

Heissluft-Turbinenanlagen mit geschlossenem Kreislauf: geschichtliche Entwicklung, heutiger Stand und Zukunftsprobleme

Autor(en): **Taygun, Fikret**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **75 (1957)**

Heft 24: **Sonderheft zum Internat. Verbrennungsmaschinenkongress Zürich 1957**

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-63375>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

(gestrichelte Linien, Bild 10) mit steigendem p_{me} und erhöhter Drehzahl wenig ab. Er ist aber mit 1,3 bei $p_{me} = 2$ und 600 U/min im Verhältnis zur kleinen Leistung der Maschine zu gross und bei grösster Leistung $p_{me} = 6$ und grösster Drehzahl $n = 1700$ U/min mit 1,06 verhältnismässig klein. Aus den Luftaufwandkurven geht auch im Drehzahlbereich von 700 bis 1100 U/min eine gewisse Unstabilität der Spülverhältnisse hervor.

4. Zusammenfassung

Bei den Untersuchungen über die Duplex-Turboaufladung an einer schnelllaufenden Zweitakt-Dieselmachine mit Längsspülung von mässiger effektiver Leistung und ohne Ladeluftkühlung wurde, ohne dass die Maschine irgendwie an sich, ausser dem Anbau der notwendigen Gebläse, verändert wurde,

eine bedeutende, von 32,2 bis 40,2 % gehende Leistungssteigerung und auch eine wesentliche Verminderung ihres Brennstoffverbrauches bei 1700 U/min von mindestens 8 bei grossen, und bis über 30 % bei kleinen Belastungen erzielt. Bei der Versuchsmachine wurden für die Duplex-Turboaufladung bestimmte Druckverhältnisse für das Vorgebläse und den Turbolader gewählt. Diese Druckverhältnisse werden natürlich verschieden festgelegt, je nachdem die betreffenden Maschinen für ortsfeste Zwecke in verschiedenen Höhen ü.M. oder für Schiffs- oder Fahrzeugantrieb verwendet werden. Für Fälle, bei denen die Einführung der Ladeluftkühlung durchführbar ist, ergeben sich selbstverständlich eine weitere Leistungserhöhung sowie eine zusätzliche Verminderung des Brennstoffverbrauchs.

Adresse des Verfassers: Dr. h. c. A. Büchi, Archstr. 2, Winterthur.

Heissluft-Turbinenanlagen mit geschlossenem Kreislauf

Geschichtliche Entwicklung, heutiger Stand und Zukunftsprobleme

DK 621.438

Von Dr. sc. techn. Fikret Taygun, Zürich

Einleitung

Im Januar 1956 kam im Werk der Escher Wyss GmbH. in Ravensburg eine Heissluftturbinenanlage von 2000 kW in Betrieb, die nach dem von Escher Wyss AG., Zürich, entwickelten Verfahren mit geschlossenem Kreislauf und mit kohlenstaubgefeuerten Lufterhitzer arbeitet. Diese Anlage hat seither fast dauernd in Betrieb gestanden, bis Ende April 1957 über 5300 Betriebsstunden gearbeitet, über 6 Mio kWh elektrischer Energie erzeugt und während des Winters das ganze Werk mit Heizwärme versorgt. Sie stellt unseres Wissens die erste, in industriellem Betrieb arbeitende Gasturbinenanlage der Welt dar, die mit festem Brennstoff betrieben wird. Mit diesem bedeutenden Ereignis ist eine bemerkenswerte Stufe in der Entwicklung thermischer Kraftmaschinen erreicht worden. Es dürfte daher der Zeitpunkt gekommen sein, den bisherigen Werdegang zusammenfassend zu überblicken, den heute erreichten Stand in seinen Hauptlinien zu beschreiben und die sich abzeichnenden Entwicklungsmöglichkeiten in einigen wesentlichen Zügen zu umreissen. Eine solche Darstellung ist hier um so eher gerechtfertigt, als die erste Veröffentlichung über den Heissluftprozess von dessen Erfindern und Förderern, Prof. Dr. J. Ackeret und Dr. C. Keller, vor 18 Jahren an dieser Stelle erfolgt ist¹⁾.

A. Die bisherige Entwicklung der nach dem geschlossenen Kreislauf arbeitenden Heissluft-Turbine

a) Die erste Versuchsanlage von 2000 kW

Die ersten Forschungsarbeiten zur Verwirklichung des Gasturbinenprozesses gehen bei Escher Wyss auf das Jahr 1920 zurück. Man stiess dabei auf Schwierigkeiten, die sich beim damaligen Stand des Strömungsmaschinenbaues und der Metallurgie noch nicht überwinden liessen. Immerhin

1) SBZ Band 113, S. 229 (13. Mai 1939).

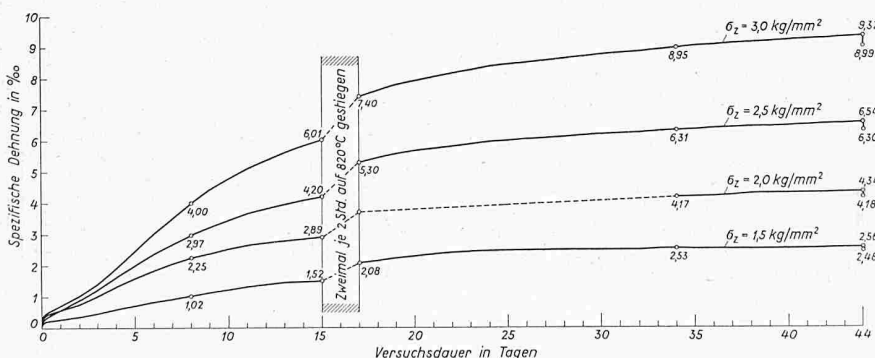


Bild 1. Dehnungsversuche aus dem Jahre 1937 an Lufterhitzerrohren aus Chrom-Nickel-Stahl 25/20 bei 720° C

wurden die hauptsächlichsten Linien erkannt, nach denen die Forschung weiterzutreiben war. Der Dampfturbinenbau bot dazu ein weites Feld praktischer Erprobung, Bewährung und Förderung.

Schon wesentlich günstiger waren die Voraussetzungen, als im Jahre 1935 Prof. Dr. J. Ackeret und Dr. C. Keller den Heissluftprozess mit geschlossenem Kreislauf zur Verwirklichung einer hochwertigen thermischen Kraftmaschine vorschlugen. Die Verwendung von Luft als Arbeitsmittel bietet sehr grosse Vorteile: Die von ihr bespülten Teile, insbesondere die Schaufelungen der Turbinen, bleiben sauber. Im Gegensatz zum Wasserdampf können die Drücke und Temperaturen unabhängig voneinander gewählt werden. Dies ermöglichte es damals, mit verhältnismässig geringen Drücken zu arbeiten, die mechanischen Beanspruchungen also klein zu halten und so den Vorstoss in Gebiete höherer Temperaturen mit einfacher Formgebung der Maschinen und Apparate und ohne Gefährdung der Betriebssicherheit erstmals zu vollziehen. Der geschlossene Kreislauf gestattet eine günstige Ausbildung der von den heissen Rauchgasen bespülten Uebertragungsflächen des Lufterhitzers und damit das Verfeuern verschiedenster, insbesondere auch fester Brennstoffe, worauf schon in der ersten Veröffentlichung¹⁾ hingewiesen wurde. Ein besonderer Vorteil ist die Druckregelung, bei welcher die Leistung lediglich durch Verändern des Systemdruckes dem Bedarf angepasst wird. Da dabei die Temperaturen, die Geschwindigkeiten und das Druckverhältnis unverändert bleiben, ergibt sich ein sehr flacher Verlauf der Wirkungsgradkurve. Da ferner bei Laständerungen die Temperaturen konstant bleiben, treten keine zusätzlichen Wärmespannungen auf. Die Veränderung des Druckpegels wird mit Vorteil im kalten Teil des Kreislaufs vollzogen, weshalb im heissen Teil keinerlei Steuer- oder Regelorgane nötig sind. Durch Erhöhen der Drücke verbessern sich die

Wärmeübergänge, und es lassen sich grosse unlaufende Arbeitsmittelmengen mit verhältnismässig kleinen Querschnitten bewältigen, so dass grosse Leistungen mit Maschinen und Apparaten von bescheidenen Ausmassen erzeugt werden können.

