Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 88 (1970)
Heft: 30: Dr. C. Seippel 70 Jahre, Zweites Sonderheft

Artikel: Die Gasturbinenabteilung bei BBC: Rückblick und heutiger Stand
Autor: Pfenninger, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84575

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: 15.07.2025

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

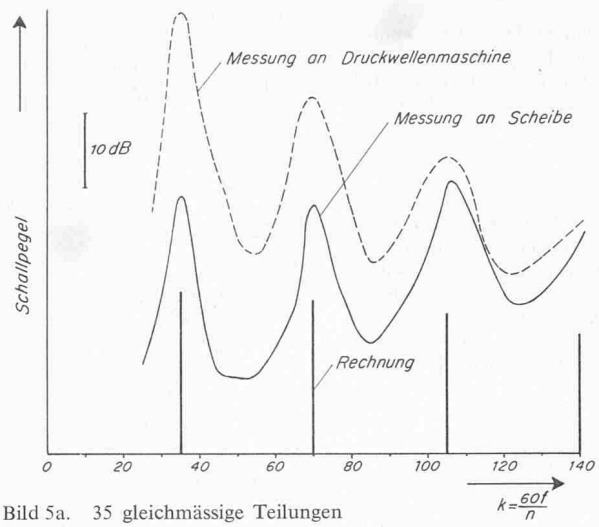


Bild 5a. 35 gleichmässige Teilungen

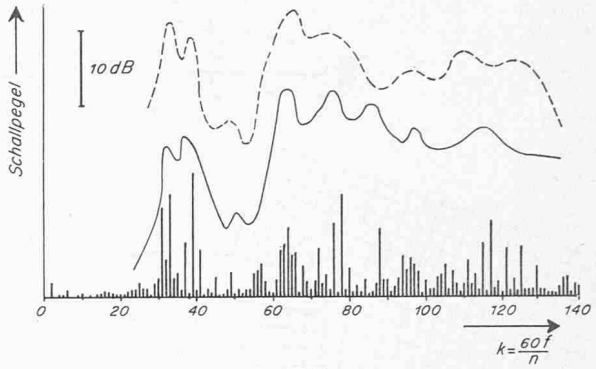


Bild 5b. 35 ungleichmässige Teilungen
Teilungsschema: AAA BB CCC B CCC BB AAA B AAA BB CCC B CC BB AAA B
A = +16,5 %, B = — 3,5 %, C = 17 %

Bild 5. Vergleich von gerechneten Geräuschspektren mit gemessenen an Scheibenmodellen und Druckwellenmaschinen

dingt erforderlich, soll das Geräusch nicht störend empfunden werden. Im Fall nach Bild 3d trifft dies zum Beispiel nicht zu. Es wurden dort 35 Teilungen untersucht. Obwohl auch eine Reduktion der grössten Amplitude auf 62% gegenüber der gleichmässigen Teilung erreicht wurde, wirkt das Geräusch lästig wegen der sehr kleinen Amplituden im Bereich $k = 39$ bis 63.

Experimentelle Überprüfung der Rechenergebnisse

Um die Rechenergebnisse nachzuprüfen, wurden Schallmessungen vorerst an rotierenden Scheiben nach einer Anordnung gemäss Bild 4 ausgeführt. Die Scheiben, die am äusseren Umfang Einfräsungen entsprechend den Breiten A, B und C aufwiesen, wurden von einem Elektromotor mit konstanter Drehzahl angetrieben und mit einem Luftstrahl axial angeblasen. Die im schalltoten Raum gemessenen Geräuschpegel sind in die Bilder 3a bis 3d im gleichen Massstab eingezeichnet. Man erkennt eine recht zufriedenstellende qualitative Übereinstimmung zwischen der gerechneten und der gemessenen Amplitudengruppierung. Es wird auch deutlich, wie die Unterschiede von Pegelmaximum zu Pegelminimum, die bei gleichmässiger Teilung der Scheibe bis zu 25 dB betrugen, sich durch die ungleichmässige Teilung tatsächlich auf wenige dB verringern liessen. Sehr gut veranschaulicht der Fall 3d die Aussagekraft der Rechnung im Vergleich zur Messung.

Man könnte einwenden, dass das vereinfachende Modell der Rechteckdruckstösse bei den untersuchten Scheiben zu guter Übereinstimmung führen kann, da sich dort die Annahme des Rechteckimpulses mit der Wirklichkeit ziemlich gut deckt, während die Übertragung der Rechenergebnisse auf den Läufer der Druckwellenmaschine fragwürdig wird. Aber auch hier zeigen die Messungen eine gute qualitative Übereinstimmung zwischen Rechnung und tatsächlich auftretendem Geräuschspektrum, wie die Bilder 5a und b beweisen, in denen Rechnung, Messung an der Scheibe und Messung an der Druckwellenmaschine gegenübergestellt sind.

Zusammenfassung

Die Druckwellenmaschine Comprex erzeugt, bedingt durch ihr stossweises Arbeiten, sirenenähnlichen Lärm, den man störend wahrnimmt. Für die vorgesehene Verwendung der Maschine als Aufladegerät für Fahrzeugdieselmotoren musste nach Wegen gesucht werden, um die Geräuschbelästigung zu vermindern. Durch ungleichmässige Teilung des Läuferrades ist es gelungen, das Geräusch im Klang angenehmer zu gestalten. Der Schallpegel des Drehklanges wird durch diese Massnahme abgebaut, und es entsteht eine Vielzahl zusätzlicher Frequenzen niedrigen Schallpegels.

Zur Vorausberechnung des auftretenden Geräuschspektrums bei vorgegebener Abweichung von der gleichmässigen Läuferteilung und gegebenem Teilungsschema wurde eine Folge von Rechteckimpulsen angenommen, die der Läuferteilung entsprach. Durch Zerlegung solcher Rechteckfunktionen mit Hilfe der Fourieranalyse erhielt man Linienspektren, die gute qualitative Übereinstimmung ergaben, sowohl mit Messungen an Modellscheiben, die mit einem Luftstrahl angeblasen wurden, als auch mit Messungen an ausgeführten Läufern in der Druckwellenmaschine. Anzustreben ist für geringste Lästigkeit ein Geräuschspektrum, das dem «weissen Rauschen» nahe kommt.

Literaturverzeichnis

[1] *A. Meyer:* Recent Development in Gas Turbines. «Mechanical Engineering» *69* (1947) No. 4, S. 273
[2] *A. Wunsch:* Aufladung von Fahrzeugdieselmotoren mit dem Abgasturbolader und der Druckwellenmaschine Comprex. «MTZ» *31* (1970) H. 1, S. 17
[3] *G. Zehnder:* Entwicklungsaufgaben an der gasdynamischen Druckwellenmaschine Comprex. SBZ *88* (1970) H. 30, S. 678
[4] *M. Berchtold:* Druckwellenaufladung für kleine Fahrzeugdieselmotoren. SBZ *79* (1961) H. 46, S. 801
[5] Deutsche Patentschrift Nr. 165330 (1909)
[6] Deutsche Auslegeschrift Nr. 1253402 (1968)

Adresse des Verfassers: *Alfred Wunsch*, Ryffelstrasse 4, 5430 Wettingen

Die Gasturbinenabteilung bei BBC

Rückblick und heutiger Stand

Von Dr. **H. Pfenninger**, Baden

DK 621.438:061.5

Der Drang der Ingenieure, an Stelle von Kolbenkraftmaschinen rotierende Kraftmaschinen zu bauen, ist sehr alt. Schon im letzten Jahrhundert gelang der Durchbruch von der Kolbendampfmaschine zur Dampfturbine. Diese hat inzwischen die Kolbendampfmaschine vom Markt weitgehend verdrängt. Es war deshalb naheliegend, dass die Ingenieure versuchten, auf dem Gebiete der Verbrennungskraftmaschine den Kolbenmotor wenigstens teilweise durch die Gasturbine zu ersetzen. Dieses Vorhaben scheiterte jedoch lange Zeit an zwei Umständen. Einerseits war kein Verdichter vorhanden, welcher die Luft mit einem für diesen Zweck brauchbaren Energieaufwand verdichten konnte, und anderseits fehlte es an Baustoffen, welche den dazu erforderlichen Temperaturen standhielten. Es war notwendig, einen Verdichter mit besserem Wirkungsgrad zu entwickeln, um bereits bei kleineren Gastemperaturen wirtschaftlich brauchbare Ergebnisse zu erzielen.

