

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 92 (1974)
Heft: 11: 19th Annual International Gas Turbine Conference and Products Show: March 31-April 4, 1974, Zürich, Kongresshaus

Artikel: Über schweizerische Beiträge zur Gasturbinenentwicklung
Autor: Ostertag, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-72287>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.02.2025

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

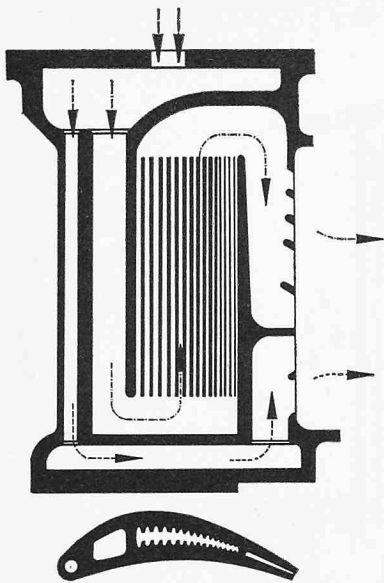


Bild 12. Schematische Darstellung der Kühlluftführung im Leitschaufelsegment des Bildes 11

scheidenerem Masse auch der Wirkungsgrad, wird in Zukunft noch wesentlich erhöht werden können. Die Steigerung der Eintrittstemperatur, kombiniert mit wirksamen Kühlsystemen, stellt einen der Pfeiler dar, auf denen diese Entwicklung beruht.

2. Die heute zum Einsatz gelangenden Kühlsysteme bieten gute Gewähr für Betriebssicherheit, indem sie erlauben, die Metalltemperaturen unterhalb der durch Festigkeit und Korrosion gegebenen Grenzen zu halten. Letztere dürften sich nur noch unwesentlich steigern lassen, da die modernen Superlegierungen bereits hochentwickelte Produkte

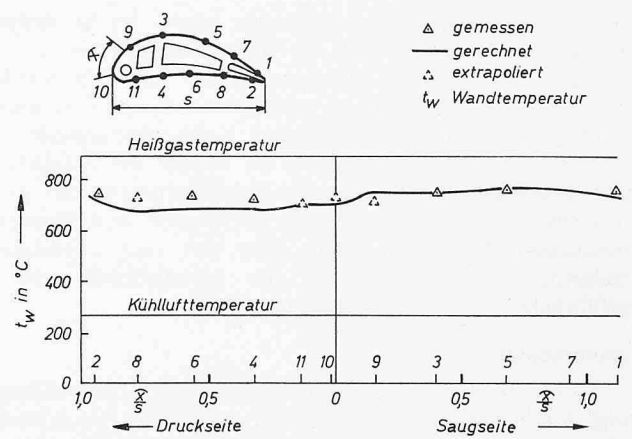


Bild 13. Vergleich der an einer Prototypmaschine gemessenen Temperaturverteilung mit den vorausgerechneten Werten für das Leitschaufelsegment des Bildes 11

darstellen und die heutige Schutzschichttechnik einen guten Stand erreicht hat. Die Verfahren zur Schaufelkühlung hingegen können hinsichtlich Wirksamkeit noch entscheidend verbessert werden.

Adresse des Verfassers: Dr.-Ing. V. Beglinger, Leiter Entwicklung, in Firma BST Brown Boveri-Sulzer Turbomaschinen AG, Escher-Wyss-Platz, Postfach, 8023 Zürich.

Wir danken der VGB, Technische Vereinigung der Grosskraftwerkbetreiber e. V., Essen, für die freundliche Genehmigung zur Wiedergabe dieses Aufsatzes, der in der «VGB Kraftwerkstechnik», 54 (1974), Heft 1, S. 46-52, erschienen ist.

Über schweizerische Beiträge zur Gasturbinenentwicklung

DK 621.438

Im Hinblick auf die Gasturbinentagung, welche *The American Society of Mechanical Engineers* (ASME) in Zusammenarbeit mit dem SIA vom 31. März bis 4. April 1974 im Kongresshaus in Zürich veranstaltet, dürfte es angezeigt sein, an die Arbeiten zu erinnern, welche in schweizerischen Forschungsstätten und Unternehmungen der Maschinenindustrie auf diesem Gebiet geleistet worden sind.