Der Vorschlag, der aus einer engen Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Industrie hervorgegangen war, versprach von Anfang an grosse Vorteile, und seine Verwirklichung erschien grundsätzlich durchführbar. Man entschloss sich daher, eine Versuchsanlage von 2000 kW mit ölgefeuerten Lufterhitzer zu bauen. Inzwischen waren auch in der Herstellung warmfester Baustoffe wesentliche

Fortschritte erzielt worden, so dass nun ein Betrieb mit hohen Temperaturen gewagt werden durfte, sofern die mechanischen Beanspruchungen sinngemäss gewählt und die für thermisch hochbelastete Teile geltenden Konstruktionsregeln befolgt werden.

Leider fiel die Verwirklichung dieses vielversprechenden Vorhabens in eine ungünstige Zeit. Der Zweite Weltkrieg brachte mannigfache Schwierigkeiten technischer sowie personeller Art und verursachte unliebsame Verzögerungen. Trotzdem konnte die Anlage fertig gestellt, ausprobiert und am 13./14. Dezember 1944 offiziellen Versuchen unterzogen werden, über die deren Leiter, Prof. H. Quiby, ETH, Zürich, hier ausführlich berichtet hat²⁾. Der gemessene Gesamtwirkungsgrad erreichte einen günstigsten Wert von 31,5 %, was einen Rekord für Gas- und Dampfturbinen dieser Grösse darstellt. Dieses Ergebnis, sowie das festgestellte Betriebsverhalten bewiesen die grundsätzliche Richtigkeit des neuen Verfahrens und bestätigten die Zweckmässigkeit der getroffenen Lösung. Das weitere intensive Verfolgen dieser Entwicklung war daher geboten. Man konnte ferner mit Genugtuung feststellen, dass das mechanische Verhalten sowie die Leistungsfähigkeit der Turbinen und Kompressoren den Erwartungen entsprachen. Die Arbeitsweise des Wärmeaustauschers, der Kühler und vor allem des Lufterhitzers befriedigte. Durch besondere Regulierversuche konnte man sich von der guten Anpassungsfähigkeit der Anlage an verschiedene Belastungen überzeugen³⁾.

Im Zusammenhang mit der Versuchsanlage sind eingehende Untersuchungen an hochhitzebeständigen Baustoffen durchgeführt worden, um deren Betriebsverhalten abzuklären. So standen etwa 450 Probestäbe bis zu 45 000 Stunden in Prüfung. Bemerkenswert sind u. a. die Versuche aus dem Jahre 1937 an Lufterhitzerrohren. Diese wurden ursprünglich aus Blechbändern aus Chrom-Nickel-Stahl 25/20 (Thermax 11) durch Aufbiegen und Schweissen der Länge nach hergestellt. Bild 1 zeigt die spezifische Dehnung, die diese Rohre bei verschiedenen Beanspruchungen durch Innendruck und bei einer Prüftemperatur von 720° Celsius erfuhr. In der Zeit zwischen dem 15. und dem 17. Versuchstag stieg die Prüftemperatur infolge einer Störung zweimal während je zwei Stunden auf 820° C. Diese starke thermische Ueberlastung bewirkte lediglich ein stärkeres Ansteigen der Dehnung, die nach Rückkehr auf die normale Prüftemperatur ohne jegliche Rissbildung ihren früheren Verlauf befolgte. Aus diesem Verhalten darf geschlossen werden, dass die Rohre bei unerwarteten Uebertemperaturen im Lufterhitzer nicht aufreissen, sondern sich nur etwas stärker dehnen werden, dass also hier eine grosse Sicherheit gegen Störungen besteht. Bei späteren Versuchen mit durch höheren Innendruck beanspruchten Lufterhitzerrohren hat sich gezeigt, dass diese Rohre bei thermischer Ueberbeanspruchung nicht brechen, sondern sich vorher stärker ausbauchen, so dass eine Gefährdung rechtzeitig festgestellt werden kann. Eine Explosionsgefahr besteht somit nicht.

Die erste Versuchsanlage von 2000 kW stand insgesamt rd. 6000 Stunden ohne nennenswerte Störung in Betrieb und hat in den Zeiten grosser Energieknappheit während und nach dem Zweiten Weltkrieg als Stromlieferant für die Werkstätten der Escher Wyss AG. in Zürich wertvolle Dienste geleistet. Sie wurde später abgebaut, um den Raum für andere Versuche freizugeben. Der Rotor der Hochdruckturbinen befindet sich heute in der Ausstellung für Erstausführungen im Deutschen Museum in München (Bild 2).

b) Die Heissluft-Turbinenanlage in St-Denis bei Paris

Auf Grund der guten Ergebnisse der ersten Versuchsanlage und der gewonnenen Betriebserfahrungen wurde in den Jahren 1946/1949 die erste industrielle Heissluft-Turbinenanlage mit geschlossenem Kreislauf für Oelfeuerung von

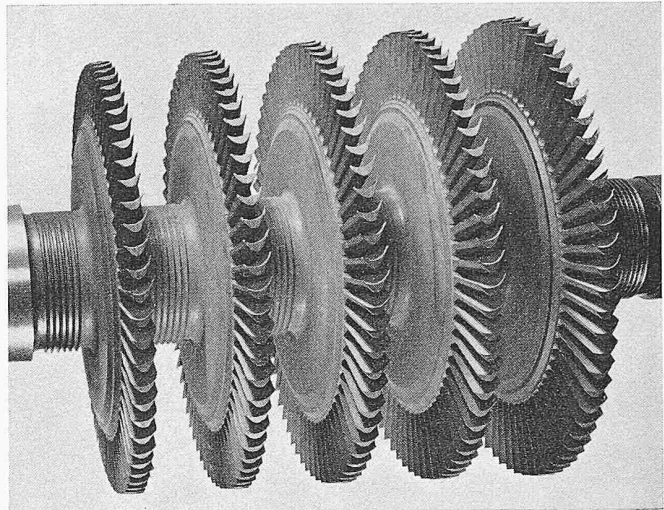


Bild 2. Rotor der Hochdruckturbinen der ersten Versuchsanlage von 2000 kW

12 500 kW für Grundlastbetrieb gebaut, die in der Centrale St-Denis der Electricité de France (EDF) zur Aufstellung kam (Bild 3). Der höchste Druck vor der Turbinen ist damals zu 50 at und das Druckverhältnis zu 10 gewählt worden. Durch das Festsetzen so hoher Drücke konnten die Wärmeaustauschflächen der Apparate (Lufterhitzer, Kühler und Wärmeaustauscher) verhältnismässig klein gehalten werden.

Man überschätzte damals die technischen Schwierigkeiten der Lufterhitzung. Die Strahlungsverhältnisse und die Wärmeübergänge bei hohen Temperaturen waren noch nicht genügend bekannt, weshalb der Lufterhitzer der Anlage in St-Denis als reiner Konvektionskessel gebaut wurde. Um dessen Abmessungen in erträglichen Grenzen zu halten, hat man eine Verbrennung bei höherem Druck (2 atü) gewählt.