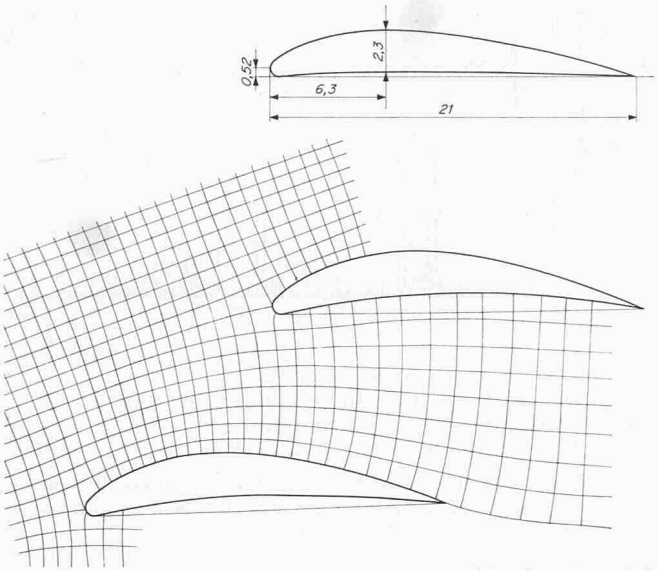


Bild 1 (links). Oben das gewählte Göttinger-Tragflügelprofil 265, unten dessen Transformation in eine Gitterströmung (Jahr 1931)

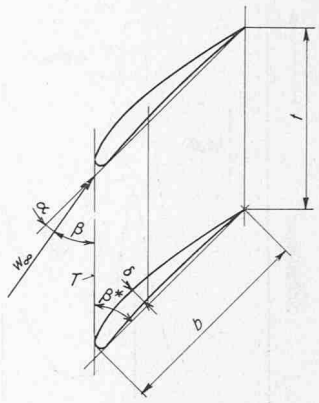


Bild 2 (rechts). Schaufelgitter mit Bezeichnungen. w_∞ Vektor der ungestörten Anströmgeschwindigkeit, α Anstellwinkel, β^* Profilwinkel, β Winkel zwischen Gittertangente T und w_∞, b Schaufelsehne, t Gitterteilung, δ Profildicke

Schon früh hat sich Dr. *C. Seippel* in richtiger Erkenntnis der sich hier bietenden Möglichkeiten um diese Entwicklung bemüht. Da vom Flugzeugbau her, vor allem durch die Arbeiten des Göttinger Instituts, brauchbare Unterlagen über das Verhalten von Tragflügelprofilen vorlagen, war es geboten, sich dieser Unterlagen zu bedienen. Bereits 1931 wurde bei BBC unter Leitung von C. Seippel der erste, vielstufige Axialverdichter gebaut und geprüft. Man wählte unter den Göttinger Profilen das am geeignetsten erscheinende aus. Da man es bei diesem Maschinentyp mit einer Gitterströmung zu tun hat, mussten die Göttinger Profile durch Transformation in eine Gitterströmung umgezeichnet werden, Bild 1. Eine wichtige Entscheidung betraf hierbei die Wahl der optimalen Gitterteilung. Für die Rechnung wurden damals die nachfolgenden Ausdrücke verwendet:

Für die statische Druckerzeugung im Rad

$$H_{stat.,\,Rad} = \frac{b}{t}\,\frac{w_\infty^2}{2}\,(c_a \cos\beta - c_w \sin\beta)$$

für die tangentiale Arbeit

$$H_{tang.,\,Rad} = \frac{b}{t}\,\frac{w_\infty^2}{2}\,(c_a \sin\beta + c_w \cos\beta)$$

für den Wirkungsgrad

$$\eta_{Rad} = 1 - \frac{c_w}{c_a}\,\frac{w_\infty}{(\sin\beta + c_w/c_a \cos\beta)\,u}$$

$$\eta_{Rad} = 1 - \frac{c_w}{c_a}\,\frac{w_\infty^2}{(w_{ax} + c_w/c_a w_{\infty t})\,u}$$

hierbei bedeuten c_w/c_a die Gleitzahl des Flügelgitters, w_∞ die ungestörte Anströmung zum Gitter, w_{ax} die axiale Durchtrittsgeschwindigkeit, $w_{\infty t}$ die Tangentialkomponente von w_∞, β den Winkel zwischen Umfangstangente und Anströmgeschwindigkeit (siehe Bild 2) und u die Umfangsgeschwindigkeit. Die Messung zeigte, dass man mit grösseren c_w-

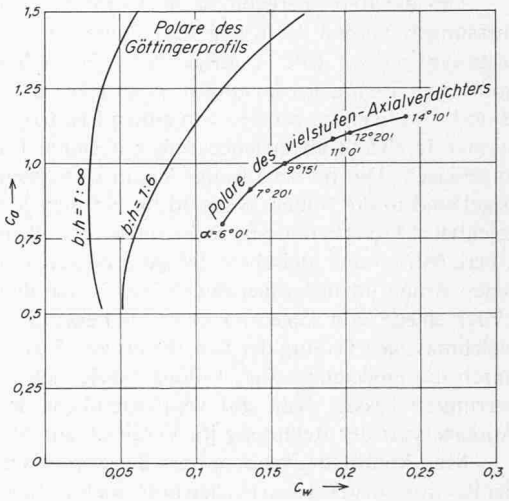
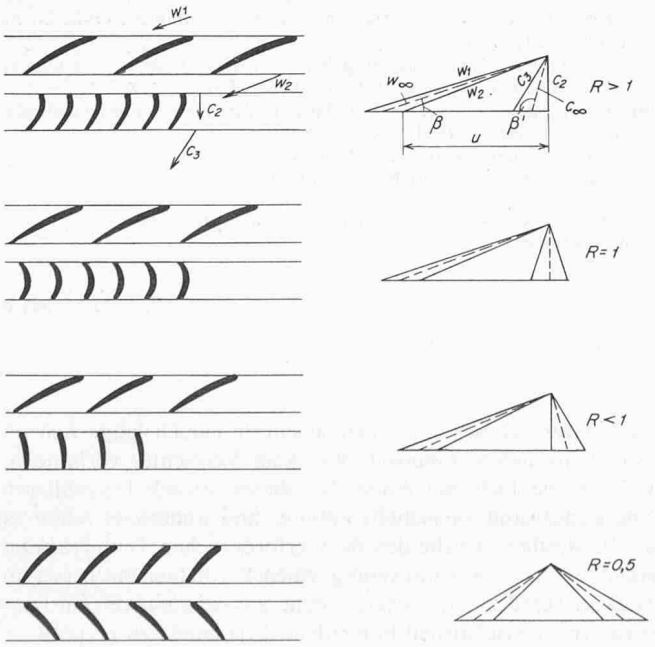


Bild 3. Polaren des gewählten Göttingerprofils 265 für $b/h = 1/\infty$ und 1/6 sowie Polare des vielstufigen Axialverdichters nach den Messergebnissen aus dem Jahre 1931. Wie ersichtlich, war der Widerstandsbeiwert c_w im Gitterverband grösser als nach der Tragflügeltheorie zu erwarten war.
b Schaufelsehne, h Schaufelhöhe (Länge des Tragflügels)

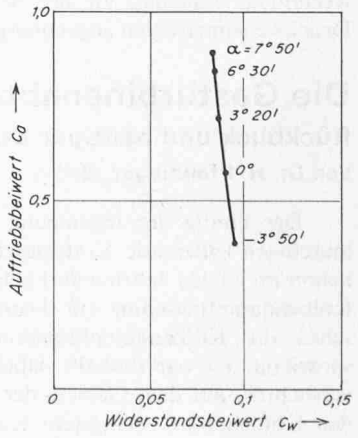


Links:

Bild 4. Die im Jahre 1932 durchgemessenen Kombinationen von Staffelungswinkel β^* mit verschiedenen Reaktionsgraden R

Rechts:

Bild 5. Die Gitterpolare der besten Lösung, die aus den Messungen am vielstufigen Versuchsverdichter mit symmetrischer Beschaufelung (R = 0,5) im Jahre 1932 ermittelt wurde



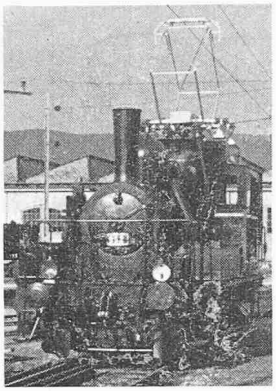


Bild 6 (links). Auf elektrischen Betrieb umgestellte Rangierlokomotive der SBB aus dem Jahre 1942

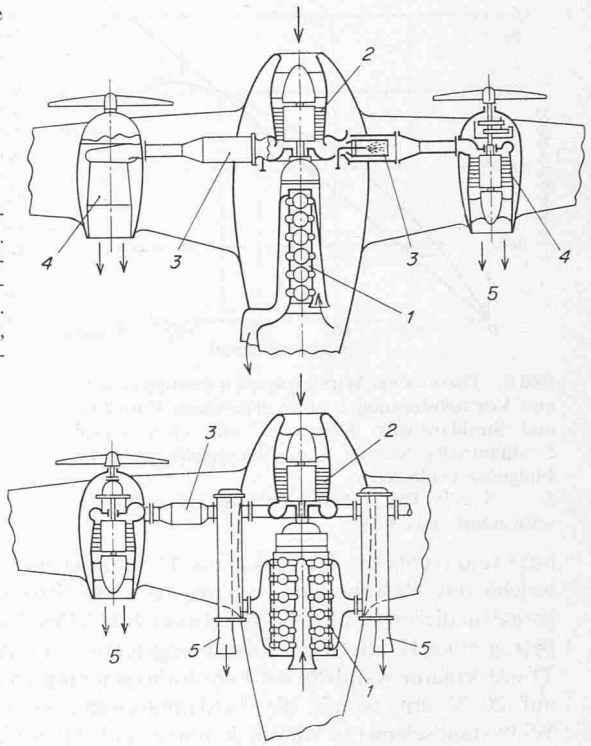


Bild 7 (rechts). Flugzeugantrieb nach dem Vorschlag von Prof. Ackeret aus dem Jahre 1943. Oben einfache Ausführung ohne Auspuff-Verwertung, unten Ausführung mit zusätzlichem Rückstossantrieb mittels der Abgase des Kolbenmotors. 1 mehrzylindriger Kolbenmotor, 2 Axialverdichter, 3 Brennkammern, 4 Propellerturbinen, 5 Rückstossantrieb zur Schuberzeugung

Werten und kleineren c_a-Werten rechnen musste, als angenommen wurde (Bild 3). Der Wirkungsgrad war noch relativ schlecht.