1. Grundlagenforschung

Die Arbeiten betrafen zunächst die Klärung der theoretischen Grundlagen und das Ausarbeiten von Berechnungsverfahren. Das geschah hauptsächlich auf den Gebieten der Thermodynamik und der Strömungslehre. Zu nennen wären hier in erster Linie die bahnbrechenden Untersuchungen von Prof. Dr. A. Stodola, der von 1892 bis 1929 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich gewirkt hatte. Schon in der 1905 erschienenen dritten Auflage seines epochemachenden Buches «Die Dampfturbinen und die Aussichten der Wärmekraftmaschinen» findet sich ein Abschnitt über Gasturbinenprobleme. Bedeutungsvoll wurde die von Stodola entworfene Entropietafel (T, s -Tafel) für Luft- und Rauchgasgemische, die genauere Untersuchungen verschiedener Prozessabläufe erlaubt. In den späteren Auflagen (die sechste erschien 1925) werden die damals vorgeschlagenen Verfahren durchgerechnet und beurteilt.

Das einfachste Verfahren lässt sich an Hand von Bild 1 verfolgen. Bei ihm wird verdichtete Luft in einer Brennkammer 4 in ein Gemisch von Luft und Rauchgasen von hoher

Temperatur umgesetzt, das anschliessend in einer Turbine 2 unter Arbeitsleistung auf den Umgebungsdruck expandiert. Zur Verdichtung der Luft ist ein Kompressor 1 erforderlich, dessen Antrieb bei den heute üblichen Arbeitsbedingungen etwa $\frac{2}{3}$ der Turbinenleistung erfordert. Eine Verbesserung dieses offenen Prozesses lässt sich dadurch erzielen, dass die verdichtete Luft in einem Wärmeaustauscher 5 durch die heissen Abgase der Turbine vorgewärmt wird. Es ist leicht einzusehen, dass eine auf diese Weise arbeitende Gasturbinenanlage nur dann wirtschaftlich konkurrenzfähig sein kann, wenn es gelingt, die Luft mit geringen Verlusten zu verdichten, wenn also der Kompressor aerodynamisch optimal durchgebildet ist. Dazu bedurfte es einer eingehenden Grundlagenforschung.

Hiefür waren die Untersuchungen bedeutungsvoll, die über die Luftströmung um Flugzeugtragflügel im Institut für Strömungsforschung der Universität Göttingen unter der Leitung von Prof. Dr. Ludwig Prandtl durchgeführt worden waren. Sie hatten schon 1918/19 zur Aufstellung einer Tragflügeltheorie geführt. Einer der Mitarbeiter Prandtls in der Zeit von 1921 bis 1927 war Jakob Ackeret, der an der ETH in Zürich studiert, 1920 bei Stodola diplomiert hatte und von 1931 bis 1967 als Professor für Aerodynamik an der ETH tätig war. Im gleichnamigen ETH-Institut, dem er vortand, entstand 1933/34 der erste grosse Überschall-Windkanal mit kontinuierlichem Betrieb, in welchem unter anderem auch Strömungsvorgänge, wie sie in den Schaufelgittern von Turbomaschinen vorkommen, untersucht wurden.

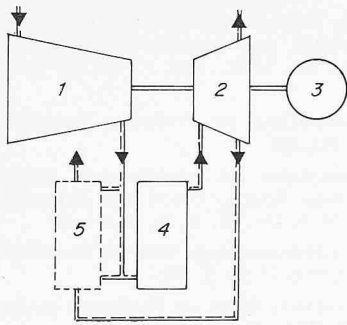
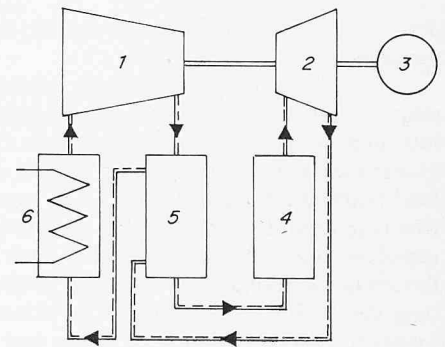