Wie bei jeder Erstausführung stellten sich allerlei Kinderkrankheiten ein, die aber mit den grundsätzlichen Auslegungen des geschlossenen Kreislaufes nichts zu tun hatten. Ausserdem erschwerten die Nachkriegsverhältnisse die Inbetriebnahme dieser Anlage. Als dann mit dem Probetrieb begonnen werden konnte, traten leider verschiedene Stör-

²⁾ SBZ Bd. 125, S. 269 und 279 (9. und 16. Juni 1945).

³⁾ Ueber die grundsätzlichen Fragen der Leistungsregelung hat Dr. F. Salzmann eingehend berichtet in SBZ 1947, Nr. 10 und 11, S. 123* und 137*.

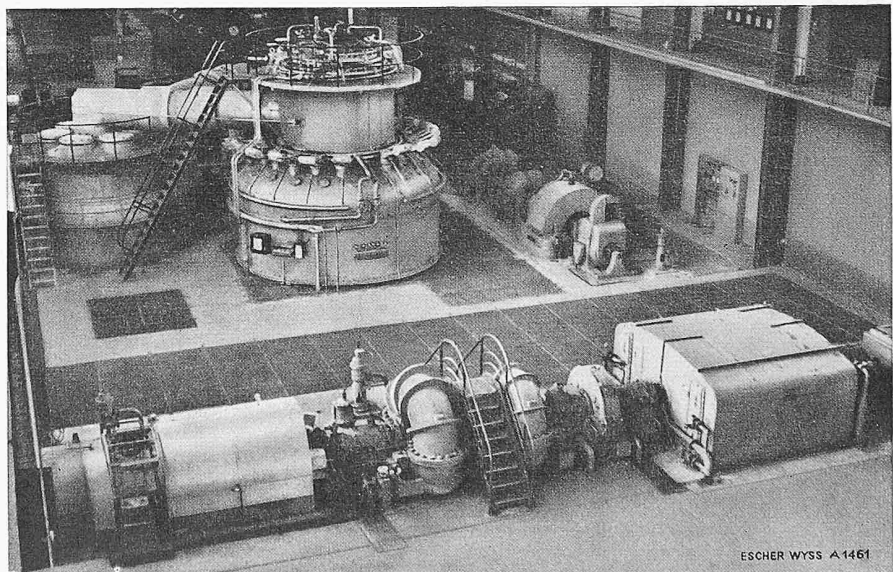


Bild 3. Heissluftturbinenanlage mit geschlossenem Kreislauf von 12 500 kW in der Centrale St-Denis bei Paris. Der Einbau in das bereits vorhandene Kraftwerkgebäude verlangte getrennte Aufstellung von Hochdruck- und Niederdruckgruppe. Im Hintergrund: Hochdruckgruppe (rechts), Lufterhitzer mit Ueberdruckölfuehrung (Mitte) und Verbrennungsluft-Vorwärmer (links)

ESCHER WYSS A 1461

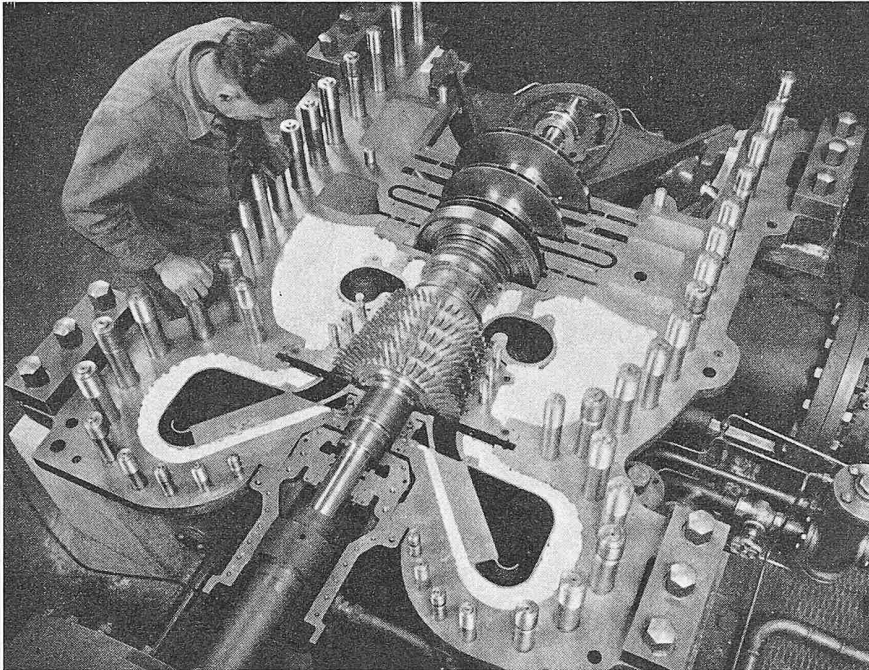


Bild 4. Abgedeckte TUCO-Anlage von 2000 kW, vorn fünfstufige Heissluftturbine für 650 bis 700° C, dahinter, auf gleicher Welle, dreistufiger Radialkompressor zur Luftverdichtung von 8 auf 32 ata

gen auf (Verbrennung von Elektromotoren für Hilfsantriebe, Schäden in Kühlwasserpumpen und Hilfskompressoren, Kontaktfehler der Schaltanlage, Schaufelbruch beim Radial-Kompressor infolge Nichtbeachtung der Zeichnungsvorschriften für das Schweißen), die kürzere oder längere Betriebsunterbrüche verursachten. Trotz allen diesen Schwierigkeiten konnte die Anlage anfangs 1954 mit Vollast betrieben werden. In verschiedenen Dauerversuchen von mehreren Wochen wurde das Verhalten bei Turbineneintrittstemperaturen von 600 bis 675° C kritisch geprüft.

Die Betriebsergebnisse dieser Anlage haben wiederum eindeutig gezeigt, dass die Elemente des Kreislaufes nach längeren Betriebszeiten sauber blieben und dass die Verwendung kleinster Strömungsquerschnitte und kleinster hydraulischer Radien zulässig ist. Die den höchsten Temperaturen ausgesetzten Teile, wie Lufterhitzerrohre und Turbinenschaukeln, haben keine einzige Betriebsstörung verursacht.

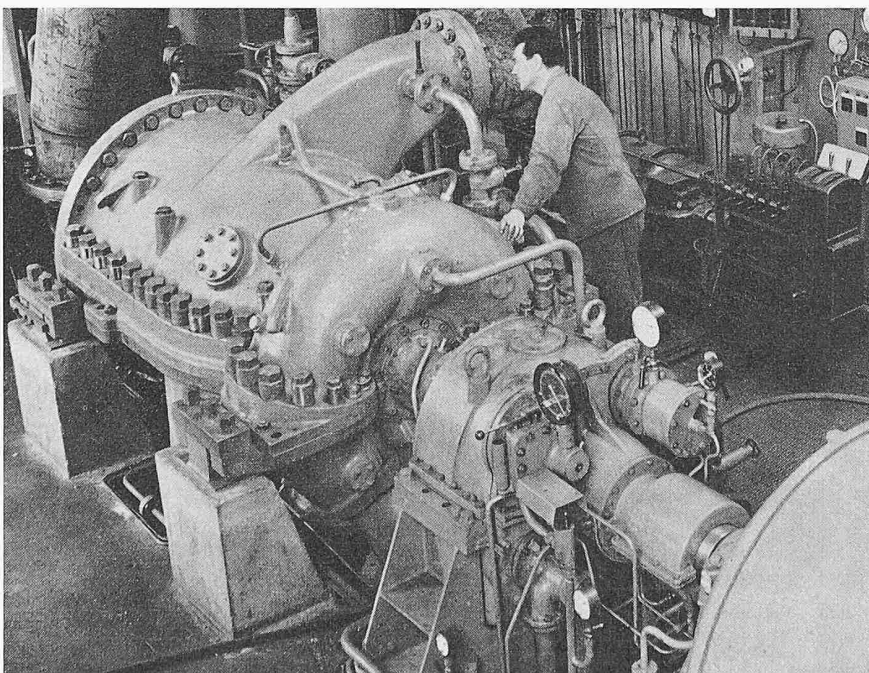


Bild 5. TUCO-Anlage für 2000 kW Nutzleistung auf dem Prüfstand

c) Heissluft-Turbinenanlagen in Grossbritannien

Die North of Scotland Hydro Electric Board, welche neben dem Ausbau von Wasserkräften in Nordschottland auch die Entwicklung auf dem Gebiete der Gasturbinen ernsthaft verfolgt, da sich diese Anlagen vorzüglich zur Spitzendeckung im Verbundbetrieb mit Wasserkraftwerken eignen, beauftragte die bekannte Schiffbaufirma John Brown & Co. Ltd., Clydebank, Schottland, mit dem Bau einer Heissluft-Turbinenanlage von 12 500 kW für die Zentrale Dundee, die die gleichen Auslegedaten aufweist wie die Anlage St-Denis der Electricité de France.