Mit grossem Eifer wurden die Messresultate verwertet und die entsprechenden Schlüsse daraus gezogen. Schon zwei Jahre später lagen Versuche mit verschiedenen Schaufelprofilen und verschiedenen Schaufelstaffelungswinkel, das heisst verschiedenen Reaktionsgraden vor. Die im Versuch erprobten Beschaufelungen zeigt Bild 4. Die Polare des Schaufelgitters, das heisst der Auftriebsbeiwert c_a in Abhängigkeit vom Widerstandsbeiwert c_w für verschiedene Anstellwinkel α, konnte bedeutend verbessert werden, Bild 5. Mit einem elfstufigen Axialverdichter wurde ein Druckverhältnis von 3,4 bei einem isentropen Kompressorwirkungsgrad von 81% erreicht. Die symetrische Beschaufelung (Reaktionsgrad = 0,5) wählte man als beste Kombination zur Standardbeschaufelung. Als Schaufel diente das transformierte Göttinger Profil 436.

Im Jahre 1939 konnte bekanntlich die erste industrielle Gasturbine von 4000 kW Klemmenleistung in einem Elektrizitätswerk mit Erfolg dem Betrieb übergeben werden. Hiermit war das Eis gebrochen und der Weg für die Gasturbine als Kraftmaschine geebnet.

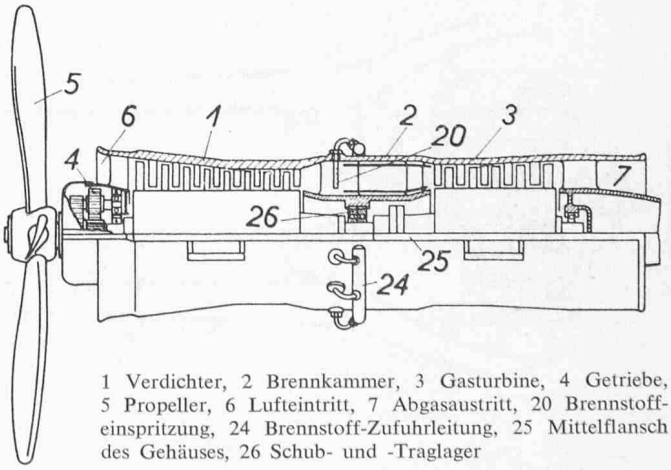
Während dem Zweiten Weltkrieg waren der von C. Seippel geleiteten Veloxkessel- und Gasturbinenabteilung alle neuen und ausgefallenen Probleme auf dem thermischen Gebiete zum Studium übergeben worden. Wir jüngeren Ingenieure hatten deshalb in dieser Abteilung immer mit interessanten Aufgaben zu tun. Es würde zu weit führen, hier die ganze Entwicklung der Veloxkessel, der Gasturbinen, der Aufladegebläse für Dieselmotoren und der Elektrokessel zu schildern. Um die Vielfalt der zu lösenden Aufgaben zu veranschaulichen, seien einige interessante, teilweise etwas aus dem Rahmen der eigentlichen Entwicklung herausfallende Studien und Konstruktionen näher beschrieben.

Die Entwicklung einer Gasturbinenlokomotive hat steuerungstechnisch viel Kopfzerbrechen bereitet. Galt es doch eine Regulierung zu entwickeln, die einerseits den Anforderungen des Bahnbetriebes genügte (zum Beispiel Beschleunigung des Zuges) und anderseits für diese Anwendung dem etwas komplizierten Charakter einer Gasturbine entgegen zu kommen. Im Servofeldregler fand man dann die Lösung. Um nicht zu schleppend anfahren zu müssen, hat man auch einen Drehzahleinstellhebel (sog. Vorbereitungshebel) vorgesehen, mittels welchem der Lokomotivführer vor der Abfahrt des Zuges die Drehzahl der Gasturbine anheben konnte, um den Zug besser beschleunigen zu können. Damit gelang es, den feststehenden Fahrplan mit einem von einer Gasturbinen-Lokomotive angetriebenen Zug einzuhalten.

Zu jener Zeit war die Versorgung mit Rohstoffen mangelhaft. Der Mangel an Pneus wirkte sich vor allem militärisch aus. So war zum Beispiel der Verbrauch von Pneus bei unserer Luftwaffe zu gross. Die Jagdflugzeuge hatten damals Landegeschwindigkeiten von fast 150 km/h. Da die Fahrgestellräder beim Berühren mit dem Boden durch Reibung sofort auf die Geschwindigkeit des Flugzeuges gebracht wurden, entstand ein grosser Pneuverschleiss. Schliesslich waren diese Jadgflugzeuge täglich im Einsatz. Was blieb da anders übrig, als die Gasturbinenabteilung bei BBC zu beauftragen, einen Radantrieb zu studieren, der es erlaubte, die Fahrgestellräder vor der Landung auf die Umfangsgeschwindigkeit zu bringen, die der Landegeschwindigkeit des Flugzeuges entsprach. Nach verschiedenen Überlegungen wurde ein Ölantrieb mit Schraubenpumpen und Schraubenmotoren entwickelt.

Da die Flab zum Antrieb der Fliegerabwehrbatterien eine leichte, transportable Kraftanlage benötigte, erhielt die Abteilung den Auftrag, einen Benzinmotor zu bauen, der den militärischen Anforderungen der Fliegerabwehr genügte. Auch diese etwas artfremde Aufgabe konnte gelöst werden.

Der Kohlenmangel der SBB brachte ebenfalls interessante Probleme. Die Rangierlokomotiven waren damals noch teilweise kohlegefeuert. Konnte man da nicht die Kohle durch elektrische Heizung ersetzen? Der Gasturbinenabteilung gelang es, auch diese Frage zu voller Zufriedenheit zu lösen. Dazu wurden bei einer kohlengefeuerten Rangierlokomotive,



1 Verdichter, 2 Brennkammer, 3 Gasturbine, 4 Getriebe, 5 Propeller, 6 Lufteintritt, 7 Abgasaustritt, 20 Brennstoffeinspritzung, 24 Brennstoff-Zufuhrleitung, 25 Mittelflansch des Gehäuses, 26 Schub- und -Traglager

Bild 8. Schweizerisches Patent für einen Flugzeugantrieb mit Gasturbinen aus dem Jahre 1940. Hauptantrieb mittels Propeller, zusätzlicher Antrieb mittels Schubdüse.

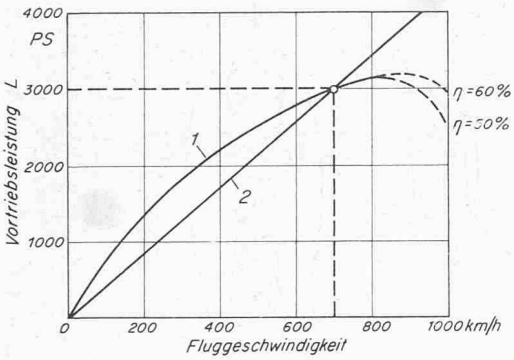
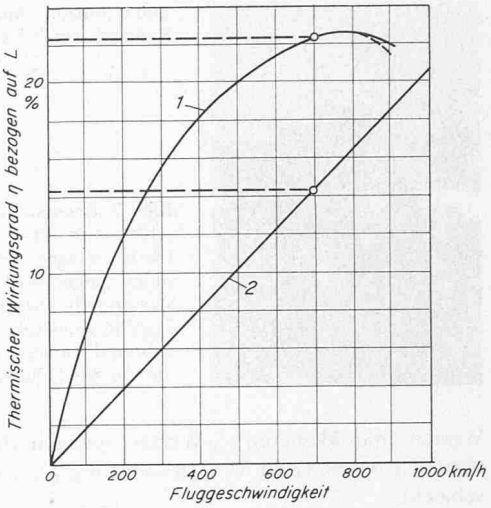


Bild 9. Thermischer Wirkungsgrad η (bezogen auf L) und Vortriebsleistung L eines gemischten Propeller- und Strahlantriebs, Kurven 1, und eines reinen Strahlantriebs, Kurven 2, in Abhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit c.
$L = S\ c/75$ PS; S Schubkraft in kp, c Fluggeschwindigkeit in m/s

Unter der Annahme, dass die Nutzleistungen beider Antriebsarten bei c = 700 km/h gleich gross gewählt werden, ergibt der gemischte Antrieb bei kleineren Fluggeschwindigkeiten eine grössere Vortriebsleistung als der reine Strahlantrieb, bei grösseren Fluggeschwindigkeiten eine kleinere Vortriebsleistung. Der thermische Wirkungsgrad ist bis etwa 950 km/h beim gemischten Antrieb besser als der reine Strahlantrieb



links und rechts des Dampfkessels, Heizkörper untergebracht, welche das Kesselwasser verdampften. Ein Stromabnehmer sorgte für die notwendige Energiezufuhr, Bild 6. Der Dampfdruck betrug etwa 12 atü, die Verdampfungstemperatur 195 °C. Ein Transformator wandelte die Fahrdrahtspannung von 15000 V auf 20 V um, womit die Verdampferrohre als elektrische Widerstandselemente wirken konnten und dabei eine Wandtemperatur von 205 °C annahmen. Diese Rohre waren mittels Thermoelementen geschützt, die bei einer Rohrwandtemperatur von etwa 300 °C den Hauptschalter öffneten. Der Lokomotivführer konnte Druck und Temperatur des Dampfes an entsprechenden Instrumenten ablesen und den Heizstrom ein- und ausschalten.