Bild 1 (links). Prinzipschema der Gasturbine nach dem offenen Prozess

- | | |
|--------------|--------------------|
| 1 Kompressor | 4 Lufterhitzer |
| 2 Turbine | 5 Wärmeaustauscher |
| 3 Generator | |

Bild 2 (rechts). Prinzipschema der Gasturbine mit geschlossenem Kreislauf

- | | |
|--------------|--------------------|
| 1 Kompressor | 4 Brennkammer |
| 2 Turbine | 5 Wärmeaustauscher |
| 3 Generator | 6 Luftkühler |



2. Entwicklungsarbeiten am offenen Gasturbinenprozess

Zwischen den Forschungsinstituten der Hochschulen und denen der Industrie bestand seit eh und je eine enge Zusammenarbeit. Das gilt namentlich auch für die Strömungsforschung und die Gasturbinenentwicklung. Diese wurde zuerst von der AG Brown, Boveri & Cie. in Baden (BBC), an die Hand genommen¹⁾. Man verfügte dort über reiche Erfahrungen sowohl auf dem Gebiet des Dampfturbinenbaues als auch auf dem der Abgasturboaufladegebläse für Verbrennungsmotoren, die in massgebenden Beziehungen eine Vorstufe der Gasturbine bilden²⁾. Bereits 1931 wurde bei BBC der erste vielstufige Achsialkompressor gebaut und geprüft, wobei man die Schaufeln nach einem Göttinger Tragflügelprofil formte. Eine zweite Versuchsmaschine, zu deren Konstruktion die an der ersten gewonnenen Ergebnisse verwertet wurden, erreichte in elf Stufen ein Druckverhältnis von 3,4 und einen isentropen Wirkungsgrad von 81%. Auf Grund dieses guten Ergebnisses konnte die erste industrielle Anlage von 4000 kW Klemmenleistung gebaut und 1939 dem Betrieb übergeben werden. Ihr folgten später eine grosse Zahl weiterer Maschinen mit Leistungen bis zu 60 MW. Die Arbeiten standen anfänglich unter der Leitung von Direktor Dr. Adolf Meyer, seit 1946 unter der von Direktor Dr. C. Seippel und dessen Mitarbeiter Dr. H. Pfenninger.

Das offene Verfahren zeichnet sich durch geringen apparativen Aufwand, kleines Gewicht je Leistungseinheit und kleinen Raumbedarf aus. Die nach ihm arbeitenden Gasturbinen lassen sich rasch anfahren und ertragen viele Inbetriebsetzungen³⁾. Sie eignen sich daher vorzüglich für Spitzenkraftwerke, Reserveanlagen, Energieerzeugung an Orten ohne Wasser sowie für den Antrieb von leichten Fahrzeugen und ganz besonders von Flugzeugen. Auch auf diesem Gebiet wurden in der Schweiz beachtenswerte Leistungen vollbracht⁴⁾. Die Gesamtwirkungsgrade liegen bei 18 bis 20% ohne und bei 23 bis 25% mit Wärmeaustauscher.

Während des Zweiten Weltkrieges haben auch Gebrüder Sulzer in Winterthur [13] und die Maschinenfabrik Oerlikon Gasturbinen nach dem offenen Verfahren entwickelt. Bemerkenswert ist dabei, dass Oerlikon, im Gegensatz zu allen andern Firmen, Radialkompressoren baute, die dank sorgfältiger aerodynamischer Durchbildung mit nur drei Stufen ebenso hohe Wirkungsgrade erreichten, wie die sonst üblichen Achsialkompressoren mit 13 bis 15 Stufen⁵⁾. Diese Bauweise ist später von Escher Wyss übernommen worden.

¹⁾ Eine Übersicht über die Entwicklungsarbeiten dieser Firma ist in [5], [9], [15] und [16] zu finden.

²⁾ Über das Aufladeverfahren und seinen geschichtlichen Werdegang hat A. Büchi in [4] berichtet.

³⁾ Nähere Angaben hierüber finden sich in [14].

⁴⁾ Hierzu sei auf den Aufsatz von H. Pfenninger in [16] hingewiesen.

