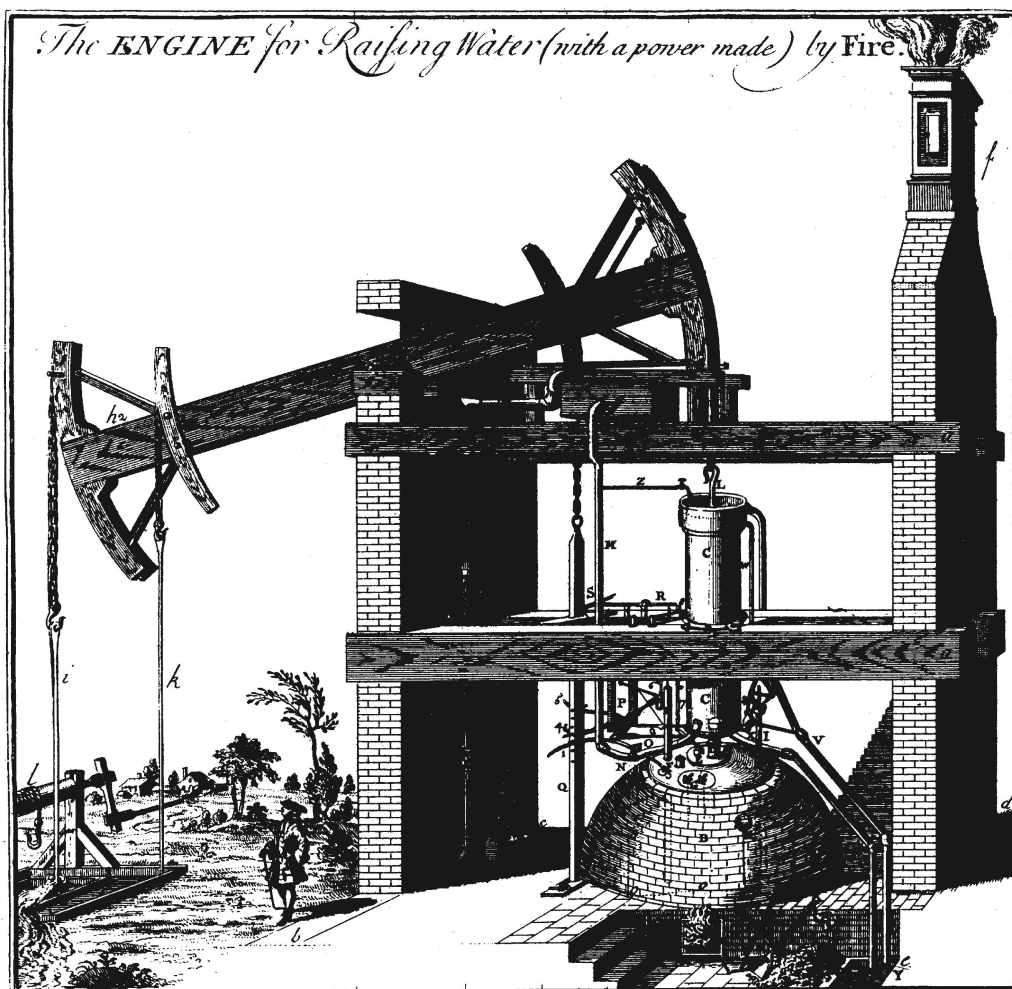
Abgeleitet von Erfahrungen mit der Kanone, wurden Versuche unternom-

men, die Gewalt des Schwarzpulvers in einer Maschine zu zähmen. Da Pulverexplosionen unberechenbar und gefährlich sind, erinnerte man sich des Wasserdampfes. Zu den Forschern, die mit Dampf experimentierten, gehörte auch Leonardo da Vinci (1452–1519). Unter anderem stellte er Versuche mit einer Dampfkanone an. Darüber berichtete er: «Eine Pfanne voll glühender Kohlen erhitzt die Ladekammer einer bronzenen Kanone. Wenn man Wasser durch das Zündloch einspritzt, wird es augenblicklich in so viel Dampf verwandelt, dass es wunderbar erscheint; ganz besonders wenn man seine Gewalt sieht und das Getöse hört, mit dem eiserne Kugeln weggeschleudert werden.» Leonardo gelang es, das bei Atmosphärendruck aus einer bestimmten Menge verdampften Wassers entstehende Dampfvolument annäherungsweise zu

berechnen. Er beschrieb auch eine «Feuermaschine zum Heben von Lasten».

Die atmosphärische Dampfmaschine

Otto von Guericke (1602–1686) erforschte die Leere (das Vakuum). Er erbrachte den Nachweis, dass die seit Aristoteles überlieferte «Angst vor dem Leeren» unbegründet war. Berühmt wurden Guericke's medienwirksame Versuche von 1657 mit den so genannten «Magdeburger Halbkugeln». Er bewies damit, dass nicht nur Überdruck, sondern auch Unterdruck (Luftleere, Vakuum) Kräfte erzeugen kann. Der Franzose Denis Papin (1647–1712), dem sowohl die Erfindung des Dampfkochtopfes als auch die des Sicherheitsventils zu verdanken ist, erzeugte ein Vakuum durch Abkühlen (Kondensation) von Was-



Atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen um 1715

serdampf. Er erhitzte Wasser in einem zylindrischen Gefäss, das durch einen beweglichen Kolben abgeschlossen war. Der entstehende Dampf trieb den Kolben nach oben, bis er durch eine einrastende Klinke festgehalten wurde. Nach dem Abkühlen des Zylinders bildete sich im Innern ein Vakuum. Beim Lösen der Klinke drückte der äussere Luftüberdruck den Kolben in seine Ausgangslage zurück. Wenn dieser Prozess in regelmässigem Zyklus wiederholt würde, so könnte der Kolben Arbeit leisten, stellte Papin fest.

Diese Aufgabe löste der Brite Thomas Newcomen (1663–1729). Statt wie Papin mit kleinen Modellen zu arbeiten, baute Newcomen haushohe Maschinen. Dafür bestand ein unmittelbarer Bedarf: Die Schächte in den englischen Kohlebergwerken mussten immer tiefer vorgetrieben werden, um an ergiebige Flöze zu gelangen. Diese Tiefe erschwerte das herkömmliche Abpumpen des eindringenden Grundwassers. Die Gleichzeitigkeit von Bedarf und realisierbarer Idee führte zum Erfolg. Newcomen trennte Dampfkessel und Arbeitszylinder voneinander. Dampf und Kaltwasser strömten abwechselungsweise in den Zylinder. Durch die Expansion hob der Dampf den Kolben. Nach dem Einspritzen von kaltem Wasser kondensierte der Dampf, worauf im Zylinder ein Vakuum entstand. Der äussere Luftdruck presste den Kolben wieder in die Ausgangslage zurück. Daher die Bezeichnung atmosphärische Maschine. Das Dampfventil und der Wasserhahn mussten im Gegenteil manuell geöffnet und geschlossen werden. Dadurch hob und senkte sich der Kolben alle drei bis vier Sekunden. Die Maschine vollzog also etwa zehn Hübe pro Minute. Ein mächtiger eichener Doppelhebel, der Balancier, übertrug die Kolbenbewe-

gung auf das Pumpengestänge. Als Mass für die Leistung der Maschinen diente die pro Zeiteinheit gehobene Wassermenge. Auf heutige Einheit umgerechnet waren es anfänglich bescheidene 10 Kilowatt. Wegen des hohen Kohleverbrauchs und anderer Mängel war der Wirkungsgrad äusserst gering. Immerhin konnte die Maschine Tag und Nacht arbeiten und bis zu hundert Pferde ersetzen. Andere Ingenieure haben die Newcomen'sche Maschine sukzessive verbessert. Es gelang schliesslich, das Öffnen und Schliessen der Hähne mit einem geeigneten Mechanismus vom Balancier aus zu steuern und auf diese Weise zu automatisieren.

Watt und seine Nachfolger

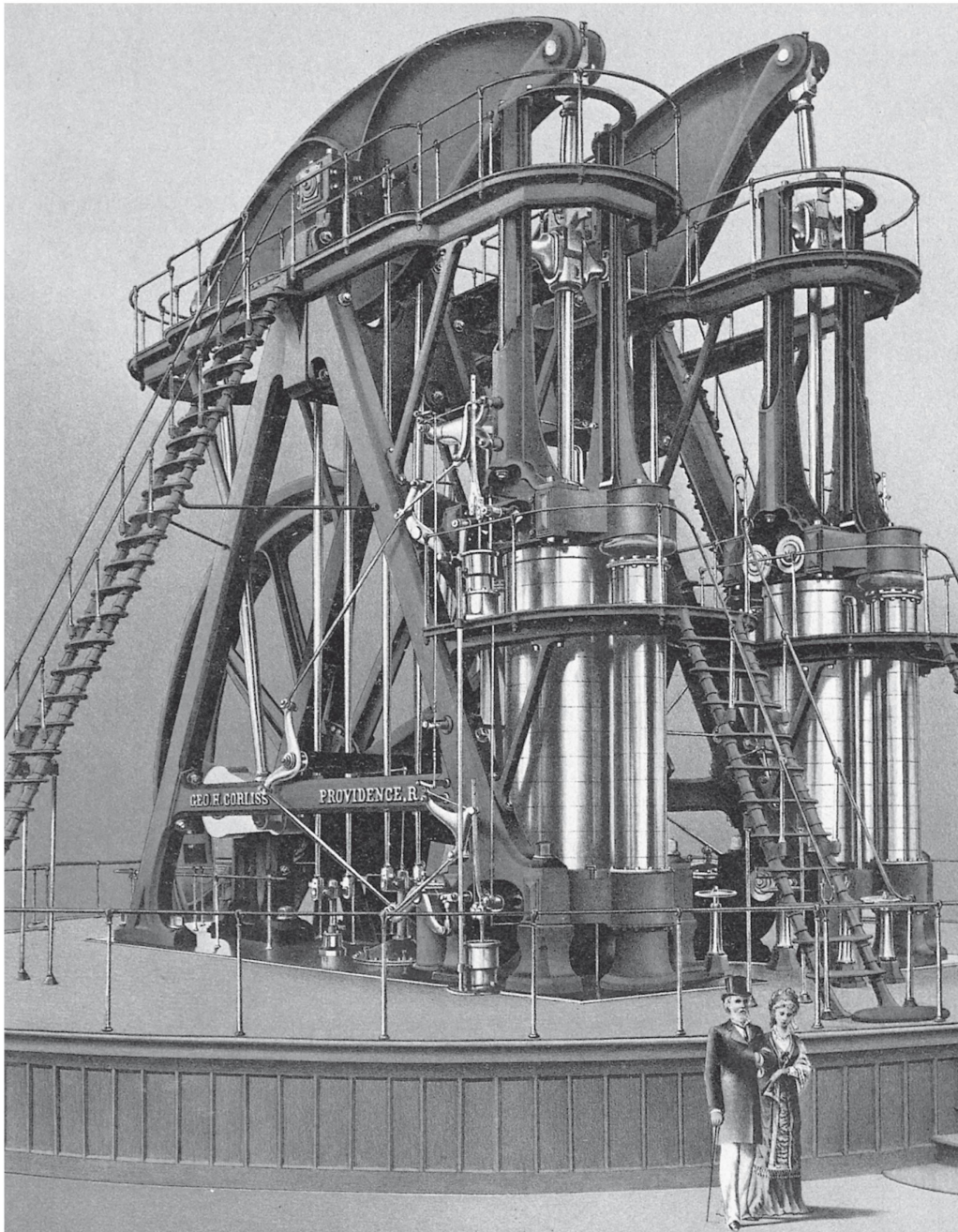
Dem Schotten James Watt (1736–1819) gebührt das Verdienst, die Dampfmaschine zu einem universell einsetzbaren Antriebsmotor entwickelt zu haben. Er erkannte die Ursache des hohen Brennstoffverbrauchs: Beim abwechselnden Erwärmen und Abkühlen des Arbeitszylinders ging ein grosser Teil der Wärme ungenutzt verloren. Durch die Trennung von Zylinder und Kondensator blieb Ersterer stets heiss und Letzterer kühl. Die Wirtschaftlichkeit stieg damit erheblich. Auf diese Erfindung erhielt Watt 1769 sein erstes, grundlegendes Patent. Doch liess es Watt nicht bei diesem Schritt bewenden. Er verschloss den Zylinder beidseitig und liess den Dampf wechselweise von der einen und der anderen Seite einströmen. Damit verdoppelte sich die Leistung auf einen Schlag. Gegenüber der Newcomen'schen Konstruktion leisteten Watts Maschinen das Zehn- bis Zwanzigfache. Der spezifische Kohleverbrauch reduzierte sich auf einen Viertel. Weitere Verbesserungen Watts waren: die Führung der Kolbenstange mittels Parallelo-

gramm, die Umwandlung der oszillierenden Bewegung des Balanciers in eine gleichmässige Rotation sowie die selbsttätige Drehzahlregelung. Ein weiteres Patent Watts fasste 1788 diese Neuerungen zusammen.

Watts Verbesserungen ermöglichten es, Dampfmaschinen sowohl zum Pumpen als auch zum Antrieb von Mühlen, Textilmaschinen und Hochofengebläsen zu verwenden. Ihrer Verbreitung waren kaum mehr Grenzen gesetzt. Watt ist ferner die Festlegung der Pferdestärke (PS) als Leistungsmass für Maschinen zu verdan-

ken. Die heute international gebräuchliche Einheit trägt ihm zu Ehren den Namen Watt.

Die Entwicklung der Dampfmaschine war jedoch noch längst nicht abgeschlossen. Nachdem Watts Patente abgelaufen waren, machte sich eine grosse Zahl von Konstrukteuren an die Weiterentwicklung. Einige Folgeinnovationen waren die Hochdruckmaschine, die Mehrzylindermaschine, die mehrstufige Verbundmaschine und die Dampfüberhitzung. Durch schrittweise Erhöhung des Dampfdruckes konnten die Leistung



Riesendampfmaschine von Henry Corliss an der Weltausstellung in Philadelphia 1876

gesteigert und die Maschinenabmessungen verkleinert werden. Mehrzylindrige Maschinen wiesen einen gleichmässigeren Gang und höhere Umdrehungszahlen auf. Dazu mussten jedoch auch widerstandsfähigere Werkstoffe entwickelt und Richtlinien für die Dimensionierung der Bauteile ausgearbeitet werden. Die Dampfmaschine wurde so zu einem wichtigen Studienobjekt der technischen Fach- und Hochschulen.

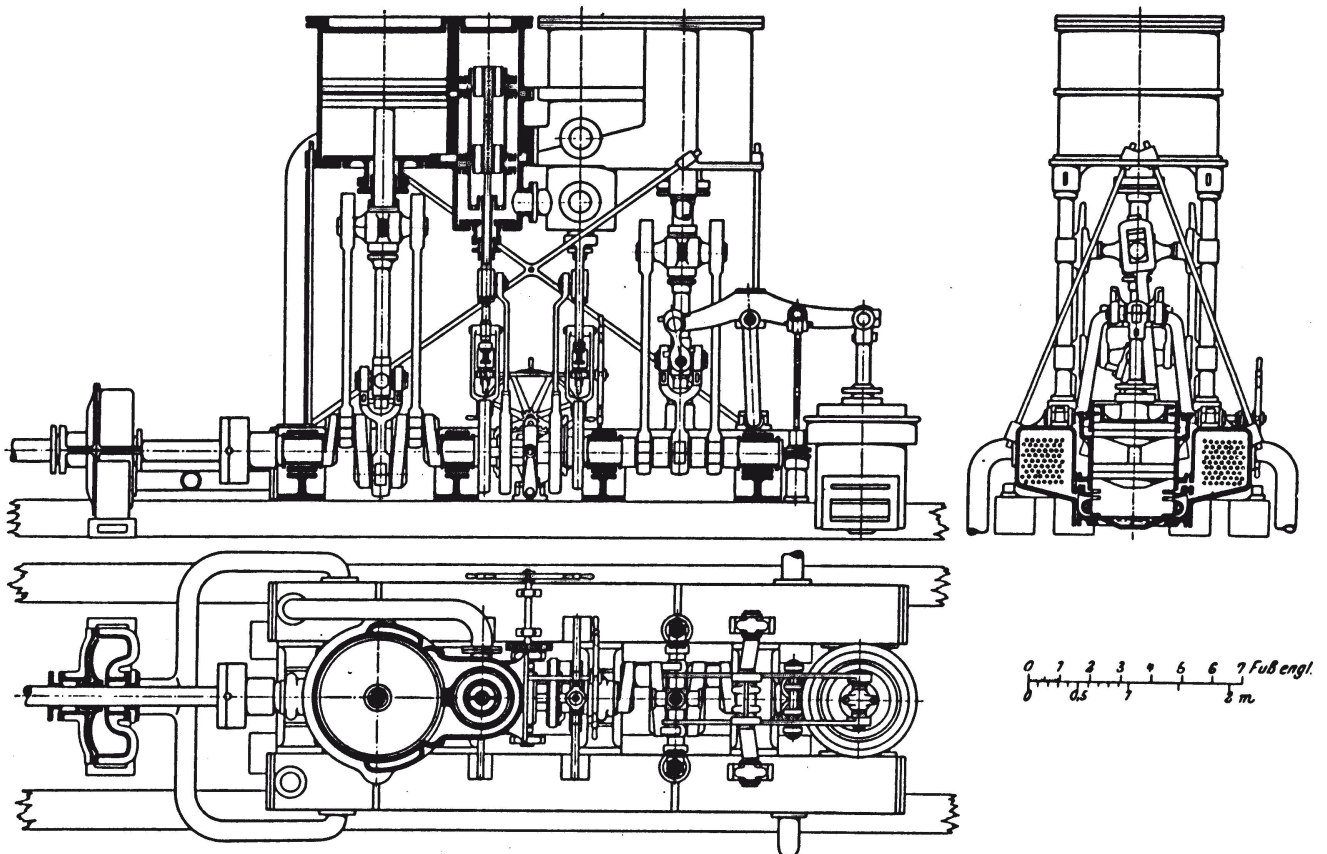
Stodola charakterisierte Watt in einem Vortrag 1897 in folgender Weise: «In James Watt, mit dem die moderne Entwicklung anhebt, finden wir drei Eigenschaften vereinigt: den gottbegnadeten Maschinenbauer, den gelehrten Physiker und die eiserne Ausdauer. Es ist bekannt, dass der Dampfmaschinenbau fast bis auf unsere Tage von den Ideen Watts gezehrt hat. Die Anwendung auf den Schiffsantrieb und die Lokomotive bedingten nur noch Tatkraft und technisch-praktischen Scharfsinn.» Dieses Por-

trät könnte fast Stodolas Spiegelbild sein!

Schweizer Dampfmaschinen

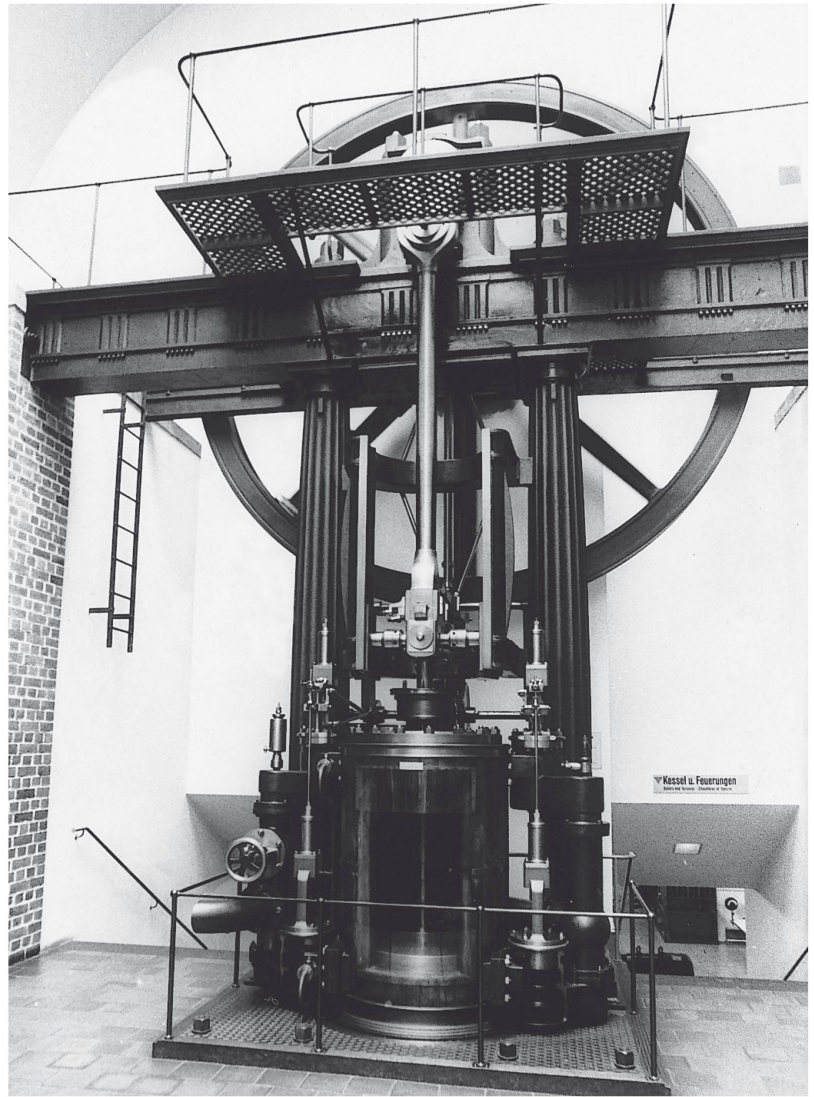
Es mag erstaunen, dass die schweizerische Industrie im Bau von Dampfmaschinen Weltgeltung erlangt hat, obwohl das Land über keine Kohlevorkommen verfügt. Schon 1824 hatte der Basler Professor Christoph Bernoulli (1782–1863) ein weit verbreitetes Lehrbuch über Dampfmaschinen verfasst, das zehn Auflagen erreichte und letztmals 1911 erschienen ist. Die 1805 gegründete Zürcher Firma Escher Wyss, mit Wasserrädern und -turbinen erfolgreich, nahm den Bau von Dampfmaschinen und Dampfschiffen nach englischem Muster 1839 auf. Um 1840 befasste sich in England auch der Schweizer Johann Georg Bodmer (1786–1864) [«Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik», Band 45] mit der Konstruktion von Dampfmaschinen. Er widmete sich besonders der Entwicklung

Zweizylinder-Doppelkolben-Schiffsdampfmaschine von Johann Georg Bodmer 1844



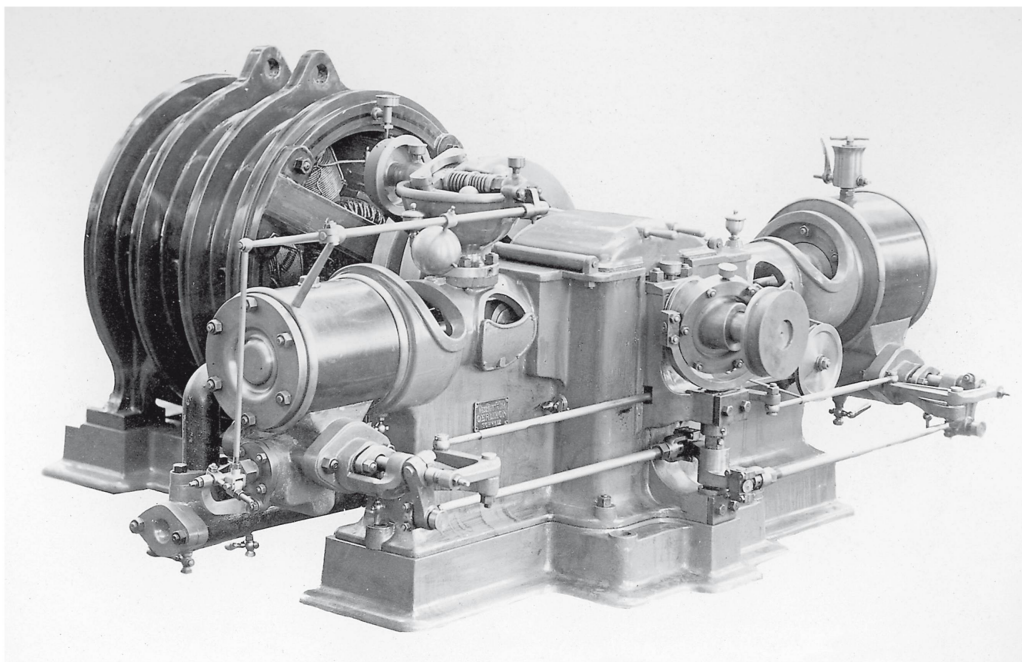
raschlaufender, sparsamer Maschinen. Zur Kompensation der durch die hin- und hergehenden Massen hervorgerufenen Rüttelbewegungen ordnete er pro Zylinder zwei sich gegenläufig bewegende Kolben an. Dieses von ihm patentierte Prinzip wendete er sowohl für stationäre Maschinen wie auch für Schiffsantriebe und Lokomotiven an.

1841 bauten die Gebrüder Sulzer in Winterthur erstmals einen Dampfkessel für eine Heizanlage, und zehn Jahre später nahmen sie die Fabrikation von Dampfmaschinen auf. Dazu verpflichteten sie den aus England eingewanderten Charles Brown (1827–1905) als Konstrukteur. Zu Browns Schöpfungen gehörte die erste Ventildampfmaschine von 1865, die heute im Deutschen Museum in München steht. Brown war ein äußerst erfolgreicher Erfinder und Ingenieur. 1871 gründete er die Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik (SLM) in Winterthur, die sowohl mit dem Bau von Lokomotiven wie auch mit anderen Erzeugnissen des Maschinenbaus bekannt wurde. Aber auch kleinere Schweizer Maschinenfabriken wie Burckhardt in Basel



[«Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik», Band 59] haben zeitweise Dampfmaschinen fabriziert.

Erste Sulzer-Ventildampfmaschine von 1865 (Foto Deutsches Museum München)



Raschlaufende Verbund-Dampfmaschine der Maschinenfabrik Oerlikon 1885

Nicolas Sadi Carnot
(1796–1832), der Begründer der Thermodynamik



Carnot begründet die Thermodynamik

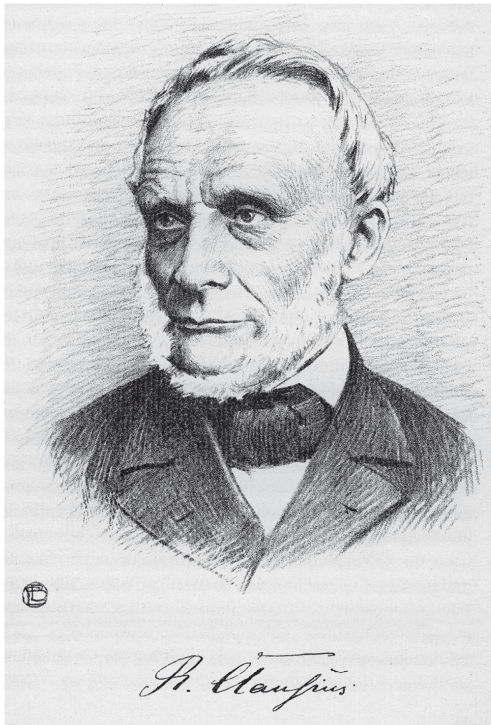
Nicolas Sadi Carnot (1796–1832), ein Absolvent der Ecole Polytechnique in Paris, entwickelte ein theoretisches Idealbild der Wärmekraftmaschine. In seiner 1824 veröffentlichten grundlegenden Studie «Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen» stellte Carnot fest, dass die Dampfmaschine zwar schon recht brauchbar, ihre Theorie aber noch zu wenig erforscht sei. Niemand wisse genau, wie viel von der bewegenden Kraft (der Energie) des Feuers überhaupt ausnützlich sei. Für die Verbesserung der Wärmekraftmaschinen war die Beantwortung dieser Frage unumgänglich.

Obschon Carnot die irri- ge Vorstellung von der Wärme als stofflichem Fluidum vertrat, fand er eine zukunftsweisende Antwort. Er beschrieb einen Kreisprozess (Arbeitszyklus), den das treibende Arbeitsmedium (Dampf oder Gas) in einer Maschine zu durchlaufen hat, damit sich der grösstmögliche Anteil der Wärme in mechanische Arbeit umwandelt.

Dabei kam er zur Einsicht, dass es unmöglich ist, Wärme vollständig in mechanische Arbeit zu verwandeln. Ein Rest muss immer als Wärme abgeführt werden; ein Beispiel dafür ist der Kühler beim Auto. Der umsetzbare Anteil der Wärmeenergie ist umso grösser, je höher die Temperatur am Beginn des Arbeitsprozesses und je tiefer die Temperatur der abzuführenden Restwärme ist. Carnot gelang der Beweis, dass es keinen anderen Kreisprozess gibt, der bei gleichen Bedingungen mehr Arbeit zu leisten vermag als der von ihm so definierte Idealprozess. Unbewusst schuf Carnot damit die Grundlage zu einem Theorem, das für alle Wärmekraftmaschinen gilt: dem Zweiten Hauptsatz. Er begründete damit die Thermodynamik.

Carnot ahnte auch bereits die Gas-Dampf-Kombianlage voraus, eine heute aktuelle Entwicklungsstufe im thermischen Maschinenbau: «Man kann sich sogar die Möglichkeit denken, dieselbe Wärme folgeweise auf Luft und auf Wasserdampf wirken zu lassen. Es würde genügen, der Luft nach ihrem Gebrauch noch eine hohe Temperatur zu lassen und sie, statt in die Atmosphäre auszustossen, in einen Dampfkessel zu führen, wie wenn sie unmittelbar aus der Feuerung käme.» Den nach ihm benannten Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen konnte Carnot noch nicht in heutiger Weise formulieren, da gewisse physikalische Grundbegriffe fehlten. Der von 1855 bis 1867 am Zürcher Polytechnikum lehrende Physiker Rudolf Clausius (1822–1888) schuf den Begriff der Entropie und vervollständigte Carnots Theorie zusammen mit dem Briten William Thomson (1824–1907), dem späteren Lord Kelvin.

Die klassische Thermodynamik, ein für den Wärmekraftmaschinen-



bau wichtiger Zweig der Physik, befasst sich mit der Veränderung der Zustandsgrößen wie Temperatur, Druck und Volumen bei Energieumwandlungen in makroskopischen Systemen. Ein wichtiges Hilfsmittel stellen die sogenannten Hauptsätze dar – aus der Erfahrung abgeleitete Theoreme, die weder beweisbar noch widerlegbar sind. Der Erste Hauptsatz postuliert für alle Umwandlungsprozesse in einem abgeschlossenen System die Erhaltung der Energie. Deshalb ist eine Maschine, die mehr Arbeit leisten würde, als der ihr zugeführten Energie entspricht (Perpetuum mobile), unmöglich. Der Erste Hauptsatz war Carnot noch nicht bekannt. Er wurde durch Julius Robert Mayer (1814–1878) und Hermann von Helmholtz (1821–1894) formuliert und durch James Prescott Joule (1818–1889) experimentell bestätigt.

Der Zweite Hauptsatz besagt, dass bei nicht umkehrbaren Prozessen wie zum Beispiel Verbrennung, Reibung oder plastischer Formänderung Energieverluste in Form von Wärme auftreten, die nicht oder höchstens zu ei-

nem Teil zurückgewonnen werden können.

Stodola und die Dampfmaschine

Als Stodola 1892 seine Professur in Zürich antrat, beanspruchte die Dampfmaschine das Gebiet der Wärmekraftmaschinen noch weitgehend allein. In einer Vorlesung bezeichnete Stodola die Dampfmaschine von allen Wärmekraftmaschinen als die wichtigste. Zwar sei ihre Konzeption weitgehend das Werk von Praktikern; an ihrem Beispiel seien jedoch die Thermodynamik erforscht und Grundlagen des Wärmekraftmaschinenbaus entwickelt worden. Durch den Akademischen Maschineningenieurverein Zürich publizierte Vorlesungen Stodolas geben Auskunft über die von ihm behandelten Steuerungen und Regulatoren und über die Vielfalt der damaligen Konstruktionslösungen. Im Labor lernten die Studenten, mit dem Indikator das Druck-Volumen-Diagramm einer Dampfmaschine auf dem Kolbenweg aufzuzeichnen und daraus die Expansionsarbeit und das Tangentialkraft-Diagramm an der Kurbelwelle zu bestimmen.

Im Auftrag des Schweizerischen Bundesrates besichtigte Stodola als Jurymitglied, zusammen mit weiteren Experten, 1896 die Landesaustellung in Genf. Dabei waren auch Stodolas Kollegen Rudolf Escher und Franz Prasil. 1898 erschien ihr umfangreicher Schlussrapport. Seinen Bericht über die Dampfmaschinen hatte Stodola bereits 1897 in der «Schweizerischen Bauzeitung» publiziert. Dem Bericht entnehmen wir: «Wenn schon die reichen Wasserkräfte der Schweiz einerseits, die grosse Entfernung der Kohलगewinnungszentren andererseits, der Anwendung der Dampfmaschine hinderlich im Wege stehen, besitzt das Land dennoch gerade auf

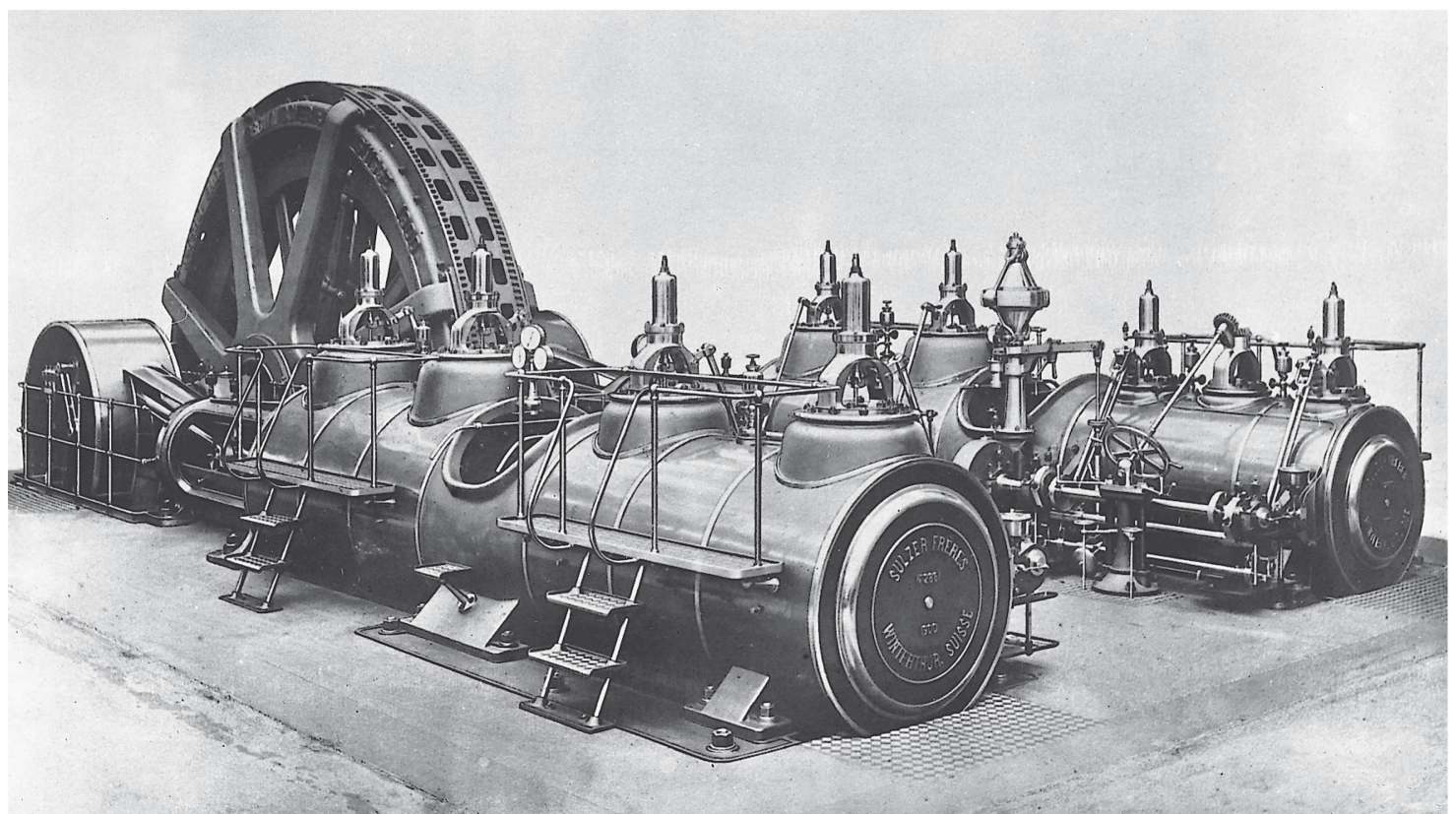
Rudolf Clausius (1822–1888), Professor für Physik am Eidgenössischen Polytechnikum und Schöpfer des Entropie-Begriffs

dem Gebiete des Dampfmaschinenbaues Firmen von unbestrittenem Weltruf, deren Teilnahme an der Ausstellung auch diesem Zweige der Maschinenteknik besonderes Interesse zusicherte.» Die um die vorletzte Jahrhundertwende gebauten Kolbendampfmaschinen erreichten mit dreifacher Expansion und mehrzylindriger Bauweise Leistungen von 1000 bis 2000 Kilowatt. Mit 80 bis 120 Umdrehungen pro Minute bewegten sie sich relativ langsam. Da für die Stromerzeugung ein gleichförmiger Gang notwendig ist, mussten kolossale Schwungrad-Generatoren mit einem Durchmesser von 8 bis 10 Metern gebaut werden.