Die Firma John Brown hatte im Jahre 1945 eine kleine Versuchsgasturbinenanlage offener Bauweise für etwa 500 PS und mit einer Gastemperatur bei Turbineneintritt von 550° C in Einwellenanordnung gebaut. Das Hauptinteresse lag dabei darin, die Wirkungsweise der verschiedenen Maschinen und Apparate sowie das Verhalten der aus austenitischen Stählen hergestellten Bauteile zu erforschen. Bei den Proben stellte man fest, dass die Turbinenschaukeln nach verhältnismässig kurzer Betriebsdauer mit beträchtlichen Ablagerungen behaftet wurden. Ähnliche Beobachtungen

konnten beim Wärmeaustauscher und bei der Brennkammer gemacht werden. Man erkannte, dass offene Gasturbinen wegen starker Verschmutzung periodisch gereinigt werden müssen, was den Ausnutzungsgrad und damit den wirtschaftlichen Wert dieser Maschinengattung empfindlich verringert.

Im Hinblick auf diese nicht sehr befriedigenden Ergebnisse wurde diese Versuchsanlage auf geschlossenem Kreislauf umgebaut, indem man die Brennkammer durch einen Lufterhitzer ersetzte. Damit sind hier erstmals von neutraler Seite Vergleichsversuche zwischen Gasturbinen nach dem offenen Verfahren und Heissluftturbinen mit geschlossenem Kreislauf durchgeführt worden, deren Ergebnisse eindeutig die Überlegenheit der Heissluftturbine zeigten. Ermutigt durch diese Feststellung erwarb die Firma John Brown von Escher Wyss AG. die Lizenz für den Bau von Anlagen nach dem Prinzip des geschlossenen Kreislaufs und nahm aktiv an der Weiterentwicklung dieser Anlagen teil. Im besondern förderte sie den Bau von Lufterhitzern für Torffeuerung. In Zusammenarbeit mit der Firma Spencer Boncourt, London, baute sie für die Foleshill Gaswerke in Coventry eine Abhitzeverwertungsanlage mit geschlossenem Kreislauf von 600 kW.

d) Entwicklungen in neuester Zeit

Der Maschinensatz der ersten Versuchsanlage bestand aus drei Kompressions- und einer Expansionsstufe. In den Anlagen in St-Denis und in Dundee sind dagegen vier Kompressions- und zwei Expansionsstufen vorhanden. Die Kompliziertheit dieser Anlagen mit je drei, mechanisch voneinander unabhängigen Gruppen und gesamthaft acht Maschinen zwangen den Konstrukteur beim Entwerfen von zukünftigen Projekten neue Richtlinien zu verfolgen, da sich bei der bisherigen Bauweise die umfangreichen Hilfseinrichtungen, die grössten Undichtheitsverluste und mechanischen Verluste infolge einer grösseren Zahl von Lagern usw. ungünstig auswirken.

Man betrachtet heute für stationäre Anlagen einfache Einheiten mit Druckverhältnissen von 3,6 bis 4,4, Höchst-

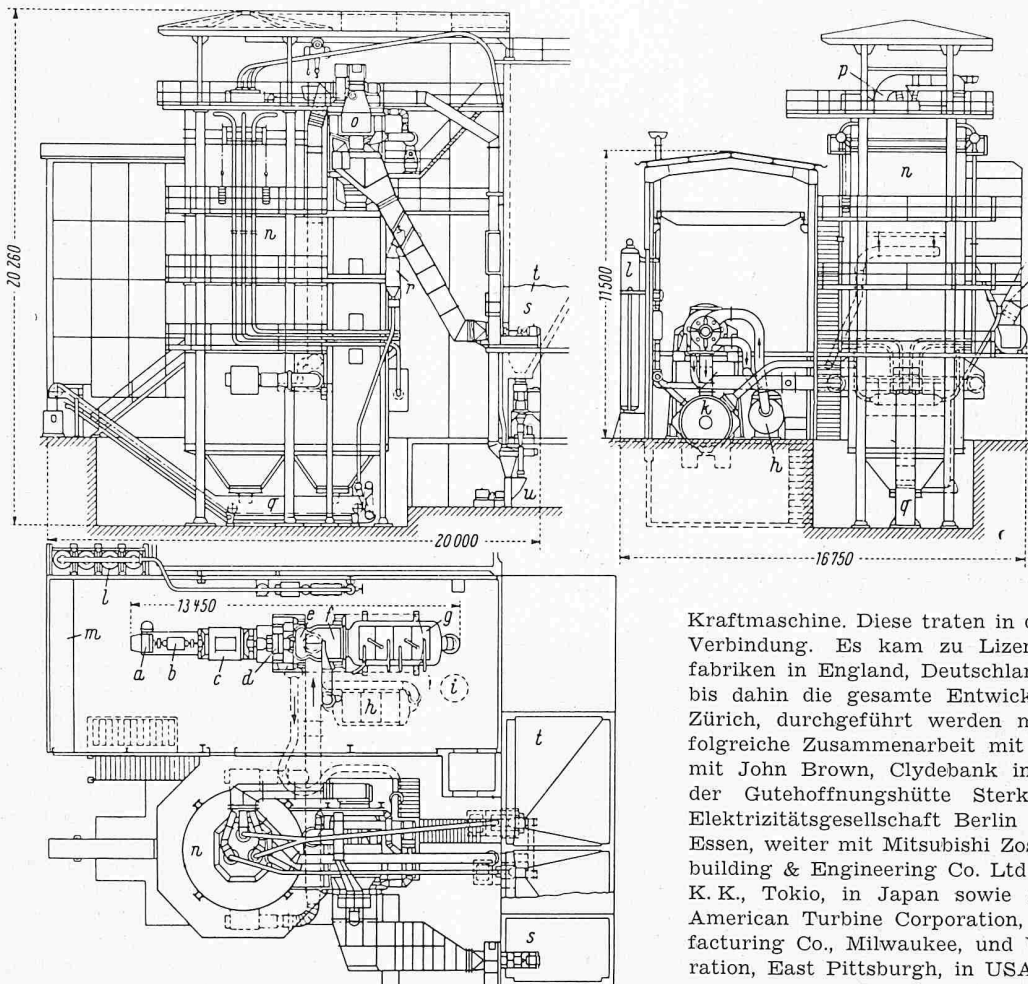


Bild 6. Dispositionsplan der Anlage Ravensburg, M 1:250

- a Anlassmotor
- b Erreger
- c Stromerzeuger
- d Getriebe
- e Turbine
- f Verdichter
- g Vorkühler
- h Zwischenkühler
- i Heizwasserrückkühler
- k Wärmeaustauscher
- l Hochdruckbehälter
- m Schalttafel
- n Lufterhitzer
- o Luftvorwärmer
- p Frischluftgebläse
- q Entschlacker
- r Entstauber
- s Abgasgebläse
- t Kohlenbunker
- u Kohlenmühlen