Die Weiterentwicklung des Antriebsaggregates von Militärflugzeugen stellte eine Aufgabe dar, die so recht in diese Abteilung passte. Der Ordinarius für Aerodynamik an der ETH, Prof. Dr. *J. Ackeret,* hatte einen neuen Flugzeugantrieb nach Bild 7 vorgeschlagen. Im Rumpf sollte das Energieerzeugungsaggregat untergebracht werden, während in den Flügeln leichte Propellerturbinen vorgesehen waren. Als zentrale Energieerzeugungsanlage waren ein Kolbenmotor von 1000 PS und ein Axialgebläse in Betracht gezogen worden, welches die Druckluft für die Propellerturbinen liefern sollte. Durch Erhitzen dieser Luft in Brennkammern vor den Propellerturbinen war es möglich gewesen, die Leistung des Antriebs zu verdoppeln, so dass jeder Propeller eine Leistung von 1000 PS verarbeiten konnte. Da bei diesem Entwurf die Hauptmasse des Antriebsaggregates (Kolbenmotor und Axialverdichter) im Rumpf untergebracht war, hätte eine Kanone von grösserem Kaliber eingebaut werden können, deren Rückstoss von der zentralen Masse abgefangen worden wäre. Das nahende Kriegsende hat diese Entwicklung wieder gestoppt. Dass man sich auch überlegte, ob eine reine Gasturbine ein geeigneter Flugzeugantrieb wäre, war klar. C. Seippel hat bereits im Jahre 1940 ein Patent für einen derartigen Antrieb angemeldet (Schweiz. Patent Nr. 214256, Bild 8). Dieses zeigt bereits genau jene Anordnung, welche einige Jahre nach dem Kriege bei den ersten zivilen Flugzeugantrieben mit Gasturbinen verwirklicht wurde.

Für die damals möglichen Fluggeschwindigkeiten galt es, die optimale Lösung zwischen Propellerantrieb und Strahlantrieb zu suchen. Es wurden drei Fälle untersucht, nämlich der reine Strahlantrieb, der gemischte Propeller-Strahlantrieb, wobei der Strahlantrieb für etwa 25 % der totalen theoretischen Nutzleistung festgelegt wurde, und der Fall, wo durch Verstellen der Düsennadel der Schubdüse für jede Fluggeschwindigkeit das günstigste Verhältnis zwischen Propeller- und Strahlantrieb eingestellt wurde.

Bild 9 zeigt den Vergleich der Nutzleistungen und der Wirkungsgrade des reinen Strahl- mit dem gemischten Propeller-Strahlantrieb. Unter der Voraussetzung, dass bei 700 km/h beide Lösungen die gleiche Vortriebsleistung haben, ergibt sich, dass unterhalb 700 km/h die Leistung des Triebwerkes mit Propeller-Strahlantrieb grösser ist als diejenige mit reinem Strahlantrieb, weil der Strahlwirkungsgrad bei kleinen Geschwindigkeiten sehr schlecht wird. Bei einer Flugge-

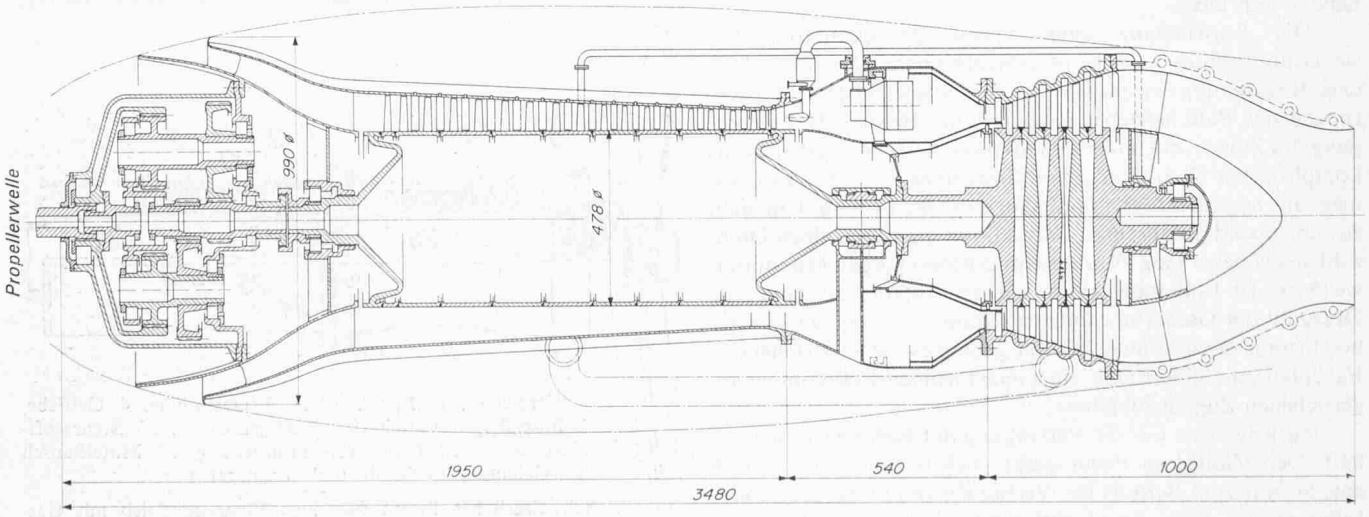
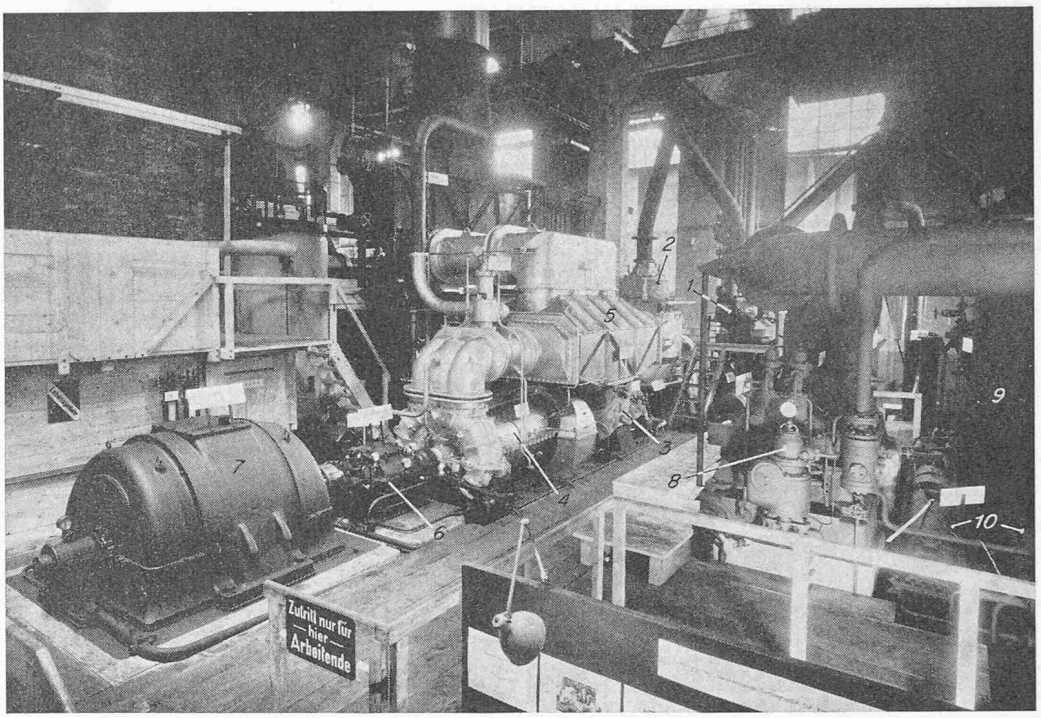


Bild 10. Entwurf des Verfassers einer Gasturbine für Flugzeuge aus dem Jahre 1944 mit gemischtem Propeller-Strahldüsenantrieb. Gesamte Vortriebsleistung 2000 PS, Drehzahlen: 8600 U/min der Turbine, 1200 U/min des Propellers

Bild 11. Mit Kohlenstaub betriebene Gasturbinen- und Veloxkessel-Versuchsanlage aus dem Jahre 1944, bemessen für eine Leistung der Gasturbine von 1500 kW und eine Dampferzeugung des Kessels von 11 000 kg/h bei 20 atü und 400 ° C. Der Aschegehalt der verwendeten Kohle betrug 8 bis 12 %
1—7 Kohlenstaub-Gasturbine, umfassend:
1 Kohlenmühle (Schlägermühle)
2 Brennkammer
3 Gasturbine
4 Axialverdichter
5 Luftvorwärmer
6 Getriebe
7 Wechselstromgenerator
8—10 Kohlenstaub-Veloxkessel, umfassend:
8 Ladegruppe, bestehend aus Antriebsdampfturbine, Ladegebläse und Expansionsturbine
9 aufgeladener Kessel mit Brennkammer und erstem Teil des Verdampfers
10 zweiter Teil des Verdampfers und Überhitzer



schwindigkeit von 700 km/h betrug der Propellerwirkungsgrad damals rund 83 %, der Strahlwirkungsgrad nur etwa 50 %. Der Brennstoffverbrauch beim gemischten Betrieb ist bis etwa 950 km/h kleiner als beim Strahlantrieb. Die Nutzleistung wird beim Strahlantrieb über 700 km/h grösser als beim gemischten Antrieb, weil der Propellerwirkungsgrad sehr schlecht wird.