Stodola fuhr in seinem Bericht fort: «Eine Übersicht der wenn auch nicht zahlreichen Ausstellungsobjekte lässt die Tendenz des modernen Dampfmaschinenbaues sehr wohl erkennen. Wir sehen, dass die Hauptvertreter dieser Industrie, die hauptsächlich vom Export lebt, vor allem auf möglichst exakte Werkstättenausführung

halten, und in dieser Beziehung Ausserordentliches geleistet haben. [...] Hand in Hand mit dem Bestreben, den höchsten Anforderungen an die Präzision zu genügen, geht die naturgemäss nie zum Stillstand gelangende Tendenz, die Geschwindigkeit, speziell die Umdrehungszahl zu erhöhen. Der wachsende Druck der Elektrotechnik zwingt hier auch noch so konservativ gesinnten Konstrukteuren Konzessionen ab. [...] Die Steigerung des Dampfdruckes erreicht allmählich ein langsames Tempo, was wohl daran liegt, dass man mit 12 Atmosphären Kesselspannung die ungefähr ökonomische Grenze für die Anwendung der dreistufigen Expansion erreicht hat, und zum Sprunge auf die vierfache Expansion weder der Maschinen- noch der Kesselbau hinreichend vorbereitet erscheinen. [...] Die grosse Frage der Dampfüberhitzung, welche die Technik gegenwärtig so stark bewegt, war an der Ausstellung nicht berührt: es gab weder besondere Dampfüberhitzer, noch Kes-

Sulzer-Tandem-Verbund-Dampfmaschine mit BBC-Generator an der Weltausstellung in Paris 1900



selsysteme, welche für Überhitzung eingerichtet werden könnten.» Anschliessend beschrieb Stodola die an der Ausstellung gezeigten Maschinen der Firmen Sulzer, Escher Wyss, Burckhardt, SLM und Mertz.

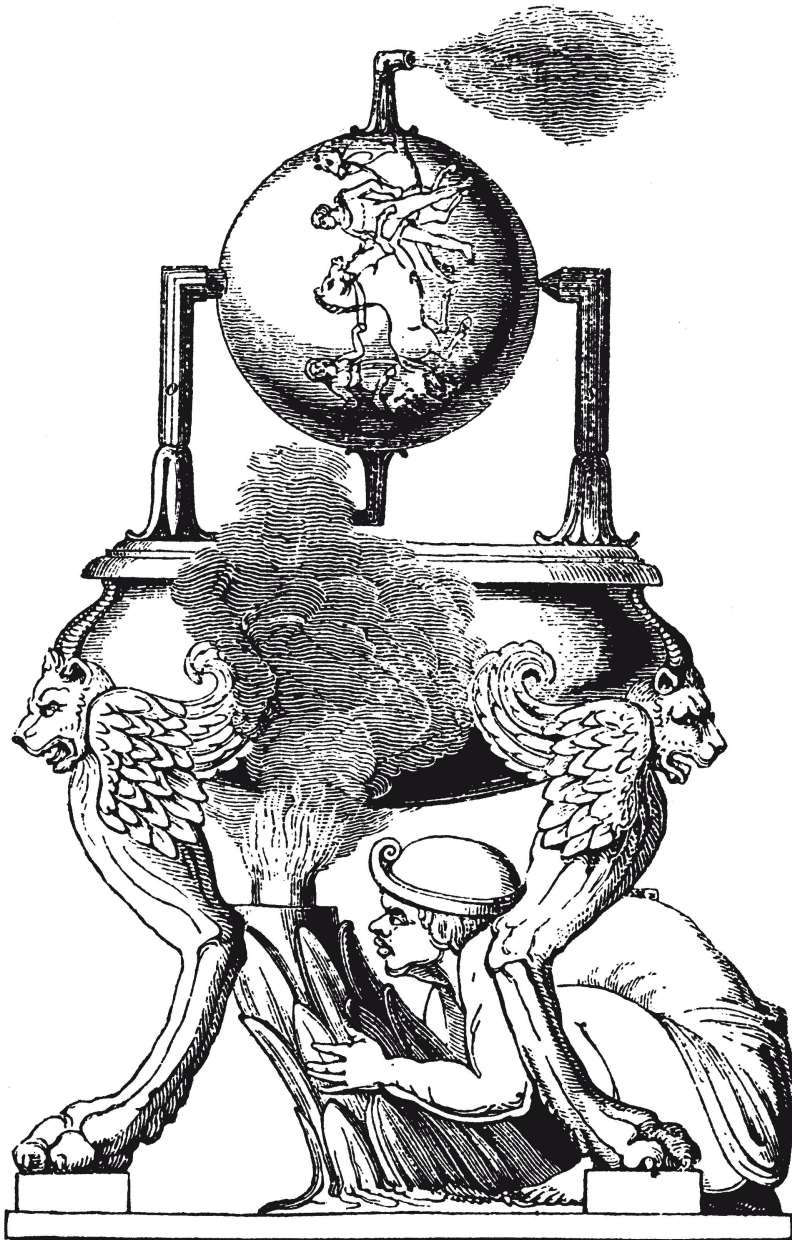
Ein neues Tätigkeitsfeld?

Mit Dampfmaschinen befasste sich Stodola auch in einem Fortsetzungsbericht in der «Schweizerischen Bauzeitung» über die Weltausstellung 1900. Der Aufsatz trug den Titel «Die Dampfmaschinen an der Weltausstellung in Paris». Bewusst hatte Stodola den Begriff «Motoren» gewählt, den er mit dem Einleitungssatz präziserte: «Der Gesamteindruck der Objekte des allgemeinen Maschinenbaues an der Weltausstellung klingt in eine Art Apotheose der Dampfmaschine aus. [...] Als präsumtive Erben sind zu nennen die Dampfturbinen von Parsons und Rateau, die in der letzten Zeit in der Tat ausserordentliche Ergebnisse erzielt haben, und falls diese sich in Zukunft bewahrheiten sollten, nicht zu unterschätzende Rivalen der Dampfmaschine darstellen werden.» In diesen Worten klingt mehr mit als ein sich abzeichnender Technologiewandel: Stodola hatte sein zukünftiges Tätigkeitsfeld gefunden, das ihn die nächsten dreissig Jahre beschäftigen sollte.

Rückblickend äusserte sich Stodola 1929 in seiner Abschiedsvorlesung: «Auf dem Gebiete der Wärmekraftma-

schine herrschte noch uneingeschränkt die Kolbendampfmaschine, die in konstruktiver Hinsicht auf die Höhe eines Kunstwerks gebracht worden war, und zwar vornehmlich durch die glänzenden Leistungen des schweizerischen Maschinenbaus. Man überbot sich in der Erfindung zierlichster Steuerungen; aber in thermodynamischer Beziehung war man an einem Stillstand angelangt, begrenzt durch die Höhe der damals praktisch anwendbaren Temperaturen und Drücke. Wohl wurden durch die Einführung der mehrstufigen Entspannung thermodynamische Fortschritte erzielt, die indessen auch bei vierfacher Aufteilung der Arbeit in aufeinanderfolgenden Zylindern kaum über einen thermischen Wirkungsgrad von 12–15 % hinausführten. [...] Da trat die durch die genialen Erfinder Parsons und de Laval geschaffene Dampfturbine auf den Plan. Während letzterer sich auf Leistungsgrössen von etwa 300 PS beschränkte, waren vor Schluss des Jahrhunderts schon 1000-pferdige Parsonssche Dampfturbinen in England in Betrieb. [...] Darauf begann auf beiden Hemisphären des Erdballs ein Wettlauf sondergleichen, in welchem Parsons, Brown Boveri, Rateau, Zoelly, General Electric und AEG als prominenteste Kämpfer zu nennen sind. Es war eine Lust zu leben, hätte von dieser Zeit gesagt werden können...»

Der Triumphzug der Dampfturbine



*Dampfkugel des
Heron von Alexan-
drien um 120 v. Chr.*

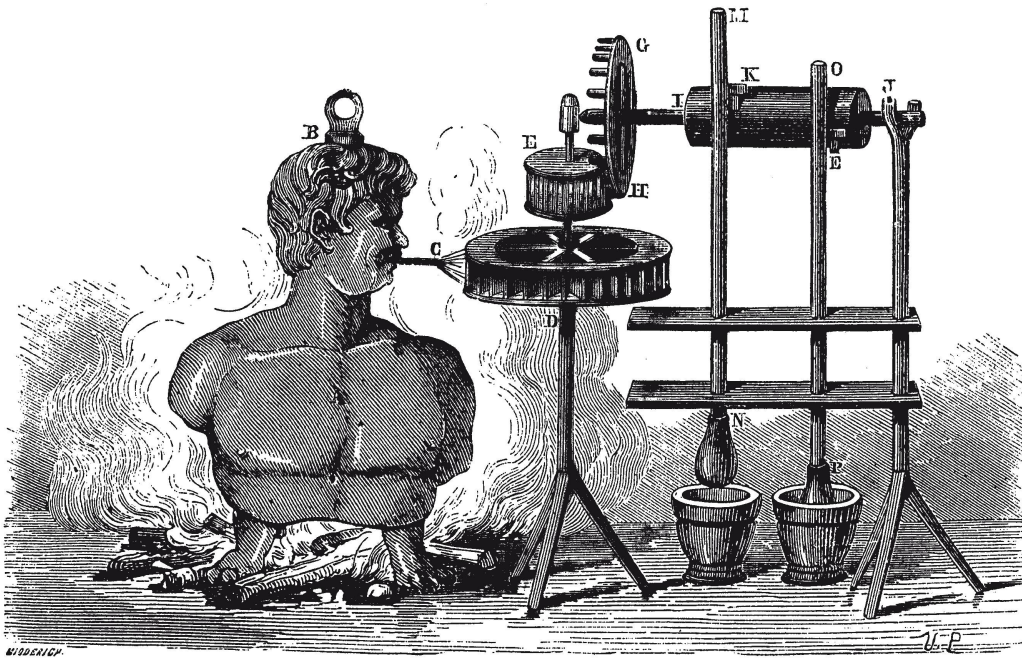
Vorläufer der Dampfturbine

Die Grundidee der Dampfturbine, mit Hilfe eines Dampfstrahls ein Schaufelrad in Drehung zu versetzen, ist mehr als zweitausend Jahre alt. Heron von Alexandria entdeckte um 120 v. Chr. mit seiner Dampfkugel das Prinzip der Reaktionsturbine. Der durch zwei rückwärts gebogene Dü-

sen ausströmende Wasserdampf versetzte die Kugel in Drehung. Im 17. Jahrhundert richtete der Italiener Giovanni Branca den Strahl eines Dampfbläasers auf ein Schaufelrad und trieb damit eine kleine Pulvermühle an. Er realisierte damit die erste Aktionsturbine. Beide Prinzipien gelangten erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts zur Ausführungsreife. Auch im modernen Dampfturbinenbau kommen beide immer noch zur Anwendung.

James Watt hatte in seinem Patent von 1769 ebenfalls die Möglichkeit angedeutet, den Druck des Dampfes direkt, das heisst ohne Umweg über Kolben und Kurbeln, in eine Drehbewegung zu verwandeln. Seine und alle weiteren Versuche mussten jedoch solange erfolglos bleiben, als die Grundgesetze der Thermodynamik und der Strömungsmechanik nicht hinreichend klar erfasst und – darauf aufbauend – ein stabiles wissenschaftliches Lehrgebäude errichtet worden war. Im 19. Jahrhundert existierte bereits eine grosse Zahl von Patenten über Dampfträder und -turbinen, ohne dass vorerst eine praktische Realisierung möglich geworden wäre. Ein Hauptproblem war die hohe Strahlgeschwindigkeit des Dampfes am Düsenaustritt, welche nahe an die Schallgeschwindigkeit herankommt. Dies kann zu Geschwindigkeiten am Umfang des Rades von mehr als 250 Metern pro Sekunde (900 km/h) führen! Zusammen mit der hohen Temperatur ergeben sich daraus beträchtliche Anforderungen an die Festigkeit der rotierenden Teile.

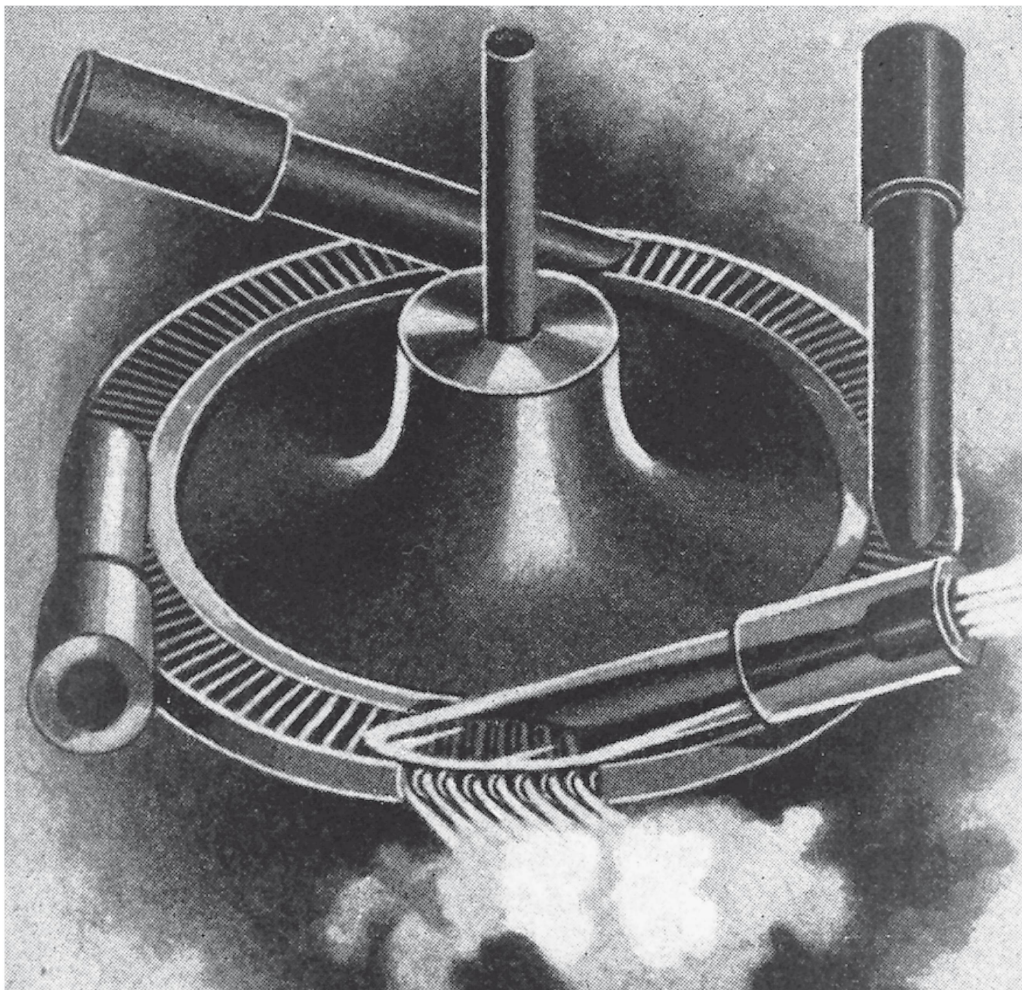
*Giovanni Brancas
Dampftrad aus dem
16. Jahrhundert*



Der Durchbruch

Die hohe Turbinendrehzahl musste deshalb via Reduktionsgetriebe oder durch andere technische Massnah-

men auf moderate Werte herabgesetzt werden. Einige Vorteile gegenüber der Kolbenmaschine gingen dadurch verloren. Zwei Erfindern gelang es prak-



*Dampfturbine von
Carl Gustaf de Laval
1883*

tisch gleichzeitig, brauchbare Dampfturbinen zu schaffen: 1883 dem Schweden Carl Gustav Patrik de Laval (1845–1913) und ein Jahr später dem Briten Charles Algernon Parsons (1854–1931). Die Turbine de Laval bestand aus einem einzigen Schaufelrad. Der Dampfstrahl traf durch Düsen unter spitzem Winkel auf dieses und beschleunigte es auf etwa 30 000 Umdrehungen pro Minute (Gleichdruck- oder Aktionsprinzip). Parsons beschritt dagegen einen anderen Weg: Er unterteilte das Druckgefälle in eine grosse Zahl von Stufen, die je aus rotierenden Schaufelrädern und dazwischen feststehenden, ebenfalls mit Schaufeln versehenen Leitkränzen bestanden (Überdruck- oder Reaktionsprinzip).

Die erste Parsonsturbine wies je 15 gegensinnig axial durchströmte Schaufelreihen auf und lieferte bei einem Dampfdruck von 6,5 bar eine Leistung von 7,5 Kilowatt. Mit 95 Millimetern Rotordurchmesser und 18 000 Umdrehungen pro Minute betrug die Umfangsgeschwindigkeit 90 Meter pro Sekunde. Die Schaufeln dieser ersten Reaktionsturbine waren nur 5 bis 7 Millimeter lang. Sie besas-

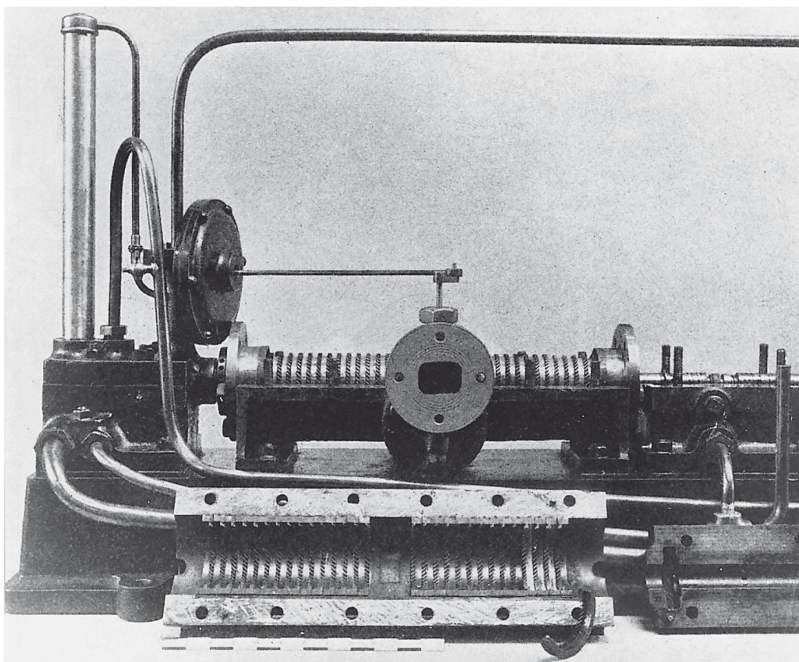
sen noch kein gekrümmtes Profil, sondern waren wie eine Schrägverzahnung direkt aus einem vollen Ring gefräst. Dampfturbinen dieser Bauart waren viel kompakter als Kolbenmaschinen und wurden zuerst auf Schiffen für die elektrische Beleuchtung eingesetzt. Man kuppelte sie direkt mit Dynamomaschinen. Durch Erhöhung der Stufenzahl und des Laufraddurchmessers gelang es Parsons, ohne Getriebe Maschinendrehzahlen von 3000 bis 5000 Umdrehungen pro Minute zu realisieren. Die Drehzahl war sechs- bis zehnmal tiefer als bei Lavalturbinen und so praktisch beherrschbar. Dadurch eröffneten sich der Dampfturbine fast unbegrenzte Möglichkeiten, um Wärme in elektrische Energie umzuwandeln.

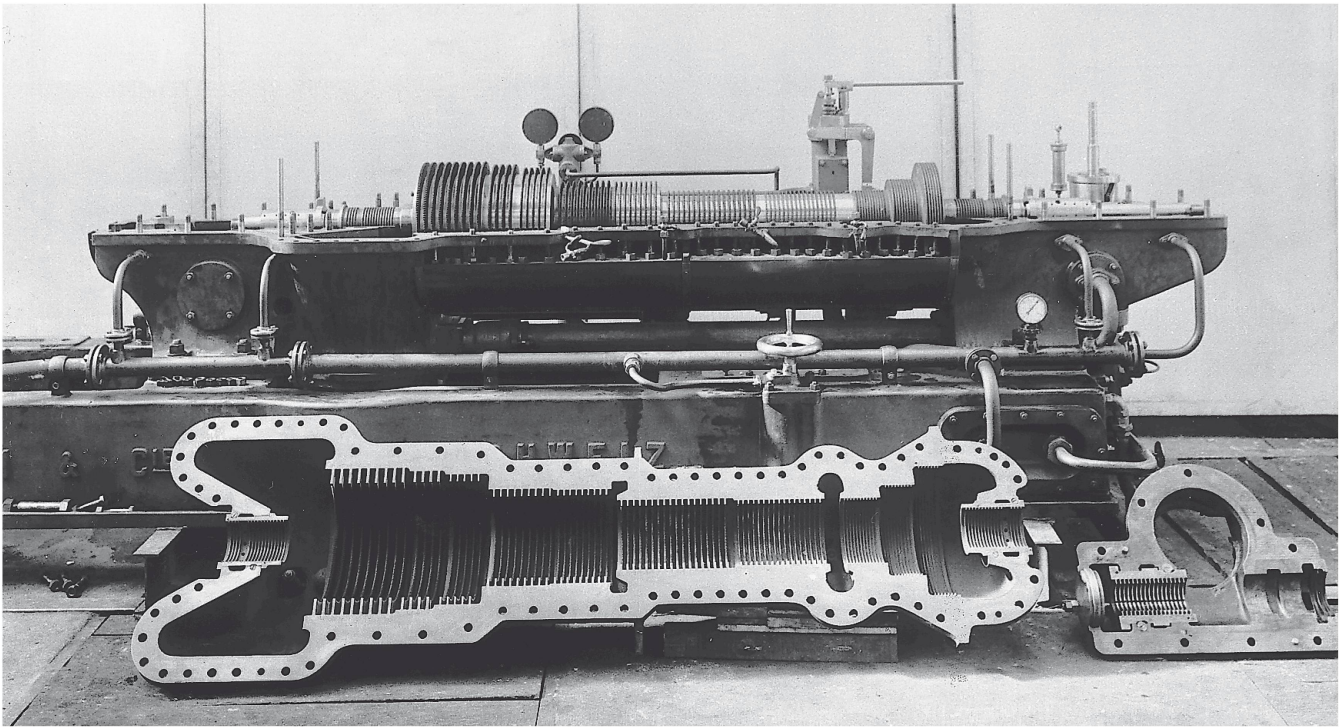
BBC nimmt den Dampfturbinenbau auf

1900 schloss BBC mit Parsons einen Lizenzvertrag ab, der dem Schweizer Unternehmen das Recht einräumte, Dampfturbinen Parsons'cher Bauart nach Deutschland, Frankreich, Italien, Russland und auch an Abnehmer im eigenen Land zu liefern. Vorangegangen waren längere Verhandlungen zwischen Charles Brown senior (1827–1905) und Charles A. Parsons. Die beiden konnten sich seit ihrer gemeinsamen Tätigkeit in Newcastle. Die 1900 gegründete Aktiengesellschaft für Dampfturbinen System Brown-Boveri-Parsons mit Sitz in Baden vermerkte in ihren Statuten: «Gegenstand des Unternehmens ist die Fabrikation und der Verkauf von Turbinen, welche mit Dampf, Gas oder komprimierter Luft betrieben werden, in Verbindung mit den von denselben angetriebenen Dynamos, Ventilatoren, Pumpen oder anderen Maschinen.»

Herkömmliche, schwer gebaute und langsam drehende Generatoren

Erste Dampfturbine von Charles A. Parsons 1884





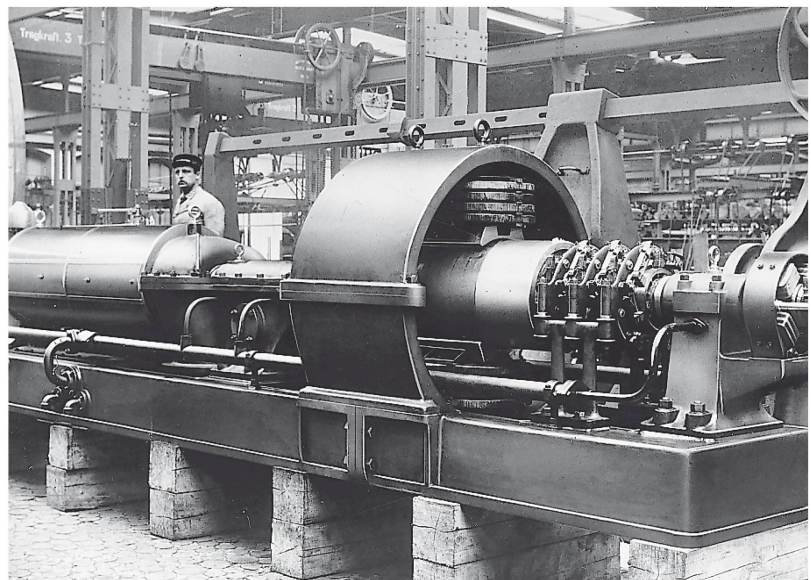
Erste BBC-Dampfturbine vor dem Zusammenbau 1901

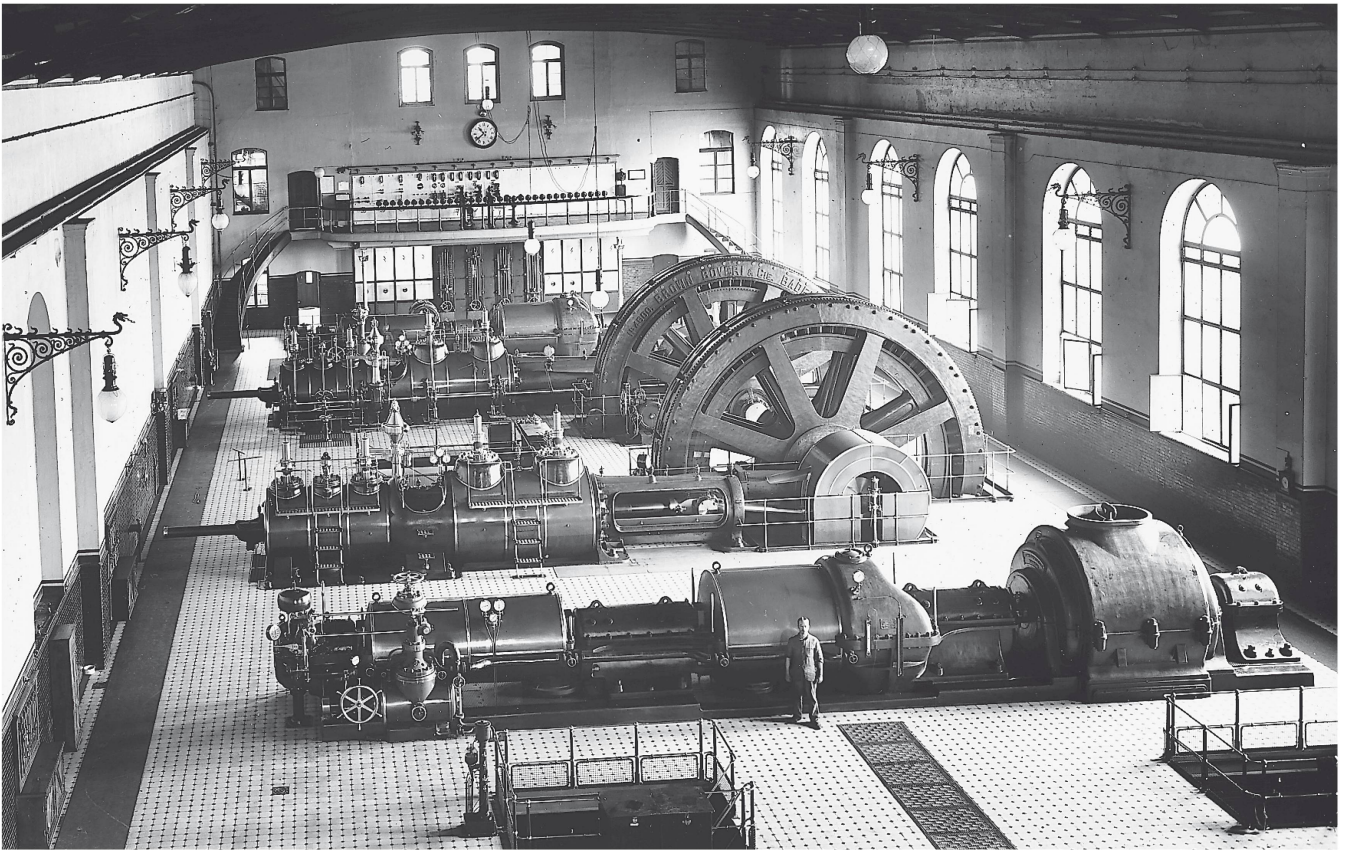
konnten nicht mit Schnellläufer-Turbinen gekuppelt werden. Charles E. L. Brown (1863–1924), dem Mitbegründer von BBC, war es vorbehalten, genau im richtigen Zeitpunkt den Turbogenerator mit schlankem zylindrischem Rotor zu entwickeln. Dampfturbogruppen beanspruchen nur einen Bruchteil an Grundfläche und Bauvolumen leistungsgleicher Kolbendampfmaschinen. Ferner laufen Turbinen praktisch erschütterungsfrei. Die erste von BBC in Baden hergestellte Dampfturbine leistete 250 Kilowatt und wurde nach Italien geliefert. Auch das Städtische Elektrizitätswerk Frankfurt gab sofort eine Dampfturbogruppe in Auftrag. Mit 2600 Kilowatt erbrachte diese Maschine bei annähernd gleicher Grundfläche die sechsfache Leistung gegenüber einer acht Jahre zuvor gelieferten Kolbenmaschinengruppe. Ein Beispiel für den rapiden Fortschritt der Technik in jener Zeit!

Wie erwähnt, hatte die Kolbendampfmaschine einen hohen Vollendungsgrad erreicht, als Stodola sich mit der Dampfturbine zu befassen be-

gann. Kaum jemand ausser ihm hatte ihre baldige Ablösung vorausgesehen. Henri Quiby (1884–1976), ehemaliger Schüler und Mitarbeiter Stodolas und später sein Nachfolger an der ETH, berichtete: «Es ist für Stodolas Scharfsinn kennzeichnend, dass er in den bescheidenen Anfängen der Dampfturbine den Keim einer gewaltigen Entwicklung voraussah. Weil er die mechanischen und thermodynamischen Grundlagen sowie auch das mathematische Werkzeug beherrsch-

Fertiggestellte 250-kW-BBC-Dampfturbine mit Generator 1901





Größenvergleich zwischen einer 3000-kW-Dampfturbine (im Vordergrund) und zwei Kolbendampfmaschinen mit Schwungradgeneratoren von je 1100 kW

te, war es ihm möglich, die in den neuartigen Maschinen sich abspielenden Vorgänge zu analysieren und daraus über die Entwicklungsmöglichkeiten Schlüsse zu ziehen.»

Ein Vortrag wird zum Fachbuch

1902 hielt Stodola an der Jahresversammlung des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) in Düsseldorf einen Vortrag mit dem Titel «Die Dampfturbinen und die Aussichten der Wärmekraftmaschinen». Unter den Zuhörern sass auch der Berliner Verleger Fritz Springer. Er regte Stodola dazu an, das Referat in der bei Springer erscheinenden VDI-Zeitschrift zu publizieren. Ferner schlug Springer Sonderdrucke vor. Aus diesem Gespräch entwickelte sich eine mehr als dreissig Jahre dauernde Zusammenarbeit zwischen Stodola und dem bedeutenden Wissenschaftsverlag. Stodolas Vortrag erschien 1903 in der genannten Zeitschrift in sieben Folgen. Im Schlusssatz klingt Stodolas Lebensprogramm

mit: «Die Wissenschaft beansprucht als ihr Sonderrecht, auf den Höhen des reinen Gedankens zu weilen; den Kampf mit der widerstrebenden Materie überlässt sie den Ingenieuren. Wohl, wir nehmen diesen Kampf auf und wollen wie bisher, mit unverdrossener Ausdauer an dem grossen Problem, das eine Daseinsfrage der Menschheit ist, arbeiten: an der Vervollkommnung der Energieumwandlung in den Wärmekraftmaschinen.»

Von Anfang an hatte Stodola beabsichtigt, die Dampfturbinen in einem Lehrbuch vertieft zu behandeln. Das auf dem Zeitschriftenaufsatz basierende Buch kam noch im gleichen Jahr mit einem Umfang von 220 Seiten in einer Auflage von 600 Exemplaren heraus. Der Titel war identisch, doch war der Text um gut die Hälfte angewachsen. Stodola vermerkte im Vorwort: «Auf Anregung einiger Freunde aus der Praxis wird hiermit die gleichnamige Studie des Verfassers [...], mit erläuternden Zusätzen

versehen, als Sonderdruck der Öffentlichkeit übergeben. [...] Im gegenwärtigen Stadium des Dampfturbinenbaues muss das Hauptgewicht auf die Erörterung der wissenschaftlichen Grundlagen dieser hohe Bedeutung erlangenden Motorenart gelegt werden. [...] Der Dampfturbinenbau bietet besonders zahlreiche Beispiele für die Notwendigkeit, die konstruktive Tätigkeit mit wissenschaftlichen Gesichtspunkten zu verknüpfen. [...] Die Darstellung musste äusserst knapp gehalten werden und beschränkt sich vielfach auf blosse Andeutungen in der Entwicklung; doch dürfte dem sich näher interessierenden Leser auch die Begründung überall klar werden.»

Das Buch fand reissenden Absatz und war innert Monatsfrist vergriffen. Der Verlag drängte auf einen sofortigen Nachdruck. Stodola bevorzugte eine aktualisierte und erweiterte Neu-

Die Dampfturbinen

und die

Aussichten der Wärmekraftmaschinen.

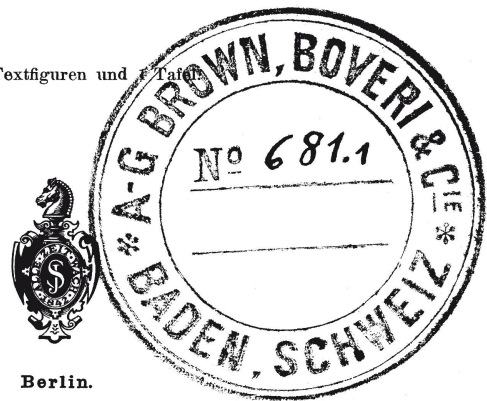
Versuche und Studien

von

Dr. A. Stodola,

Professor am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich.

Mit 119 Textfiguren und 7 Tafeln



Berlin.

Verlag von Julius Springer.

1903.