Kraftmaschine. Diese traten in der Folge mit Escher Wyss in Verbindung. Es kam zu Lizenzabkommen mit Maschinenfabriken in England, Deutschland, Japan und USA. Während bis dahin die gesamte Entwicklung von Escher Wyss AG., Zürich, durchgeführt werden musste, begann jetzt eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit den Lizenznehmern, nämlich mit John Brown, Clydebank in Grossbritannien, ferner mit der Gutehoffnungshütte Sterkrade AG., der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft Berlin und Friedrich Krupp AG. in Essen, weiter mit Mitsubishi Zosen K. K., Tokio; Mitsui Shipbuilding & Engineering Co. Ltd., Tokio und Fuji Denki Seizo K. K., Tokio, in Japan sowie schliesslich mit den Firmen American Turbine Corporation, New York, Nordberg Manufacturing Co., Milwaukee, und Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, in USA.

drücken unterhalb von 35 at und Temperaturen von 660 bis 700° C, mit einfacher Expansion in der Turbine und nur einem oder zwei Zwischenkühlern zwischen den Kompressionsstufen, in den meisten Fällen als die beste Lösung. Auf Grund ausgedehnter Untersuchungen gelangte man zur TUCO-Bauweise (Bild 4), bei welcher die Laufräder der Turbine und des Kompressors auf einer gemeinsamen, nur zweifach gelagerten Welle in einem Gehäuse zusammengebaut sind. Auf diese Weise konnte das Gesamtgewicht der Maschinengruppe von 25 t der ersten Versuchsanlage auf etwa 9 t bei der TUCO-Gruppe verringert werden, während die Baulänge der Maschinengruppe ohne Generator von 9,5 auf 3,0 m zurückging. Diese bedeutende Vereinfachung konnte aber erst durchgeführt werden, nachdem die Erfahrungen mit der ersten Versuchsanlage und der Anlage von St-Denis vorlagen und es durch intensive Forschungsarbeit gelungen war, den Wirkungsgrad des Radialkompressors ganz erheblich zu verbessern.

Gleichzeitig hat man die Lufterhitzer neu durchgebildet. Die Wärmeübertragungsfläche, die aus Rohren von kleinem Durchmesser aufgebaut wird, besteht neuerdings aus einem Strahlungsteil und einem Konvektionsteil. Damit konnte der Wärmeübergang beträchtlich verbessert werden. Es ist jetzt möglich, die Verbrennung unter atmosphärischem Druck vorzunehmen, ohne übermässig grosse Flächen zu erhalten. Das bedeutet eine weitere wesentliche Vereinfachung. In diesem Zusammenhang ist auch darauf hinzuweisen, dass im Gegensatz zu vielen andern Meinungen das Aufheizen von komprimierter Luft kein grösseres Problem darstellt als die Erzeugung von hochüberhitztem Wasserdampf. Bild 5 zeigt eine TUCO-Gruppe für 2000 kW mit drei Kompressor- und fünf Turbinen-Stufen auf gemeinsamer Welle. Sie ist im Jahre 1954 auf dem Versuchsstand der Escher Wyss AG. in Zürich einem gründlichen Probelauf unterzogen worden.

Die Vorführung der ersten Heissluftturbinenanlage mit geschlossenem Kreislauf sowie zahlreiche Veröffentlichungen und Patentschriften überzeugten verschiedene bedeutende Unternehmungen von den Vorteilen dieser neuen thermischen

B. Die kohlenstaubgefeuerte Heissluft-Turbinenanlage in Ravensburg

a) Die Veranlassung

Die beträchtliche Produktionssteigerung, die die Escher Wyss GmbH, Ravensburg, in den letzten Jahren erfuhr, erhöhte naturgemäss auch den Bedarf an elektrischer Energie. Die Tagesspitze beträgt heute 1800 kW, während der Energiebedarf bei Nacht zwischen 300 und 800 kW liegt. Die bestehenden hydraulischen und thermischen Anlagen, welche bisher einen Teil des Werkbedarfs deckten, liessen sich nicht mehr weiter ausbauen. Daher kam für die Eigenversorgung nur eine thermische Zentrale in Betracht. Wirtschaftliche Ueberlegungen liessen erkennen, dass als Brennstoff nur Kohle in Frage kommt. Es musste entschieden werden, ob eine neue Dampfturbinenanlage oder eine Heissluftturbinenanlage aufgestellt werden soll. Die Wahl fiel nach gründlichen Studien und eingehenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen auf die Heissluftturbinenanlage, da diese Anlage besonders gute Teillastwirkungsgrade aufweist und demzufolge belastungsmässig den Anforderungen des Werkes besser angepasst werden kann. Ausserdem ist sie im Stande, das ganze Werk in sehr wirtschaftlicher Weise mit der nötigen Heizwärme zu versorgen. Die normale Dauerleistung wurde zu 2000 kW festgelegt. Der Wärmebedarf erreicht im Winter 2 Mio kcal/h, er kann bei sehr kaltem Wetter sogar auf 3 Mio kcal/h ansteigen.

Die Projektstudien liessen ganz allgemein die hervorragende Eignung der mit geschlossenem Kreislauf arbeitenden Heissluftturbinenanlage für die Kupplung von Kraft- und Wärmeerzeugung erkennen. Im Gegensatz zur Dampfturbinenanlage steht in den Luftkühlern der Heissluftanlage stets Wärme für Raumheizung von genügend hoher Temperatur zur Verfügung und zwar ohne dass dadurch der thermische Wirkungsgrad der Kraftherzeugung irgendwie ungünstig beeinflusst würde.

Interessant ist der Vergleich des Verhaltens mit dem einer Dampfturbinenanlage gleicher Leistung. Im Vollastpunkt würde man hier bei reinem Kondensationsbetrieb auf einen Klemmenwirkungsgrad von etwa 22 % und im Heiz-

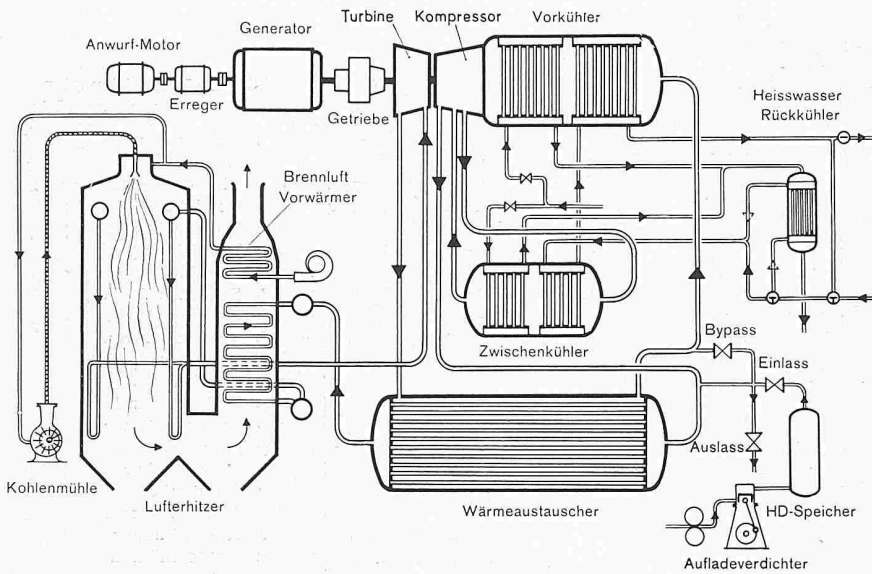


Bild 7. Prinzipschema der Heissluftturbinenanlage Ravensburg

betrieb auf einen solchen von 18 bis 19 %, im Mittel also auf rd. 20 % kommen. Demgegenüber ergibt die Heissluft-Turbinenanlage gemäss Auslegung einen Klemmenwirkungsgrad von 26 %, der nur bei Wärmeabgaben, die wesentlich über 2 Mio kcal/h liegen, also nur wenige Wochen im Jahr vorkommen, auf 24,5 % zurückgeht. Bei Teillasten verschieben sich die Verhältnisse noch mehr zu Gunsten der Heissluftturbine.