Der Strahlwirkungsgrad ergibt sich, wenn c die Fluggeschwindigkeit und w die Strahlgeschwindigkeit ist, zu

$$\eta_{\text{Strahl}} = \frac{2\,c/w}{1+c/w}$$

Tabelle 1a. Konstruktionsdaten des Aufladegebläses für Flugmotorenaufladung aus dem Jahre 1939 (Bild 13).

Ansaugedruck	kp/cm² abs	0,575
Ansaugetemperatur	°C	—15
Enddruck	kp/cm² abs	1,37
Endtemperatur	°C	85
Druckverhältnis		2,38
Ansaugestrom	m³/s	1,90
Luftdurchsatz	kg/s	1,44
Normaldrehzahl	U/min	25400
Maximale Drehzahl	U/min	27000
Umfangsgeschwindigkeit am Rotorumfang	m/s	221
Umfangsgeschwindigkeit an der Spitze der 1. Laufschaufel	m/s	313
Durchmesserverhältnis der 1. Laufreihe		1,42
Rotordurchmesser	m/s	165
Reaktionsgrad	%	50

Tabelle 1b. Messergebnisse des Verdichters nach Bild 13

Drehzahl	U/min	20000	24000	25480
Druckverhältnis am Bestpunkt		1,85	2,25	2,38
Ansaugestrom	m³/s	1,36	1,71	1,84
Polytropischer Beschaufelungswirkungsgrad	%	82	80	74

Der verlangte Ansaugestrom wurde bei einer Drehzahl von 25480 U/min und beim verlangten Druckverhältnis von 2,38 nicht ganz erreicht.

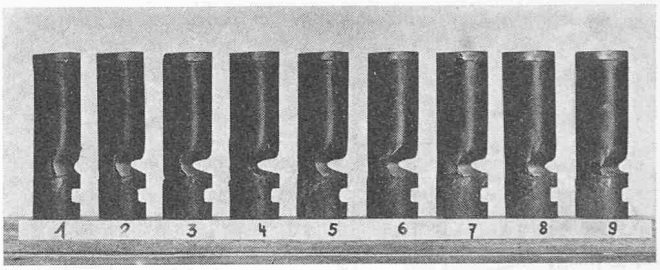
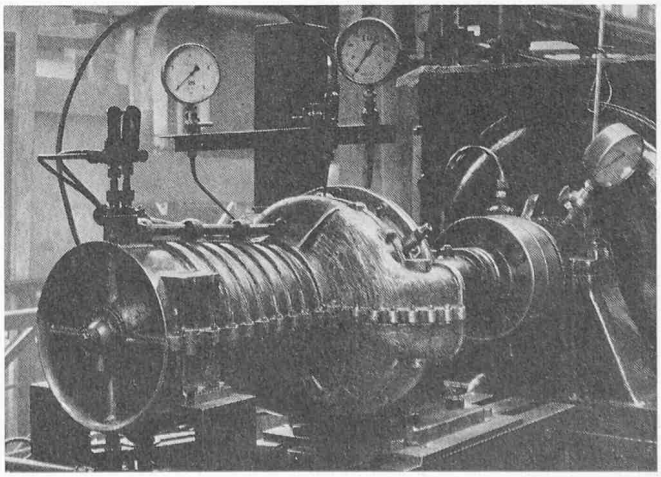


Bild 12. Erodierte Schaufeln der Kohlenstaubgasturbine nach 250 Betriebsstunden. Obgleich ein wirksamer Aschenabscheider am Eintritt in die Gasturbine vorgesehen wurde, genügten die restlichen Aschenteile, um die Schaufeln in kurzer Zeit zu erodieren

Hieraus kann man leicht ersehen, dass bei einer Fluggeschwindigkeit von nur 700 km/h (=195 m/s) und einer Strahlgeschwindigkeit von 600 m/s der Strahlwirkungsgrad nur etwa 50 % wird. Bild 10 zeigt den Entwurf eines derartigen Triebwerkes.

Dass man die Möglichkeiten erwog, Veloxkessel und Gasturbinenanlagen mit Kohlenstaub zu betreiben, lag bei den damals gegebenen Zeitumständen nahe. Es war auch zu

Bild 13. Flugmotorenladegebläse in axialer Bauart für die Firma Rolls-Royce in Derby (England) mit Gehäuse aus Leichtmetall, Baujahr 1939. Leistungsgewicht 0,21 kg/PS, übrige Daten s. Tabelle 1



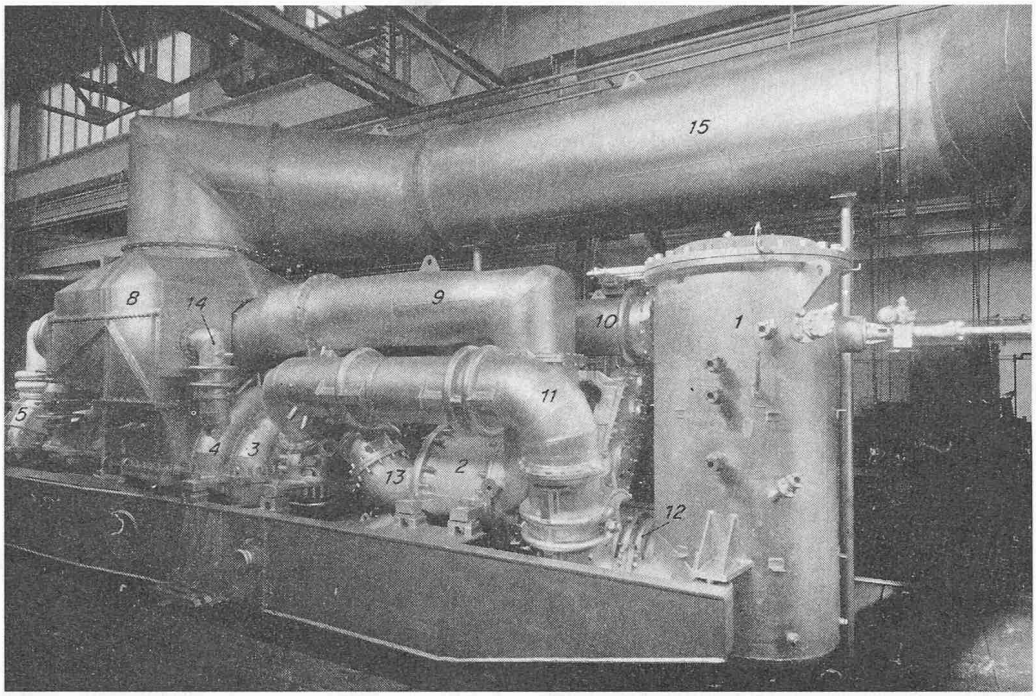


Bild 14a. Antriebsaggregat von 4000 PS für eine Gasturbinenlokomotive mit einem Drucktauscher als Oberstufe aus dem Jahre 1944

1 Brennkammer
2 Drucktauscher
3 Hochdruckturbine
4 Niederdruckturbine
5 Axialverdichter
6 Getriebe
7 Gleichstromgeneratoren
8 Luftvorwärmer
9 Luftleitung von 8 zu 2
10 Luftleitung von 2 zu 1
11 Gasleitung von 1 zu 3
12 Gasleitung von 1 zu 2
13 Gasleitung von 2 zu 4
14 Antipompageleitung von 5 zu 4 (um die Energie der Luft aufzuwerten, wurde diese Leitung durch den Luftvorwärmer geleitet)
15 Abgasleitung zum Kamin

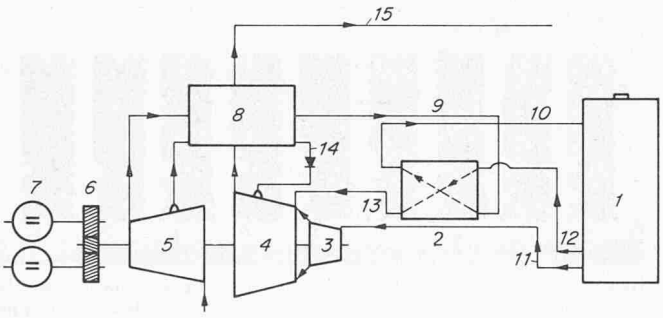


Bild 14b. Schema zum Antriebsaggregat nach Bild 14a

erwarten, dass nicht alle Ideen zum Erfolg führten. Die Kohlenstaubverbrennung brachte tatsächlich viele unangenehme Überraschungen. Bild 11 zeigt die mit Kohlenstaub betriebene Gasturbine und den mit Kohlenstaub gefeuerten Veloxkessel, Bild 12 die erodierten Schaufeln der Turbine nach 250 Betriebsstunden. Diese Erosionen traten trotz Staubabscheidung am Turbineneintritt auf.