Titelblatt der ersten Auflage von Stodolas Dampfturbinen-Lehrbuch

Im Lehrbuch behandelte Themenbereiche:

- Strömende Bewegung des Dampfes:
Stodola untersucht die Dampfströmung in Düsen theoretisch und vergleicht sie mit den Resultaten von Laborversuchen.
- Festigkeit rotierender Scheiben und Wellen:
Die Spannungsberechnung und die Formgebung von Turbinenscheiben sowie kritische Drehzahlen der Wellen.
- Energieumsatz in der Dampfturbine:
Stodola leitet den thermodynamischen Wirkungsgrad ab und rechnet mehrere Turbinenbauarten durch.
- Dampfturbinensysteme:
Stodola stellt diverse Turbinenbauarten vor und vergleicht die Wirtschaftlichkeit der Dampfturbine mit jener der Kolbendampfmaschine.
- Aussichten der Wärmekraftmaschine:
Aus dem Zweiten Hauptsatz und dem Carnotprozess leitet Stodola Beurteilungskriterien für die künftige Entwicklung ab.

ausgabe. Der von der Zeitschrift übernommene einspaltige Satz hatte die Reproduktion von Zeichnungen und Kurventafeln eingeschränkt.

Die zweite Auflage von 1904 war um mehr als die Hälfte umfangreicher als die erste. Die Zahl der Abbildungen wurde sogar verdoppelt. Schon ein Jahr später war auch diese Ausgabe verkauft. Stodolas Buch entwickelte sich zu einem Bestseller – eher aussergewöhnlich für ein wissenschaftliches Werk dieses Niveaus. Von dieser zweiten Auflage erschienen 1905 Übersetzungen in englischer und französischer Sprache. Stodolas «Verkaufsrenner» war in jener Zeit keineswegs das einzige Fachbuch über Dampfturbinen. Zu diesem Thema erschienen zwischen 1905 und 1914 zahlreiche Fachaufsätze und Bücher in praktisch allen Industrieländern. Keine andere Publikation stiess jedoch auch nur auf annähernd so viel Echo wie Stodolas Meisterwerk.

Wachsender Markt für Dampfturbinen

Mittlerweile war eine Reihe weiterer Unternehmen auf das technische Potenzial der Dampfturbine aufmerksam geworden. Neue und erfolgreiche Baumuster belebten den Markt, beispielsweise die mehrstufigen Gleichdruck-Turbinen von Auguste Rateau (1863–1930) in Frankreich und Charles G. Curtis (1860–1953) bei General Electric in den USA. Die AEG fabrizierte anfänglich Dampfturbinen eigener Bauart, System Riedler-Stumpf, erwarb jedoch später von General Electric die Lizenz für Curtisturbinen.

Vor allem in der von Heinrich Zoelly (1862–1937) bei Escher Wyss in Zürich entwickelten Dampfturbine erwuchs BBC eine ernsthafte Konkurrenz. Diese Konstruktion besass mehrere auf dem Aktionsprinzip basie-

rende schlanke Scheibenräder, die auf eine gemeinsame Welle aufgeschumpft waren. Damit liessen sich hohe Druckgefälle in kompakten Maschinen umsetzen. Wenige Stufen und grosse Raddurchmesser waren ein Kennzeichen dieser erfolgreichen Bauart. Für die Herstellung von Dampfturbinen nach System Zoelly verband sich Escher Wyss 1904 mit Siemens, Krupp, dem Norddeutschen Lloyd und der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (MAN) zum Zoelly-Syndikat, dem sich später weitere Firmen anschlossen. Auf dem europäischen Kontinent entstand so ein Gegengewicht zum Marktleader BBC.

1905 erschien die dritte, 1910 die stark erweiterte vierte Auflage von Stodolas Buch. Der Untertitel lautete nun: «Mit einem Anhang über die Aussichten der Wärmekraftmaschinen und über die Gasturbine». Das Buch wies jetzt stattliche 708 Druckseiten, 856 Bilder und 9 Faltafeln auf. Zudem war es auf Lexikonformat vergrössert worden. Stodola sagte im Vorwort: «Als Unterstützung des Studierenden sind die wichtigeren Lehrsätze und Verfahren durch breiter angelegte Zahlenbeispiele veranschaulicht, die auch für den Selbstunterricht als Wegleiter erwünscht kommen dürften, und wir waren bestrebt, die Übersicht des Werkes durch folgerichtige Einteilung so weit als möglich zu erleichtern. Manchem wird der Umfang des Buches trotzdem zu ausgedehnt erscheinen, und es seien daher die nachfolgenden pädagogischen Bemerkungen zuhanden des Studierenden gestattet.

Das Buch setzt nur die Elemente der höheren Mathematik und der analytischen Mechanik voraus, deren Aneignung erfahrungsgemäss der grossen Mehrzahl der Hochschulhörer keine Schwierigkeiten zu bereiten pflegt. Ohne diese Elemente und die

einfachste Fassung des Begriffes der Entropie, Dampfturbinen unter Verantwortung mit einiger Aussicht auf Erfolg [...] entwerfen zu wollen, ist ein Ding der Unmöglichkeit. [...] Man nehme nur so viel vom Mathematischen auch in diesem Buche in sich auf, als man mit Sicherheit beherrschen kann, sonst kommt es zum tragischen Konflikt der Gewissenhaftigkeit mit dem Ziel der Ingenieur-tätigkeit: die an sich lobenswerte vertiefte Erforschung des Vorhandenen wird zur Hauptsache – der technische Fortschritt verschwindet aus dem Gesichtsfelde. Wir bleiben an den Fuss-angeln einer unlösbaren Differential-gleichung hängen, während draussen reiches Leben flutet und neue Erfindungskeime sprossen.» Erstmals schickte Stodola dem theoretischen Teil einen kurzen historischen Überblick voraus, der die Entwicklung der Dampfturbine bis 1900 zusammenfasst.

Die «Bibel» des thermischen Turbomaschinenbaus

Die stürmische Entwicklung der neuen Kraftmaschinengattung schlug sich direkt in Stodolas Standardwerk nieder. Der Erste Weltkrieg verzögerte jedoch weitere Ausgaben des Lehrbuches. Stodola gewann dadurch Zeit, um das Buch wiederum gründlich zu überarbeiten und auf den neuesten technischen Stand zu bringen. 1922 konnte endlich die fünfte Auflage erscheinen, nun mit dem Titel «Dampf- und Gasturbinen». Der Band umfasste jetzt mehr als 1100 Seiten mit ebenso vielen Abbildungen sowie 13 Diagrammtafeln. Stodola betonte im Vorwort: «Der Dampfturbinenbau hat seit dem Erscheinen der vierten Auflage, trotz der Unterbrechung der Entwicklung durch den Weltkrieg, abermals mächtige Fortschritte gemacht. Durch unablässige zähe Arbeit und zahlrei-

che Verbesserungen [...] wurde die Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit wie auch die Wirtschaftlichkeit der Dampfturbine auf eine Stufe der Vollkommenheit gehoben, dass die beherrschende Stellung, die sie im Gebiete der Grosskraftherzeugung einnimmt, in absehbarer Zukunft kaum bestritten werden dürfte. Diesem Fortschritt will durch Zusammenfassen des Erreichten und durch neue Beiträge auch die neue Auflage dieses Buches dienen. [...] Der weite Inhalt bedingt ein Lesen mit Auswahl, eine Übung, die dem Studierenden lebhaft empfohlen zu werden verdient.»

1924 erschien die sechste und zugleich letzte deutsche Ausgabe. Der um einen 32-seitigen Nachtrag ergänzte Reprint der fünften Auflage bringt stolze 3,1 Kilogramm auf die Waage! Der ehemalige Stodola-Schüler und erfolgreiche Konstrukteur Walter Noack (1881–1945) urteilte darüber: «Die 6. Auflage stellt mit ihren 1150 Seiten, fast 1200 Abbildungen und 13 Tafeln ein Lehrbuch dar, wie es in gleicher Vollständigkeit wohl kein anderer Zweig der Technik aufzuweisen hat. Aber auch etwas anderes zeichnet dieses Buch, wie überhaupt Stodolas Art des Schaffens aus: Das Streben, jedes Problem der mathematischen Behandlung zugänglich zu machen und seiner Lösung durch rechnerische Mittel soweit als möglich beizukommen. Dabei verleugnete Stodola keineswegs den Nutzen des Versuches, pflegte vielmehr den Sonderversuch, der nun einmal zur Bestimmung der Beiwerte, ohne die die Rechnung nicht auskommen kann, erforderlich ist, in hohem Masse.»

Von dieser letzten Ausgabe erschien 1927 gleichzeitig in New York und in London eine zweibändige Übersetzung. Der amerikanische Übersetzer Louis C. Loewenstein, der bereits die englische Ausgabe von

1905 ediert hatte, war nach eigenen Angaben beratender Ingenieur und mit der Materie bestens vertraut. Er hatte sich die Mühe genommen, alle Formeln, Tabellen und Tafeln vom metrischen ins englische Masssystem umzurechnen. Im Vorwort schrieb er: «Professor Stodola ist als führende Dampfturbinen-Autorität anerkannt und sein Buch wird seit Jahren als die Bibel zu diesem Thema bezeichnet. Das Buch mag als Modellfall dienen, wie eine Ingenieurwissenschaft behandelt werden sollte.» Drei Jahre nach Stodolas Tod erschien 1945 in New York ein Neudruck der amerikanischen Ausgabe. Von der letzten deutschen Auflage wurde in China ein Offset-Nachdruck vertrieben. Dies beweist, dass Stodolas Standardwerk keineswegs an Aktualität verloren hatte. Auch in der Schweiz bezeichnete man das Buch noch in den sechziger Jahren als die «Bibel» des Turbomaschinenbaus. Es war auf dem antiquarischen Buchmarkt nur schwer aufzutreiben.

Aus einer anderen Perspektive würdigte der angesehene russisch-amerikanische Festigkeitsfachmann Stephen P. Timoshenko, Professor an der Stanford University, Stodolas Dampfturbinenbuch. 1953 schrieb er in seiner Geschichte der Festigkeitslehre: «Am Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts zeichneten sich neue Entwicklungen in der Maschinenindustrie ab, welche exaktere Verfahren für die Spannungsberechnung in Maschinenteilen wünschbar erscheinen liessen. Diese Tendenz fand ihren Ausdruck in neuen Büchern über Maschinenbau, unter denen Stodolas Buch «Die Dampfturbinen» ein hervorragendes Beispiel darstellt. Während in früheren Büchern die Dimensionierung von Maschinenteilen auf empirischen Formeln und elementaren Spannungsrechnungen basierte, wen-

det Stodola in seinem Werk sämtliche Methoden der Spannungsbestimmung an, die die Elastizitätstheorie zur Verfügung stellt. Er behandelt Spannungen in Platten und Schalen, untersucht Wärmespannungen sowie die Festigkeit rotierender Scheiben. Grosse Aufmerksamkeit schenkt er den durch Schwingungen hervorgerufenen Beanspruchungen. Auch die Spannungskonzentration um Löcher und bei Querschnittsübergängen findet seine Beachtung. Ferner pflegt er verschiedene Methoden zur experimentellen Spannungsermittlung. Dieses Buch ist für die Festigkeitslehre richtungweisend und stellt ein wichtiges Werk dar bezüglich Anwendung wissenschaftlicher Methoden in der Maschinenkonstruktion.»

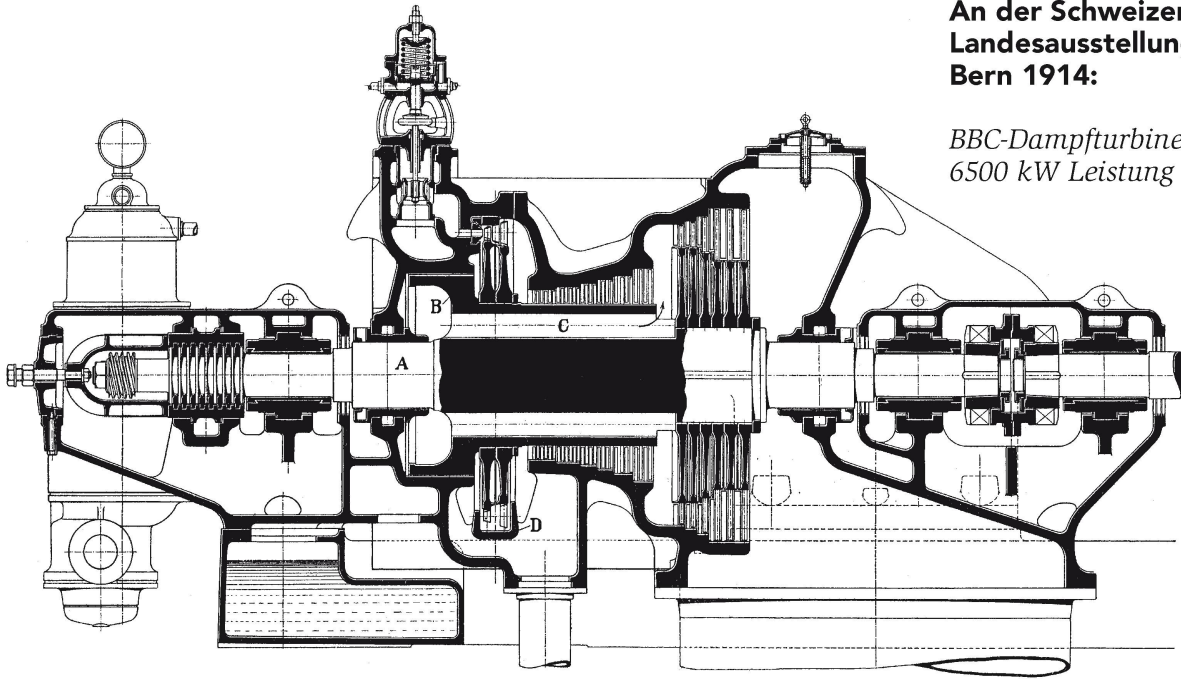
Führende Schweizer Unternehmen

Zum weltweiten Konkurrenzkampf auf dem Gebiet der Dampfturbinen traten neben BBC und Escher Wyss zeitweise noch zwei andere Schweizer Unternehmen an: Die Maschinenfabrik Oerlikon hatte sich eine Lizenz von Rateau gesichert, während Sulzer eine Eigenkonstruktion vorstellte. Das im Dampfmaschinen-, Dieselmotoren- und Kesselbau erfolgreiche Winterthurer Unternehmen gab den Dampfturbinenbau jedoch bald wieder auf.

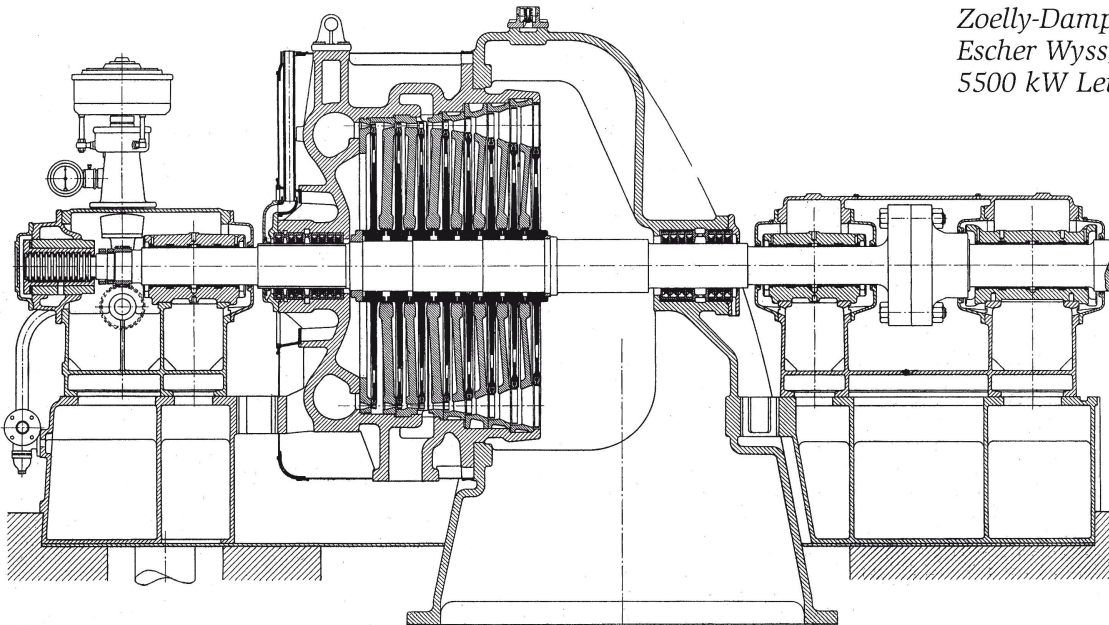
Im Jahre 1914 besuchte Stodola die Schweizerische Landesausstellung in Bern. In der «Schweizerischen Bauzeitung» äusserte er sich zu den durch die drei erwähnten Schweizer Firmen präsentierten Turbomaschinen: «Die Dampfturbinen boten das glänzende Bild einer durch zielbewusste Arbeit, finanziellen Wage- und Opfermut und tadellose Werkstattausführung zum Weltruf gelangten Industrie, deren Ausdehnung und weit ausgreifende Tätigkeit in einem seltsamen, aber

An der Schweizerischen
Landesausstellung in
Bern 1914:

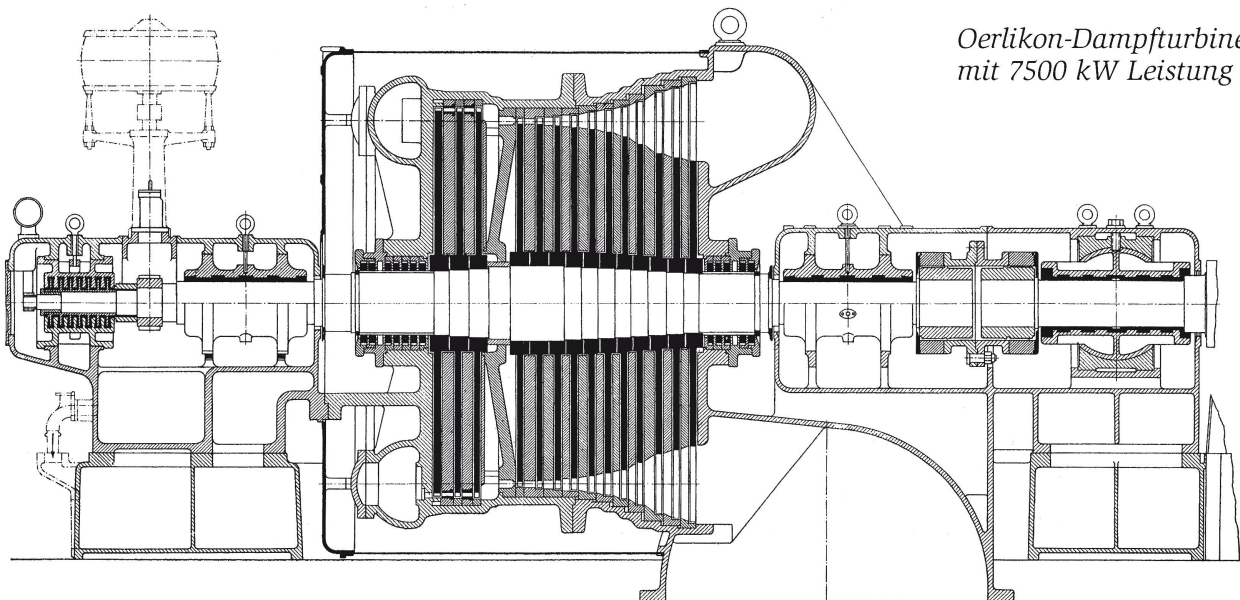
BBC-Dampfturbine mit
6500 kW Leistung



Zoelly-Dampfturbine von
Escher Wyss, Zürich, mit
5500 kW Leistung



Oerlikon-Dampfturbine
mit 7500 kW Leistung

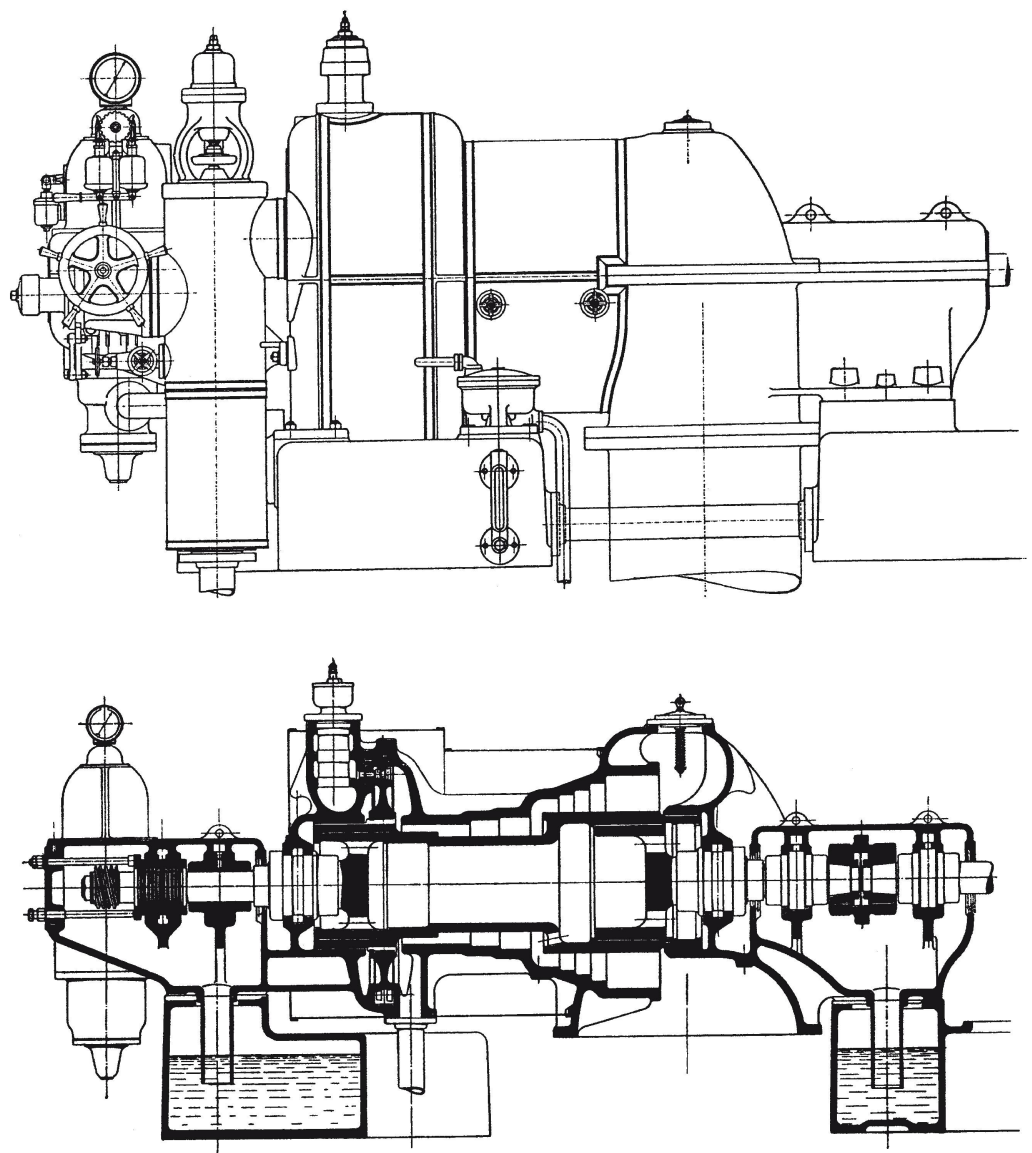


hocherfreulichen Gegensatz zur Grösse des Landes stehen. [...] Wohlthuend berührt eine gewisse Stabilisierung der Verhältnisse, wie sie wahrnehmbar ist [...] und gewissermassen die Ruhe eines gesicherten Besitzes widerspiegelt. Dies schliesst natürlich nicht aus, dass im Einzelnen unausgesetzt Verbesserungen angestrebt und die Turbine sowohl in wärmetheoretischer wie in betriebstechnischer Hinsicht aufs feinste weiter ausgefeilt wird; denn im Dampfturbinenbau hat von Anfang an der schärfste Wettbewerb, den die Geschichte des Maschinenbaues kennt, eingesetzt, und dauernder Stillstand nach irgend einer Richtung ist vollkommen ausgeschlossen.»

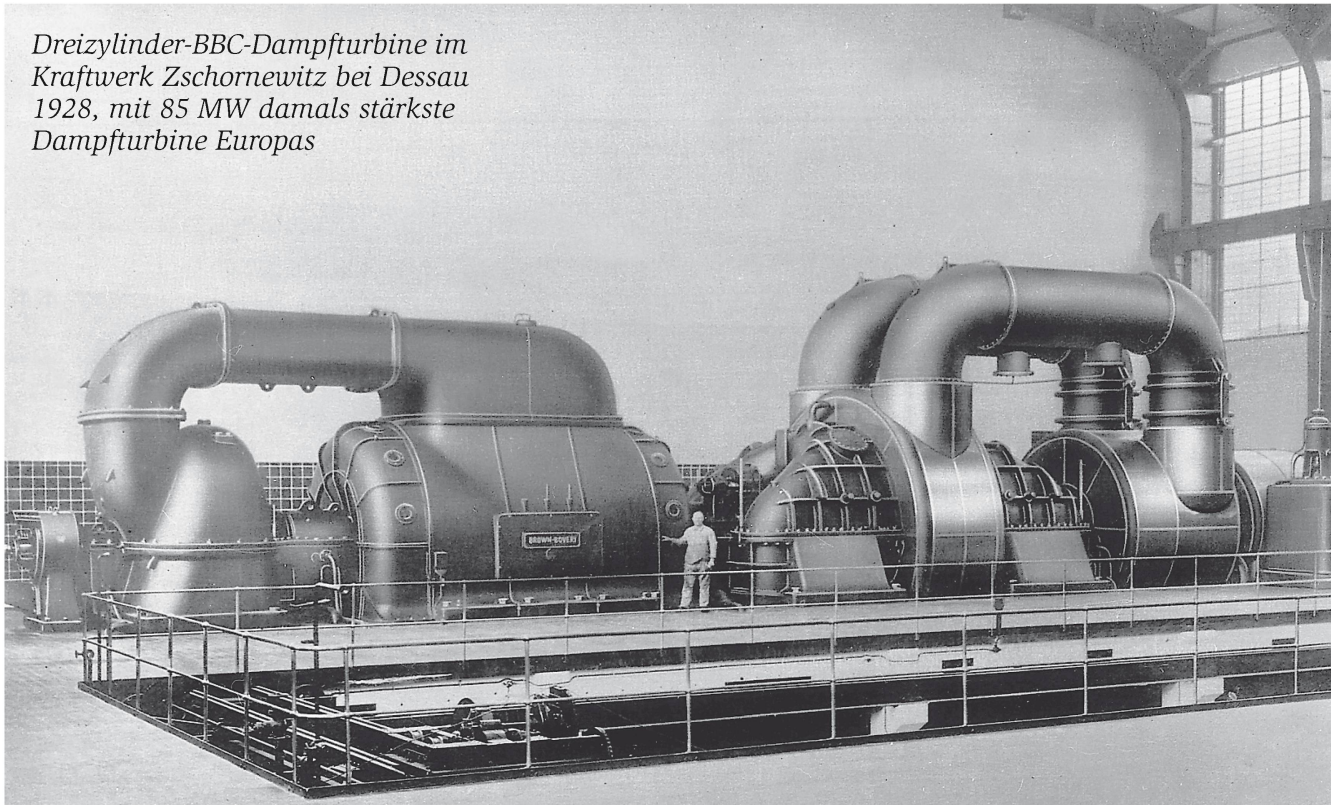
Neben stationären Anlagen zur Stromerzeugung oder zum Antrieb von Hochofengebläsen in Hüttenwerken gelangten Dampfturbinen zunehmend auch in der Hochseeschifffahrt zur Anwendung. Bei Kriegsschiffen und Atlantikdampfern lösten sie die Kolbendampfmaschinen rasch ab. 1903 stellte BBC im Binnenland Schweiz erstmals eine Schiffsturbine her, die für die Kaiserliche Deutsche Marine bestimmt war. Schiffsturbinen mit den zugehörigen Zahnradgetrieben für grosse Leistung bildeten lange Zeit sogar eine Spezialität des Badener Unternehmens.

Der Dampfturbinenbau entwickelte sich bei BBC zu einem der bedeutendsten Sektoren. Schon 1904

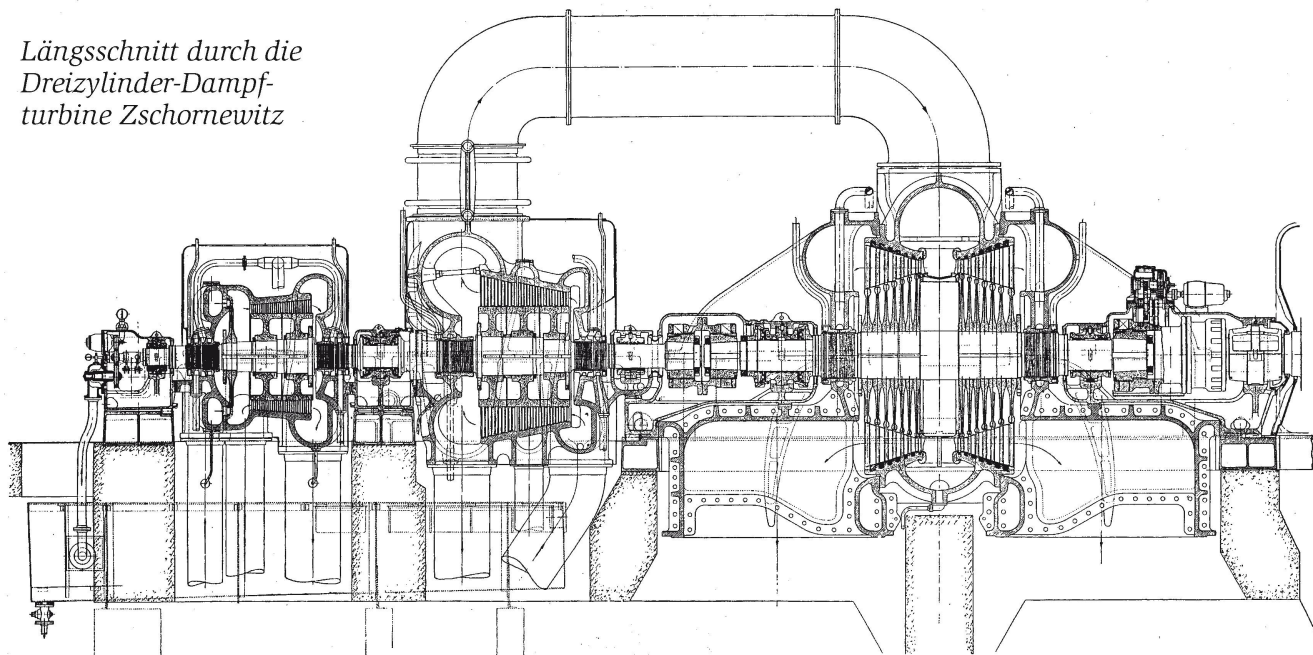
Kombinierte BBC-Dampfturbine von 1907, Ansicht und Längsschnitt



Dreizylinder-BBC-Dampfturbine im Kraftwerk Zschornowitz bei Dessau 1928, mit 85 MW damals stärkste Dampfturbine Europas



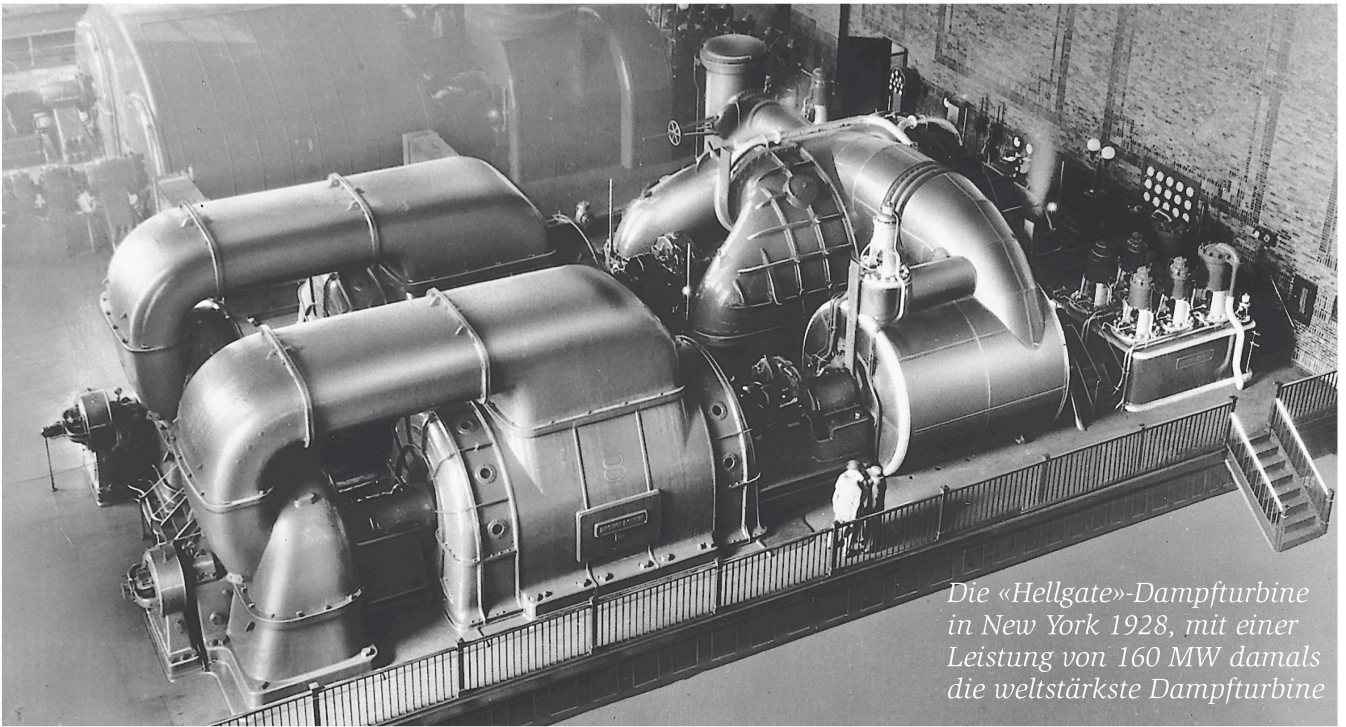
Längsschnitt durch die Dreizylinder-Dampfturbine Zschornowitz



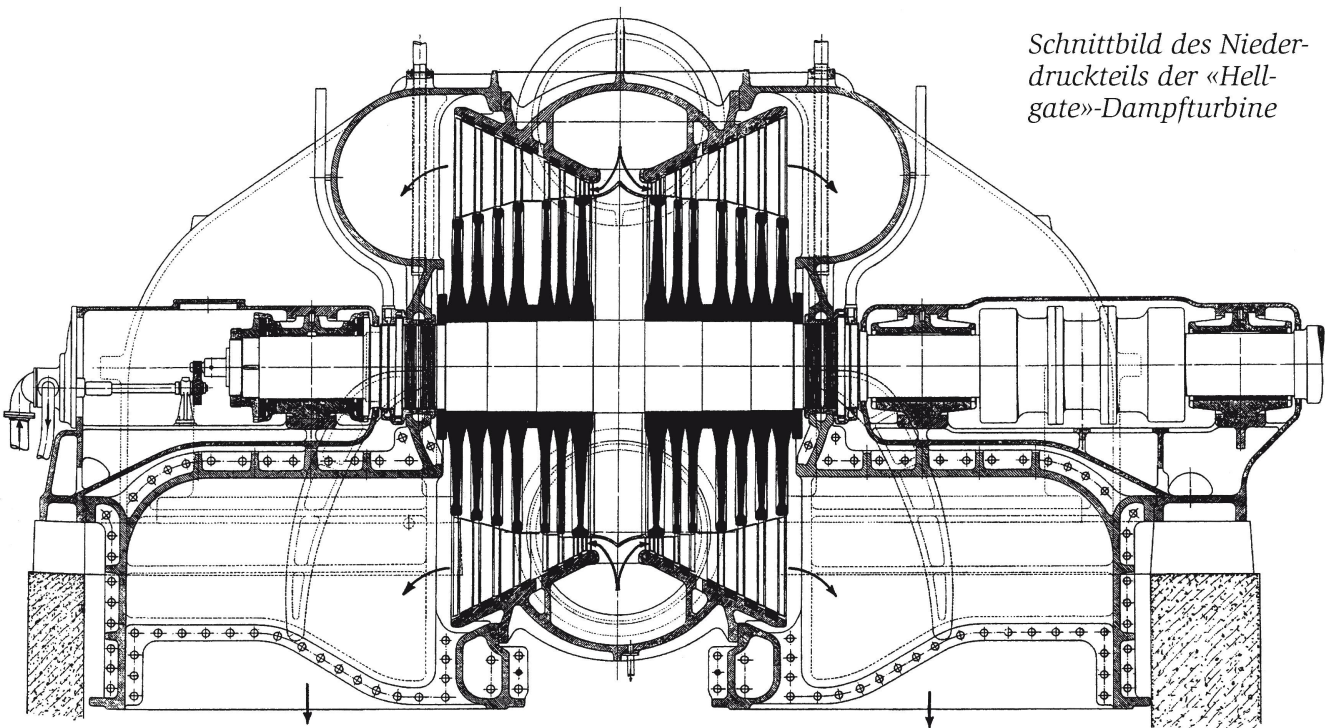
wurde die Hälfte des gesamten Umsatzes mit dem neuen Produkt erwirtschaftet. Von 1901 bis 1906 hat BBC rund 500 Dampfturbinen mit einer Gesamtleistung von 770 Megawatt verkauft. 1908 wurde die Gigawattgrenze (eine Million Kilowatt) überschritten und bis 1929, dem Abschluss von Stodolas Lehrtätigkeit, wuchs die Summe auf sagenhafte 12

Gigawatt an. Dieser Leistungsausweis ist von keiner anderen europäischen Firma auch nur annähernd erreicht worden.