⁵⁾ Eine eingehende Beschreibung der Gasturbinenanlage der Maschinenfabrik Oerlikon hat der Leiter der betreffenden Abteilung, W. Karrer, in [3] verfasst. Er weist in [8] auf interessante Möglichkeiten eines Verbundbetriebes mit Dampfturbinen hin.

3. Verfahren mit geschlossenem Kreislauf

Weitere Verbesserungen ergibt das Verfahren mit geschlossenem Kreislauf. Dieses wurde 1935 von J. Ackeret und C. Keller der Firma Escher Wyss vorgeschlagen, die es aufgriff und eine Versuchsanlage von 2000 kW baute. Bei ihm tritt an die Stelle der Brennkammer ein Lufterhitzer 4 (Bild 2); die Turbine 2 erhält reine Druckluft von etwa 700 °C. Diese wird nach dem Wärmeaustauscher 5 im Luftkühler 6 möglichst tief gekühlt und dann dem Kompressor 1 wieder zugeleitet⁶⁾.

Hauptsächliche Vorteile dieses Verfahrens sind: Erstens die Möglichkeit, die Arbeitsdrücke frei wählen zu können. Für grosse Leistungen arbeitet man mit hohen Drücken und erhält so verhältnismässig kleine Abmessungen. Zweitens die Leistungsregelung durch Verändern des Druckpegels, wobei das Druckverhältnis, die Temperaturen, die Geschwindigkeiten und damit der Prozesswirkungsgrad unverändert bleiben. Drittens kann statt Luft ein anderes Gas verwendet werden, so vor allem Helium, das besonders günstige Eigenschaften aufweist und sich namentlich dann eignet, wenn es zugleich als Kühlmittel von Hochtemperaturreaktoren dient. Diese Möglichkeit hat J. Ackeret schon 1945 untersucht. Dabei können Temperaturen von 1000 °C und mehr angewendet werden, wobei man die heissen Teile aus Titan herstellt. Der Gesamtwirkungsgrad lässt sich so von etwa 32% bei Luft von 700 °C⁷⁾ auf Werte steigern, die über denen moderner Dampfkraftwerke liegen werden. Viertens lässt sich zum Erwärmen des Arbeitsmittels jeder Brennstoff verwenden. Man kann sich somit der Marktlage weitgehend anpassen. Eine Verschmutzung der Turbine ist nicht zu befürchten. Vorteilhaft ist schliesslich bei beiden Verfahren die Möglichkeit, die anfallende Abwärme für Städteheizung und Warmwasserversorgung auszunützen, wofür heute ein grosses Bedürfnis besteht. Tatsächlich eignen sich Gasturbinen für Fernheizkraftwerke besonders gut.

Die Firma Escher Wyss hat eine beträchtliche Zahl von Anlagen mit geschlossenem Kreislauf mit Leistungen bis 14 MW ausgeführt, die sich im Betrieb gut bewährt haben⁸⁾. Gegenwärtig steht eine mit Helium arbeitende, ölgefeuerte Versuchsanlage von 50 MW (elektrisch) und etwa 50 Gcal/h Heizleistung in Oberhausen (Rheinland) im Bau. Man will mit ihr Erfahrungen für den Betrieb einer später zu errichtenden Kraftwerkanlage von 300 MW mit Hochtemperaturreaktor sammeln.

Nach den erfolgten Firmenzusammenschlüssen liegen Entwicklung, Bau und Verkauf von Gasturbinenanlagen in

⁶⁾ Die aerodynamische Wärmekraftanlage beschreiben die Erfinder in [1].

⁷⁾ H. Quiby hat an der Versuchsanlage von nur 2000 kW einen besten Gesamtwirkungsgrad von 31,5% gemessen, worüber er in [2] berichtet.

⁸⁾ Über die geschichtliche Entwicklung, den heutigen Stand und über Zukunftsprobleme berichtet F. Taygun in [7] und [12].

der Schweiz in den Händen der Brown, Boveri-Sulzer Turbomaschinen AG (BST)⁹⁾ 10).