Die Anlage entstand in Gemeinschaftsarbeit der Firmen Escher Wyss AG., Zürich, Escher Wyss GmbH., Ravensburg, und Gutehoffnungshütte Sterkrade AG. Der Luftherhitzer wurde zudem noch in Zusammenarbeit mit der Kohlenscheidungs-Gesellschaft Stuttgart entworfen, die auch die Feuerungseinrichtung lieferte. Bild 6 zeigt die Anordnung der Hauptteile.

b) Der Aufbau der Ravensburger Anlage

Wie aus dem Prinzipschema Bild 7 hervorgeht, wird bei Normallast Luft von 7,25 ata und 20 ° C im dreistufigen Radialkompressor mit einfacher Zwischenkühlung auf 28,2 ata verdichtet, sie durchströmt dann den Wärmeaustauscher, in welchem sie sich an der von der Turbine herkommenden Luft auf 397 ° C erwärmt. Anschliessend gelangt sie in den Luftherhitzer, in dessen Konvektionsteil sie zunächst im Gegenstrom mit den Verbrennungsgasen auf 470 ° C und nachher in dessen Strahlungsteil bis auf 660 ° C erhitzt wird. In diesem Zustand tritt sie in die Turbine ein, wo sie in fünf Stufen unter Arbeitsleistung auf 7,5 ata und 423 ° C expandiert. Schliesslich erfährt sie im Wärmeaustauscher und im Vorkühler weiteren Wärmeentzug, bis ihre Temperatur auf 20 ° C gesunken ist.

Die Leistungsregelung erfolgt, wie erwähnt, durch Verändern des Druckpegels. Bei Lasterhöhung wird aus einer Batterie von vier Druckluftbehältern verdichtete Kaltluft in die Hochdruckleitung zwischen Verdichter und Wärme-

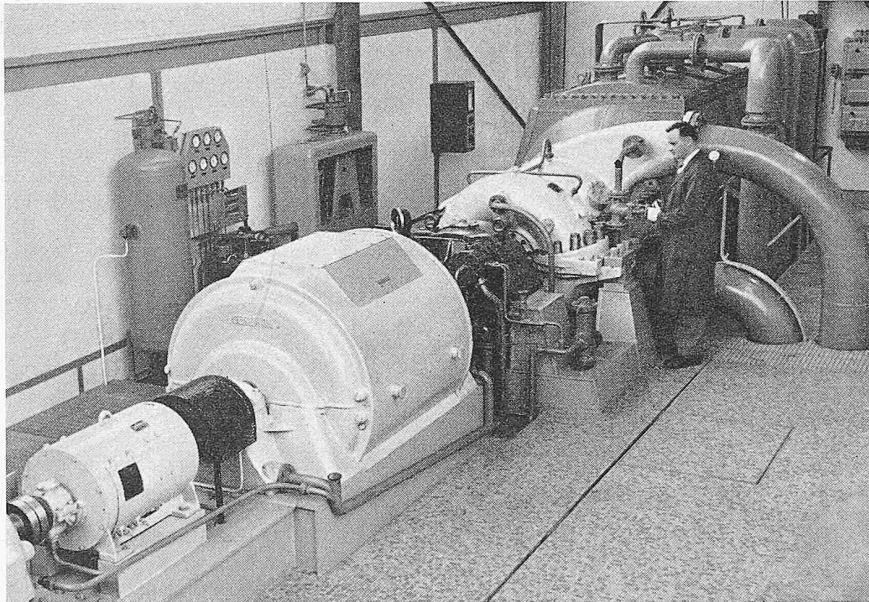


Bild 9. Maschinengruppe der Heissluftturbinenanlage Ravensburg. Vorn Erreger, anschliessend Generator, Getriebe, Turbine, Kompressor mit Luftleitungen nach (oben) und vom (unten) Zwischenkühler, ganz hinten Vorkühler mit isolierten Kühlwasser- und Heizwasserleitungen

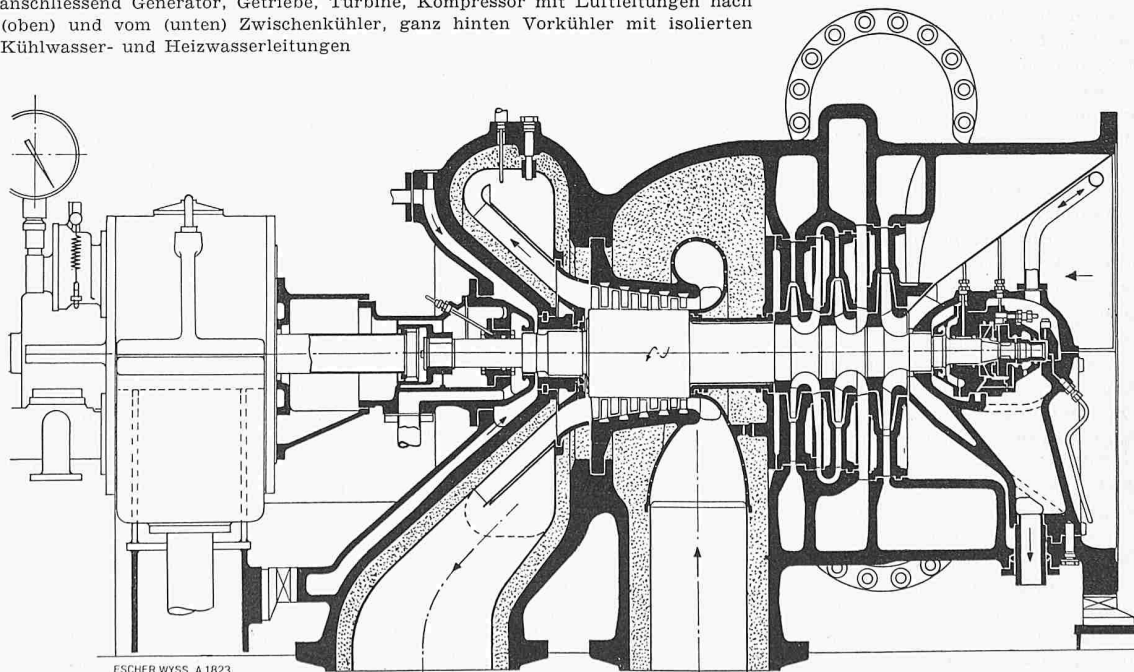


Bild 8. Längsschnitt durch die Maschinengruppe in TUCO-Bauweise

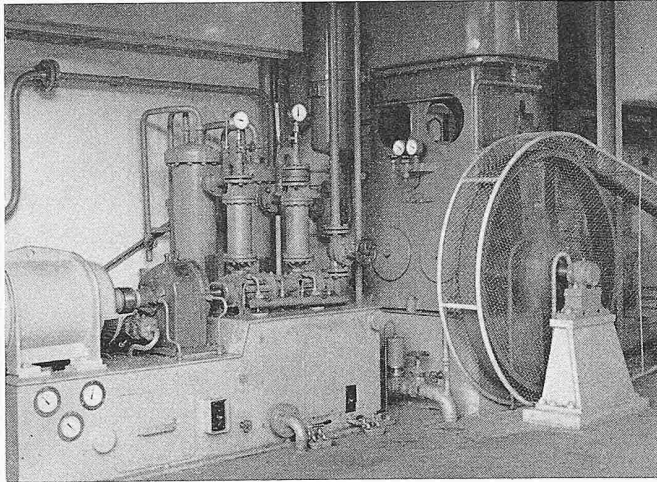


Bild 10. Lysholm Schraubenkompressoren (Drehzahl rd. 17 000 U/min, Enddruck rd. 10 atü) mit dazu in Serie geschaltetem Trockenlauf-Kolbenkompressor (Drehzahl 275 U/min, Enddruck 40 atü) zum Aufladen der Hochdruckspeicher mit ölfreier Luft

austauscher eingeführt und so der Druckpegel erhöht. Bei Entlastungen, die plötzlich erfolgen können, öffnet zunächst ein Bypassventil, das eine Verbindung zwischen dem Austrittsstutzen des Kompressors und dem Eintrittsstutzen des Vorkühlers herstellt, und verringert so unverzüglich die durch die Turbine strömende Luftmenge. Hält der geringere Leistungsbedarf während längerer Zeit an, so verbindet ein weiteres Regelorgan die vorhin genannte Stelle in der Druckleitung des Kompressors mit dem Freien und senkt so den Druckpegel ab, während gleichzeitig das Bypassventil schliesst.