Steigende Leistungen und höhere Dampfdrücke erforderten mehr Stufen und führten zu einer grösseren Baulänge der Maschine. Aus Gründen der Stabilität stiess man bald an Grenzen. BBC entwickelte daher im Jahre



Die «Hellgate»-Dampfturbine in New York 1928, mit einer Leistung von 160 MW damals die weltstärkste Dampfturbine



Schnittbild des Niederdruckteils der «Hellgate»-Dampfturbine

1907 die kombinierte Dampfturbine. Diese erhielt als erste Stufe ein- oder mehrstufige Aktionsräder, denen eine entsprechend kleinere Anzahl Reaktionsstufen nachgeschaltet werden konnte. Damit wurden die Maschinen kürzer. Gleichzeitig ergab sich eine bessere Reguliermöglichkeit, indem man für die erste Stufe eine durch entsprechende Ventile gesteuerte Teilbe-

aufschlagung des Aktionsrades konzipierte. Diese Eigenentwicklung von BBC ermöglichte 1912 ein frühzeitiges Aussteigen aus dem Lizenzvertrag mit Parsons. Zur Leistungserhöhung älterer Anlagen – auch solcher der Konkurrenz – stellte BBC kompakte, einstufige Hochdruck-Vorschaltturbinen her. Für sehr grosse Leistungen und entsprechende Dampfmengen wur-

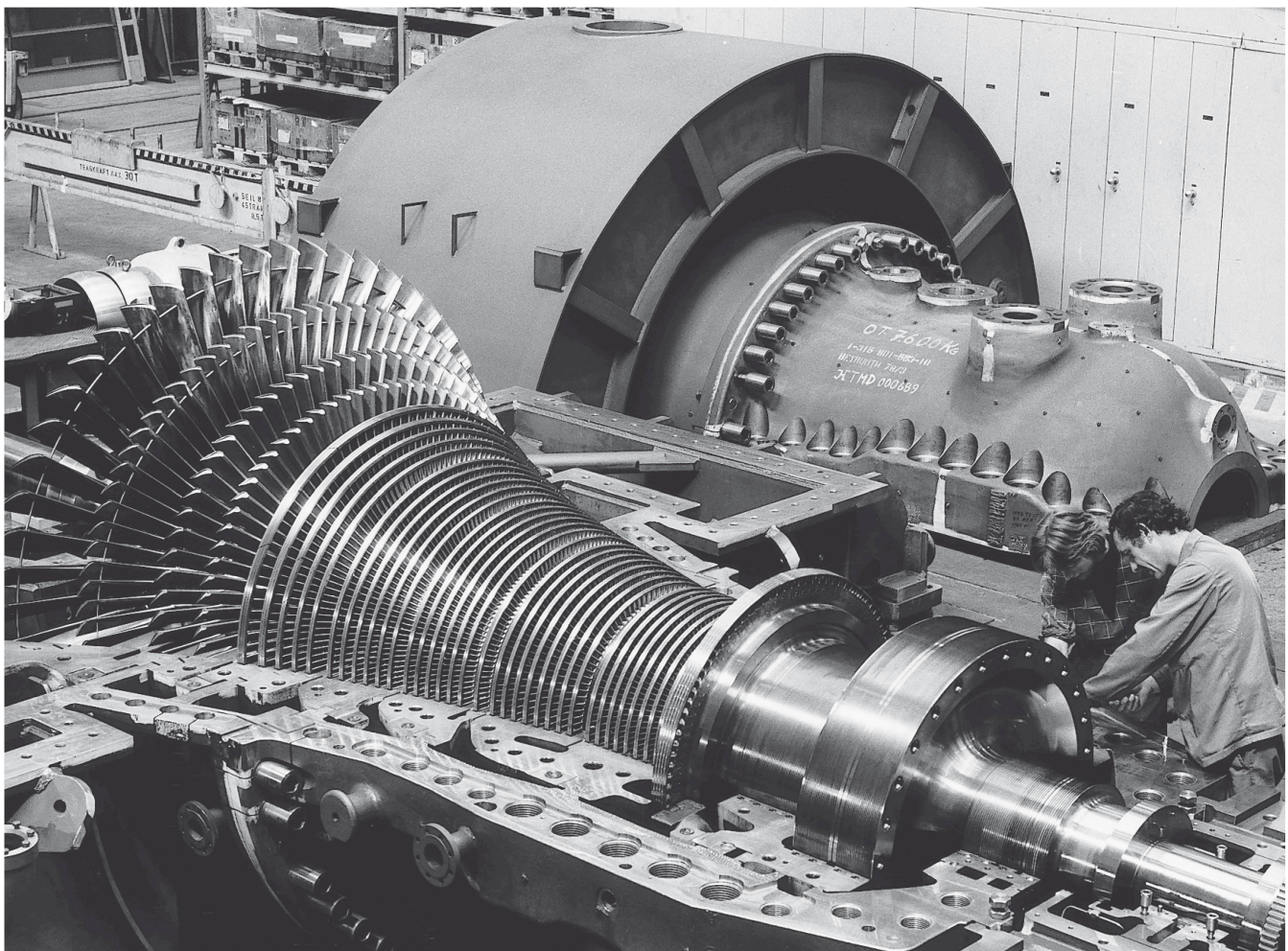
den die Turbinensätze mehrgehäusig ausgeführt. Die riesigen Dampfvolu-
mina im Niederdruckbereich liessen
sich damit in zwei bis vier Parallel-
ströme teilen. Damit blieben Abmes-
sungen und Beanspruchung inner-
halb beherrschbarer Grenzen. Ferner
gestattete diese Bauweise eine Zwi-
schenüberhitzung des Dampfes.

Dieses bewährte Prinzip wurde bis
in die Gegenwart beibehalten und
konsequent weiterentwickelt. Grosses
Augenmerk galt der Strömungsfor-
schung und der Entwicklung hoch be-
lastbarer Turbinenschaufeln. Die Ma-
schinenleistung erreichte in der Folge
eine unglaubliche Steigerung: Zehn-,
zwanzig-, fünfzigtausend und mehr
Kilowatt liessen sich in einer einzigen
Maschine umsetzen. 1928 hat BBC
die für lange Zeit stärkste Dampfur-

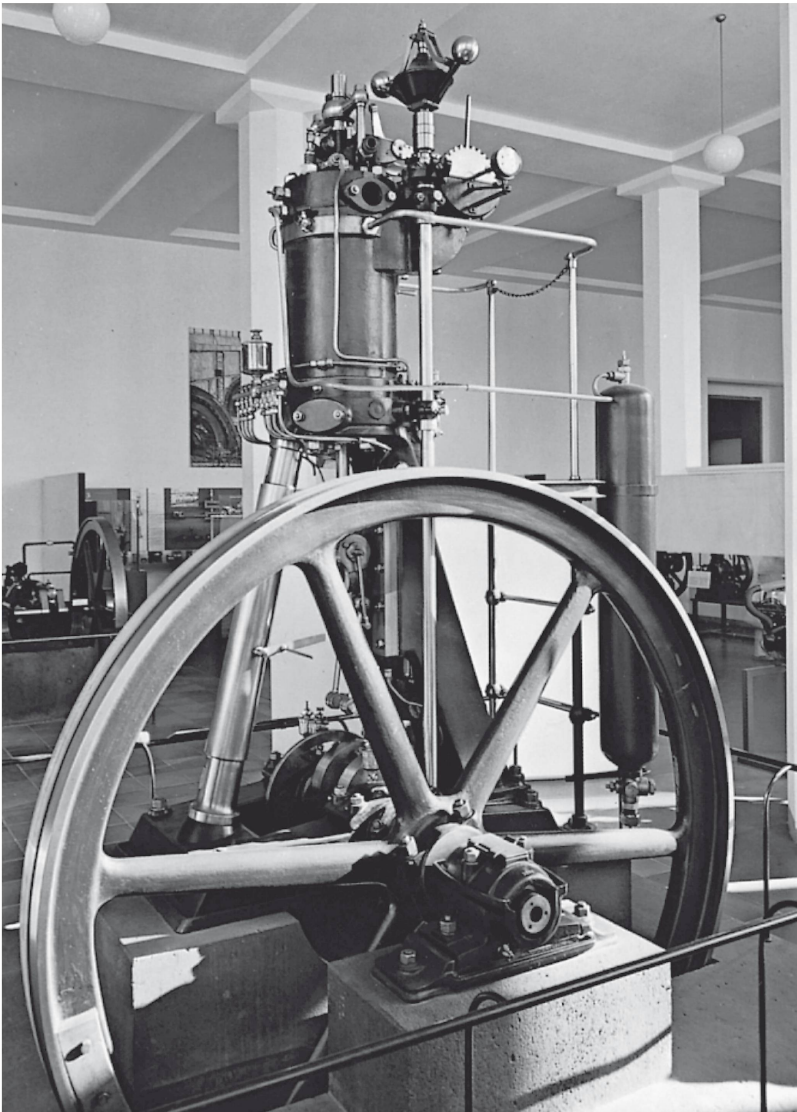
bine der Welt abgeliefert. Die 160 Me-
gawatt leistende, zweiwellige Anlage
gelangte im Elektrizitätswerk «Hell-
gate» in New York zur Aufstellung.

Professor Walter Traupel (1914–
1998) hat das Wirken Stodolas, seines
Vor-Vorgängers auf dem Lehrstuhl für
thermische Turbomaschinen, mit fol-
genden Worten gewürdigt: «Wir dür-
fen uns eines Mannes erinnern, der
während Jahrzehnten an der ETH ge-
wirkt hat: Aurel Stodola. Er hat keine
grundlegende Erfindung auf dem Ge-
biete des Dampfturbinenbaues ge-
macht, doch hat er seine überragende
Kapazität vor allem in den Dienst der
Entwicklung dieser Maschine gestellt,
und das war mehr als Erfinden. Unter
den Schöpfern der Dampfturbine
gehört ihm ohne Zweifel der erste
Platz.»

*Montage einer Einzy-
linder-Dampfturbine
mit 70 MW Leistung.
Daneben der Zylinder-
Oberteil als Verbund-
konstruktion*



Verbrennungsmotor und Turboaufladung



Erster betriebsfähiger Dieselmotor, gebaut 1897 durch die Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (Foto Deutsches Museum München)

Stodola und der Verbrennungsmotor

Aurel Stodola hat sich vor allem als Autorität auf dem Gebiet des thermischen Turbomaschinenbaus profiliert. Zu seinen Lehrverpflichtungen am Polytechnikum gehörten jedoch auch Vorlesungen über Gasmotoren. Nach einem geschichtlichen Überblick erörterte Stodola die verschiedenen Brenngasarten und die zugehörigen Produktionsanlagen. Auch die wichtigsten Konstruktionselemente wie

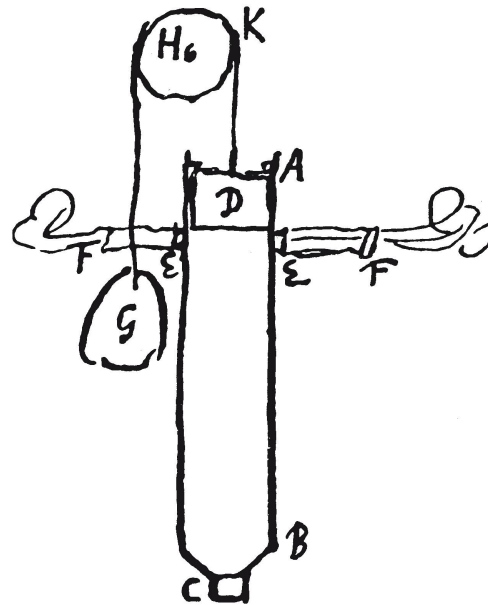
Kolben, Ventile und Regulatoren bezog er in seinen Unterricht ein. Ferner behandelte Stodola die thermodynamischen Grundlagen der Verbrennungsmotoren. Über die 1896 an der Genfer Landesausstellung gezeigten Gasmotoren berichtete Stodola: «Während an der Ausstellung von 1883 in Zürich erst ein einziger Gasmotor zu sehen war, bildet diese Maschinenart zusammen mit den Benzinmotoren, deren Anwendung eine unerwartet rasche Zunahme verzeichnet, die zahlenmässig grösste in der Maschinenhalle der Genfer Ausstellung. Trotz der unzweifelhaften Konkurrenz der Elektrizität bevorzugt das Kleingewerbe in den meisten Fällen noch den Gasmotor.» Unter den vertretenen Schweizer Marken hob Stodola besonders die Namen Saurer, SLM, Martini und Weber hervor.

1902 besuchte Stodola die Gewerbe- und Industrieausstellung in Düsseldorf. In der «Schweizerischen Bauzeitung» berichtete er über die dort gezeigten Gasmotoren: «Zuletzt – aber nicht als die geringsten – müssen die Gasmotoren besprochen werden. An ihren massigen Schubstangen und auffällig starken Kropfbolzen lassen sie die ungeheure Wucht auch äusserlich erkennen, mit welcher der zwischen 20 und 30 Atmosphären gelegene Explosionsdruck auf das Gestänge einwirkt. [...] Drei Systeme kämpfen um die Vorherrschaft: der Viertakt, in der Deutzer Ausführung mit mehreren Zylindern, der Zweitakt als doppeltwirkende Maschine von Körting und in der Form der Doppelkolbenmaschine von Oechelhäuser.»

Die Verbesserung des Wirkungsgrades von Wärmekraftmaschinen war für Stodola ein Dauerthema. Als sich die Turboaufladung, eine Kombination von Kolbenmotor und Gasturbine, als Weg dazu abzeichnete, fand sie sofort Stodolas Interesse. Sie versprach neue Erkenntnisse sowohl für die Konstruktion der Motoren als auch für die der Turbinen. In den beiden letzten Auflagen seines Standardwerks «Dampf- und Gasturbinen» äusserte sich Stodola zur Aufladung von Flugmotoren: «Zur Verdichtung des Ladegemisches der Flugzeugmaschinen in grosser Höhe über dem Erdboden werden bekanntlich Kreiselerdichter angewendet, die man durch Zahnradvorgelege oder durch Gasturbinen antreibt.» Stodola stellte im erwähnten Buch zwei amerikanische Ausführungen turbinengetriebener Lader in Bild und Text vor. In der Periode von Stodolas Lehrtätigkeit am Zürcher Polytechnikum erfuhren sowohl der Otto- wie auch der Dieselmotor eine stürmische Entwicklung. Zusammen mit dem rasanten Aufschwung der Dampfturbine beschleunigte dies die Ablösung der Kolbendampfmaschine. Nach Stodolas Rücktritt wurde an der ETH Zürich eine besondere Professur für Verbrennungsmotoren errichtet. Nachstehend ein Überblick der geschichtlichen Entwicklung des Verbrennungsmotors:

Von der Pulvermaschine zum Gasmotor

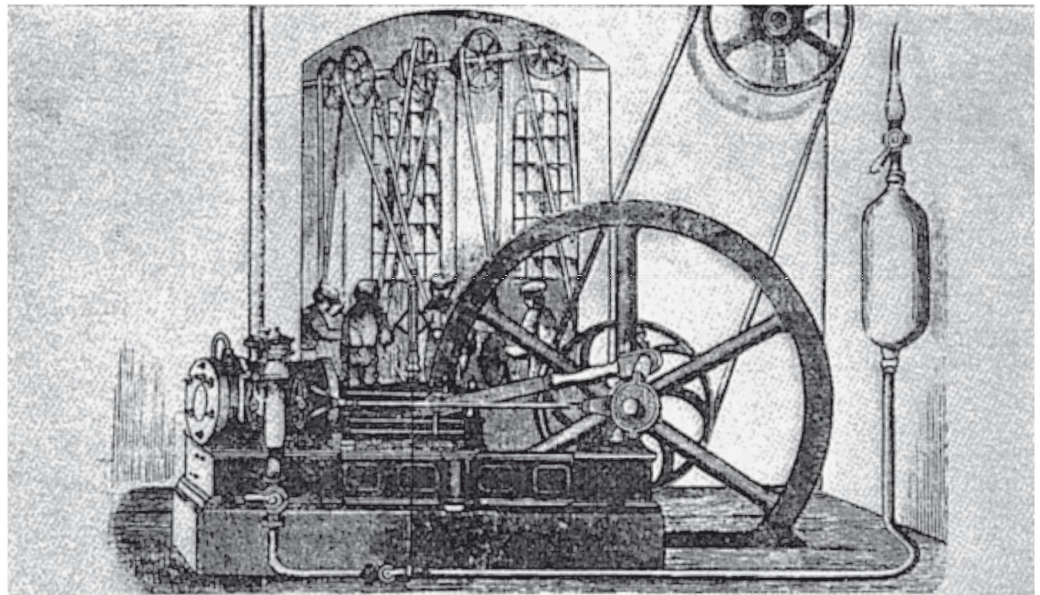
Die Kanone war die erste Verbrennungskraftmaschine, die eine weite Verbreitung fand. Erfunden wurde sie im 14. Jahrhundert durch einen Anonymus. Zahllose Versuche wurden unternommen, um mit Schwarzpulver eine Maschine zu betreiben, die Arbeit verrichten könnte. Der Erfinder der Pendeluhr, der niederländische Physiker Christian Huygens (1629–



Skizze von Christian Huygens für eine Pulverexplosionsmaschine 1673

1695), hat im Jahre 1673 eine solche Pulverexplosionsmaschine skizziert. Auch Papin beschäftigte sich anfänglich mit dieser Idee. Wie im Kapitel über die Dampfmaschinen dargelegt, nahm mit Papin die Entwicklung den Umweg über den scheinbar leichter beherrschbaren Wasserdampf. Verbrennungsmaschinen wurden erst im 19. Jahrhundert wieder aktuell, als mit dem Leuchtgas erstmals ein geeigneter Brennstoff für motorische Zwecke verfügbar war.

1860 liess der Franzose Joseph Etienne Lenoir (1822–1900) den ersten funktionstüchtigen Gasmotor patentieren. Seine Konstruktion ging von einer Dampfmaschine aus: In einem horizontal liegenden Zylinder bewegte sich ein scheibenförmiger Kolben, der in bekannter Weise über Kreuzkopf und Pleuelstange eine Pleuelstange in Drehung versetzte. Während der ersten Hälfte des Kolbenhubes saugte die Maschine über Schieberventile Gas und Luft an. In der Mitte des Hubes zündete ein elektrischer Funke das Gemisch. Die Verbrennung bewirkte eine Drucksteigerung im Zylinder und leistete Arbeit auf dem restlichen Kolbenweg bis zum Totpunkt. Beim Rückgang drück-



Maschinen LENOIR von $\frac{1}{2}$, 1, 2 & 3 Pferdekraft.

**Commandit-Gesellschaft mit einem Actien-Capital
von 2,000,000 Frcs.**

unter der Firma



Gautier & C^{le} in PARIS,



vertreten durch **A. T. Meylus** in Hamburg, welcher ausschliesslich das Monopol für Deutschland und den Norden während der Dauer obiger Gesellschaft contractlich besitzt.

te der Kolben das Abgas via Auspuffschieber hinaus. Gleichzeitig spielte sich auf der Kolbenrückseite ein weiterer Arbeitstakt ab. Im Unterschied zu Dampfmaschinen mussten der Zylinder und die Zylinderköpfe mit Wasser gekühlt werden. Da weder eine äussere noch eine innere Verdichtung des Gemisches erfolgte, erreichte die Leistung lediglich etwa 3 bis 5 PS und der Wirkungsgrad blieb mit 4,5 Prozent äusserst bescheiden.

Immerhin war der Lenoir-Gasmotor die erste Wärmekraftmaschine, die ohne Dampfkessel auskam. Er er-

reichte vor allem bei Gewerbebetrieben eine grössere Verbreitung. Verschiedene Unternehmen in Frankreich, England und Deutschland fabrizierten Lenoirmotoren in Lizenz. Zur «Theorie der Lenoir'schen Gasmachine» schrieb ein gewisser Gustav Schmidt 1861 in der VDI-Zeitschrift: «Viel günstiger würden sich aber die Resultate stellen, wenn man eigene Kompressionspumpen durch die Maschine betreiben liesse, welche die kalte Luft und das kalte Gas vor dem Eintritt in die Maschine auf etwa 3 Atmosphären komprimieren, wodurch

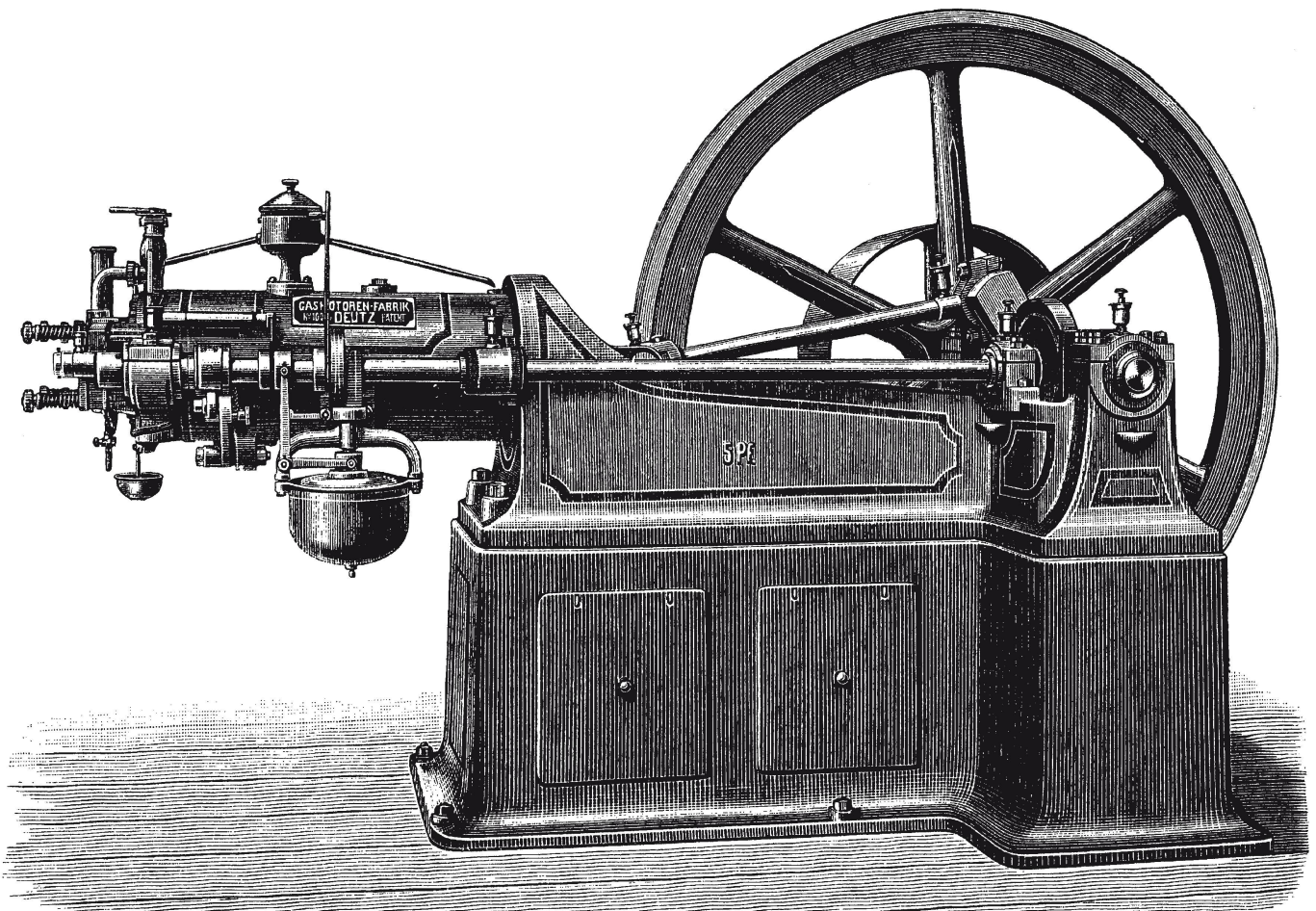
eine weit stärkere Expansion und Ausnutzung der Verbrennungswärme möglich gemacht würde.» Hier tauchte erstmals der Vorschlag auf, zur Leistungssteigerung eines Verbrennungsmotors die Vorkompression (Aufladung) anzuwenden.

Otto- und Dieselmotor

Nikolaus August Otto (1832–1891) und Eugen Langen (1833–1895) zeigten an der Weltausstellung 1867 in Paris den ersten deutschen Gasmotor. Niemand hätte geglaubt, dass die bizarre Maschine bald zur Konkurrenz für Lenoir werden könnte. Es handelte sich um eine atmosphärische Maschine mit stehendem, oben offenem Zylinder. Die Kolbenstange war als Zahnstange ausgebildet und griff in ein Zahnrad ein, das über einen Freilauf verfügte. Im Fuss des als

dorische Säule gestalteten Zylinders befanden sich die schiebergesteuerten Ein- und Auslassventile. Nach der Zündung durch eine Gasflamme schnellte der Kolben in freiem Lauf hoch bis zum Anschlag. Nach der Abkühlung drückten ihn äusserer Luftüberdruck und Eigengewicht wieder in die Ausgangslage zurück. Arbeit leistete er nur bei der Abwärtsbewegung, deshalb die Bezeichnung «atmosphärischer» Motor. Via Zahnrad und gesperrtem Freilauf setzte die Zahnstange ein Schwungrad in Bewegung. Der Motor benötigte keine Kühlung, da sich die durch die Verbrennung erhitzten Teile bis zum nächsten Arbeitstakt an der Luft genügend abkühlten. Messungen ergaben, dass dieser Motor bei vergleichbarer Leistung nur einen Viertel der Gasmenge eines Lenoirmotors verbrauchte.

Ottos Viertakt-Gasmotor, der Urahn des Automotors, 1876

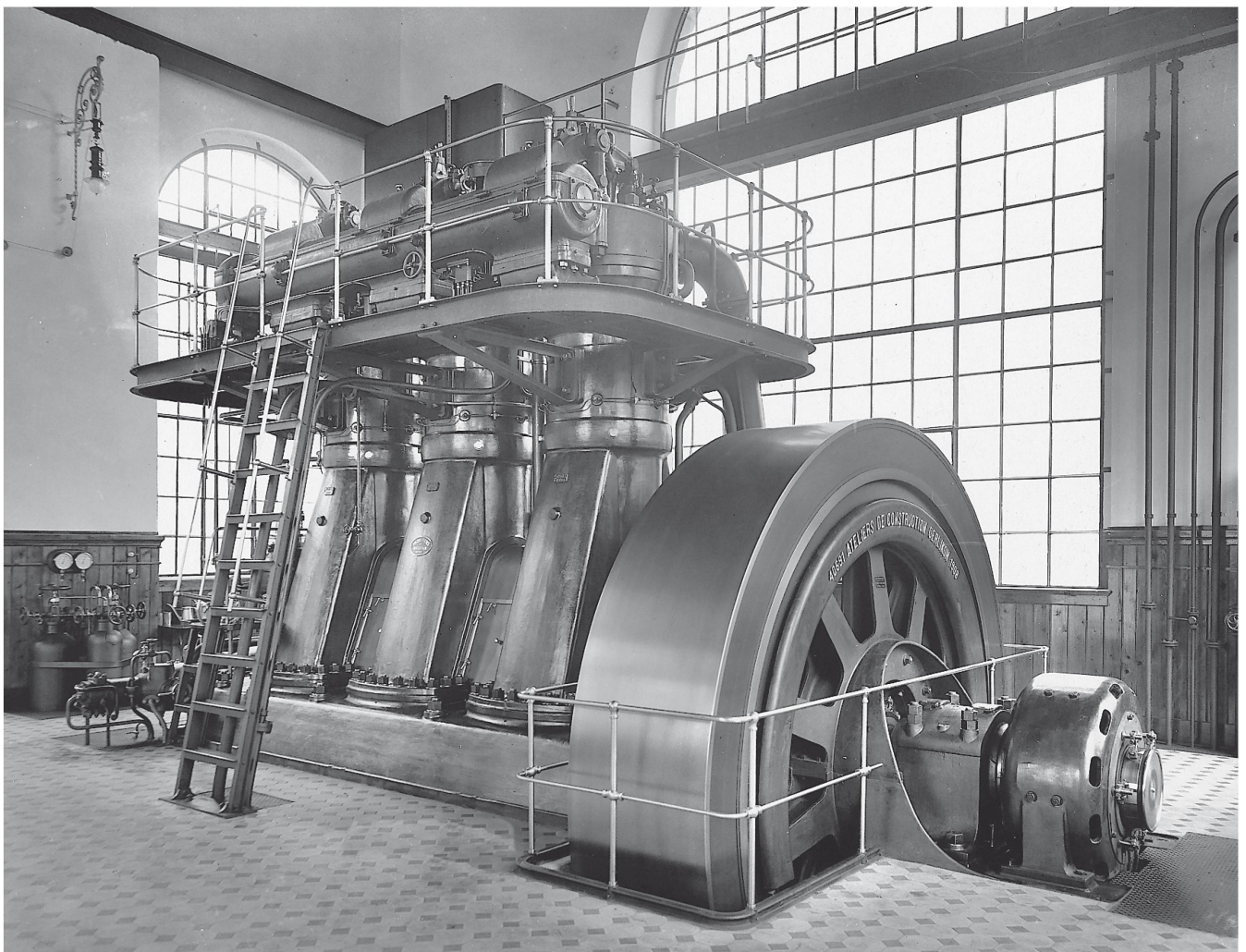


Ottos Motor wurde mit der Goldmedaille ausgezeichnet. Obschon sich der Motor gut verkaufte, war Otto mit seiner Konstruktion noch nicht zufrieden. 1876 schuf er einen Viertakt-Gasmotor mit Gemischverdichtung im Arbeitszylinder. Dies war die Geburt des modernen Verbrennungsmotors. Gottlieb Daimler (1834–1900), Carl Benz (1844–1929) und Wilhelm Maybach (1846–1929) entwickelten den Ottomotor weiter zum leichten, schnelllaufenden Benzinmotor. Sie bauten auch die ersten motorgetriebenen Kutschen und öffneten damit den Weg zur grenzenlosen Mobilität.

Rudolf Diesel (1858–1913) beschritt einen völlig anderen Weg: Ihm schwebte vor, auf streng wissenschaftlicher Basis einen Verbrennungsmotor zu konstruieren, der möglichst nahe an den Carnotprozess

herankam. Diesel erwartete einen extrem hohen Wirkungsgrad von 73 Prozent, was eine zehnfache Einsparung an Brennstoff gegenüber einer leistungsgleichen Kolbendampfmaschine bedeutet hätte. Ein hohes Verdichtungsverhältnis sollte zur Selbstzündung des mit Druckluft eingeblasenen Brennstoffes (Gas, Petroleum oder Kohlenstaub) führen und eine sanfte Verbrennung mit starker Drucksteigerung bewirken. Diesel beantragte sein grundlegendes Patent 1892, also im gleichen Jahr, als Stodola seine Professur in Zürich antrat. Ein Jahr später veröffentlichte Diesel sein Buch «Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungsmotoren». Doch musste noch sehr viel Entwicklungsarbeit geleistet werden,

Sulzer-Dreizylinder-Zweitakt-Dieselmotor mit Oerlikon-Generator 1909



bis die Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (MAN) 1897 den ersten betriebsfähigen Dieselmotor vorstellen konnte. Dabei handelte es sich um eine stehende Einzylindermaschine mit einer Leistung von 20 PS und einem Wirkungsgrad von 25 Prozent. In der Folge konnte Diesel an mehrere Unternehmen Lizenzen verkaufen, darunter auch an Gebrüder Sulzer in Winterthur.

Anfänge der Motorenaufladung

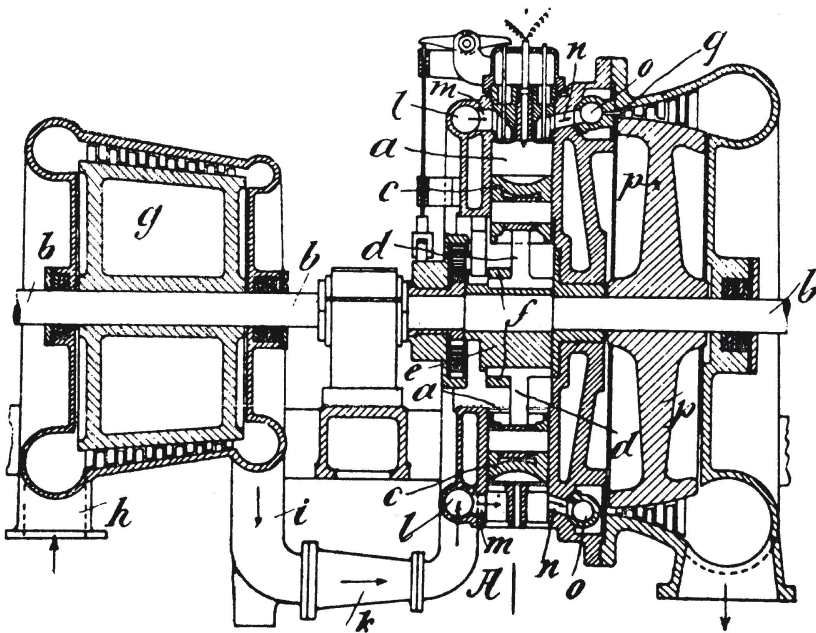
Bei Ausbruch des Ersten Weltkriegs musste der bereits erwähnte ehemalige Stodola-Schüler Walter Noack als deutscher Staatsbürger zum Wehrdienst einrücken. Als Ingenieur wurde er nach der militärischen Grundausbildung zur Fliegertruppe nach Berlin versetzt. Noack erhielt damit Gelegenheit, sich mit der Leistungssteigerung von Flugmotoren zu befassen. Damals stellte der Leistungsabfall der Motoren in grösserer Flughöhe ein besonderes Problem dar. Noack berichtete in seinen Memoiren: «Für mich begann eine rege, vielseitige und unendlich interessante Tätigkeit. Ich erhielt die Betreuung der maschinellen Einrichtung der Riesenflugzeuge zugewiesen, die man eben zu entwickeln begann, um einen Ersatz für die Zeppeline zu haben, die für den Frontdienst nicht mehr in Frage kamen. Diese Riesenflugzeuge erhielten vier bis sechs Motoren mit etwa 1200 bis 1800 PS Gesamtleistung. [...]

1917 überreichte ich der Flugmeisterei eine Denkschrift über die Aufladung der Flugmotoren zur Konstanthaltung ihrer Leistung in der Höhe. Darin wurde von mir vorgeschlagen, den Flugmotoren durch ein leichtes Turbogebläse Luft zuzupumpen und dieses Gebläse entweder vom Motor selbst, oder bei mehrmotorigen Flugzeugen durch einen besonderen Mo-

tor, oder durch eine Abgasturbine anzutreiben. [...] Die ersten Ausführungen der Gebläse sind auf meine Veranlassung und unter meiner Mitarbeit bei Brown Boveri in Mannheim entstanden. Die ersten Versuche im Flugzeug wurden durch die Flugzeugwerft Staaken unter meiner Teilnahme unternommen. [...] Ihr gutes Ergebnis legte den Gedanken nahe, die Aufladung bei jeder Brennkraftmaschine anzuwenden, um ohne Änderung des Motors mit ihr eine beachtliche Mehrleistung zu erhalten. [...] Im März 1919 machte ich Brown Boveri den Vorschlag, sich der Aufladung anzunehmen. Der Vorschlag fand jedoch keine Zustimmung. Leider habe ich mich durch die Badener Stellungnahme irre machen lassen. Mein Vorschlag, bestehende Motoren durch turbinengetriebene Lader aufzuladen, wäre unbedingt neu und patentfähig gewesen. [...] 1924 erfolgte die erste Fühlungnahme von BBC mit Büchi. Dieser war ein guter Freund Adolf Meyers [beide waren ehemalige Stodola-Schüler]. Ferner war Büchi ein Dieselmotoren-Fachmann und hatte sich seinerzeit in ähnlicher Richtung beschäftigt wie wir, aber mit anderen Zielen. Brown Boveri und ich überliessen es dann Büchi, auf seinen Namen ein Patent anzumelden.» Soweit Noack.