An dieser Stelle mag eine Episode aus dieser Zeit Raum finden. Der Kohlenstaub wurde durch Vermahlen von Kohle in einer Schlägermühle erzeugt, welche unter dem Enddruck des Gasturbinenverdichters stand. Eine bestimmte, vom Verdichter abgezweigte Luftmenge diente als Schleppmedium

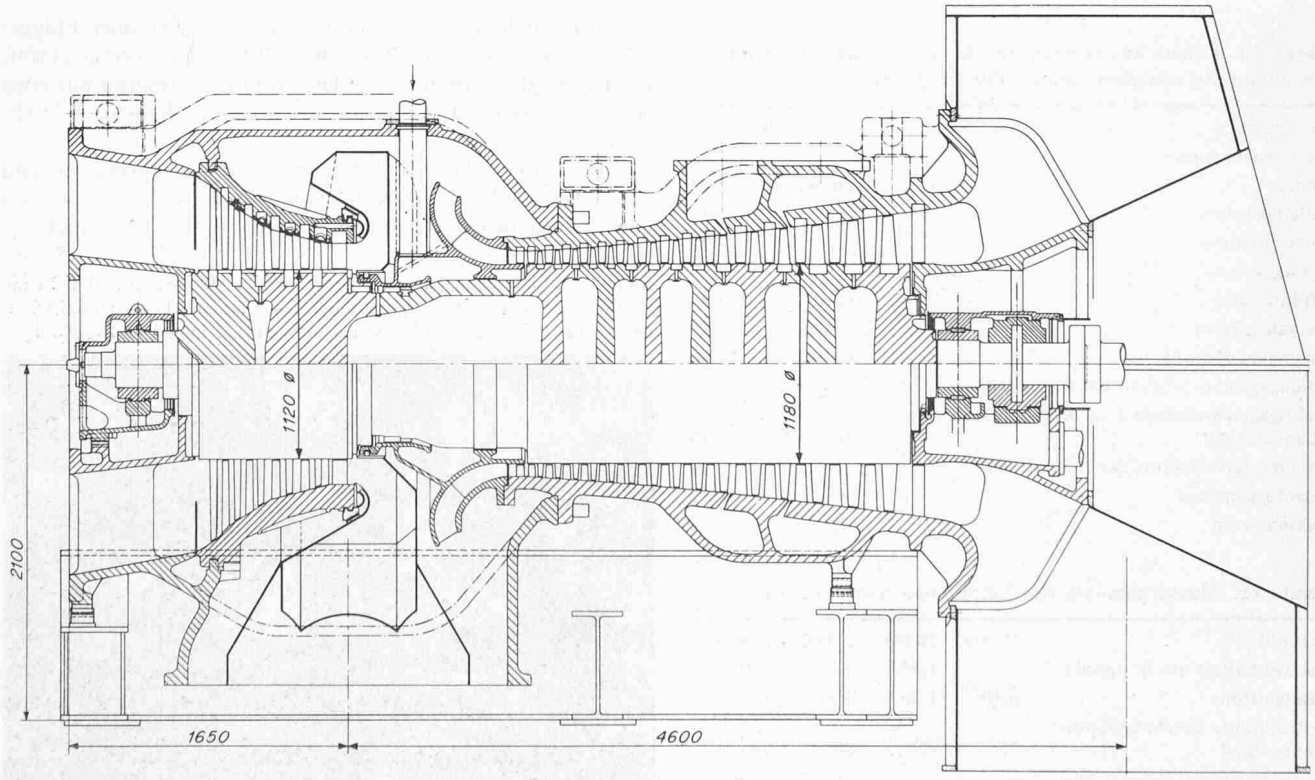


Bild 15. Schnitt durch die Gasturbinengruppe 11S aus dem Jahre 1970; Konstruktionsdaten siehe Tabelle 2

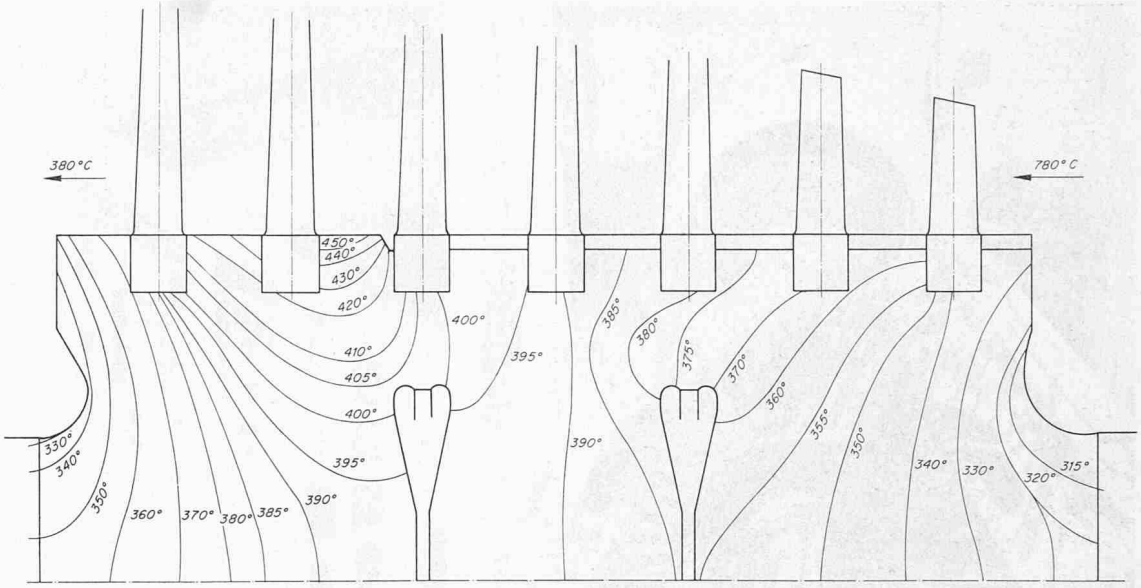


Bild 16. Temperaturverteilung im Rotor der Gasturbine bei einer Gaseintrittstemperatur von 780 ° C. Dank der guten Kühlung erreicht die maximale Rotortemperatur dabei nur rund 450 ° C. Auch die Temperaturgradienten sind relativ klein, so dass die auftretende Wärmespannungen gering sind

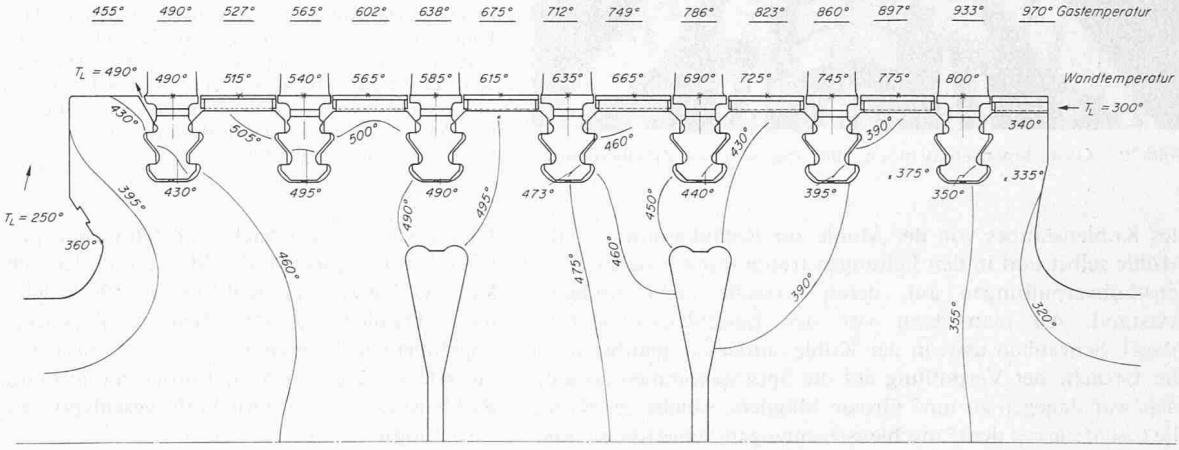


Bild 17. Temperaturverteilung im Rotor der Gasturbine bei einer Gaseintrittstemperatur von 970 ° C. Die maximale Rotortemperatur beträgt nur etwa 500° C, so dass noch ferritische Rotormaterialien verwendet werden können

Bild 18. Gasturbinengebläseblock der Anlage von 30 000 kW (Bild 15), Ansicht von der Gasturbinenaustrittsseite