Der Druckluftbehälter besteht aus vier Flaschen, die mit Luft von 40 ata gefüllt sind. Da die Luft absolut ölfrei sein muss, dienen zum Aufladen Lysholm-Schraubenverdichter, denen ein vertikaler Trockenlauf-Kolbenkompressor nachgeschaltet ist, Bild 10. Bei einer Anlage, die nur für die Grundlastversorgung bestimmt ist oder nach einem bestimmten Tagesfahrplan betrieben wird, kann auf die Hochdruckspeicherung mit Kolbenkompressor verzichtet werden. Das selbe gilt für Anlagen grösserer Leistung, wo man mit Schraubenverdichtern allein auskommt.

Die der Leistungsregelung dienenden Luftventile werden von mit Drucköl arbeitenden Servomotoren betätigt, die unter der Kontrolle des Drehzahlreglers stehen und mit geeigneten Rückführungen ausgerüstet sind. Die Menge des den Bren-

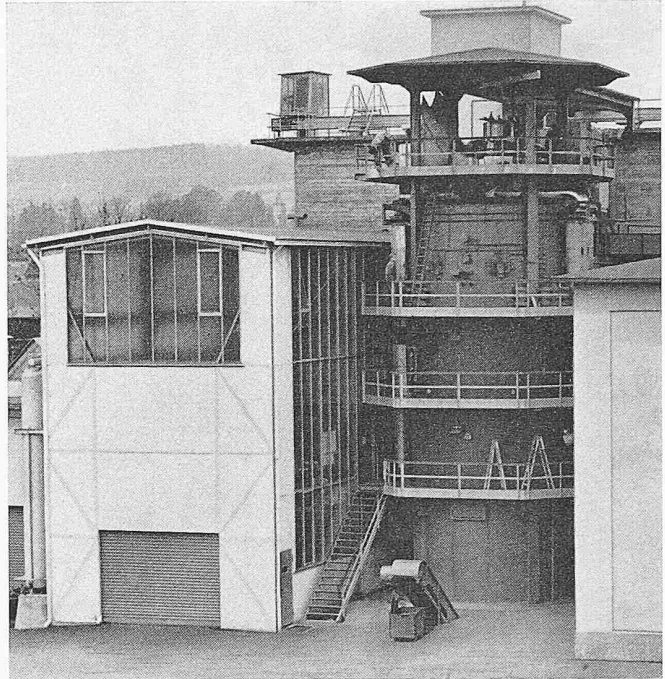


Bild 14. Ansicht des Lufterhitzers rechts, links das Turbinenhaus

nern des Lufterhitzers zugeführten Kohlenstaubes wird selbsttätig in Abhängigkeit der Belastung geregelt. Dabei erfolgt eine erste Beeinflussung der Zuteilung in Abhängigkeit des Luftdruckes im Hochdruckteil, während die eigentliche Feinregelung von der Lufttemperatur vor der Turbine ausgeht, und diese konstant hält.

c) Die Hauptorgane der Anlage

1. Die Maschinengruppe

Der Aufbau der sehr eng zusammengebauten Maschinengruppe geht aus dem Längsschnitt (Bild 8) hervor. Die Rotoren von Turbine und Kompressor sind auf einer gemeinsamen Welle aufgesetzt, die in zwei Lagern gehalten ist und mit 12 750 U/min umläuft. Die kälteren Niederdruckseiten beider Maschinen befinden sich aussen, die heissen Hochdruckseiten innen. Diese werden durch ein einfaches Labyrinth voneinander getrennt, das eine nur geringe Druckdifferenz abzdrosseln hat. Dabei bewirkt die kühlere Leckluft, die von der Hochdruckseite des Kompressors nach der Turbine strömt, eine sehr willkommene Kühlung der Welle. An den Aussenseiten dichten einfache Stopfbüchsen die Niederdruckteile von Turbine und Kompressor gegen die Lager ab.

Bemerkenswert ist ferner die Doppelmantel-Bauweise der Heissluftzuführung zur Turbine. Der in der Leitung herrschende Druck wird vom unlegierten, dickwandigen äusseren Rohrkörper aufgenommen, während das heisse Gas durch ein dünnwandiges, perforiertes Blechrohr aus hitzebeständigem Stahl geführt wird. Zwischen diesem und dem Aussenmantel ist eine Isolation aus Steinwolle eingebaut. Bei einer Druckänderung im Innern der Leitung pflanzt sich diese durch die Oeffnungen im Führungsrohr bis zur Gehäusewand fort. Durch diese Aufgabentrennung ergibt sich eine sehr gute Werkstoffausnützung. Dass die Doppelmantel-Bauweise durchgeführt werden kann, bildet einen weiteren wesentlichen Vorteil des mit einem reinen Arbeitsmittel betriebenen Turbinenprozesses. Sie ist, wie aus Bild 8 ersichtlich, sowohl auf der Eintrittseite wie auch auf der Austrittseite der Turbine angewendet worden, weshalb das Aussengehäuse nicht aus teurem, austenitischem Material hergestellt werden muss.

Die Turbine treibt über ein Planeten-Reduktionsgetriebe (12 750/3000 U/min, Bauart Stoeckicht) den Generator mit seinem Erreger an. Am Wellenende befindet sich der Anwurfmotor.

2. Der Lufterhitzer

Dieser mit Kohlenstaub gefeuerte Apparat stellt eine bemerkenswerte Erstaussführung dar. Bild 11 zeigt das