Alfred Büchi und die Turboaufladung

Alfred J. Büchi (1879–1959) studierte von 1899 bis 1903 Maschinenbau am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich. Als Schüler von Stodola schloss er mit Auszeichnung ab. Rückblickend schrieb Büchi: «Der Verfasser darf sich glücklich schätzen, unter Professor Stodola studiert zu haben und damit gleichzeitig in den Genuss der Vorteile gelangt zu sein, wie der ausgezeichneten Einrichtung



Patentzeichnung von
Alfred Büchi zu einem
Verbundmotor 1905

gen für Maschinenuntersuchungen in dessen Institutslaboratorium, das eines der vielseitigsten und allerersten in dieser frühen und so wichtigen Periode war.»

An seiner ersten Arbeitsstelle in einer belgischen Maschinenfabrik beschäftigte sich Büchi mit Entwicklungsarbeiten an Dieselmotoren und mit Studien für eine Versuchsgasturbine. 1905 liess Büchi seine Idee patentieren, Kolbenmotoren durch ein Gebläse aufzuladen, das durch eine Abgasturbine angetrieben wurde. Büchi glaubte, dass es möglich sei, eine Kolbenmaschine lediglich als Gaserzeuger zu nutzen und die mechanische Leistung vollständig in einer nachgeschalteten Turbine zu erzeugen. Büchi ergänzte einige Jahre später: «Die Zwischenschaltung der Verbrennungszyylinder ist lediglich das Mittel, um die Verbrennung bei hohem Drucke und hoher Temperatur, d.h. bei hohem Wirkungsgrade, in praktisch dazu geeigneten konstruktiven Elementen einzuleiten, um dann der Turbine die Auspuffgase bei relativ niederer Temperatur entsprechend der Auspufftemperatur gewöhnlicher Kolbenmotoren, aber proportional zur

Vorkompression höherem Druck als bei den letzteren zuzuführen.»

Die Motorenindustrie stand Büchis revolutionären Ideen zuerst skeptisch gegenüber. Über dieses grundlegende Patent seines ehemaligen Schülers berichtete Stodola 1922: «Der Hochdruckteil der Verdichtung, die Verbrennung und ein Teil der Ausdehnung sollen in einem Dieselmotor erfolgen, um die Schwierigkeit der hohen Temperaturen von der Turbine fernzuhalten. Nur nach starker Entspannung auf einen Druck von wenigen Atmosphären mit der entsprechenden ungefährlichen Temperatur würden die Abgase in die Turbine treten, wo ihre Arbeitsfähigkeit bei mässigen Geschwindigkeiten voll ausgenützt werden könnte.»

Ab 1909 führte Büchi bei Sulzer in Winterthur Versuche zur Aufladung von Zwei- und Viertakt-Dieselmotoren durch. Er erkannte dabei den positiven Nebeneffekt, dass die Turboaufladung die thermische Belastung der hoch beanspruchten Motorenteile reduzierte. Dies als Folge des Spülens der Zylinder mit kühler Ladeluft. 1911 bis 1912 war Büchi bei Sulzer mit Entwicklungsarbeiten am Motor der weltersten Diesellokomotive beschäftigt. 1926 liess er die Stossaumladung patentieren, bei der die Druckstösse in den einzelnen Auspuffleitungen der Motorenzylinder zur Erhöhung des Ladedruckes genutzt werden.

Das Büchi-Syndikat und der BBC-Turbolader

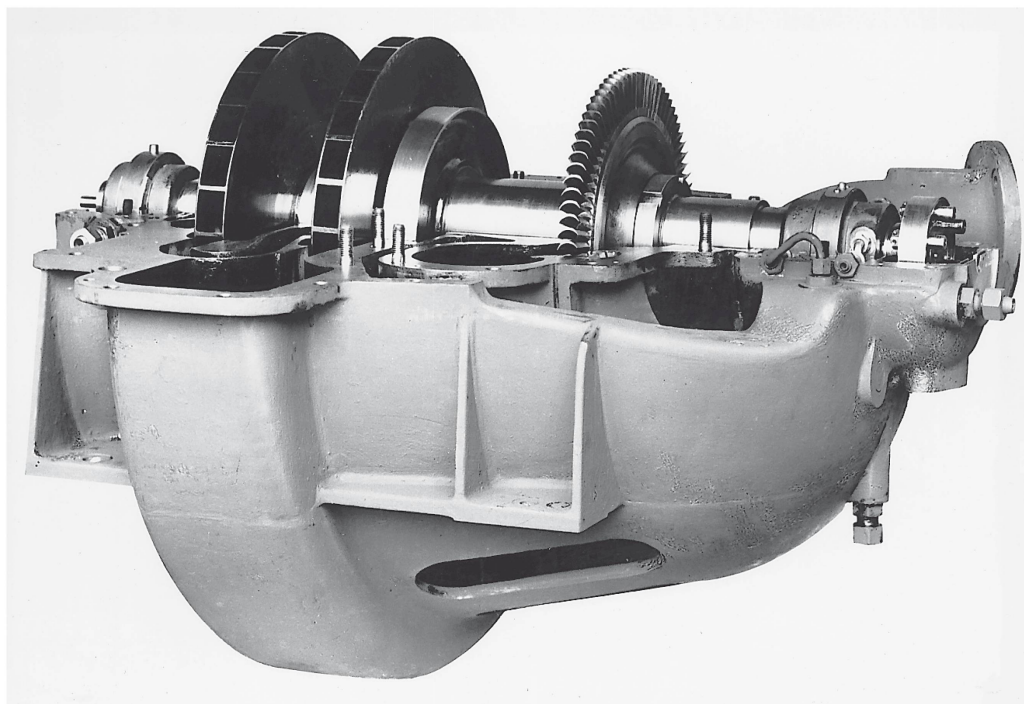
1926 trat Büchi zur Schweizerischen Lokomotiv- und Maschinenfabrik (SLM) in Winterthur über und übernahm dort die Leitung der Motorenabteilung. Im gleichen Jahr schlossen SLM und BBC mit Büchi einen Syndikatsvertrag ab. Dieser bezweckte die «Weiterentwicklung der Verbund-Verbrennungskraftma-

schinen mit Abgasturbine und Aufla-
degebläse gemäss Büchis Patenten
sowie ihrer kommerziellen Verwer-
tung».

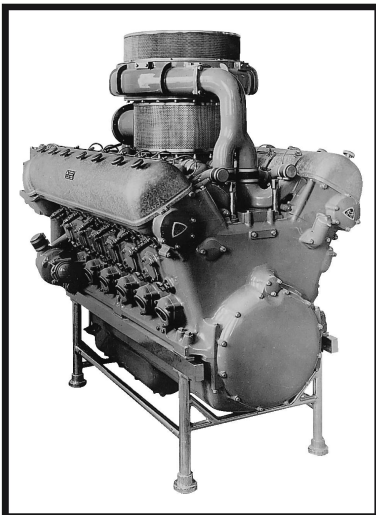
Unter Aufsicht von Aurel Stodola
fanden 1928 bei SLM Leistungsversu-
che an einem aufgeladenen Dieselmotor
statt. Stodola rapportierte darüber
in der VDI-Zeitschrift: «Die Schweize-
rische Lokomotiv- und Maschinenfab-
rik, Winterthur, hat im Verein mit
der Firma Brown Boveri & Cie., Baden
und Mannheim, den Bau von Dieselmotoren
mit Aufladung nach dem
Verfahren von Ingenieur Büchi aufge-
nommen. Dieses Verfahren besteht,
auf den Viertakt angewendet, darin,
dass die Auspuffgase mit einem geeig-
neten Überdruck eine Gasturbine be-
aufschlagen; diese treibt ein Turboge-
bläse an, das auf den Ladedruck ver-
dichtete Luft den Saugventilen des
Motors zuführt. Die auf diese Weise
vergrösserte Lademenge erlaubt, eine
entsprechend erhöhte Brennstoff-
menge einzuspritzen und so die Lei-
stung zu steigern, ohne dass erforder-
lich wäre, die Temperaturen und
Drücke während der Verbrennung zu
erhöhen. Dies ist wichtig wegen der

Wärmespannungen und des Einflus-
ses der an das Kühlwasser übergehen-
den Wärmemenge auf den Verlauf der
Entspannung. Thermodynamisch ver-
läuft mithin der Arbeitsvorgang unter
den gleichen Verhältnissen wie im
gewöhnlichen Dieselmotor, so dass er
bei der Entspannung auf Atmosphä-
rendruck den gleichen «inneren» (oder
indizierten) thermischen Wirkungs-
grad ergeben müsste. Dass der Brenn-
stoffverbrauch pro PS und Stunde
trotz des höheren Gegendruckes, der
die Entspannung begrenzt, nicht nur
gleich, sondern sogar geringer ist als
beim gewöhnlichen Dieselmotor, liegt
an der merklichen Erhöhung des
mechanischen Wirkungsgrades.»

Den für diese Versuche verwendete
Turbolader hatte BBC in Baden ge-
baut. Ohne im Detail auf die Messre-
sultate einzugehen, sollen Stodolas
Schlussfolgerungen hier nicht fehlen:
«Die Büchische Aufladung erlaubt
demnach, die Nennleistung des ge-
wöhnlichen Dieselmotors um 50 bis
60 Prozent zu erhöhen; die 1,3fache
Überlastung aber entspricht sogar ei-
ner Steigerung um 88 bis 100 Prozent.
Diese aussergewöhnliche Elastizität



*Der erste BBC-Turbo-
lader aus dem Jahre
1923*



Maybach-V12-Zylinder-Dieselmotor mit BBC-Turbolader 1935



Schnelltriebzug der Deutschen Reichsbahn von 1935 mit aufgeladenen Dieselmotoren



Dieselelektrische Lokomotive Bm 4/4 der SBB von 1939

Blick durch die Dachöffnung der Lokomotive auf den 8-Zylinder-Sulzer-Dieselmotor und den Turbolader

der Maschine ist darin begründet, dass die Abgasturbine infolge der wachsenden Abgasdrücke selbsttätig eine höhere Drehzahl annimmt und bei erhöhtem Ladedruck eine reichlich höhere Luftmenge liefert als bei Nennlast. So ist die Verbrennung stets vollkommen, und der Auspuff lässt auch bei 1,3facher Überlast mit freiem Auge keine Trübung erkennen. [...] Motor und Abgasgebläse verhielten sich während der Versuche einwandfrei. Obschon die Temperatur vor der Turbine bis auf 540 °C steigt, wird keine künstliche Kühlung der Rohrleitung oder des Turbinengehäuses angewendet. Der Überdruck ist so klein und die Aussenschicht der Wand wird durch Wärmeabgabe an die Umgebung so weit abgekühlt, dass ihre Wärmebeanspruchung hinsichtlich der Festigkeit zu keinen Bedenken Anlass gibt.»

Alfred Büchi machte sich 1935 selbstständig und gründete ein eigenes Ingenieurbüro. Für seine Verdienste verlieh ihm die ETH Zürich 1938 den Ehrendokortitel. Das Büchi-Syndikat wurde nach Ablauf der Patente 1941 aufgelöst. BBC hatte im Bau von Turboladern inzwischen so grosse Erfahrungen gesammelt, dass kein Interesse mehr bestand, dafür Lizenzen zu bezahlen. 1935 bis 1937 rüstete die Deutsche Reichsbahn ihre neuesten Schnelltriebzüge mit BBC-Turboladern aus. Die Leistung der V12-Maybach-Dieselmotoren stieg damit von 420 auf 600 PS. 1938 entwickelte BBC bereits Flugmotoren-Turbolader mit Gaseintrittstemperaturen bis zu 900 °C. Bei Vollast rotierte das Turbinenlaufrad mit 25 000 Umdrehungen pro Minute und wurde rot-

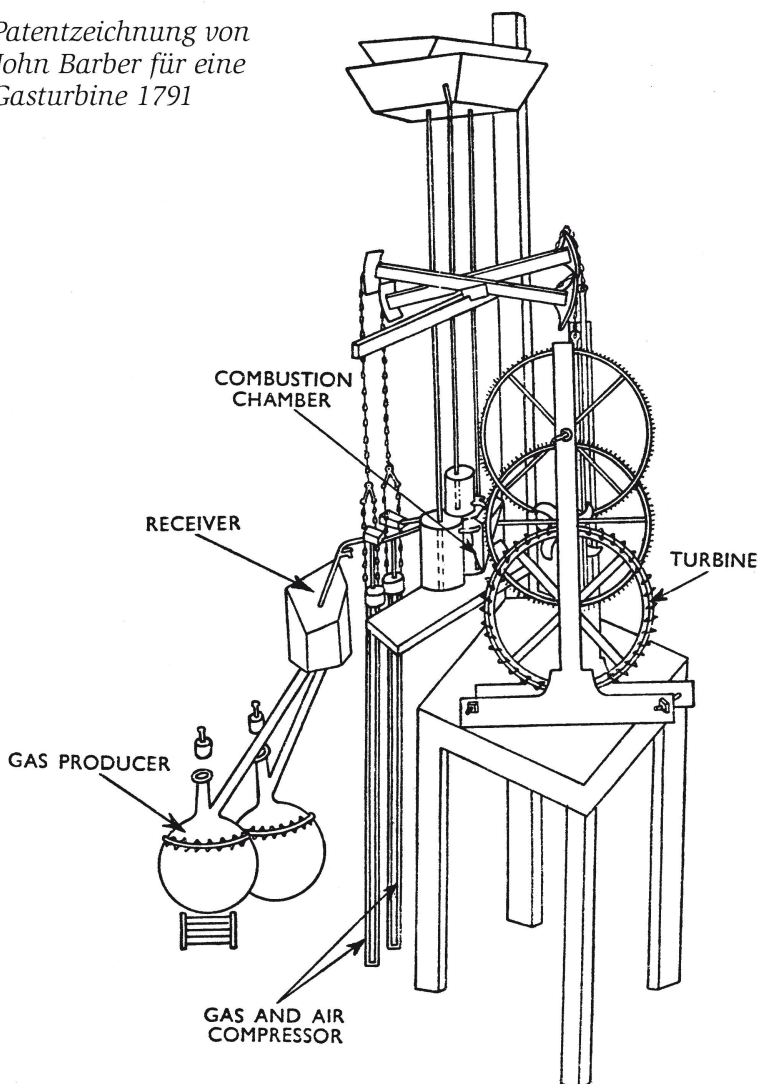


glühend. 1939 stellten die SBB zwei vierachsige dieselelektrische Lokomotiven mit Sulzer-8-Zylinder-Viertaktmotor und BBC-Turbolader in Betrieb. Mit einer Leistung von 1200 PS und einem Dienstgewicht von nur 66 Tonnen galten die Lokomotiven damals weltweit als die modernsten ihrer Art. Während des Zweiten Weltkriegs kam die Turboaufladung schliesslich an allen Fronten zum Einsatz. Sie war für die Leistungssteigerung von Fahrzeug-, Flugzeug- und Schiffsmotoren unentbehrlich geworden. Die Turboaufladung trägt auch dazu bei, die Weltreserven an Erdölbrennstoffen wirtschaftlicher zu nutzen.

Aurel Stodola im Alter von 55 Jahren

Verschlungene Wege zur Gasturbine

Patentzeichnung von
John Barber für eine
Gasturbine 1791

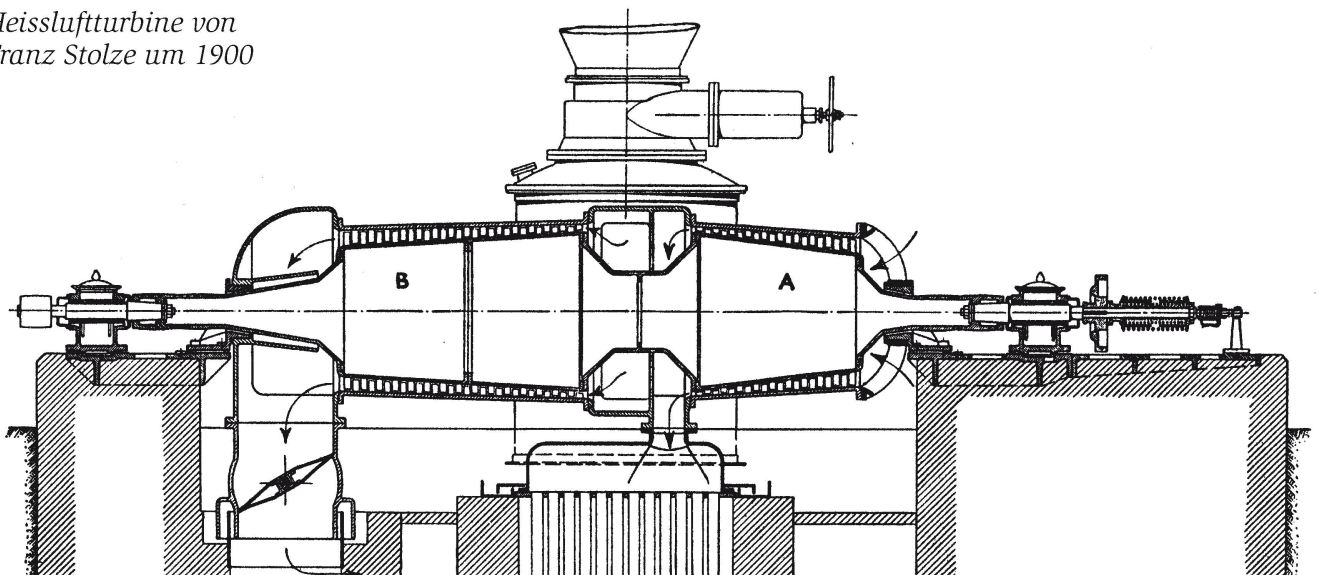


Einige Vorläufer

Die Gasturbine ist ein typisches Beispiel dafür, wie eine Idee plötzlich auftaucht, ihre Realisierung hingegen viele Jahrzehnte beansprucht. Ähnlich wie bei der Dampfturbine liegt auch die Grundidee zur Gasturbine weit zurück. Zur Zeit der Renaissance und des Barocks wurden bereits Rauchgasturbinen zum Antrieb von Bratspiessen vorgeschlagen. Das erste Patent für eine Gasturbine meldete 1791 der Brite John Barber an. Er wollte in Retorten flüssigen Brennstoff verbrennen und das entstehende Gas unter Überdruck durch eine Düse auf ein Schaufelrad leiten. Mit den verfügbaren Werkstoffen wäre diese Maschine damals nicht realisierbar gewesen.

In der Folge entstanden immer neue Vorschläge auf diesem Gebiet und schlugen sich in einer Reihe von Patenten nieder, ohne dass aber nur ein einziger verwirklicht worden

Heissluftturbine von
Franz Stolze um 1900



wäre. Ferdinand Redtenbacher (1809–1863), Professor für Maschinenbau am Polytechnikum in Karlsruhe, verfasste 1853 ein Buch mit dem Titel «Die calorische Maschine». Darin räumte er einer auf dem Ericsonprozess (Heissluftmaschine) basierenden Turbine gewisse Chancen ein, hatte jedoch Bedenken wegen der zu erwartenden hohen Drehzahl. Redtenbacher schrieb an Gustav Zeuner, einen Lehrstuhlvorgänger Stodolas: «Das Grundprinzip der Dampfbildung und Dampfbenutzung ist falsch. In hoffentlich nicht zu langer Zeit werden die Dampfmaschinen verschwinden, wenn man erst über das Wesen und die Wirkungen der Wärme ins klare gekommen ist.» Um 1900 begann Franz Stolze (1836–1910) in Berlin mit Versuchen an einer Gasturbine. 1904 stellte er eine 200-PS-Turbine vor, die bereits alle Elemente des modernen Gleichdruckprozesses aufwies. Stolzes Tod verhinderte jedoch die Weiterentwicklung.

Stodola und die Gasturbine

Schon die erste Auflage von Stodolas Lehrbuch «Die Dampfturbine» enthielt das Kapitel «Die Aussichten der Wärmekraftmaschinen». Darin widmete Stodola auch einen Abschnitt der Gasturbine. Er hob hervor: «Der einfachste Arbeitsprozess, der sich für eine Gasturbine naturgemäss von selbst darbietet, ist der folgende: Gas und Luft werden getrennt auf einen mehr oder weniger hohen Druck durch Kompressoren verdichtet, in einer Kammer bei konstanter Pressung verbrannt und unmittelbar der Turbine zugeführt. Das System der Turbine ist theoretisch gleichgültig; die Expansion wird bis auf den Atmosphärendruck fortgesetzt. [...] Andere als einstufige, d. h. mit Düsen arbeitende Turbinen sind wegen der hohen Temperatur ausgeschlossen [...].

Ein Betrieb dieser Art ergäbe sehr hohe Endtemperaturen vor der Expansion, welche die Erhaltung der Radschaufeln fraglich machen würden. Mischt man der Verbrennungsluft zerstäubtes Wasser bei, so kann die Temperatur tiefer gehalten werden; allein auch der Wirkungsgrad sinkt in gleichem Masse. Die Verwendung der Abwärme zur Verdampfung des Einspritzwassers würde hier helfend eingreifen. Aber alles in allem erscheint es fraglich, ob eine Gasturbine, die mit dem beschriebenen Prozess arbeitet, Aussichten besitzt, um mit dem Kolbengasmotor in erfolgreichen Wettbewerb zu treten.»

Mit jeder neuen Ausgabe seines Standardwerks erweiterte Stodola auch den Teil über Gasturbinen. Während dieser in der ersten Auflage kaum mehr als eine Seite umfasste, nahm er in den beiden letzten, 1922 und 1924 erschienenen Ausgaben 86 Seiten ein. In der dritten Auflage von 1905 hegte Stodola noch immer Zweifel bezüglich der Realisierbarkeit einer Gasturbine. Er wiederholte die vorher zitierte Bemerkung und ergänzte: «Nicht viel anders steht es mit dem ebenfalls schon vorgeschlagenen Arbeitsverfahren, die Turbine mit einem gewöhnlichen Viertaktmotor derart zu verbinden, dass die Explosionsgase, während der Expansionsperiode auf die Turbine geleitet, gleichzeitig hier und im Zylinder Arbeit leisten würden. Man könnte allerdings die Expansion bis auf den Atmosphärendruck fortsetzen und so scheinbar mühelos das erreichen, was der Verbundgasmotor wegen zu starker Abkühlung der Arbeitsgase früher vergeblich angestrebt hat. Dem theoretischen Gewinn steht aber einmal die schlechtere Ausnützung der Expansionsarbeit in der Turbine gegenüber, dann die erhöhten Verluste in der Düse, die mit stark schwanken-

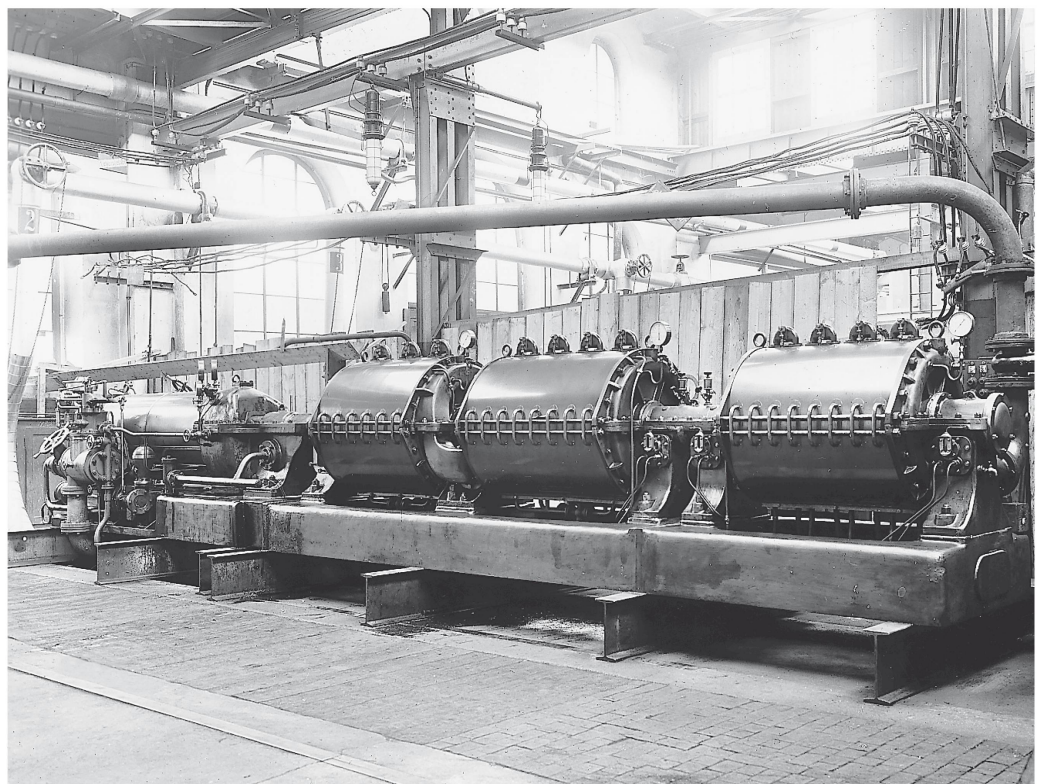
dem Druckverhältnis arbeiten müsste. Ausserdem ist der intermittierende Betrieb in mancher Beziehung ungünstig, während die Schwierigkeiten mit der Temperatur ebenso bestehen bleiben wie bei der Gleichdruckturbine. Einen Fortschritt in der thermischen Ausnützung der Wärme wird also die Gasturbine nicht bringen können; trotzdem wird ihr viel Beachtung geschenkt wegen der Aussichten, die sie für die Verwendung der bisher auf die Dampftechnik angewiesenen Brennstoffe bietet.» Trotz seiner skeptischen Äusserungen fügte Stodola die Berechnung einer Gleichdruck-Gasturbine an.

In der Buchaufgabe von 1910 gab sich Stodola schon zuversichtlicher: «Es entsteht die Frage, ob es andere Arbeitsverfahren gibt, durch die man die geschilderten Schwierigkeiten umgehen könnte. Das Ergebnis der unten mitgeteilten näheren Untersuchung ist zur Zeit negativ. Trotzdem dürfte das Thema der Gasturbine nicht so bald von der Tagesordnung abgesetzt werden. [...] Eine betriebssichere

Gasturbine, verbunden mit dem Kreiselkompressor [Radialverdichter], wäre eine unübertreffliche Vereinfachung und würde einen Fortschritt bedeuten. So wie sich die Dampfturbine, noch bevor sie in der Dampfökonomie eine wirkliche Verbesserung zu bringen vermocht hatte, durch ihre konstruktiven Vorzüge den Eintritt in die Industrie zu erzwingen verstanden hat, so würden die Aussichten einer dem Gasmotor nachstehenden, aber konstruktiv einfacheren Gasturbine, wenn sie nur die Dampfturbine in der Ökonomie übertrifft, vorzügliche sein. Und selbst bei gleich grossem Wärmeverbrauch würde die Beseitigung des Kesselhauses, d. h. Ersatz desselben durch eine Gaserzeugungsanlage [Brennkammer], der Gasturbine den Vorrang sichern.»

In den späteren Buchausgaben räumte Stodola neuen Gasturbinenvorschlägen, ihren thermodynamischen Prozessen und ihrer Berechnung zunehmend Raum ein. Schon in der Ausgabe von 1910 hatte er mehrere konstruktive Vorschläge vorge-

*Vielstufiger BBC-
Radialverdichter zur
Gasturbine von Ar-
mengaud und Lemale
1906*

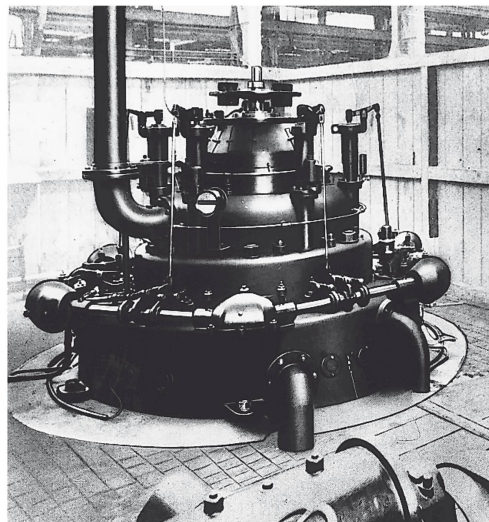


stellt. Stodola ging besonders auf die Versuchsanlage der Société anonyme des Turbomoteurs, Paris, ein. Die Franzosen Armengaud und Lemale waren damit 1906 einer betriebsfähigen Gasturbine schon sehr nahe gekommen. Zur Verdichtung der Luft hatte Brown Boveri einen vielstufigen Radialverdichter mit Antrieb durch eine Dampfturbine geliefert. Als die Gasturbine auf dem Prüfstand tatsächlich funktionierte, gab sie genau die zum Antrieb des Verdichters nötige Leistung ab. Darüber hinaus vermochte sie keine Nutzleistung zu erbringen. Das Prinzip wurde schliesslich zu einem Torpedoantrieb abgewandelt. Für eine Gleichdruck-Gasturbine war die Zeit noch nicht reif. Es fehlten wärmebeständige Materialien, und die Wirkungsgrade der damaligen Turbinen- und Verdichterbauarten genügten nicht. Das gescheiterte Projekt weckte jedoch bei BBC das Interesse an der Gasturbine. Die folgenden Abschnitte zeigen, wie eine Entwicklung manchmal verschlungene Wege geht.

Die Holzwarth-Gasturbine

Im ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts begann auch der Deutsche Hans Holzwarth (1877–1953) mit der Entwicklung einer Gasturbine. Seine Idee bestand darin, eine analog zum Viertaktmotor arbeitende Verpuffungsturbine mit intermittierender Zündung zu bauen. Diese Konstruktion sollte ihm erlauben, den Festigkeitsproblemen auszuweichen, die hohe Temperaturen bei den Werkstoffen damals verursachten. 1909 begann Holzwarth eine Zusammenarbeit mit Brown Boveri Mannheim. Eine dort gebaute, vertikalachsige Holzwarth-Turbine arbeitete noch ohne Vorverdichtung.

Walter Noack (1881–1945) kam 1909 zu BBC. Er war 28 Jahre lang er-



Bei BBC Mannheim gebaute vertikalachsige Holzwarth-Gasturbine 1909

folgreich im thermischen Turbomaschinenbau tätig und besass über hundert Patente. 1939 verlieh ihm die ETH Zürich das Ehrendoktorat. Nach dem Rückzug aus dem Berufsleben verfasste Noack Memoiren, worin er seine Beiträge zu den Sparten Turboaufladung, Gasturbinen, Dampfkessel und Dampfturbinen festgehalten hat: «Meine erste Arbeit bei BBC war die Anpassung der von Holzwarth gemachten Entwürfe der 1000-PS-Versuchsgasturbine, die auf Grund eines Lizenzvertrages zu bauen war, an die Brown-Boveri-Praxis. [...] Schon zu Beginn der Arbeiten mit der Holzwarth-Turbine beschäftigte ich mich auch mit der Gleichdruck-Gasturbine. [...] Wenn wir auch die Arbeiten Holzwarth's nie aus den Augen verloren, so verfolgten wir sie doch nach dem  bertritt Holzwarth's 1912 zu Thyssen nur noch aus der Ferne.»

Stodola als Gutachter

Anlässlich seiner Rezension von Holzwarths Buch «Die Gasturbine» in der VDI-Zeitschrift zog Stodola die publizierten Versuchsergebnisse in Zweifel. Die unterschiedlichen Auffassungen der beiden Fachleute führten anfänglich zu einer Fehde. Später kam aber eine fruchtbare Zusammenarbeit zustande. Robert Boveri

(1873–1934), der technische Leiter der BBC-Tochtergesellschaft in Mannheim, hatte Holzwarth dazu ermuntert, Stodola als unbestechlichen Gutachter beizuziehen. Noack: «Es boten die vielen ungelösten Fragen der Holzwarth-Gasturbine ein ganzes Dorado von Problemen, an denen sich Stodolas seltene Gabe, Dinge durch die mathematische Behandlung zu klären, auswirken konnte.»

In den beiden letzten Auflagen seines Lehrbuches hat Stodola die Holzwarth-Turbine ausführlich vorgestellt und ihre Berechnung erläutert. Die Konstruktions- und Betriebsprobleme bei Turbinenschaufeln infolge der hohen Gastemperatur brachten Stodola zur wichtigen Einsicht: «Die eigentliche Lebensfrage der Gasturbine ist: wie verhütet man das Erglühen der Schaufel, insbesondere das Abschmelzen der Schaufelkante, ohne mit der Gastemperatur auf wirtschaftlich ungünstige niedere Beträge herabzusteigen? Die Lösung scheint darin zu liegen, dass man die Schaufel rasch wechselnder periodischer Abkühlung durch einen Spülluft- oder besser Dampfstrom aussetzt, wodurch mit Rücksicht auf den Oberflächenwiderstand das Eindringen hoher Temperaturspitzen in das Innere der Schaufel und ihrer führenden Kante verhütet wird, sofern diese mit einer gewissen Mindestabrundung versehen ist.» Das angesprochene Problem und Stodolas Lösungsvorschlag sind auch im modernen Gasturbinenbau noch aktuell.

Noack berichtete weiter: «1927 trat Holzwarth wieder mit Brown Boveri in Kontakt. Anfang August wurde ich nach Mülheim eingeladen, um mich von den bis dahin gemachten Fortschritten an der Gasturbine persönlich zu überzeugen. Besondere Beachtung fand bei mir Holzwarths Bemerkung, dass sich bei Messungen,

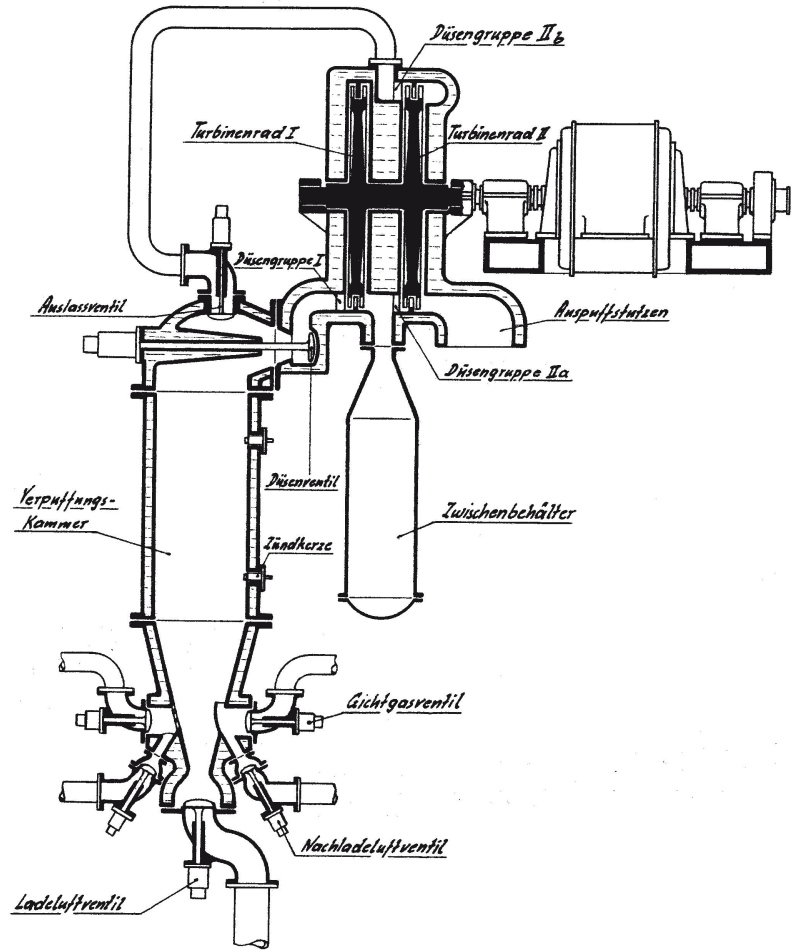
die die Professoren Schüle und Stodola an einer Versuchsturbine vorgenommen hatten, ergeben habe, dass die Wärmeverluste an den von den Treibgasen mit hoher Geschwindigkeit bestrichenen Wänden bedeutend grösser waren, als nach Rechnung mit den bisher gebräuchlichen Formeln erwartet werden musste. Davon, dass die Oelturbine, an der die Professoren Schüle und Stodola die Messungen vornahmen, recht ordentlich lief, konnte ich mich selbst überzeugen. Wesentlich war dabei aber wahrscheinlich, dass sie mit einer Dampfturbine gekoppelt war. Der Dampf wurde in einem Kessel erzeugt, der mit den Abgasen der Gasturbine geheizt wurde.» Die Dampfturbine diente zum Antrieb der Verdichter, während die Gasturbine mit einem Stromgenerator gekuppelt werden sollte. Der hier erstmals realisierte Gas-Dampf-Kombiprozess erlangte in neuester Zeit zunehmende Bedeutung.