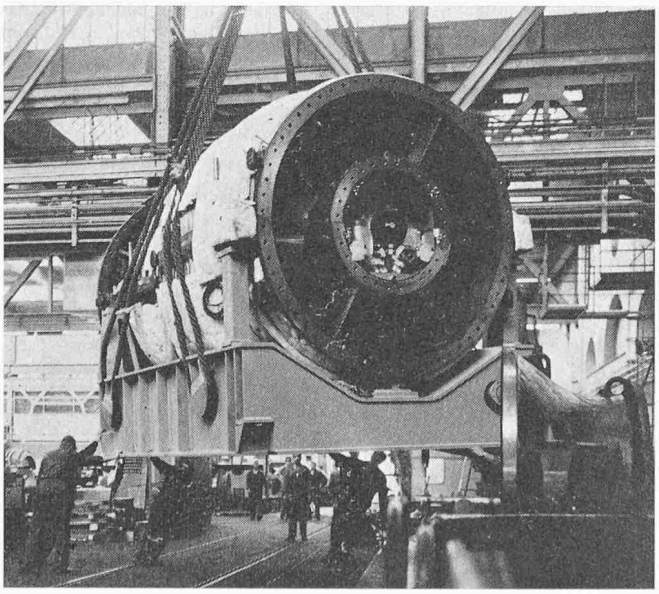
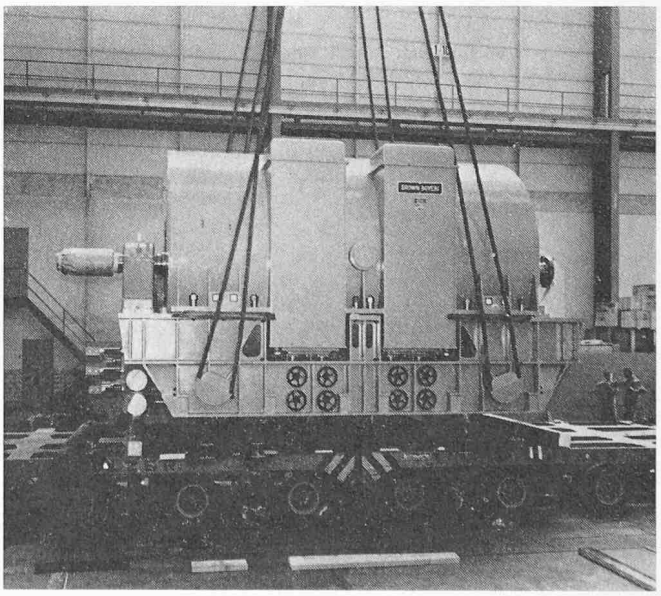


Bild 19. Generatorblock der Anlage von 30 000 kW



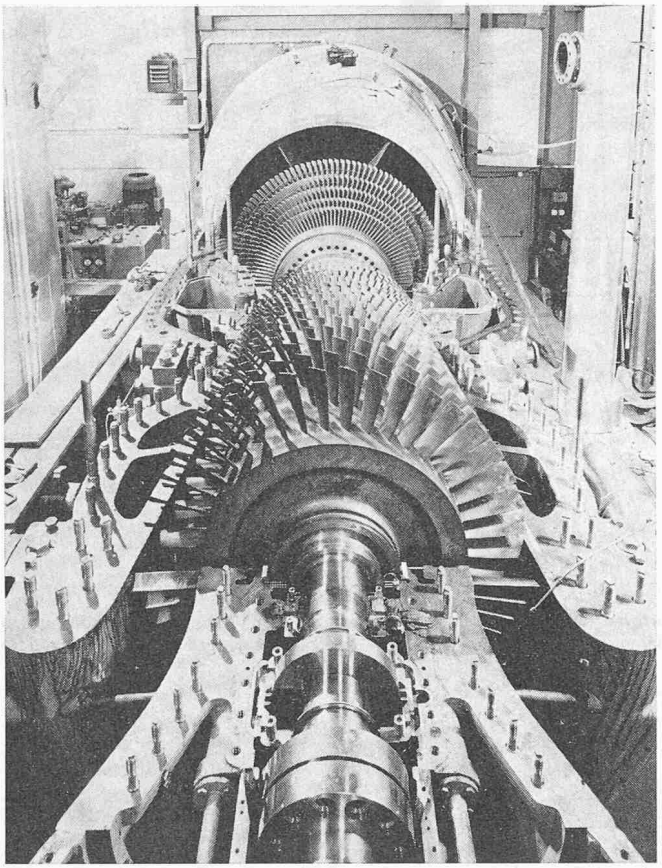


Bild 20. Gasturbinengebläseblock, mit abgedecktem Zylinderoberteil

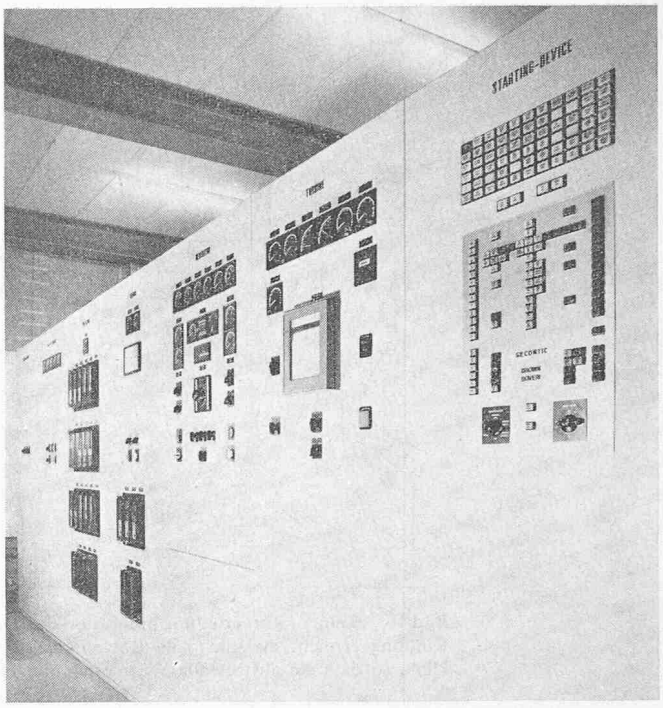


Bild 21. Schalttafel für den automatischen Start. Erstes Feld rechts: Elektronische Automatik, BBC-Secontic-System. Die linke Seite dieses Feldes ist für den Start mit Erdgas und die rechte Seite für den Start mit Brennöl vorgesehen. Mit dem Drehschalter links unten kann die Automatik ausgeschaltet und der Start darnach von Hand durchgeführt werden. Eine dritte Schalterstellung dient zum Testen der Apparatur. Links die Instrumentenfelder für die Turbine, den Generator und die Hilfsbetriebe

des Kohlenstaubes von der Mühle zur Brennkammer. In der Mühle selbst und in den Leitungen traten immer wieder Kohlenstaubverpuffungen auf, deren Ursache nicht eindeutig feststand. Als man dann vor der Einschleusvorrichtung Nägel, Schrauben usw. in der Kohle entdeckte, glaubte man, der Ursache der Verpuffung auf die Spur gekommen zu sein. Was war dagegen zu tun? Grosse Magnete, welche der Kohle die Eisenteile vor dem Einschleusen entzogen, schien die richtige Massnahme. Als dies keinen Erfolg brachte, machte man folgenden Versuch: Etwas Kohlenstaub wurde in eine Stahlbombe hineingebracht, diese anschliessend verschlossen und mit Luft von gleichem Druck gefüllt, wie er in der Schlägermühle herrschte (~2 ata). Nach einer bestimmten Wartezeit trat durch Selbstoxydation des Kohlenstaubes eine Verpuffung auf.

Damit war man der Sache auf den Grund gekommen. In den toten Strömungsecken der Mühle und der Leitung zur Brennkammer lagerte sich Kohlenstaub ab, welcher langsam oxydierte. Da die Oxydationswärme durch die tote Strömung nicht abgeführt wurde, stieg dort die Temperatur bis zur Verpuffung an. Hieraus ergab sich die Forderung, in Leitungen, in welche Kohlenstaub durch Druckluft geschleppt wurde, alle toten Strömungsecken zu vermeiden.

Die Firma Rolls-Royce in England ersuchte uns, unmittelbar vor dem Zweiten Weltkrieg einen Axialverdichter für die

Bild 22. Getriebeblock mit einem Übersetzungsverhältnis von 3600/3000 U/min der Anlage nach Bild 20

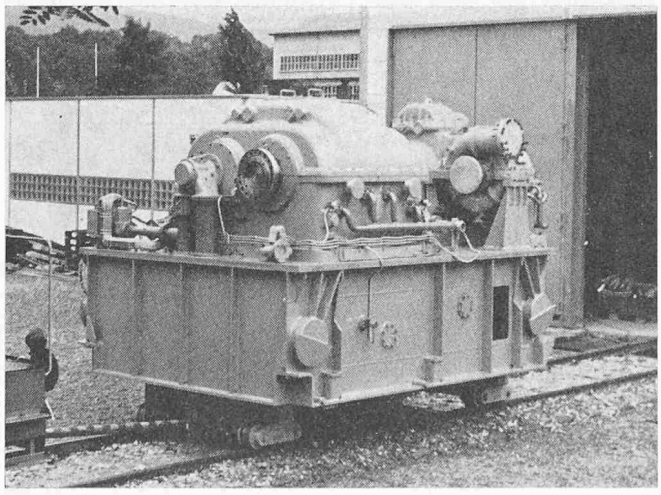


Bild 24. Gebäude der Anlage aus vorfabrizierten Elementen. Das Stahlgerüst nimmt die Kräfte auf (Kranbahn, Winddruck, Dachbelastung). Die Wandauskleidung besteht aus Siporex-Wandplatten, die eine gute Schalldämmung ergeben. Rechts die Kühlanlage für das Schmieröl und die Generatorluft. Für wasserarme Gegenden ersparen diese Luftkühler jegliche Wasserkühlung. Links das Gebäude für die Schaltanlage