Abschliessend darf festgestellt werden, dass die Arbeiten sehr beachtlich sind, welche schweizerische Forschungsinstitute und Maschinenfabriken auf dem Gebiete des Gasturbinenbaues geleistet haben. Sie fanden denn auch im Ausland, namentlich auch in den USA, grosse Beachtung. Gewiss trug dazu der Umstand bei, dass unser Land vom Krieg verschont blieb. Wir sind uns aber auch bewusst, dass diese Bevorzugung verpflichtet, und zwar nicht zu weiterer Steigerung des Wohlstandes, sondern zu tatkräftiger Mitarbeit am weltweiten Werk, Ordnung zu halten und Not zu lindern.

A. Ostertag

⁹⁾ Diese Firma hat neuerdings einen ARI-Isothermkompressor für grosse Leistungen entwickelt, bei welchem der Niederdruckteil als Achsialmaschine mit verstellbaren Leitschaufeln ausgebildet ist, während der Hochdruckteil aus drei Radialstufen besteht.

¹⁰⁾ Dass sich die Gasturbine auch noch auf andere Weise mit Erfolg verwirklichen lässt, zeigt R. Huber in [6] und [11].

Literaturverzeichnis

- [1] J. Ackeret und C. Keller: Eine aerodynamische Wärmekraftanlage, SBZ Bd. 113 (1939), Nr. 19, S. 229.
- [2] H. Quiby: Comptes rendus des essais de la turbine aérodynamique Escher Wyss-AK. SBZ Bd. 125 (1945), H. 23, S. 269 und H. 24, S. 279.
- [3] W. Karrer: Die Gasturbinen-Versuchsanlage der Maschinenfabrik Oerlikon. SBZ 66 (1948), Nr. 21, S. 291–296.
- [4] A. Büchi: Über die Entwicklungs-Etappen der Büchi-Abgasturboaufladung, SBZ 70 (1952), Nr. 16, S. 217; Nr. 17, S. 244; Nr. 18, S. 263.
- [5] H. Pfenninger: Wirtschaftliche Betrachtungen zur Erzeugung von Energiespitzen durch Gasturbinen und Betriebserfahrungen mit dem Spitzenkraftwerk Beznau der NOK. SBZ 73 (1955), H. 9, S. 115–119.
- [6] R. Huber: Über die Weiterentwicklung der Freikolben-Generatoren. SBZ 75 (1957), H. 24, S. 361–368.
- [7] F. Taygun: Heissluft-Turbinenanlagen mit geschlossenem Kreislauf. Geschichtliche Entwicklung, heutiger Stand und Zukunftsprobleme. SBZ 75 (1957), H. 24, S. 374–381, H. 25, S. 394–401.
- [8] W. Karrer: Die Oerlikoner Gasturbinenanlage Bône der Electricité et de Gaz d'Algérie. SBZ 75 (1957), H. 24, S. 386.
- [9] W. P. Auer: Die Brown-Boveri-Gasturbinen im Kraftwerk «Luigi Orlando» in Livorno. SBZ 75 (1957), H. 24, S. 390.
- [10] G. Deuster: Die Heissluftturbine in der Heizwirtschaft und das Heizkraftwerk Oberhausen. SBZ 80 (1962), H. 33, S. 571–578.
- [11] R. Huber: Über den gegenwärtigen Stand der Freikolbentechnik. SBZ 80 (1962), H. 35, S. 603–609.
- [12] F. Taygun: Die Gasturbine mit geschlossenem Kreislauf als Mehrzweckanlage. SBZ 84 (1966), H. 10, S. 175–190.
- [13] R. A. Strub: Erfahrungen an industriellen Gasturbinen. SBZ 84 (1966), H. 10, S. 191–197.
- [14] H. R. Bolliger: Gasturbinen für Spitzenlast-Erzeugung. SBZ 84 (1966), H. 10, S. 197–202.
- [15] H. Pfenninger: Axialverdichterbeschaukelung für grosse Fördermengen. SBZ 88 (1970), H. 24, S. 535–541.
- [16] H. Pfenninger: Die Gasturbinenabteilung bei BBC, Rückblick und heutiger Stand. SBZ 88 (1970), H. 30, S. 683–691.
- [17] F. Salzmann: Zur Theorie der Regelung von aerodynamischen Wärmekraftanlagen mit geschlossenem Kreislauf. «Schweizerische Bauzeitung» 65 (1947), H. 10, S. 123 und H. 11, S. 137.
- [18] F. Taygun und H. Fruttschi: Die Heissluftturbineanlage mit Naturgasfeuerung in Toyotomi. «Schweizerische Bauzeitung» 76 (1958), H. 39, S. 579.