BBC steigt in den Gasturbinenbau ein

1928 kam zwischen Holzwarth und BBC Baden ein neuer Vertrag zustande. Dazu Noack: «Wir erhielten eine Menge Unterlagen, Zeichnungen, Versuchsergebnisse sowie Berechnungen und Entwürfe, die als Vorlage für eine Versuchsturbine mit einer Leistung von 2000 Kilowatt dienen sollten. Die Rechnungsunterlagen Holzwarth's stammten zum grössten Teil von den Professoren Schüle und Stodola. Sie waren im Prinzip natürlich richtig, gründeten aber auf Annahmen, die viel Optimismus und eine starke Annäherung der Konstruktion an das theoretische Ideal voraussetzten.» Der Görlitzer Professor W. Schüle hatte ein verbreitetes Lehrbuch über technische Thermodynamik verfasst. Im Auftrag von Holz-

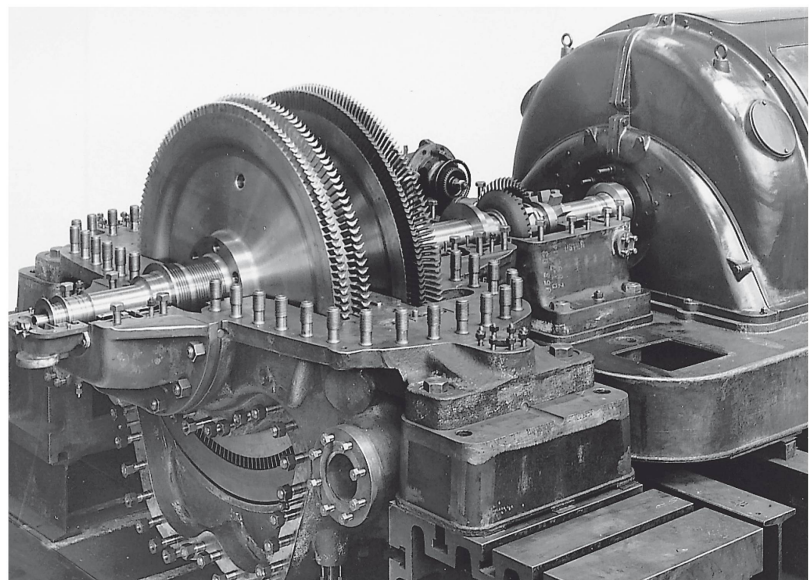
warth berechnete und überprüfte er die Versuchsturbine nach thermodynamischen Kriterien. Unter der Voraussetzung einer optimierten Abwärmeverwertung kam Schüle auf einen Wirkungsgrad von 21 bis 23 Prozent. Stodolas Beitrag betraf die detaillierte Berechnung des Wärmeaustausches und der Wärmespannungen in der Turbine. Um das Verhalten hoch beanspruchter Werkstoffe unter dem Einfluss der Temperatur zu klären, hatte Stodola erstmals vorgeschlagen, Zeitstands- und Kriechversuche durchzuführen. Über die Messergebnisse erstellte Stodola 1927 einen ausführlichen Schlussbericht und resümierte: «Die Leistung, die nach wissenschaftlichen Grundsätzen erwartet werden sollte, ist nicht erreicht.» Stodolas Bericht ist an der ETH Zürich archiviert. Die fundierten Gutachten und Fachberichte Schüles und Stodolas bewogen BBC dazu, mit Holzwarth eine erneute Zusammenarbeit einzugehen.

Die Anfang der 1930er-Jahre bei BBC gebaute Holzwarth-Gasturbine wurde mit Gasöl betrieben und gründlich getestet. 1934 rüstete man sie auf Gichtgasbetrieb um und stellte sie in der August-Thyssen-Hütte in Hamborn auf. Sie wies zwei durch mehrstufige Radialverdichter aufgeladene, ventilgesteuerte Verpuffungskammern auf, die im Gegentakt zündeten. Nach Noack war es eine Art Zweitaktverfahren: «Während des ersten Taktes wurde das verdichtete Brennstoff-Luft-Gemisch in der Brennkammer entzündet; es verpuffte unter Druckentwicklung und entlud sich mit hoher Geschwindigkeit auf die Turbine. Nach der Entladung begann der zweite Takt: Frische Brennluft schob den Abgasrest aus der Brennkammer. Diese wurde von neuem gefüllt und durch den Verdichter auf den vollen Druck gebracht,



Funktionsschema der Holzwarth-Turbine

2000-kW-Holzwarth-Turbine während der Montage 1931

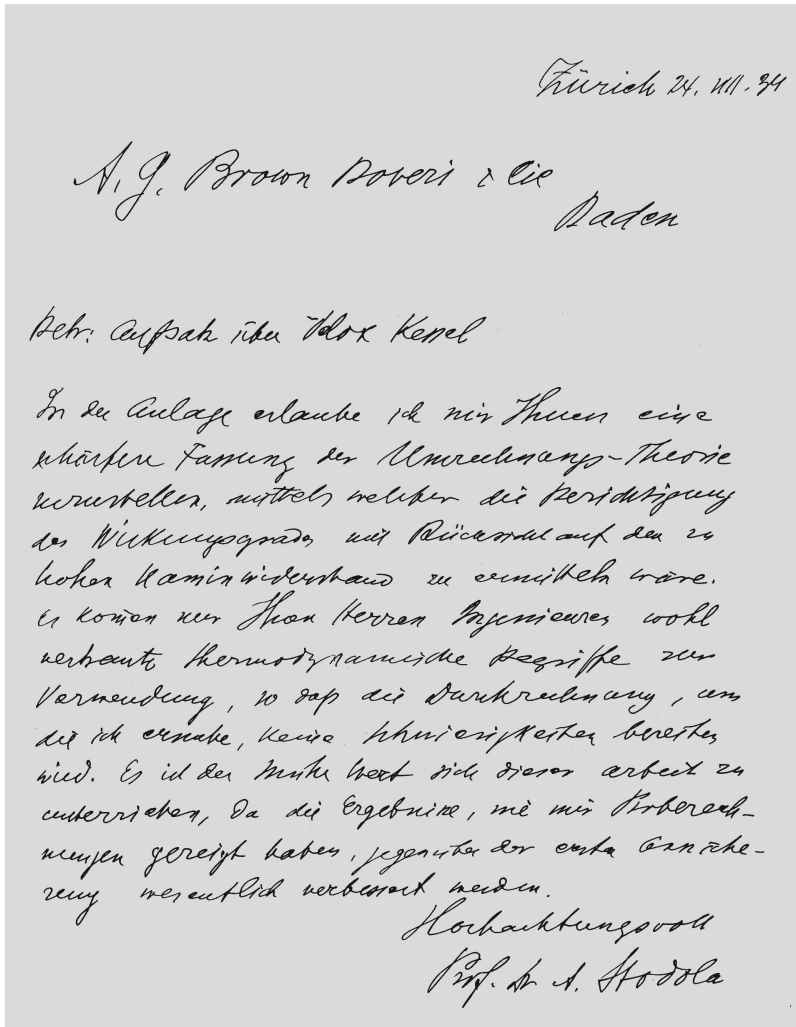


während gleichzeitig Brennstoff zugeführt wurde. Der Antrieb des Verdichters erfolgte durch die stossweise arbeitende Gasturbine. Um gleichmässiges Arbeiten zu erreichen, sollten mindestens zwei, besser vier

Brennkammern abwechselnd auf eine Turbine arbeiten.»

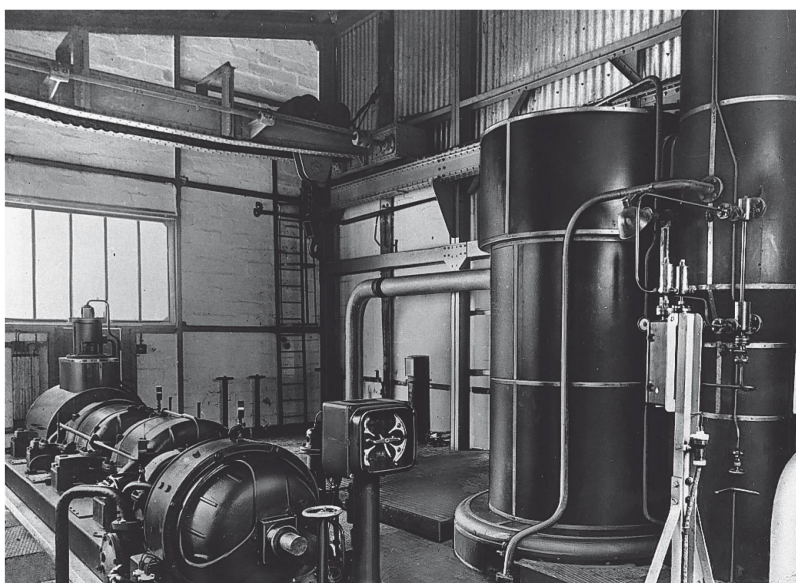
Mit 700 °C lag die Temperatur beim Turbineneintritt für die damalige Zeit sehr hoch. Der Turbinenrotor bestand aus zwei auf gleicher Welle angeordneten Aktionsrädern mit wassergekühlten Schaufeln. Dazu Noack: «Nachdem wir den Bau einer Gleichdruck-Gasturbine aufgenommen hatten und diese unstreitig mehr Erfolg versprach als die Verpuffungsturbine, existierte die Holzwarth-Turbine für BBC so gut wie nicht mehr.» Die Entwicklung lag später in den Händen von Adolf Meyer (1880–1965), auch er ein ehemaliger Stodola-Schüler.

Brief Stodolas betreffend einen Aufsatz über Veloxkessel

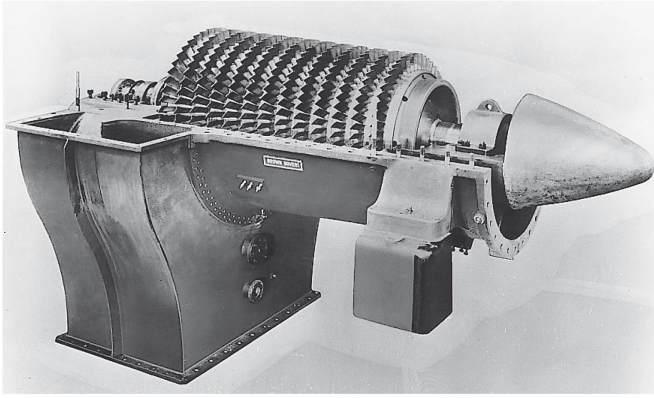


«Velox»- Dampfkessel und Axialverdichter

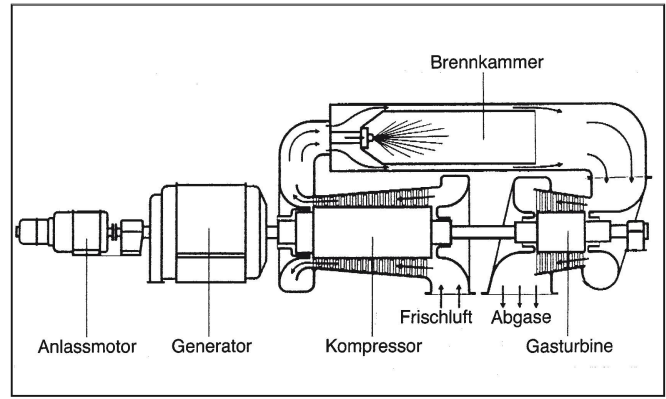
Unterdessen verfolgte Noack eine andere Idee weiter: Der intensive Wärmeübergang bei den wassergekühlten Gaskanälen der Holzwarth-Turbine legte den Gedanken nahe, einen aufgeladenen Dampfkessel zu konstruieren, der dieses Phänomen ausnützen sollte. Anfänglich ging Noack von der Gleichraum-Verpuffung aus, wie sie bei der Holzwarth-Turbine eingesetzt wurde. Schliesslich kam aber die Gleichdruck-Verbrennung zur Anwendung. 1932 stellte BBC den ersten so genannten «Velox»-Dampferzeuger vor. Gegenüber normalen Dampfkesseln benötigte dieser wesentlich kleinere Heizflächen und konnte deshalb kompakt gebaut werden. Ferner liess er sich rasch aufheizen, daher rührt sein Name. Der Veloxkessel wurde für BBC zu einem erfolgreichen Produkt. Wie bei einem aufgeladenen Verbrennungsmotor erfolgte der Druckaufbau im Veloxkessel durch einen Turboverdichter. Die Verbrennung flüssiger oder gasförmiger Brennstoffe erfolgte unter konstantem Überdruck im Kesselraum. Die erzeugte Wärme diente primär



Erster «Velox»-Dampfkessel von BBC 1932



13-stufiger Axialverdichter von BBC für den Überschall-Windkanal an der ETH in Zürich 1934



Funktionsschema der ersten BBC-Gleichdruck-Gasturbine

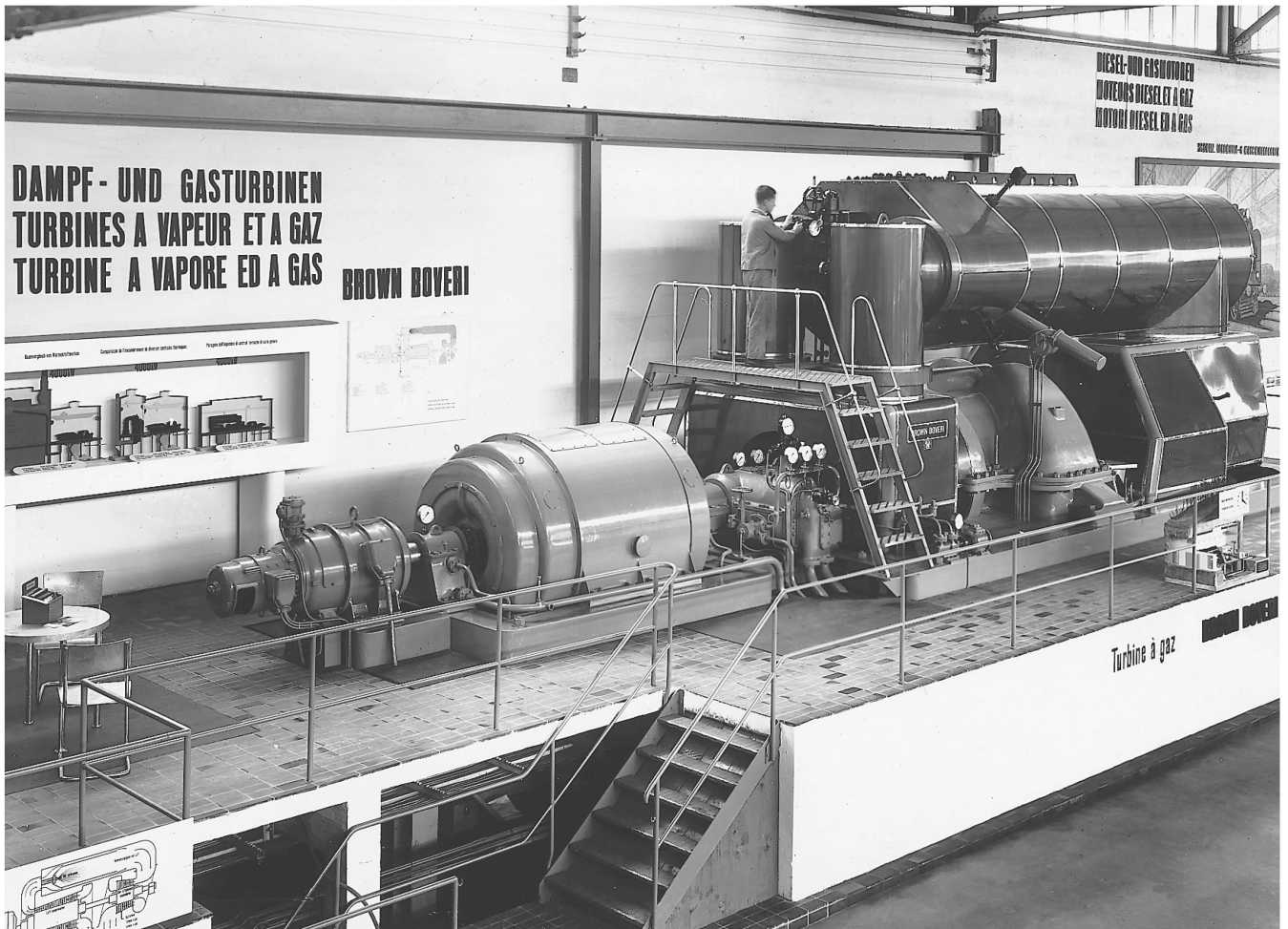
zur Dampferzeugung. Anschliessend strömten die heissen Abgase durch eine Turbine, die den Verdichter antrieb.

Zuerst musste aber ein für grosse Luftmengen geeigneter Turboverdichter entwickelt werden. Dem Prinzip nach ist ein solcher nichts anderes als die Umkehrung einer vielstufigen Dampf- oder Gasturbine. Die angesaugte Luft durchläuft über mehrere Verdichtungsstufen abwechslungsweise Lauf- und Leitschaufelreihen. Dabei steigt der Druck kontinuierlich an und entsprechend nimmt das Volumen ab. Der spätere ETH-Professor Jakob Ackeret (1898–1981), auch er ein ehemaliger Stodola-Schüler, hatte eine Tragflügeltheorie erarbeitet, mit deren Hilfe sich die Strömung im Schaufelgitter einer Turbomaschine exakt berechnen liess. Damit gelang es, Axialverdichter mit hohem Wirkungsgrad zu entwickeln. Den ersten Axialverdichter baute BBC für einen Überschall-Windkanal im Strömungslabor an der ETH in Zürich. Die verbesserten Wirkungsgrade von Verdichter und Turbine ermöglichten nun, mit der Aufladegruppe eines Veloxkessels zusätzlich einen elektrischen Generator anzutreiben. Der Leistungsüberschuss konnte so zur Stromerzeugung genutzt werden.

Schliesslich mutierte der Dampfkessel zur Brennkammer, das heisst zum Treibgaserzeuger für die Gasturbine. So entstand endlich eine betriebstaugliche Gleichdruck-Gasturbine, wie sie Stodola dreissig Jahre früher vorausgesehen hatte. Moderne Gasturbinen folgen grundsätzlich diesem Baumuster. Es eignet sich ebenso gut zur Stromerzeugung wie für Düsentriebwerke in Flugzeugen.

Die Gleichdruck-Gasturbine

An der Schweizerischen Landesausstellung 1939 in Zürich führte BBC die erste Industrie-Gasturbine der Welt vor. Sie war innerhalb eines Jahres entwickelt und gebaut worden. Für das Besucherpublikum der Ausstellung wurde die Maschine täglich zweimal in Betrieb gesetzt. Unter Aufsicht des achtzigjährigen Aurel Stodola hatte sie kurz vorher im Labor ein umfangreiches Versuchsprogramm durchlaufen. Stolz verkündeten die «Brown Boveri Mitteilungen»: «Mit dieser ersten Verbrennungs-Gasturbine ist ein Traum, der seit über hundert Jahren Erfinder und Ingenieure der ganzen Welt beschäftigt hat, endlich Wirklichkeit geworden.» Wie gewohnt, hatte Stodola alle Messergebnisse in einem Protokoll akribisch festgehalten. Gerne hätte er darüber



Die Gleichdruck-Gasturbine an der Landesausstellung in Zürich 1939. Von links nach rechts: Anwurfmotor, Generator, Schmierölpumpe, Verdichter und Turbine mit darüberliegender Brennkammer

einen ausführlichen Bericht in einer deutschen Fachzeitschrift publiziert. Im Hinblick auf den sich abzeichnenden Weltkrieg äusserte die BBC-Direktion Bedenken. Schliesslich erschien von Stodolas Bericht 1940 eine Kurzfassung gleichzeitig in den «Brown Boveri Mitteilungen» und in der VDI-Zeitschrift mit dem Titel «Leistungsversuche an einer Gleichdruck-Gasturbine».

Stodola berichtete: «Der Verbrennungsgasturbine eröffnen sich heute Verwirklichungsmöglichkeiten, die vor kurzem noch unmöglich schienen, durch die Verbesserung des Gebläsewirkungsgrades einerseits und die der wärmefesten Baustoffe andererseits. [...] Ohne diese Mittel blieb für die Verwirklichung der Gasturbine nur der Weg der Explosionsturbine offen, den Holzwarth in Erkenntnis dieser Umstände schon 1905 besprochen

und seither in zäher, opferwilliger Arbeit verfolgt hat, bis 1933 in Zusammenarbeit mit Brown Boveri eine betriebsfähige Anlage entstand. [...] BBC hat anlässlich der Entwicklung des Veloxkessels und der Aufladeanlagen auf die wissenschaftliche Erforschung der strömungstechnischen Fragen und der konstruktiven Ausgestaltung der Turbine und der Axialgebläse grösste Sorgfalt angewendet. Als Ergebnis ist die hier beschriebene Anlage anzusehen, deren Einzelwirkungsgrade die höchsten bis heute erreichten Beträge darstellen.»

Charakteristisch für Stodola war, dass er es nicht bei einem Loblied auf die Herstellerfirma bewenden liess, sondern nach Auflistung der Messresultate konkrete Vorschläge für die künftige Weiterentwicklung anbrachte. Stodola schloss seinen Bericht: «Der thermische Wirkungsgrad

von 17,38 % könnte gewiss durch Zwischenschaltung eines Luftvorwärmers oder etwa einer Abwärmedampfturbine erhöht werden. Die Erstellerin hat mit Vorbedacht hiervon Abstand genommen, um die verblüffende Einfachheit der Anlage nicht preiszugeben.» Für eine künftige Steigerung des Wirkungsgrades schlug Stodola folgende vier Massnahmen vor:

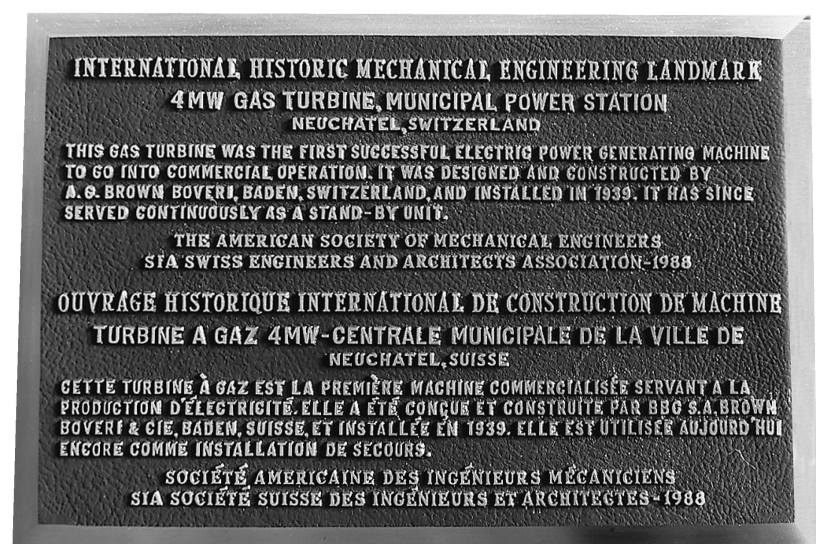
1. Lufterwärmung nach dem Verlassen des Kompressors durch die heissen Abgase [Wärmetauscher].
2. Fraktionierte Verbrennung, die in einer Teilung der Turbine besteht, wobei in einer Zwischenbrennkammer durch frische Brennstoffeinspritzung eine Temperaturerhöhung für die nächste Stufe bewirkt wird.
3. Verbesserung des Wirkungsgrades bei Teilbelastungen, indem man die Turbine in zwei Einheiten teilt, wobei die eine nur den Kompressor antreibt und dabei die zweckmässigste Drehzahl annehmen kann.
4. Die Erhöhung der Verbrennungstemperatur, die der erhöhten Wärmefestigkeit neuer Baustoffe, wie sie zu erwarten ist, folgen wird und grosse Fortschritte verheisst.

Alle diese Vorschläge wurden später im Gasturbinenbau tatsächlich realisiert. Doch kehren wir nochmals zur legendären «Landmaschine» zurück: Diese wurde an das Elektrizitätswerk der Stadt Neuenburg geliefert, wo sie eine Dampfturbinenanlage ersetzte. Kriegsbedingt platzierte man die Maschinengruppe in einer bombensicheren Felskaverne. Die im offenen Kreislauf arbeitende Anlage besteht im wesentlichen aus Axialverdichter, Brennkammer, Turbine und Generator. Die Generatorleistung beträgt 4 Megawatt. Die Temperatur am Turbineneintritt ist mit 550 °C aus

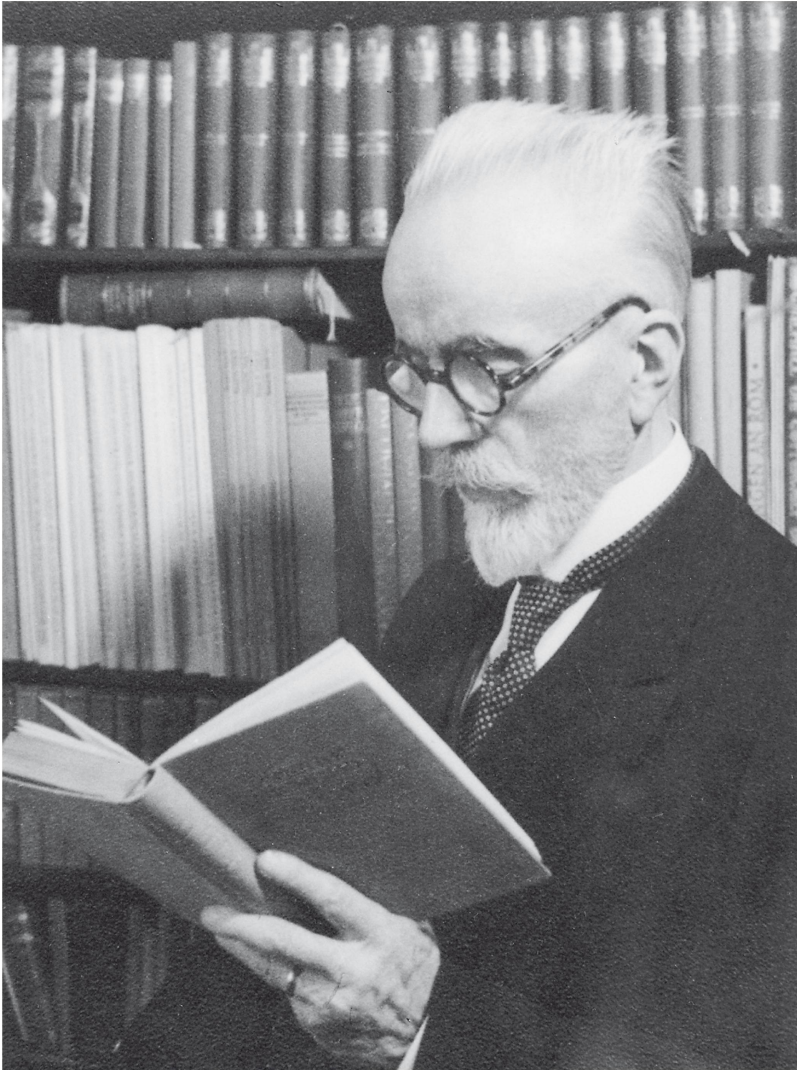
heutiger Sicht bescheiden, jedoch vorteilhaft für eine lange Lebensdauer. Es spricht für die Qualität der Ausführung, dass die jetzt über sechzigjährige Maschine noch immer ihren Dienst versieht. Bei einem Stromausfall startet die Anlage automatisch und beschleunigt in acht Minuten auf Vollast am Netz. 1988 zeichnete die American Society of Mechanical Engineers diese Gasturbine als «Historic Landmark» mit einer Ehrenplakette aus.

Die einflussreiche amerikanische Ingenieurvereinigung hatte Aurel Stodolas Gesamtwerk bereits 1941 mit der Verleihung der Ehrenmitgliedschaft gewürdigt. Keine andere Auszeichnung als die erwähnte Plakette hätte wohl Stodolas Verdienste um die Gasturbinen-Entwicklung besser zu krönen vermocht. Seinem Fachwissen und seiner Persönlichkeit, aber ebenso der Leistung einer Reihe seiner Schüler verdankt die Gasturbine unendlich viel.

Auszeichnungsplakette als «Historic Landmark» für die welt-erste Gleichdruck-Gasturbine



Stodola als Lehrer und Mensch



*Aurel Stodola in seiner
Bibliothek*

Die Abschiedsvorlesung

Aurel Stodola fasste 1929 in seiner Abschiedsvorlesung die Entwicklung des thermischen Maschinenbaus in den vorangegangenen fünfzig Jahren zusammen. Am Beispiel der Entwicklung der Dampfturbine setzte er sich mit dem scheinbaren Gegensatz von Theorie und Empirie auseinander: «Auch heute noch muss sich der Fachdozent gefallen lassen, von den eigenen Kreisen aus einem «Mann der Wissenschaft» spöttisch in einen «Theoretiker» umgedeutet zu werden.

Steht er über den Parteien, so wird er sich damit trösten, dass auch in der Bezeichnung «Empiriker» einige Geringschätzung für die oft intensive geistige Arbeit des sogenannten «Praktikers» hereinspielt. Überhaupt wird man vorurteilsfrei zunächst feststellen können, dass es sich um kein «entweder-oder» handelt, dass vielmehr beide Faktoren zum Aufbau der Technik gleich notwendig gleichberechtigt sind: Die Wissenschaft, wenn sie nicht in begrifflose mechanische Rechnerei ausartet – die Empirie, wenn sie sich nicht in eine Trotzstellung gegen die Wissenschaft begibt, sondern sich entschliesst, Hand in Hand mit ihr zu arbeiten. [...] Und, geschmähte Wissenschaft, sage du selbst jenen feindlichen Kreisen, dass deine Absicht und Wirkung über das eng Fachliche hinausgeht, dass, wer dich in sein Herz geschlossen, letzten Endes dem tiefen Trieb der intellektuellen Ehrlichkeit nachgeht, die alles Urteilen auf motivierte Gründe abstellt, dass man im Wahrheit-Suchen und -Finden ein Erlebnis davonträgt, das uns behütet, unsere Meinungen und Handlungen überhaupt auf den seichten Grund von Schlagworten oder Modezeitströmungen aufzubauen.»

Stodolas Weltanschauung

Gewissermassen als sein geistiges Vermächtnis veröffentlichte Stodola 1931 ein 120-seitiges Buch mit dem Titel «Gedanken zu einer Weltanschauung vom Standpunkte des Ingenieurs». Darin ist auch die erwähnte Abschiedsvorlesung abgedruckt. Die-

se Publikation stiess ebenfalls auf grosses Interesse und wurde mehrfach aufgelegt. Stodola profilierte sich darin als tief sinniger Denker. Unter anderem setzte sich der Autor mit der Kritik an der Technik auseinander. Der Erste Weltkrieg und die grosse Weltwirtschaftskrise hatten dem vorher ungebrochenen Fortschrittsglauben einen Dämpfer versetzt. Einige Denker gaben der Technik die Schuld an diesen Katastrophen. Technikkritik und Kulturpessimismus kamen in Mode.

1918–1922 erschienen die viel diskutierten beiden Bände «Der Untergang des Abendlandes» des deutschen Geschichtsphilosophen Oswald Spengler (1880–1936). Ähnlich wie Nietzsche vertrat er darin die Idee, alle Kulturen würden zyklisch verlaufen: nach Aufstieg und Blütezeit setze der Verfall ein. Nach Spenglers Ansicht hätte unsere westliche Kultur mit dem 19. Jahrhundert ihren Höhepunkt überschritten und gehe nun dem Untergang entgegen. 1931 publizierte Spengler eine Schrift mit dem Titel «Der Mensch und die Technik». Darin vertiefte er einige Gedanken aus dem «Untergang». Spengler charakterisierte den Menschen als «Raubtier». In der Maschine werde der Begriff der Beute des Raubtieres zu Ende gedacht. Es sei ein faustischer Traum, der zur Entwicklung der Maschinen geführt habe, um sich «dem unerreichbaren Ziel des Perpetuum mobile so sehr als möglich zu nähern. Wer nicht selbst vom Willen zur Allmacht über die Natur besessen war, musste das als teuflisch empfinden, und man habe die Maschine stets als Erfindung des Teufels empfunden. [...] Der Frevler und Sturz des faustischen Menschen ist grösser als alles, was Äschylus und Shakespeare geschaut haben».

Stodola war, wie wohl die meisten

**GEDANKEN ZU EINER
WELTANSCHAUUNG
VOM STANDPUNKTE DES INGENIEURS**

VON

**PROFESSOR DR. A. STODOLA
ZÜRICH**

ZWEITE, ERGÄNZTE AUFLAGE

MIT 11 TEXTABBILDUNGEN



**BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER
1932**

Titelblatt zur 2. Auflage von Stodolas «Weltanschauung» 1932

Ingenieure, ein entschiedener Gegner von Spenglers Untergangsmoralität, die zu einem Fatalismus führen musste. Im Gegensatz zu Spengler hielt Stodola die Technik «für eine der grössten Geistestaten der Menschheit». Die Technik an sich sei wertneutral, weder gut noch böse. Der Mensch, der die Technik nutzt, kann verantwortungsvoll oder gewissenlos handeln, sie zum Wohle der Völker oder für Vernichtungskriege einsetzen. Stodola: «Vielleicht stehen wir nicht vor einem «Ende», sondern an ei-

ner verheissungsvollen Wende. Denn noch lebt im europäischen Menschen die Fähigkeit zur Synthese von Kraft und Güte, Entschlossenheit und Kontemplation, von Zähigkeit und Grossmut. Gerade der Beruf des Ingenieurs fordert die Vereinigung dieser Triebe.»

In seinem Buch setzte sich Stodola auch mit neueren physikalischen Theorien wie der Relativitätstheorie, der Quantentheorie und der Wellenmechanik auseinander. Ferner äusserte er sich zu Fragen der Evolutionstheorien und zu den Rätseln des Lebens. Der Karlsruher Professor Rudolf Plank (1886–1973) rezensierte die zweite Auflage von Stodolas «Weltanschauung» 1932 in der VDI-Zeitschrift: «Es ist in den letzten Jahren von Unberufenen, der Technik fremd gegenüberstehenden Autoren soviel Unsinniges über das Wesen der Technik und ihre Verknüpfung mit der gegenwärtigen Krise geschrieben worden, dass man es warm begrüssen kann, wenn sich jetzt ein Mann zum Worte meldet, dessen technisch-fachliche Leistungen über jeden Zweifel erhaben sind. Stodolas Buch liefert den Beweis, dass die Vertiefung in ein technisches Spezialgebiet immer noch genügend Spielraum für die Erfassung der Nachbargebiete und für die Ausbildung der ganzen Persönlichkeit lassen kann. Schon aus zahlreichen Abschnitten von Stodolas klassischem Werk über Dampfturbinen konnte man erkennen, [...] dass es ihm auf die tieferen Zusammenhänge und die grossen Entwicklungslinien ankommt. Das stempelte ihn zum idealen Hochschullehrer, der nicht nur Gelehrter, sondern auch Mittler und Erzieher war. Möge manchen Stodolas Idealismus übertrieben erscheinen, er ist unendlich fruchtbarer und edler als der anklagende Pessimismus moderner Untergangphilosophen. Nur gegen sich selbst ist

Stodola unerbittlich streng. [...] Es offenbaren sich in dem Werk Güte und Menschlichkeit, aber auch ein scharfer, kritischer, allumfassender Verstand und ein seltener Kenner der Technik und ihrer verwickelten Zusammenhänge. Niemand wird Stodolas Buch ohne bleibenden Gewinn lesen.» Zur gleichen Zeit berichtete Stodola seinem Bruder Emil: «Ich habe mit der freundlichen Aufnahme meiner Schrift den Höhepunkt des Lebens erklommen und danke Gott für die Kühnheit, die er mir eingab, jene Schrift zu schreiben.»