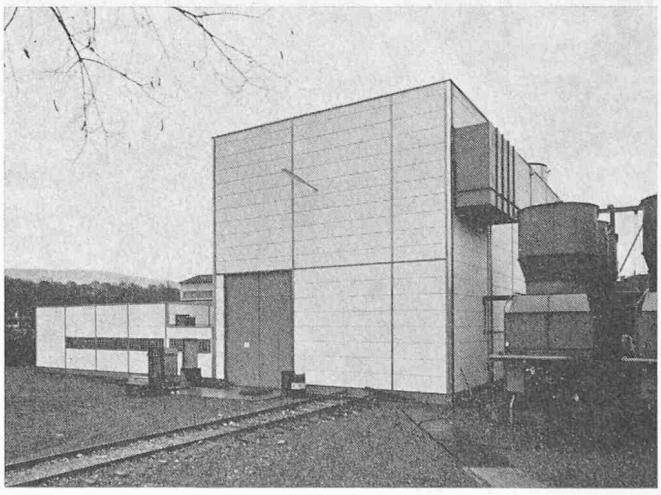


Tabelle 2. Konstruktionsdaten der Gasturbinengruppe nach den Bildern 15 bis 24

Gastemperatur vor Turbine	°C	780	850
Kupplungsleistung	kW	28000	33000
Kupplungswirkungsgrad	%	25	26
Drehzahl	U/min	3600	3600
Druckverhältnis		~7,9	~8,0
Luftdurchsatz	kg/s	~215	~215
Abgastemperatur	°C	380	415
Anwurfmotorleistung	kW	900	900

Tabelle 3. Messdaten der Gasturbinengruppe nach Bild 15–24

Gastemperatur	°C	780	940*)
Klemmenleistung	kW	28300	42800
Klemmenwirkungsgrad	%	24,7	28,1
Drehzahl	U/min	3600	3600
Druckverhältnis		7,70	8,20
Temperatur des Rotors an der wärmsten Stelle	°C	<400	<430

Die Anlage hat die gestellten Bedingungen mehr als erfüllt. Die Rotortemperaturen sind 50 °C bis 70 °C tiefer als erwartet wurde.

*) Kurzzeitiger Versuchsbetrieb

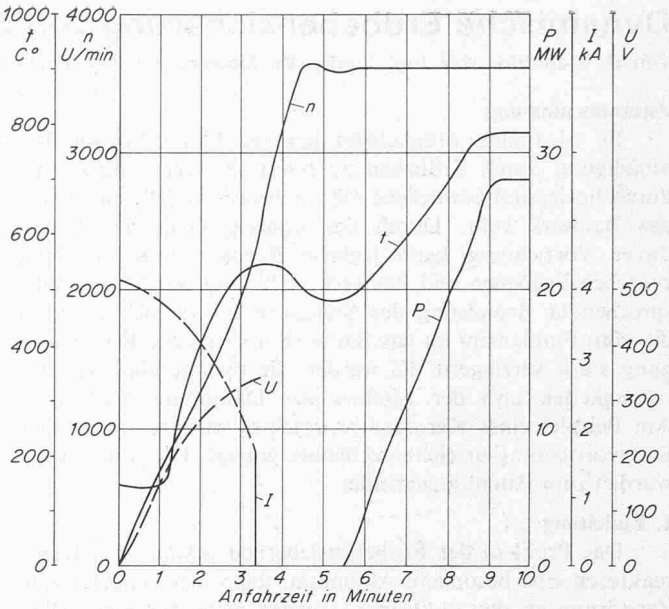


Bild 23. Startdiagramm der Gasturbine von 30 000 kW. Zum Anwerfen dient die Erregermaschine des Generators, die als Motor läuft. *n* Drehzahl, *t* Temperatur vor Turbine, *P* Generatorleistung, *U* Anfahrspannung, *I* Anfahrstrom

Flugmotorenaufladung zu entwickeln. Auch diesem Wunsch wurde entsprochen. Bild 13 zeigt den Flugmotorenlader axialer Bauart und Tabelle 1a orientiert über seine technischen Daten. Umfangsgeschwindigkeiten und Strömungsgeschwindigkeiten waren nahe an der Schallgeschwindigkeit. Veröffentlichungen der NACA kamen uns damals sehr zu Hilfe, welche den Einfluss vom Machzahlen auf den Auftrieb und Widerstand von Tragflügelprofilen zeigten. In Tabelle 1b sind Messergebnisse zu finden.

Über die Entwicklung des Drucktauschers wird in den Aufsätzen von *G. Zehnder* und *A. Wunsch* in diesem Heft eingegangen. Kurz erwähnt sei die Gasturbinenlokomotive von 4000 PS mit einem Drucktauscher als Oberstufe, Bilder 14a und 14b.

Im Jahre 1946 übernahm C. Seippel als Nachfolger des unvergesslichen Dr. *Adolf Meyer* den Posten eines technischen Direktors; gleichzeitig wurde mir die Gasturbinen- und Veloxkesselabteilung anvertraut, die eine bestens ausgebaute Arbeitsgemeinschaft mit gut geschultem Personal und einem aufgeschlossenem Teamgeist war. Sie im Geiste Seippels weiter zu entwickeln, war eine Selbstverständlichkeit.

Wie im Aufsatz über Axialverdichter für grosse Fördermengen[1]) gezeigt wurde, ist es heute möglich, Gasturbinen mit grossen Leistungen zu bauen. So sind in den letzten Jahren neue Typen entwickelt worden, von denen jener herausgegriffen werden soll, der sich gerade jetzt auf dem Prüfstand befindet. Da die Gasturbine die Kraftmaschine für Länder mit billigem Brennstoff ist, und ein wesentlicher Teil dieser Länder durch Netze mit einer Frequenz von 60 Hz versorgt wird, wurde beschlossen, eine Gasturbine mit einer Drehzahl von 3600 U/min zu entwickeln, welche aber durch das Einschieben eines Getriebes zwischen Gasturbinengruppe und Generator auch für Netze mit einer Frequenz von 50 Hz verwendet werden kann. Gasturbinen müssen heute mit kurzem Liefertermin angeboten werden können. Dies erfordert einerseits eine weitgehende Standardisierung sowie die Beschränkung auf wenige Typen und anderseits die Aufgabe von Vorräten. Um dennoch bestimmte Kundenwünsche erfüllen zu können und die Montagezeiten abzukürzen, wurde die Blockbauweise im Baukastensystem möglichst weitgehend verwirklicht. Die Anlagen werden schlüsselfertig, das heisst, einschliesslich Gebäude verkauft.

Die zur Zeit auf dem Prüfstand in Münchenstein stehende Anlage weist eine Leistung von rund 30000 kW auf. Die technischen Daten gehen aus Tabelle 2 hervor. Ein Schnitt durch diese Gruppe ist aus Bild 15 zu ersehen .Die Gruppe ist sehr kompakt gebaut, Gebläse und Turbine weisen eine gemeinsame Welle auf. Der Gasturbinenrotor ist luftgekühlt und erlaubt deshalb hohe Gaseintrittstemperatur. Wenn diese auf 780 °C ansteigt, beträgt die Rotortemperatur nur etwa 450 °C, siehe Bild 16. Auch die Temperaturgradienten innerhalb des Rotors sind bescheiden, was kleine Wärmespannungen im Betrieb ergibt. Selbst bei einer Gaseintrittstemperatur von 970 °C würde die maximale Rotortemperatur 500 °C nicht überschreiten, Bild 17. Das vorfabrizierte Gebäude besteht aus einer Stahlkonstruktion mit Siporexplatten als Wandverkleidung, welche eine gute Schalldämmung nach aussen sichert. Der Schallpegel beträgt etwa 50 dB (A) in rund 50 m Distanz von der Zentrale.

Die Bilder 18 und 20 zeigen den Gasturbinengebläseblock. Der Generatorblock ist aus Bild 19 ersichtlich. Ein eigener Getriebeblock, welcher zwischen Gasturbinenblock und Generatorblock eingeschoben werden kann, erlaubt, die Maschine sowohl für Netze von 50 Hz wie auch für solche von 60 Hz zu verwenden, Bild 22.

Der Start der Anlage kann automatisch und ferngesteuert erfolgen. Bild 21 zeigt die Startschalttafel. Für die Automatik wurde das BBC-Secontic-System verwendet. Die Anlage kann in 10 Minuten auf Vollast gebracht werden. Ein Startdiagramm ist aus Bild 23 zu ersehen. Die ganze Zentrale ist aus Bild 24 ersichtlich. Die bis heute vorliegenden Messergebnisse bestätigen nicht nur die rechnerischen Daten, sondern übertreffen sie sogar da und dort, wie aus Tabelle 3 hervorgeht. Die Rotortemperaturen wurden niedriger gemessen als die etwas zu vorsichtige Rechnung ergab. Die Maschine hat bis heute über 250 Anfahrvorgänge anstandslos bewältigt.

Eine etwas kleinere Maschine mit einer Klemmenleistung von rund 18000 kW sowie eine grössere mit einer solchen von 60000 bis 70000 kW befinden sich gegenwärtig in Fabrikation.

[1]) s. SBZ *88* (1970) H. 24, S. 535–541