Jubiläum bei Escher Wyss

DK 621.438:061.5

Im Jahre 1954 kam im Werk der Escher Wyss GmbH in Ravensburg eine im geschlossenen Kreislauf arbeitende Gasturbinenanlage von 2300 kW in Betrieb. Sie hat seither ohne wesentliche Störungen während 100 000 Stunden elektrische Energie und Wärme für die Versorgung der dortigen Fabrikanlagen geliefert.

Dieses für eine Pionieranlage bemerkenswerte Ergebnis verdient im Kreise der beteiligten und interessierten Fachleute gebührend gefeiert zu werden. So fanden sich am 7. Dezember 1973 rund dreissig Gäste und Angehörige der Arbeitsgemeinschaft, welche Entwicklung, Konstruktion, Ausführung und Betrieb durchgeführt hatte, im Werk Ravensburg zusammen. Nach einer Begrüssung durch Direktor M. Henzi schilderte Prof. Dr. C. Keller die Entwicklung der nach ihren Erfindern J. Ackeret und C. Keller benannten AK-Anlage. Anschliessend gab Dipl.-Ing. G. Deuster, Vorsitzender der Energieversorgung Oberhausen, interessante Betriebserfahrungen bekannt, die er an der im dortigen Heizkraftwerk 1957 aufgestellten Heissluftturbineanlage von 15 000 kW elektrischer Nennleistung gesammelt hatte (Betriebsstundenzahl bis heute rund 85 000).

Beide Anlagen sind für Kohlenstaubfeuerung gebaut. Sie können aber auch mit Leichtöl oder Schweröl betrieben werden. Sogar der Einbau von Gasbrennern ist vorgesehen (Naturgas in Ravensburg bzw. Koksofengas in Oberhausen), so dass man sich sehr weitgehend den günstigsten Liefermöglichkeiten für Brennstoffe anpassen kann.

Die Anlage im Werk Ravensburg stand bei der Besichtigung in Betrieb. Die nach über 70 000 Betriebsstunden ausgewechselten Teile, die den hohen Temperaturen ausgesetzt wa-

ren, im besonderen der Düsenkasten am Turbineneintritt und der Turbinenrotor, zeigten keine Ansätze von Verunreinigungen. Eindrücklich war auch der Rundgang durch die grosszügig angelegten Werkstätten, die mit in Bearbeitung befindlichen Maschinenteilen gefüllt waren. Besonderes Interesse fanden vor allem die grossen Stücke von Wasserturbinen und Kugelschiebern sowie von Papiermaschinen und Schiffspropellern mit verdrehbaren Schaufeln.

Beim Mittagessen im Gästeraum des Escherhauses entspann sich ein reges Gespräch über neuere und neuste Entwicklungen im Bau von thermischen Kraftmaschinen, von Kernreaktoren und über die im Hinblick auf die zunehmenden Versorgungsschwierigkeiten mit Rohöl besonders aktuelle Wärmekraftkupplung. So kam unter anderem auch die besondere Eignung des geschlossenen Kreislaufprozesses in Verbindung mit Hochtemperatur-Kernreaktoren und Helium als Betriebsmittel zur Sprache, auf die Prof. J. Ackeret und C. Keller schon im Jahre 1945 hingewiesen hatten, und worüber in [12] bemerkenswerte Vorschläge sowie erste Ausführungen bekanntgegeben wurden. Dabei begeisterte man sich auch an kühnen Möglichkeiten der Gewinnung von Nutzenergien, wozu neueste Ergebnisse der physikalischen Forschung anregten.

In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, dass die erste AK-Anlage von 2000 kW Leistung auf Grund eines im Jahre 1935 gefassten Beschlusses der Geschäftsleitung in Zürich nach 2 1/2-jähriger Entwicklungs- und Bauzeit verwirklicht worden war [1]. Sie hat während der Kriegsjahre und der anschliessenden Zeit erhöhten Energiemangels mitgeholfen, die Escher-Wyss-Werke in Zürich mit elektrischer Ener-