Humanitäres und soziales Wirken

Angesichts der grossen Zahl verstümmelter Menschen im Ersten Weltkrieg beabsichtigte der berühmte Chirurg, Professor Ferdinand Sauerbruch (1875–1951), Gliederprothesen industriell herzustellen. Er warb bei einflussreichen Persönlichkeiten für sein Vorhaben. Unter anderem korrespondierte Sauerbruch mit Walter Boveri (1865–1924), dem Präsidenten von BBC, und mit Stodola. Letzterer war von der Idee angetan, sein Wissen in den Dienst einer humanitären Aufgabe zu stellen. 1915 publizierte er in der VDI-Zeitschrift einen Aufsatz mit dem Titel «Künstliche Gliedmassen: eine dankbare chirurgisch-mechanische Aufgabe».

Stodola führte aus: «Die Frage, wie man das Los der zahlreichen Verstümmelten des gegenwärtigen Krieges mildern, insbesondere ihnen die verlorene Erwerbstätigkeit wieder verschaffen könnte, hat ein tiefgehendes menschliches, staatliches, soziales und zuletzt auch mechanisches Interesse. [...] Von dem Wunsch erfüllt, zur Lösung dieser Aufgabe beizutragen, überlegte ich in erster Linie, welche Kraftquellen zur Betätigung der künstlichen Glieder verfügbar wären.

Wünschenswert ist offenbar, die eigene Muskelkraft zu verwerten, denn man kann wohl eine kleine Akkumulatorenbatterie mit sich herumtragen, ist dann aber ein Sklave dieser fremden Energie. [...] Die Frage, ob das Bilden eines solchen lebenden Maschinenelementes vom chirurgischen Standpunkt lösbar erscheint, wurde mir von namhaften medizinischen Fachleuten bejaht, und es gebührt insbesondere Herrn Professor Sauerbruch aus Zürich, derzeit in Greifswald, das Verdienst, die Sache auf mein Ansuchen sofort äusserst tatkräftig als erster unterstützt zu haben. [...] Die ausführlichen Besprechungen mit ihm haben mich überzeugt, dass insbesondere im Anfang ein inniges Zusammenarbeiten des Chirurgen und des Konstrukteurs unentbehrlich ist, soll der richtige Mittelweg zwischen den grossen Feinheiten der chirurgischen Technik und den Anforderungen der Mechanik gefunden werden.» Leider gibt es keine Hinweise, ob Stodolas Vorschläge tatsächlich Verwendung fanden.

1924 offerierte Stodola dem Präsidenten des Schulrates, Robert Gnehm, «zum Zwecke der Errichtung einer Stiftung, als Zeichen der Dankbarkeit gegenüber der ETH und meiner zweiten Heimat, die Schenkung eines Kapitals, das bei Anlass der mir von in- und ausländischen Maschinenbauanstalten überwiesenen Ehrengaben» geöffnet werden konnte. Stodolas Töchtern sollte die Nutznießung des Kapitals zu ihren Lebzeiten zustehen, nach ihrem Tod dieses jedoch der ETH zufallen. «Als Zweckbestimmung der Einkünfte aus dem der ETH zur Verfügung stehenden Fonds möchte ich im Einverständnis mit den Donatoren, die Förderung der Entwicklung der maschinen- und elektrotechnischen Wissenschaften an der ETH bezeichnen, unter anderem

durch gelegentliche Erteilung von Reisetstipendien an begabte Studierende.» Stodola vergass nie, dass auch er seine Karriere einem Stipendium zu verdanken hatte. Harte Schicksale und Bedürftigkeit liessen ihn nicht gleichgültig. Wo es ihm möglich war, engagierte er sich in christlicher Nächstenliebe für die Linderung der Not. In diesem Zusammenhang ist auch die Unterstützung erwähnenswert, die er Albert Schweitzers Urwaldspital in Lambarene angedeihen liess. Es gelang Stodola, für diesen Zweck grosszügige Geldgeber zu mobilisieren.

Stodola im Urteil seiner Schüler

Die meisten seiner ehemaligen Studenten attestierten Stodola ein profundes Wissen über technisch-physikalische Zusammenhänge, Klarheit und Gewandtheit im Vortrag sowie die Neigung zu gutmeinender Kritik der Entwürfe bei den Konstruktionsübungen.

«... was bedeutete es dann, wenn im Konstruktionssaal das erste Empfinden der Unnahbarkeit durchbrochen wurde durch die Herzenswärme individuellster Anteilnahme, die uns aus klarblickenden Augen entgegenkam. Sei es, dass die sichere Linienführung seiner Hand und seiner Urteilskraft, sei es, dass ein noch feinerer Linienzug seines Geistes mit wenigen treffenden Worten sich nachhaltig in unser Wesen eintrug, immer war die Begegnung bedeutungsvoll» (Eichelberg).

Eine Reihe bekannter und erfolgreicher Persönlichkeiten durfte sich rühmen, zu Stodolas Schülern und Mitarbeitern gezählt zu haben. Zu nennen wären etwa der Astrophysiker und Morphologe Fritz Zwicky (1898–1974), die ETH-Professoren Henri Quiby (1884–1976), Alfred Car-

Erfolgreiche ehemalige Stodola-Schüler und -Assistenten:

*Bild oben links:
Alfred J. Büchi
(1879–1959),
Erfinder der Turboauf-
ladung*



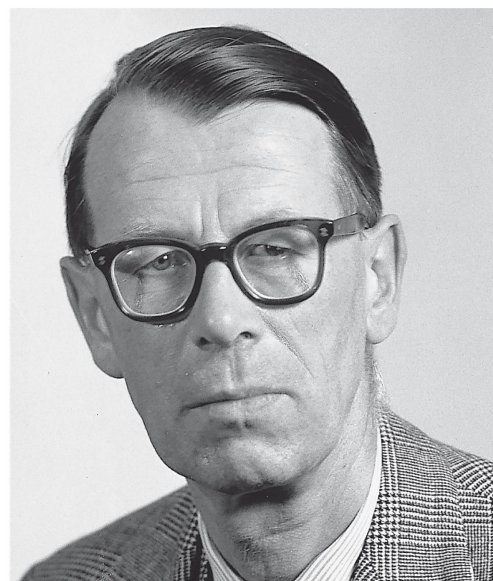
*Bild oben rechts:
Walter Noack
(1881–1945), Erfinder
des «Velox»-Dampf-
kessels*



*Bild unten links:
Adolf Meyer
(1880–1965), Pionier
der Gleichdruck-Gas-
turbine*



*Bild unten rechts:
Claude Seippel
(1900–1986), Erfinder
des Druckwellenladens
«Comprex»*



rard (1889–1948), Gustav Eichelberg (1891–1976), Emil Honegger (1892–1983), Jakob Ackeret (1898–1981) und Eduard Amstutz (1903–1985). Ferner mehrere leitende Ingenieure der schweizerischen Maschinenindustrie wie Alfred Büchi (1879–1959), Adolf Meyer (1880–1965), Walter Noack (1881–1945), Paul Faber (1882–1956), Herbert Brown (1896–1987) und Claude Seippel (1900–1986).

Auch Emanuel Jaquet (1897–1981) war ein ehemaliger Stodola-Schüler. Er schloss sein Studium 1920 mit dem Diplom ab und war anschliessend Stodolas Assistent. Auf dessen Empfehlung arbeitete er nach seiner Dis-

sertation bei Skoda in Pilsen und bei Escher Wyss in Zürich. Schliesslich leitete er bis 1966 ein eigenes Unternehmen in Basel. Jaquet berichtete: «Schon in der ersten Vorlesung war ich fasziniert von der vornehmen Gestalt Stodolas und seinem klaren Vortrag. Aber erst im letzten Semester hatten wir Studenten im Zeichensaal Gelegenheit mit Stodola zu sprechen, da er persönlich die Konstruktionsübungen überwachte und sie nicht, wie heute üblich, den Assistenten überliess. Den Schwächeren unter uns gab er Mut zum Ausharren und half ihnen bei ihren Schwierigkeiten. Den Begabteren gab er zusätzliche

Spezialaufgaben, um sie zu selbständigem Denken anzuregen. Es herrschte immer eine menschlich gütige Atmosphäre und von professoralem Dünkel war nichts zu spüren. [...] Dreimal hat Stodola in den Gang meiner beruflichen Laufbahn eingegriffen: zuerst als er mich zum Assistenten berief und mir so die Gelegenheit verschafft hat, in engere Beziehung zu ihm zu treten, sodann, als er durch seinen Vorschlag für eine Dissertation mir die Möglichkeit geboten hat, meine Kenntnisse zu vertiefen und schliesslich indem er durch seine Empfehlung mir den Eintritt in das praktische Berufsleben erleichtert hat. Grund genug, dem verehrten Lehrer zu grösstem Dank verpflichtet zu sein.»

Der Schöpfer der Relativitätstheorie und spätere Nobelpreisträger Albert Einstein (1879–1955) erhielt 1900 am Polytechnikum das Diplom als Fachlehrer für Mathematik und Physik. Einstein und Stodola waren später für kurze Zeit Kollegen, bis Einstein 1914 nach Berlin zog. Zwischen den beiden Gelehrten entwickelte sich ein länger dauernder Briefwechsel. Nach Stodolas Rücktritt hat Einstein dessen Wirken in der «Neuen Zürcher Zeitung» mit folgenden Worten gewürdigt: «Indem ich die Feder nehme, um ein paar Worte über Stodola, den Meister der Technik, den feinen und zugleich starken Menschen zu sagen, fühle ich, dass meine Ausdrucksmöglichkeiten zu schwach sind, um dem Manne gerecht zu werden. [...] Wäre Stodola in die Renaissance hineingeboren, so wäre er ein grosser Maler oder Bildhauer geworden; denn der stärkste Trieb seiner Persönlichkeit ist Phantasie und Gestaltungsdrang. Solche Naturen gehen seit hundert Jahren meist zur Technik. Hier entlädt sich mächtig der Gestaltungstrieb des Zeitalters, und auch der Schönheits-

sinn mit seiner Leidenschaftlichkeit findet hier reichere Gelegenheit, sich auszuleben, als der Laie ahnt. Mächtig war die Anregung, die in den vielen Jahren befruchtender Lehrtätigkeit auf seine Schüler überging, und es leuchtete jedes Auge, wenn von ihm und seinem Schaffen die Rede war. [...] Als der Schreibende dieser Zeilen als neugebackener Dozent an der Zürcher Universität über theoretische Physik las, da erschien zu seiner Freude und seinem begreiflichen Schrecken Stodolas wunderbare Gestalt im Auditorium, um die Entwicklung dieses Faches zu verfolgen, teils reiner Erkenntnis halber, teils auch, um das Erkannte gestaltend zu verwerten. Wenn das Kolleg fertig war, dann stellte er, der stets das Wesentliche spielend überblickte, tiefe Fragen, die oft in erquickender Form berechnigte Kritik enthielten. Die Scheu vor dem gewaltigen Manne schwand bald im Gespräche; denn Güte und Wille zur Bejahung leuchtete stets aus seinen Reden. Wenn etwas den Partner drückte, so war es die tiefe Bescheidenheit Stodolas...»

Stodola war über Einsteins Ehrbezeugung bewegt und antwortete: «Nun strömt Ihr Artikel in der NZZ mir wie ein warmer Quell entgegen, in den ich vertrauensvoll tauchen und alle Zweifel wegwaschen lassen darf. Das tut einem Manne, der, wie Sie hellsichtig errieten, in nicht adäquater Umgebung, Jahrzehnte der Einsamkeit leben musste, unendlich wohl! Beim Lesen Ihrer staunenswerten Zeilen erlebte ich den Augenblick, zu dem man sagt: verweile doch...»

Einbürgerung, Auszeichnungen und Abwerbeversuche

Anlässlich des 50-Jahr-Jubiläums des Eidgenössischen Polytechnikums im Jahre 1905 ermunterte die Stadt

Zürich ausländische Professoren, die seit mindestens zehn Jahren in Zürich niedergelassen waren, die Einbürgerung zu beantragen. Aurel Stodola machte von dieser Möglichkeit Gebrauch. Am 8. November 1905 erhielten er und seine Familie das Bürgerrecht der Stadt Zürich und wurden damit Schweizer Bürger.

In Anerkennung seiner Verdienste um die Entwicklung des thermischen Turbomaschinenbaus und für seine Förderung des Ingenieur-Nachwuchses wurden Stodola zahlreiche Auszeichnungen und Ehrungen zuteil. Den Reigen eröffnete die Universität Zürich 1901 mit der Verleihung des Ehrendoktorats. 1905 folgte die Uni-

versität Hannover dem Beispiel. 1908 ehrte der Verein Deutscher Ingenieure Stodola mit der Grashof-Denk Münze, der höchsten Auszeichnung dieser angesehenen Gesellschaft. 1909 ernannte der Österreichische Ingenieur- und Architekten-Verein Stodola zum Ehrenmitglied, und 1912 folgte die Ehrenmitgliedschaft beim Deutschen Museum in München. Die Deutsche Technische Hochschule Brünn, mit der Stodola durch persönliche Kontakte eng verbunden war, verlieh ihm 1926 das Ehrendoktorat. Anlässlich Stodolas 70. Geburtstag ernannte ihn 1929 auch die Technische Hochschule Prag zum Ehrendoktor. Im gleichen Jahr widmeten Freunde und ehemalige Schüler ihrem verehrten Lehrer eine umfangreiche Festschrift. 1930 verlieh die American Society of Mechanical Engineers (ASME) Stodola ihre Ehrenmedaille und 1941 die Ehrenmitgliedschaft. Stodola wurde auch Ehrenmitglied der französischen, der schwedischen und der preussischen Wissenschaftsakademie. Die britische Institution of Mechanical Engineers in London würdigte 1940 Stodolas Schaffen mit der Verleihung der James-Watt-Medaille.

Der wachsende Ruhm Stodolas veranlasste verschiedene ausländische Hochschulen, ihn mit attraktiven Versprechungen aus der Schweiz wegzulocken. Darunter waren so renommierte Schulen wie diejenigen von Harvard, Petersburg, Wien, Prag, Hannover und Karlsruhe. Stodola hätte den schmeichelhaften Angeboten wohl kaum widerstanden, wäre er nicht überzeugt gewesen, dass nur Zürich ihm ein solch ideales Umfeld für seine fruchtbare und erfolgreiche Forscherlaufbahn bieten konnte. Er blieb der ETH ganze 37 Jahre lang treu und trat erst nach Vollendung seines 70. Altersjahres von seinem Lehramt zurück.

Buchumschlag der Festschrift zu Stodolas 70. Geburtstag 1929

**FESTSCHRIFT
PROF. DR.
A. STODOLA**

ZUM 70. GEBURTSTAG

HERAUSGEBER: E. HONEGGER.
600 SEITEN MIT ÜBER 400 ABBILDUNGEN.
UNTER DEN MITARBEITERN:
BELLUZZO, ROM / EINSTEIN, BERLIN / FLÜGEL,
DANZIG / FÖPPL, O., BRAUNSCHWEIG / GRAMMEL,
STUTTGART / JAKOB / FRITZ, BERLIN / JOSSE,
CHARLOTTENBURG / KÖRNER, PRAG / LÖFFLER,
CHARLOTTENBURG / LÖSEL, WIEN / MEISSNER,
ZÜRICH / VON MISES, BERLIN / MOLLIER, DRESDEN
NACHTWEH, HANNOVER / NUSSLEIT, MÜNCHEN
PRANDTL / BUSEMANN, GÖTTINGEN / SCHÜLE, GÖRLITZ

ORELL FÜSSLER VERLAG ZÜRICH-LEIPZIG



Letzte Lebensjahre und Tod

Auch nach seinem Rücktritt pflegte Stodola Kontakte zu ehemaligen Schülern und Mitarbeitern sowie zur einschlägigen Industrie. Davon zeugen ein umfangreicher Briefwechsel und eine Reihe von Fachaufsätzen. Als hochverdienter, international geschätzter Fachmann und unbestechliche Autorität auf dem Gebiet der thermischen Turbomaschinen wurde Stodola weiterhin von verschiedenen schweizerischen Maschinenfabriken als Gutachter beigezogen.

Nach dem Tod seiner Ehefrau im Jahre 1935 wurde es stiller um den alternden Gelehrten. Er zog an die Witikonstrasse 360, nachdem er mit sei-

ner Familie zuvor viele Jahre lang an der Freiestrasse 62 gewohnt hatte. Ihm zu Ehren trägt heute eine Quartierstrasse im Zürcher Stadtteil Witikon seinen Namen. Stodolas Tochter Olga war nach Giessen in Deutschland übersiedelt, nachdem ihr Ehemann Curt Krause dort Professor geworden war. Die politischen Verhältnisse im nördlichen Nachbarland trübten und erschwerten Stodolas Beziehungen zur dortigen Fachwelt in zunehmendem Masse.

Mit fortschreitendem Alter stellten sich bei Stodola gesundheitliche Probleme ein. Seit seiner Jugend plagten ihn Kopfschmerzen. Trotz allem durfte er in geistiger Frische ein hohes Alter erreichen. Ein Abschiedsbrief an seinen Schwiegersohn lässt den Schluss zu, dass Stodola 1938 mit seinem baldigen Tod rechnete. Damals litt er an einer schmerzhaften Blasen-erkrankung, die durch einen chirurgischen Eingriff etwas gelindert werden konnte. Ein Jahr später erschien der achtzigjährige Stodola jedoch zu den Abnahmeversuchen für die erste Kraftwerksgasturbine in Baden und verfasste darüber einen Bericht. Etwas später schrieb er seinem ehemaligen Schüler, BBC-Direktor Adolf Meyer: «Mein Befinden gerät jetzt in eine unangenehme Phase durch fortwährende Störung der Nachtruhe (wegen meines Blasenleidens), so dass ich tagsüber, ohne ‹krank› zu sein, total abgespannt bin und daher auch auf die Benützung Ihres freundlichen Angebotes, einen Informations-Ingenieur zu mir zu entsenden, vorläufig verzichten muss.»

Da an eine Teilnahme Stodolas am 50-Jahr-Jubiläum von Brown Boveri nicht zu denken war, lud ihn Direktor Adolf Meyer zu einer persönlichen Werksbesichtigung nach Baden ein. Begleitet von seiner Tochter Olga, folgte Stodola dieser Einladung. Dies

Aurel Stodola im Alter von 80 Jahren

Strassenschild in Zürich-Witikon



*Bild oben und unten:
Aurel Stodola in Be-
gleitung seiner Tochter
Olga Krause-Stodola
anlässlich einer
Werksbesichtigung bei
Brown Boveri in
Baden 1940*



war wohl sein letzter Auftritt in der Öffentlichkeit. Nachdem eine Lungenentzündung seinen Organismus weiter geschwächt hatte, sah man ihn kaum mehr. Krank und schwach, aber geistig rege, verbrachte er die letzten Monate in seinem Haus. Wenn es sein Zustand zuließ, korrespondierte er mit Tochter und Schwiegersohn, mit ehemaligen Schülern und anderen Persönlichkeiten. Am 25. Dezember 1942 erlöste ihn der Tod.

Nachrufe

Trotz der Kriegswirren verbreitete sich die Nachricht vom Ableben des Vaters der Dampf- und Gasturbine in der technischen Welt blitzartig. Telegramme und Kondolenzschreiben aus allen Ländern trafen in Zürich ein. Viele Tageszeitungen und wohl die meisten technischen Fachzeitschriften publizierten Nachrufe. Es würde zu weit führen, sie hier aufzuzählen. Einige Auszüge mögen genügen, um seine Leistungen nochmals in Erinnerung zu rufen. Die ehemaligen Schüler und Lehrstuhlnachfolger Gustav Eichelberg und Henri Quiby würdigten Stodolas Lebenswerk in der «Schweizerischen Bauzeitung» vom 13. Februar 1943. Eichelberg schrieb: «Uns, die wir sein reiches Wirken erlebten – damals als wir noch zu seinen Schülern und jungen Assistenten zählten, und heute, wo wir fachlich in seinem Arbeitsgebiet, ja in seinem Lehrbereich tätig sind – uns war Stodola ein begeisternder Meister, strenges Vorbild und väterlicher Freund zugleich. [...] Ob es sich dabei um thermodynamische Erkenntnisse handle – etwa der Arbeitsprozesse von Wärmekraftmaschinen, oder der Strömungsform des Dampfstrahles – oder um Untersuchungen aus dem Gebiete der Mechanik – wie bei der Lösung von Regulierproble-

men oder der Berechnung von Schwingungen von Turbinenwellen und -scheiben – immer bezeugt schon die Art der Fragestellung und die Behandlungsweise den lebendigen Blick des begnadeten Ingenieurs, dessen Schaffen – dem seiner Zeitgenossen vielfach vorausseilend – unter einem neuen Zeichen stand.»

Henri Quiby liess Stodolas wissenschaftliche Verdienste Revue passieren: «Diese gewaltige Arbeit erscheint dem normalen Menschen rätselhaft, umso mehr, wenn man weiss, dass Stodola seine Tätigkeit bei weitem nicht ausschliesslich der technischen Wissenschaft widmete, sondern noch reichlich Zeit fand, die Musik zu pflegen, die Literatur und die Philosophie aufmerksam zu verfolgen. Dazu noch traf man ihn regelmässig in den Gemäldeausstellungen. Und dabei war in ihm keine Spur von Dilettantismus. Er nahm alles ernst. Keine Seite seiner erstaunlichen Bildung war oberflächlich. Er beteiligte sich aktiv, oft leidenschaftlich an allem.» Im Anschluss an diese Würdigungen veröffentlichte die «Schweizerische Bauzeitung» eine Liste der zwischen 1930 und 1940 erschienenen Arbeiten Stodolas.

In der VDI-Zeitschrift vom 3. April 1943 äusserte sich E. Sörensen: «Durch die hervorragende Vortragskunst Stodolas wurden aus aller Welt junge Maschinenbauer nach Zürich gezogen. Von ihm empfohlen, haben die begabtesten seiner Schüler und Mitarbeiter gewissermassen als seine Gesandten die Ergebnisse seiner Arbeit überallhin getragen und verbreitet. Sie haben, ausgehend von den technischen Lehr- und Arbeitsstätten in Europa und Übersee, in die sie berufen worden waren, die rasche Entwicklung des Dampfturbinenbaues weiterhin gefördert.»

Epilog

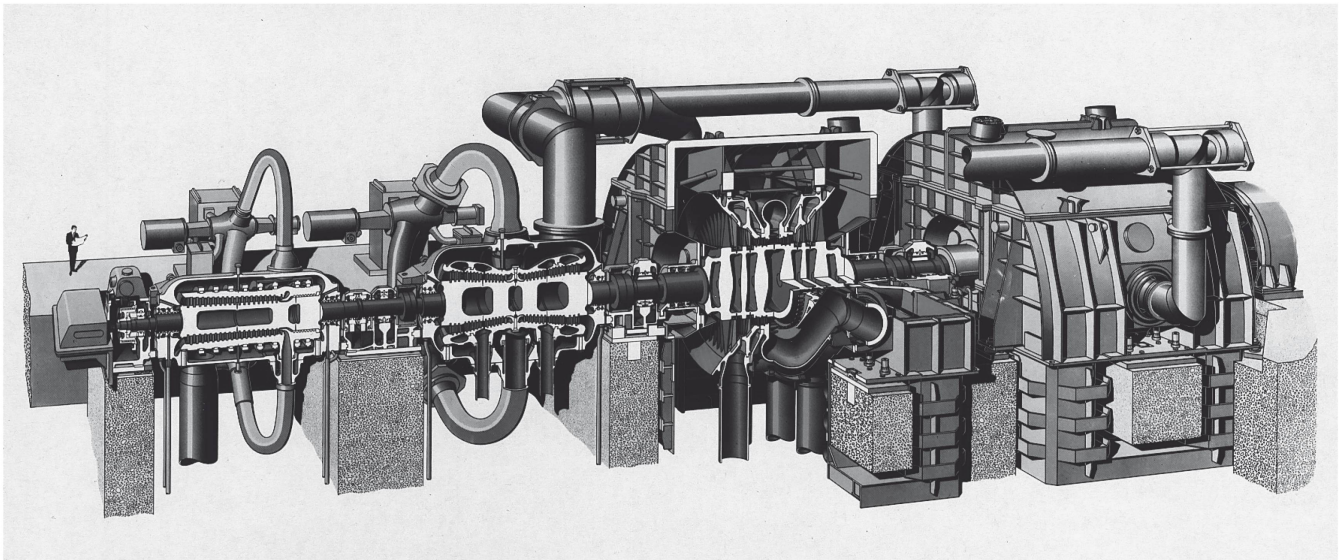


Büste Aurel Stodolas im Maschinenlabor der ETH Zürich, modelliert von seinem Schüler und späteren Lehrstuhlnachfolger Gustav Eichelberg (Bild ETH)

Turbomaschinenbau in der Schweiz nach 1945

Die schweizerische Industrie blieb im Zweiten Weltkrieg glücklicherweise von Zerstörungen verschont. Nach dem Krieg setzte sich der Trend zu stärkeren Einheiten und besseren Wirkungsgraden bei Dampf- und Gasturbinen fort. Die Wirtschaft profitierte von Europas Wiederaufbau. Die wachsende Energienachfrage verhalf der schweizerischen Turbomaschinenindustrie zu vollen Auftragsbüchern. Vielfach standen die Ingenieure vor der Entscheidung, entweder möglichst einfache und entsprechend preisgünstige Maschinen zu bauen oder mit aufwendigen und teuren Anlagen ein Maximum an Wirkungsgrad und Leistung herauszuholen. In vielen Fällen wählte man den zweiten Weg. Inzwischen war eine Schar ehemaliger Stodola-Schüler in leitende Funktionen aufgestiegen und bewies, dass sie das Erbe ihres Lehrmeisters gut verwaltete.

Stodola war keineswegs vergessen. Und damit dies auch nicht geschehen konnte, veranstaltete die ETH am 10. Mai 1959, anlässlich Stodolas 100. Geburtstag, eine Gedenkfeier. Hans Pallmann, der damalige Präsident des Schweizerischen Schulrates, lud mit folgenden Worten ein: «Stodolas Wahlheimat Zürich, die ETH und die Schweiz haben von ihm in mancher Hinsicht so viel empfangen, dass es uns Ehrenpflicht ist, des grossen Sohnes der Slowakei an der Stätte würdig zu gedenken, wo sein Lebenswerk verwurzelt ist. Wir laden darum jedermann, in welcher Weise er auch



Dampfturbine der 600-MW-Klasse um 1970

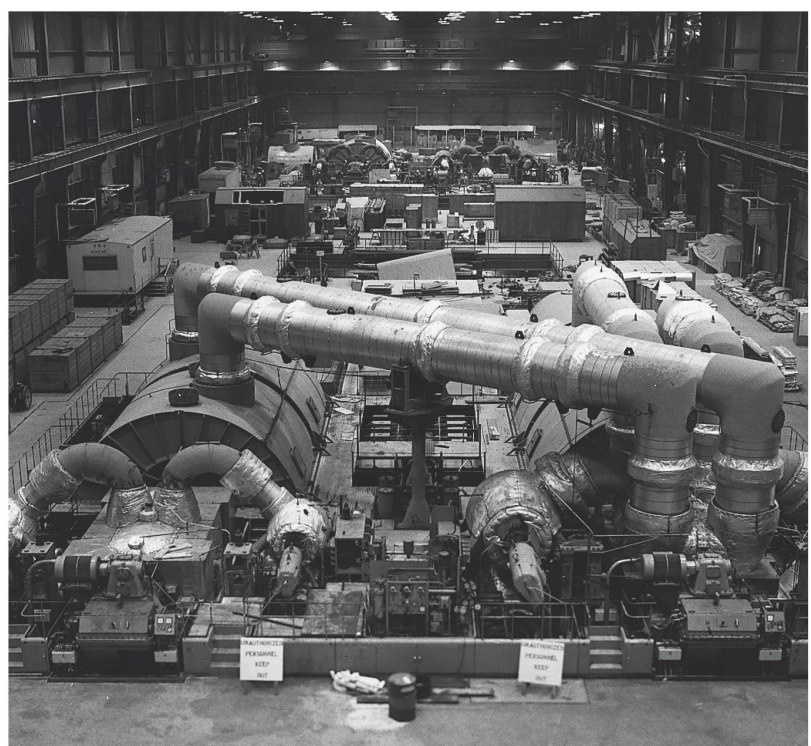
immer mit Stodola oder seinem Arbeitsgebiet in Beziehung steht, vor allem natürlich seine ehemaligen Schüler, Assistenten und Mitarbeiter, herzlich zur Teilnahme an der Feier ein, welche die Eidgenössische Technische Hochschule zusammen mit dem Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA) und der Gesellschaft Ehemaliger Studierender der ETH (GEP) veranstaltet.» Nach einem musikalischen Auftakt begrüßte Rektor Albert Frey-Wyssling die Gäste im Auditorium maximum. Die Professoren Gustav Eichelberg, Jakob Ackert und Walter Traupel sowie BBC-Direktor Claude Seippel hielten Vorträge, die anschliessend in der «Schweizerischen Bauzeitung» publiziert wurden.

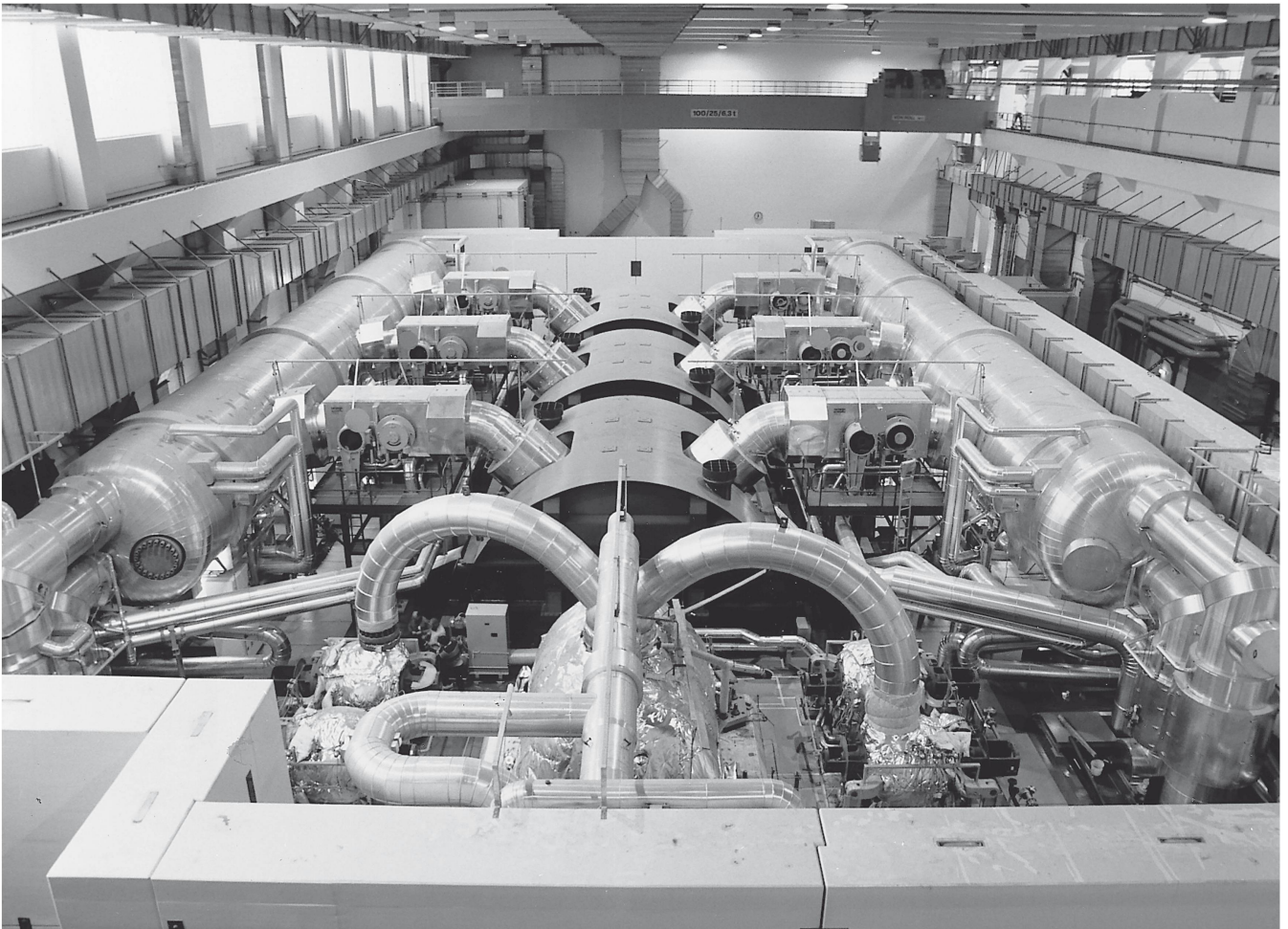
Dampfturbinen

Während die 160 Megawatt der erwähnten «Hellgate»-Anlage 1928 noch einen Rekord bedeutet hatten, wurde diese Leistungsgrösse um die Mitte der 1950er-Jahre schon beinahe zum Standard. In den sechziger Jahren stiegen die Leistungen weiter an und erreichten für einwellige Maschinen bis zu 650 Megawatt. Die erprobte Dreizylinderanordnung mit Zwischenüberhitzung und Abdampf-

Speisewasservorwärmung setzte sich für grosse Kraftwerksturbinen allgemein durch. Der Frischdampfdruck stieg auf 150–250 bar und die Eintrittstemperatur auf 550 °C. Eine Aufteilung der Dampfexpansion auf zwei Maschinenstränge ermöglichte eine weitere Leistungssteigerung. Der Spitzenwert von 1300 Megawatt für eine zweiwellige Dampfturbinenanlage wurde im Jahre 1972 erreicht und bis in die Gegenwart nicht mehr übertroffen.

Erste 1300-MW-Zweiwellen-Dampfturbine während der Montage 1974 (Cumberland / USA)





Blick auf die Dampfturbine des Kernkraftwerks Leibstadt 1984. Von vorne nach hinten sind der doppel-flutige Hochdruck- und die 3 doppel-flutigen Niederdruckteile erkennbar. Die Maschine leistet 1100 MW.

Ganz andere Anforderungen stellen Dampfturbinen für Kernkraftwerke. Da das nutzbare Wärmegefälle aus physikalischen Gründen tiefer liegt, arbeiten die Turbinen im Satt-dampfbereich. Das führt zu grösseren Dampfmengen und zu entsprechend voluminösen Maschinen. Die Länge der Endschaufeln im Niederdruckteil gibt einen Massstab für die Maschi-nendimension. Während sie in der Vorkriegszeit einen halben Meter nur selten überschritten, weisen die Schaufeln der letzten Stufe von neueren Grossdampfturbinen eine Länge von bis zu 1,3 Metern auf. Der auf dem Buchumschlag abgebildete Niederdruckrotor wiegt 225 Tonnen! Er rotiert mit 1500 Umdrehungen pro Minute. An jeder der längsten Schaufeln zieht eine Fliehkraft von rund achtzig Tonnen. Nach Ablauf der wichtigsten Dampfturbinenpatente und mehreren

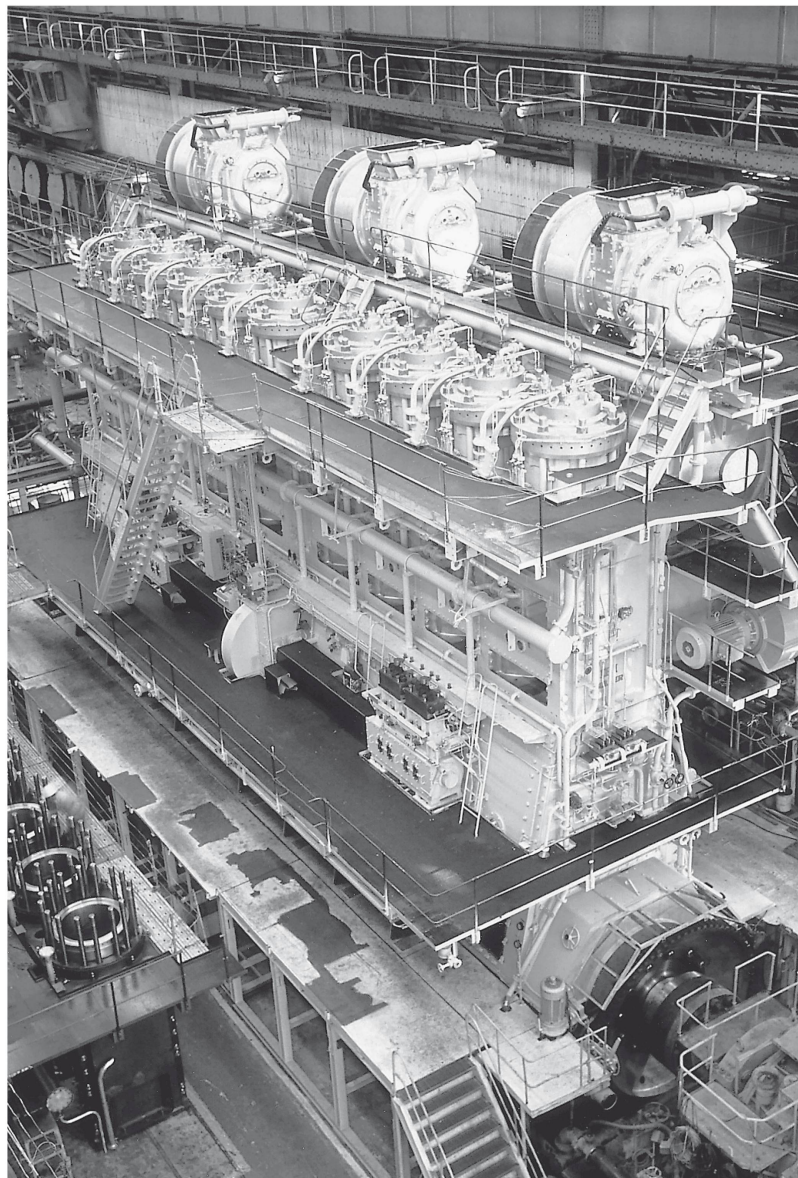
Firmenzusammenschlüssen glichen sich die Baumuster einander immer mehr an. Heute bestehen kaum mehr konstruktive Unterschiede zwischen den Dampfturbinen der wenigen noch verbliebenen Hersteller.

Dieselmotoren und Aufladung

Grosse Schiffsdieselmotoren waren bereits in der Zwischenkriegszeit zum Markenzeichen von Sulzer in Winterthur geworden. Der Nachholbedarf für Schiffe zum Transport von Erdölprodukten und anderen Gütern sowie für touristische Kreuzfahrten führte nach dem Zweiten Weltkrieg auch im Motorenbau zu einem Boom. Der Zweitaktdieselmotor verdrängte die Schiffsdampfturbine. Supertanker benötigen Leistungen bis gegen 80 000 PS. Motoren mit Zylinderbohrungen von bis zu einem Meter und mit Turboaufladung erreichen tatsächlich

derart enorme Leistungen. Nach der Erdölkrise von 1973 verlagerte sich der Schiff- und Schiffsmotorenbau zunehmend in den Fernen Osten. Ende 1988 verliess der letzte Schiffsdieselmotor die Werkhallen von Sulzer in Winterthur. Das Unternehmen trat 1997 seine Dieselmotoraktivitäten an die finnische Wärtsilä NSD Corporation ab.

Im Todesjahr Stodolas, 1942, hatte sein ehemaliger Mitarbeiter Claude Seippel ein Patent für einen neuartigen Verdichter, den so genannten Drucktauscher, beantragt. Im Unterschied zu einer Turbomaschine tauscht ein solches Gerät Gasdrücke auf einfachere Weise aus. Ein rotierendes Zellenrad wird abwechselnd mit Auspuffgasen und mit Frischluft beaufschlagt. Die Materialtemperatur bleibt damit innerhalb beherrschbarer Grenzen. 1945 baute BBC eine Versuchsanlage zur Aufladung einer Gasturbine. Man erkannte, dass die «Comprex» genannte Maschine sich auch zur Aufladung von Fahrzeugdieselmotoren eignen könnte. Nach intensiven Versuchen rüstete BBC in den achtziger Jahren mehrere Kleinserien von Diesel-Personenautos mit Comprex-Ladern aus. Nach der Umwandlung von BBC in ABB wurden die Comprex-Patente verkauft. ABB ist jedoch mit Turboladern für Lokomotiv- und Schiffsdieselmotoren wei-



9-Zylinder-Schiffsdieselmotor mit Turboladern

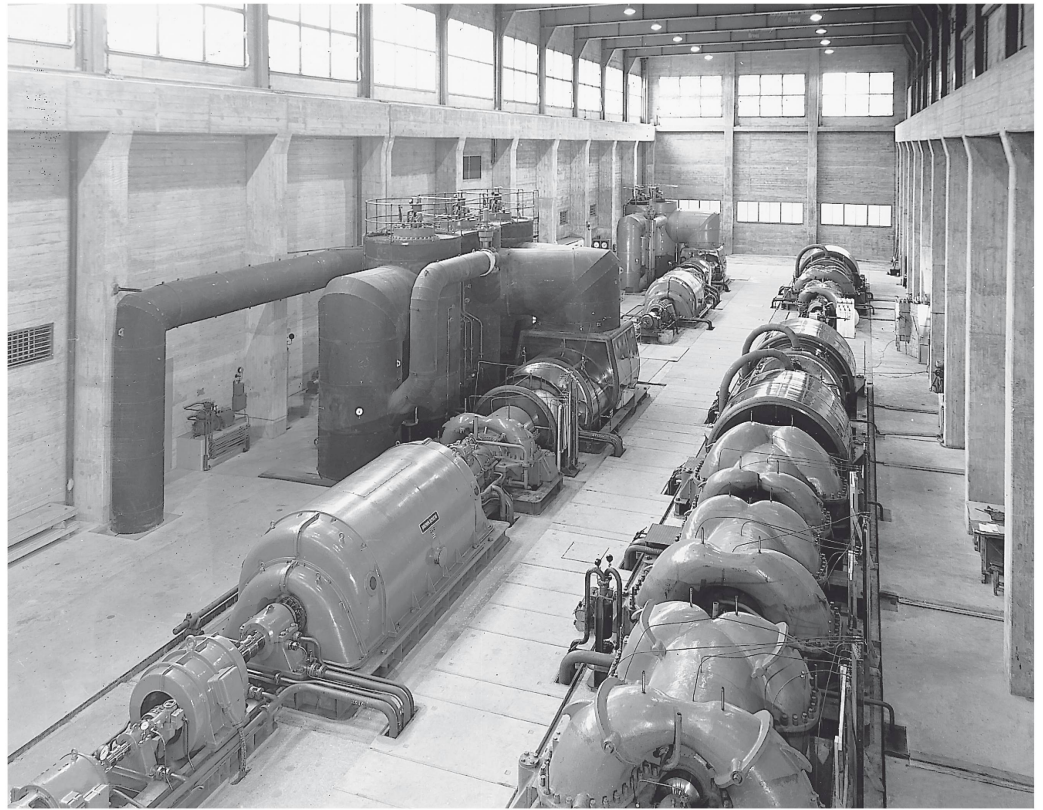
terhin erfolgreich. Moderne Hochleistungsturbolader vermögen die Motorleistung bis auf den vierfachen Wert zu steigern.

Gasturbinen

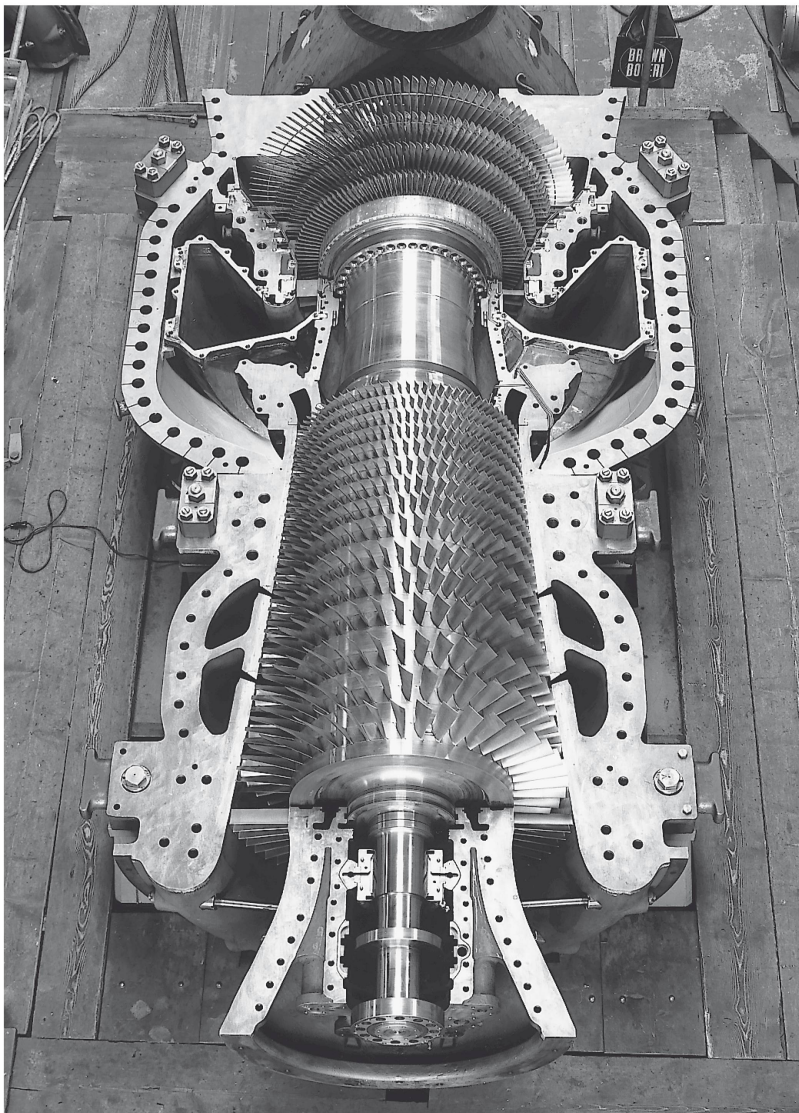
Anlässlich ihres 50-Jahr-Jubiläums stellte Brown Boveri 1941 die weltweite erste Gasturbinenlokomotive vor. 1950 konnte die Firma eine stärkere Lokomotive an die British Rail liefern. Die Erfahrungen mit dem Bau kompakter Lokomotivgasturbinen wurden bei schienengebundenen Gasturbokraftwerken verwertet. 1948/49 nahm das mit 40 Megawatt damals weltstärkste Gasturbinenkraftwerk in Beznau am Unterlauf der Aare den Be-

Verdichterrad eines modernen Turboladers

*Gasturbinenanlage
Beznau 1949. Im Vor-
dergrund die 27-MW-
Gruppe; links der
Hochdruckteil mit den
Brennkammern und
rechts der Nieder-
druckteil. Hinten die
analog aufgebaute 13-
MW-Gruppe*



*Gasturbine während
der Montage in Baden
1980. Vorne ist der
Verdichter sichtbar,
hinten die auf der
gleichen Welle ange-
ordnete Turbine. Die
Brennkammer sitzt
bei diesem Typ auf
dem noch nicht mon-
tierten Gehäuse-Ober-
teil*



trieb auf. Die von Stodola 1939 aufgezeigten Möglichkeiten zur Erhöhung des Wirkungsgrades gelangten hier zur Anwendung. Mit aufwendigem Aufbau und einer Eintrittstemperatur von 600 °C erreichte diese Anlage die zehnfache Leistung der Landmaschine und einen fast doppelt so hohen Wirkungsgrad. Mit höherer Verdichtung und 750 °C Eintrittstemperatur wurde 1960 auch mit einwelligen Maschinen ein Wirkungsgrad von 25 % erreicht. 1975 liessen neue temperaturbeständige Werkstoffe und innengekühlte Schaufeln bereits Eintrittstemperaturen von 900 bis 1000 °C zu. Solche Maschinen erreichten Leistungen bis 85 Megawatt. 1994/95 ersetzte eine 55-Megawatt-Gasturbine mit einer Eintrittstemperatur von 1100 °C die Anlage Beznau. Trotz einfacher Bauart, die prinzipiell der Anlage von Neuenburg entspricht, erreichte ihr Wirkungsgrad 32 %. Für die Entwicklung der modernsten Gasturbinengeneration waren Erfahrungen mit sequenzieller (zweistufiger)

Verbrennung von grosser Bedeutung. 1978 wurde bei einer Luftspeicheranlage erstmals eine zweistufige Verbrennung mit zwei Brennkammern und nur einem einzigen Turbinenrotor verwirklicht. Die Vervollkommnung dieses Prinzips ermöglichte bei den neuesten Gasturbinen ein besseres Teillastverhalten, eine höhere Leistung sowie einen günstigeren Wirkungsgrad. Ringbrennkammern mit speziellen Brennern ermöglichten den Bau emissionsarmer und umweltfreundlicher Gasturbinen- und Kombikraftwerke.

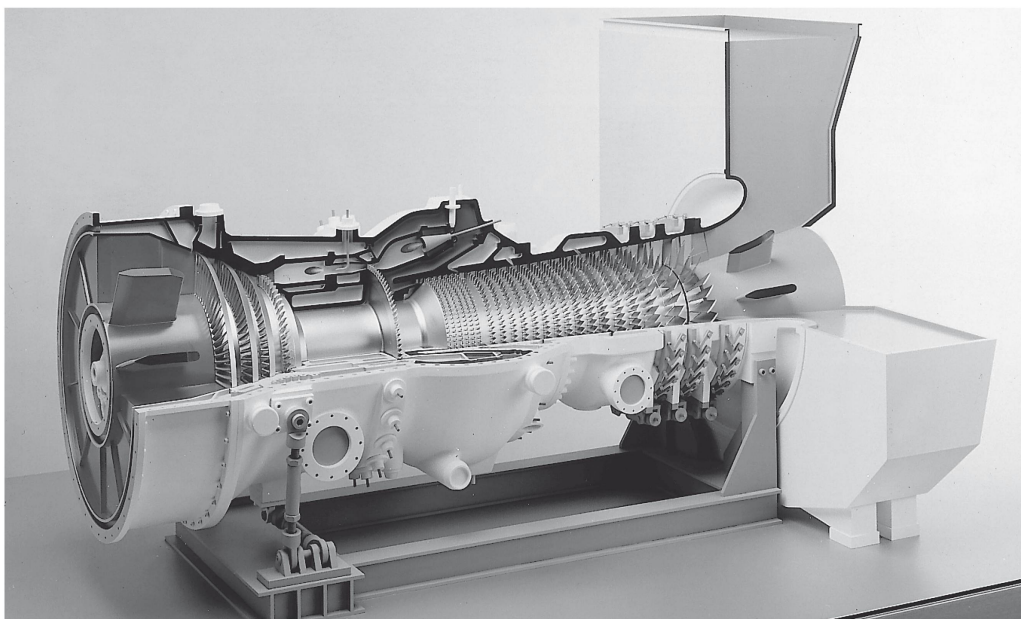
Einwellige Anlagen mit zweistufiger Verbrennung erreichen heute Leistungen bis 240 Megawatt. Kombiniert mit einem Abwärme-Dampferzeuger und einer Dampfturbine ergeben sich mechanische Leistungen bis 365 Megawatt und thermische Wirkungsgrade bis zu 58 %.

Der Konzentrationsprozess in der schweizerischen Maschinenindustrie

Bereits in den 1960er-Jahren erkannte man, dass die Konkurrenz von vier Schweizer Turbomaschinenfirmen auf dem Weltmarkt zu einem Kräfteverschleiss führen würde. Einen

ersten Schritt zur Flurbereinigung leiteten BBC mit der Übernahme der Maschinenfabrik Oerlikon und Sulzer mit der Integration von Escher Wyss ein. Um Doppelspurigkeiten zu vermeiden, kamen die beiden Konzerne überein, ihr Geschäft für thermische Turbomaschinen zusammenzulegen. Auf Jahresbeginn 1969 entstand das Gemeinschaftsunternehmen Brown Boveri-Sulzer Turbomaschinen AG (BST) mit Sitz in Zürich. Nachdem es Anzeichen dafür gab, dass der Konzentrationsprozess weltweit fortschreiten würde, wurde die BST 1974 wieder aufgelöst. BBC richtete sich auf den Bau von Dampf- und Gasturbinen für die Stromerzeugung aus, während Sulzer sich auf Aktivitäten in den Bereichen Industrie und Schiffbau konzentrierte.

1988 verband sich BBC mit der schwedischen ASEA zum global tätigen Elektrokonzern ABB. Obschon inzwischen bedeutungslos geworden, kamen damit die ursprünglich konkurrierenden Dampfturbinentechnologien von Parsons und de Laval unter einen Hut. Nach dem Fall des Eisernen Vorhangs entstanden in Osteuropa neue, kostengünstige Fertigungsstätten. Turbomaschinen werden seit-



Schnittmodell der ABB-Gasturbine Typ 24/26 von 1994 mit zweistufiger Verbrennung. Von rechts nach links: Lufteintritt, Verdichter, Hochdruck-Brennkammer, Hochdruck-Turbine, Niederdruck-Brennkammer, Niederdruck-Turbine, Abgasaustritt

her in einem globalen Verbund hergestellt – das heisst, die wichtigsten Teile einer Anlage treffen erst auf dem Montageplatz zusammen. Ein vereinfachter Datenaustausch über weltweite elektronische Netze macht dies möglich. Mit ihrem Werk Birr wurde ABB Schweiz zu einem «Center of Excellence» für hochtechnische Turbinenschaukeln, Dampf- und Gasturbinen- sowie für Turbogenerator-Rotoren.

1999 schloss sich die ABB Kraftwerke AG mit der Alstom Power zu einem globalen Joint Venture für Kraftwerkstechnik zusammen. Die erste Silbe im Namen Alstom verrät, dass das französische Unternehmen seine Wurzeln im Elsass hat. Durch Übernahme der Firma Rateau und der ehemaligen französischen BBC-Tochter CEM gelangte Alstom in den siebziger Jahren in den Besitz einer modernen Turbinentechnologie. Völlig überraschend veräusserte ABB im Jahr 2000 auch den restlichen Anteil ihres Kraftwerksgeschäftes an Alstom. Kurze Zeit vorher war dieser Sektor noch als Kernaktivität bezeichnet worden. Ist es Ironie des Schicksals, dass sich ABB genau hundert Jahre nach dem Beginn der Dampfturbinenentwicklung von dieser Sparte trennte? Immerhin spielt die Entwicklung von Gasturbinen in der Schweiz weiterhin eine wichtige Rolle. Alstom Power beschäftigt in Baden und Birr rund 5000 Mitarbeiter. Für unsere Wirtschaft bleiben Stodolas grundlegende Arbeiten auch 60 Jahre nach seinem Tod noch von Bedeutung.

Niedergang

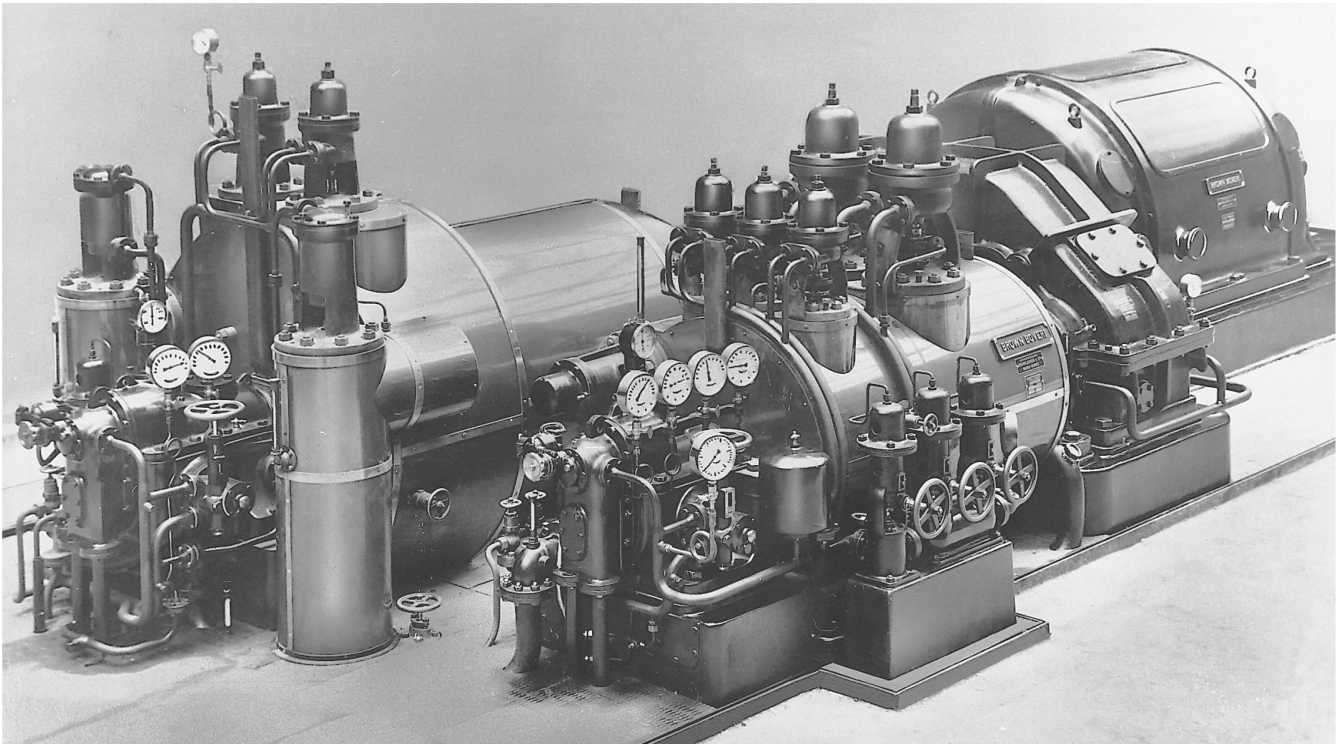
Eine Reihe renommierter Firmen wie Brown Boveri, Escher Wyss, Maag, Oerlikon, Saurer und Sulzer sind leider zu einem Schatten ihrer selbst geworden oder sogar erloschen. Nicht immer waren wirtschaftliche

Krisen allein für den Abstieg verantwortlich. Teilweise lag die Schuld bei Finanzleuten, die zur Vergrösserung der liquiden Mittel und um die Aktienkurse in die Höhe zu treiben, Sachwerte und Know-how verschleuderten. Aber auch Manager, denen das eigene Wohl oft näher stand als die Verantwortung für die ihnen anvertrauten Mitarbeiter und Werte, trugen zum Niedergang bei. Ohne Rücksicht auf Traditionen und leider vielfach auch ohne substanzielles Fachwissen wurden, kurzfristiger Scheinerfolge wegen, solide Unternehmen ausgehöhlt oder verscherbelt. Abstrakte Begriffe wie «Corporate Identity» und unverbindliche Definitionen von Leitbildern traten an die Stelle von menschlicher Führung. Aber auch der verbreitete Irrglaube, die Qualität von Leistungen und Produkten sei durch Marketing beliebig ersetzbar, sowie ein genereller Wertezwerg sind Gründe für diesen Abstieg. Materialismus und Individualismus verdrängen zunehmend moralische Werte wie Ehrlichkeit, Fleiss und Bescheidenheit. Überall ist eine Nivellierung nach unten feststellbar, die mit einer wachsenden Kommerzialisierung aller Lebensbereiche einhergeht. Angesichts der heutigen oberflächlichen «Lifestyle»- und «Fun»-Gesellschaft wären wohl auch Stodola Zweifel gekommen, ob vielleicht in Spenglers Untergangsphilosophie nicht doch ein Körnchen Wahrheit steckt!

Allen Bedenken zum Trotz bleibt die Hoffnung, dass im Verborgenen immer noch – oder von neuem – Menschen im Geiste Aurel Stodolas handeln, als Vorbilder wirken und – eigene Ansprüche selbstlos zurückstellend – die Jugend zu verantwortungsvollem Umgang mit der Technik und zu wertvollen Stützen unserer Gesellschaft heranbilden.

Chronologie

- 1859 Aurel Stodola wird am 10. Mai in St. Nikolaus in der Liptau (Slowakei) geboren.
- 1876 Stodola erwirbt an der Realschule Kaschau die Matura.
- 1877 Stodola nimmt das Studium an der polytechnischen Schule in Budapest auf.
- 1881 Stodola erhält am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich das Diplom als Maschineningenieur mit Auszeichnung.
- 1883 Stodola hilft mit beim Wiederaufbau des durch einen Brand zerstörten väterlichen Geschäfts in St. Nikolaus in der Liptau.
- 1887 Aurel Stodola heiratet Darina Palka.
- 1889 Geburt von Stodolas Tochter Helene
- 1891 Geburt von Stodolas Tochter Olga
- 1892 Stodola tritt die Professur für Maschinenkonstruktion am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich an.
- 1896 Stodola besucht als Jury-Mitglied die Schweizerische Landesausstellung in Genf.
- 1900 Am Eidgenössischen Polytechnikum wird das Maschinenlabor in Betrieb genommen.
- 1901 Die Universität Zürich verleiht Stodola den Ehrendokortitel.
- 1903 Stodolas Lehrbuch «Die Dampfturbine» erscheint und wird zum Bestseller.
- 1905 Stodola und seine Familie erhalten das Bürgerrecht der Stadt Zürich.
- 1908 Der Verein Deutscher Ingenieure verleiht Stodola die Grashof-Denkmünze.
- 1910 Stodolas Lehrbuch «Die Dampfturbine» erscheint in 4. Auflage.
- 1914 Stodola begutachtet die an der Schweizerischen Landesausstellung in Bern präsentierten Dampfturbinen und Turbogebälde und publiziert darüber einen Aufsatz.
- 1924 Die 6. und letzte Auflage von Stodolas Lehrbuch «Dampf- und Gasturbinen» erscheint.
- 1927 Stodola ermittelt den Wärmeaustausch und die Wärmespannungen in der Holzwarth-Gasturbine und erstellt darüber einen umfangreichen Bericht.
- 1929 Stodola tritt im Alter 70 Jahren vom Lehramt zurück. Nachfolger auf dem nun geteilten Lehrstuhl werden seine ehemaligen Schüler Henri Quiby und Gustav Eichelberg. Freunde und Schüler publizieren zu Ehren Stodolas eine 600-seitige Festschrift.
- 1931 Stodolas Buch «Gedanken zu einer Weltanschauung vom Standpunkte des Ingenieurs» liefert einen wichtigen Beitrag zur Technik-Diskussion.



*Dampfturbinengruppe
für das Fernheizkraft-
werk der ETH Zürich
1934*

1935
1939

Stodolas Ehefrau Darina stirbt im Alter von 73 Jahren.
Der 80-jährige Stodola leitet bei BBC die Abnahmeversuche an der ersten Gasturbine zur Stromerzeugung. Diese Turbine wird an der Landesausstellung in Zürich vor dem Publikum täglich in Betrieb gesetzt.

1940

Stodola folgt einer Einladung zur Betriebsbesichtigung bei BBC in Baden.

1941

Die britische Institution of Mechanical Engineers verleiht Stodola die James-Watt-Medaille.

Die American Society of Mechanical Engineers ernennt Stodola zu ihrem Ehrenmitglied.

1942

Am 25. Dezember stirbt Aurel Stodola im 84. Altersjahr in Zürich.

1959

Die ETH Zürich feiert Stodolas 100. Geburtstag.

1980

Die ETH Zürich veranstaltet ein Kolloquium mit ehemaligen Stodola-Schülern, an dem diese über Erinnerungen an ihren Lehrer berichten.



*Tschechoslowakische
Briefmarke zu Aurel
Stodolas 100. Geburts-
tag 1959*

Wichtigste Quellen und Literatur

Archive

Stodola-Archiv der ETH-Bibliothek, Spezialsammlungen, Zürich.
Historisches Archiv der ABB Schweiz, Baden.

Literatur

Aurel Stodola hat neben Lehrbüchern und Vorlesungsskripten rund 60 wissenschaftliche Berichte und Aufsätze verfasst. Ein Verzeichnis befindet sich in der Stodola-Festschrift von 1929 und eine Ergänzung dazu in der «Schweizerischen Bauzeitung». Band 121, Nr. 7, S. 77–78. 1943.

Büchi Alfred J.: Über Verbrennungskraftmaschinen. «Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen». Nr. 20–22, S. 313–351. 1909.
Über die Entwicklungsetappen der Büchi-Abgasaufladung. «Schweizerische Bauzeitung». Bd. 70, Nr. 16–18, S. 217–269. 1952.

Geschichtliches über den Ursprung der Idee, einige grundlegende Patente und die ersten kommerziellen Anwendungen der Büchi-Abgasaufladung an Brennkraftmaschinen. «Motortechnische Zeitschrift». Bd. 18, Nr. 6, S. 171–175. 1957.

Carnot Sadi: Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen. Neuausgabe. Braunschweig 1988.

Diesel Rudolf: Die Entstehung des Dieselmotors. Berlin 1913.

Dietrich Max: Die gebräuchlichen Dampfturbinen-Systeme für Land- und Schiffszwecke. Rostock 1906.

Eichelberg Gustav/
Quiby Henri: † Aurel Stodola. «Schweizerische Bauzeitung». Bd. 121, Nr. 7, S. 73–78. 1943.

Eyermann / Schulz: Die Gasturbinen. Ihre geschichtliche Entwicklung, Theorie und Bauart. Berlin 1917.

Faber Paul: Zum Tod von Professor Dr. Aurel Stodola. «Wir und unser Werk» (BBC-Hauszeitung). Nr. 2, S. 59. 1943.

Feuchte Martin: Praxisorientierte Technikwissenschaften. Zur Gründung des Maschinenlaboratoriums am Zürcher Polytechnikum und dem Werk Aurel Stodolas. Düsseldorf 2000.

Fruttschi Hans Ulrich: Die neuen Gasturbinen GT24 und GT26 – historischer Hintergrund des «Advanced Cycle System». «ABB Technik». Nr. 1, S. 20–25. 1994.

Gentsch Wilhelm: Dampfturbinen. Entwicklung, Systeme, Bau und Verwendung. Hannover 1905.

- Gille Walter: Witiker Strassennamen berühmter Persönlichkeiten: Aurel Stodola, Vater der Dampfturbinen-Theorie. «Quartier-Anzeiger für Witikon». Bd. 2, Nr. 2, S. 25. 1976.
- Guggenbühl Gottfried (Hg.): Eidgenössische Technische Hochschule 1855–1955. Zürich 1955.
- Honegger Emil (Hg.): Festschrift für Professor Dr. A. Stodola zum 70. Geburtstag. Zürich 1929.
- Holzwarth Hans: Die Gasturbine. Theorie, Konstruktion und Betriebsergebnisse von zwei ausgeführten Maschinen. München / Berlin 1911.
- Holzwarth Hans / Meininghaus Ulrich: Die Entwicklung der Holzwarth Gasturbine. Mülheim-Ruhr 1938.
- Jenny Ernst: Der BBC-Turbolader. Geschichte eines Schweizer Erfolges. Basel / Boston / Berlin 1993.
- Jung Ingvar: Dr. de Laval and his early work with the Steam Turbine. Stockholm 1957.
- Knecht Walter: Geschichte der Verbrennungsmotoren-Entwicklung in der Schweiz. Umiken 1993.
- Kraft E. A.: Amerikas Dampfturbinenbau. Berlin 1927.
- Lang Norbert: Johann Georg Bodmer (1786-1864), Maschinenbauer und Erfinder. «Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik». Bd. 45. Zürich 1987.
- Matschoss Conrad: Die Entwicklung der Dampfmaschine. Berlin 1908.
- Meyer Adolf: Die Gleichdruck-Gasturbine. Ihre Geschichte, ihr heutiger Stand und ihre Aussichten für die nahe Zukunft. «Brown Boveri Mitteilungen». Bd. 26, Nr. 6, S. 127–140. 1939.
- Niemitz Hans-Ulrich: Dampfturbinenkonstruktion bei der Brown Boveri & Cie AG nach dem Zweiten Weltkrieg. Frankfurt/M. 1993.
- Noack Walter: Lebenslauf und beruflicher Werdegang von ihm selbst erzählt. Vervielfältigtes Typoskript. Baden 1942.
- Oechsli Wilhelm(Hg.): Festschrift zur Feier des fünfzigjährigen Bestehens des Eidgenössischen Polytechnikums. Frauenfeld 1905.
- Parsons Charles A.: The Steam Turbine. Cambridge 1911.
- Pfenninger Hans: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft der Brown Boveri Gasturbine. «Motortechnische Zeitschrift». Bd. 27, Nr. 11. 1966.
- Reuss Hans-Jürgen: Hundert Jahre Dieselmotor. Idee; Patente; Lizenzen; Verbreitung. Stuttgart 1993.
- Richardson Alex: The Evolution of the Parsons Steam Turbine. London 1911.
- Sako Hoess Renata: Slowakei. Land und Leute. Köln 2001.
- Sarkowski Heinz: Der Springer-Verlag. Stationen seiner Geschichte. Teil I: 1842–1945. Berlin / Heidelberg 1992.
- Sass Friedrich: Geschichte des deutschen Verbrennungsmotorenbaues von 1860 bis 1918. Berlin 1962.

- Seippel Claude: Die Entwicklung der Brown Boveri Axialverdichter. «Brown Boveri Mitteilungen». Bd. 27, Nr. 5, S. 108–113. 1940.
From Stodola to Modern Turbine Engineering. The Seventh Parsons Memorial Lecture. London 1953.
- Sinell Emil: Beschreibung und Betriebsvorschriften für Turbodynamos Bauart Brown-Boveri-Parsons. Berlin o. J.
- Sitterding Heinrich (Hg.): 150 Jahre Escher Wyss, 1805–1955. Zürich 1955.
- Somer Jack A. / Behling Helmut: From the Mountains to the Seas. The Sulzer Diesel Engine. Winterthur 1998.
- Sosnowski K.: Roues et Turbines à Vapeur. Paris 1897.
- Spengler Oswald: Der Mensch und die Technik. München 1931.
- Stodola Aurel: Die Dampfturbinen und die Aussichten der Wärmekraftmaschinen. 1. Auflage: Berlin 1903. 6. (letzte) Auflage mit dem Titel: Dampf- und Gasturbinen. Berlin 1924.
Leistungsversuche an einem Dieselmotor mit Büchischer Aufladung. «Zeitschrift des VDI». Bd. 72, Nr. 13, S. 421–428. 1928.
Weltanschauung vom Standpunkte des Ingenieurs. 2. Auflage: Berlin 1932.
Leistungsversuche an einer Gleichdruck-Gasturbine der AG Brown Boveri & Cie. in Baden. «Brown Boveri Mitteilungen». Bd. 27, Nr. 4, S. 79–83. 1940.
- Traupel Walter: Die Entwicklung der Gasturbine in der Schweiz. Gesamtbericht der Fünften Weltkraftkonferenz in Wien 1956. Bd. 11, S. 3765–3792. Wien 1957.
Thermische Turbomaschinen. 3. Auflage. Berlin 1977.
- Voda Juraj: Aurel Stodola, 1859–1942. Denkschrift zum 100. Geburtstag. Bratislava 1959.
- Vykoupil Susanna: Slowakei. München 1999.
- Wilson Stuart S.: Sadi Carnot, Technik und Theorie der Dampfmaschine. «Spektrum der Wissenschaft». Nr. 10, S. 98–109. 1981.
- Diverse Autoren: Gedenkfeier für Aurel Stodola an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich am 10./11. Mai 1959 anlässlich seines 100. Geburtstages. Sonderdruck aus der «Schweizerischen Bauzeitung», Nr. 20 vom 14. Mai 1959.

Bildnachweis

Die mit «Bild ETH» bezeichneten Bilder stammen aus dem Bildarchiv der ETH-Bibliothek, Zürich.

Bilder ohne Vermerk stammen aus dem ABB-Archiv.

Adresse des Autors:

Norbert Lang
Dipl. Maschineningenieur HTL/STV
Schulstrasse 2
5415 Nussbaumen