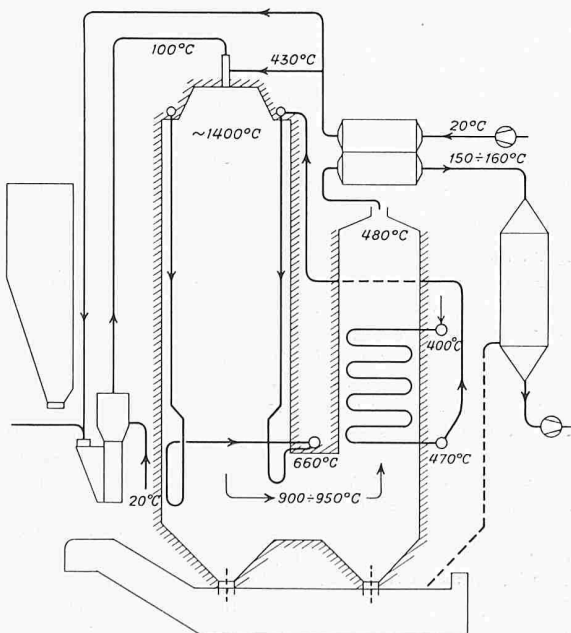


Bild 11. Schema des kohlenstaubgefeuerten Lufterhitzers mit Arbeitstemperaturen

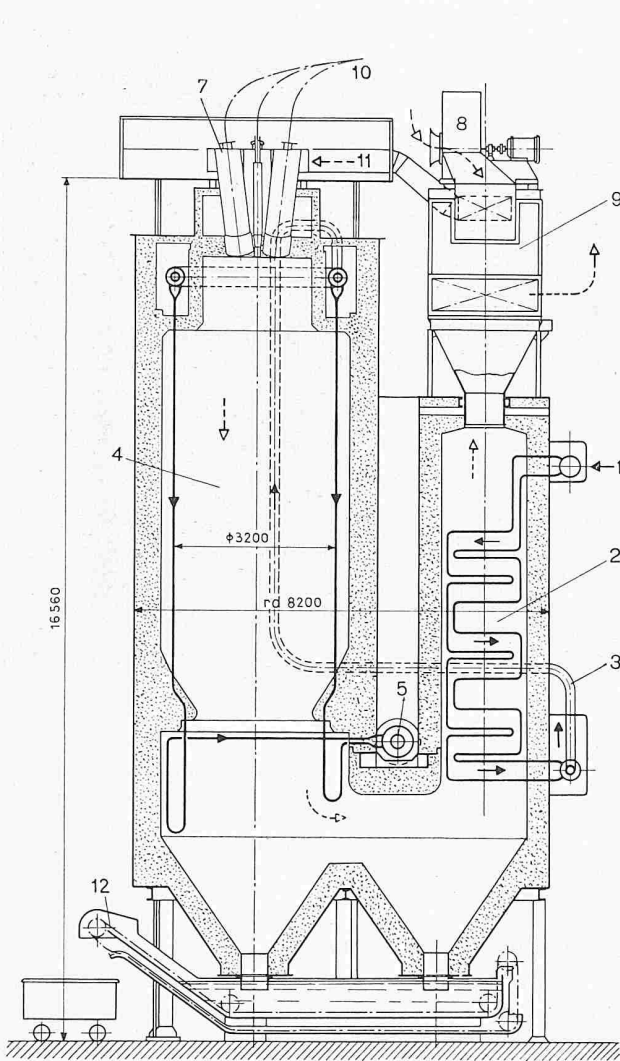


Bild 12. Schnitt durch den Lufterhitzer der Anlage Ravensburg von 2000 kW mit Kohlenstaubfeuerung, Masstab 1:120

- | | |
|---|--|
| 1 Hochdruckluft-Eintritt (aus Wärmeaustauscher) | 6 Kohlenmühlen |
| 2 Konvektionsteil | 7 Wirbelbrenner für Kohlenstaub |
| 3 Verbindungsleitung vom Konvektionsteil zum Strahlungsteil | 8 Gebläse für Verbrennungsluft |
| 4 Brennkammer (Strahlgs.-Teil) | 9 Ljungström-Luftvorwärmer |
| 5 Sammler für die austretende Kreislauf Luft | 10 Zufuhrleitung für Primärluft und Kohlenstaub zu 7 |
| | 11 Zufuhrleitg. für Sekundärluft |
| | 12 Nassentschläcker |

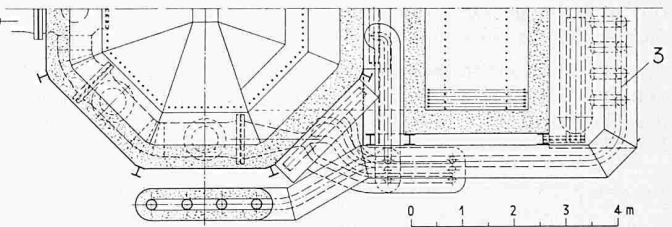
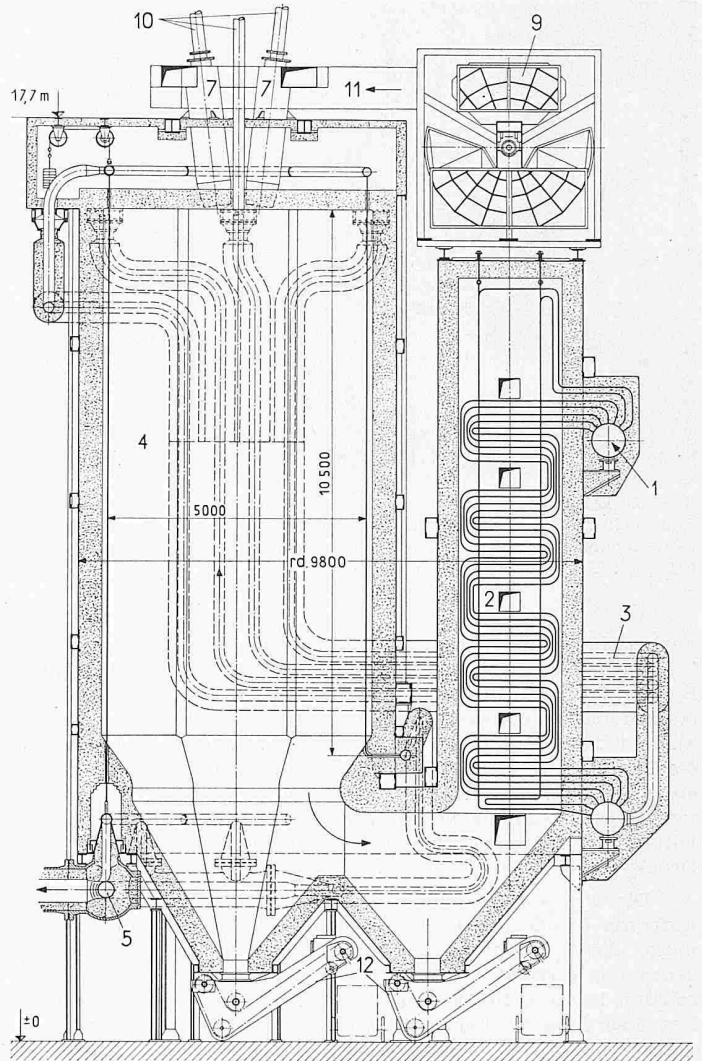


Bild 13. Schnitt durch den Lufterhitzer der Anlage Coburg von 6600 kW mit Kohlenstaubfeuerung, Masstab 1:120

Schema mit den Arbeitstemperaturen, Bild 12 einen Schnitt und Bild 14 eine Ansicht des im Freien aufgestellten Apparates.

Beim Entwurf hat man dem Umstand Rechnung getragen, dass es sich um eine Erstaufführung handelt, und dass das Verfeuern von Kohlenstaub für so kleine Leistungen ungewöhnlich ist. Dementsprechend wählte man eine sehr niedrige Brennkammerbelastung von nur rd. 150 000 kcal/m³h, ordnete die drei Brenner 7 (Bild 12) oben mit leicht gegen die Vertikale geneigter Axe an, so dass sich eine grosse Ausbrandlänge ergibt, und sah einen zusätzlichen Oelbrenner vor, der zum Anfahren und bei Belastungen unter etwa 350 kW zur Erzeugung einer Stützflamme dient. Der Betrieb hat gezeigt, dass der Brennraum wesentlich höher belastet werden kann. Der Lufterhitzer der Heissluftturbinenanlage von 6600 kW für die Werke der Stadt Coburg ist, wie Bild 13 zeigt, nur wenig grösser als derjenige der Ravensburger Anlage. Die Flamme durchsetzt die Brennkammer 4 (Bild 12) von oben nach unten. Eine Einschnürung im untern Teil hält sie in der Mitte des Rohrkranzes. Die auf 900 bis 950° C abgekühlten Rauchgase gelangen nach zweimaliger Umlenkung um 90° in den Konvektionsteil 2, durchstreichen diesen von

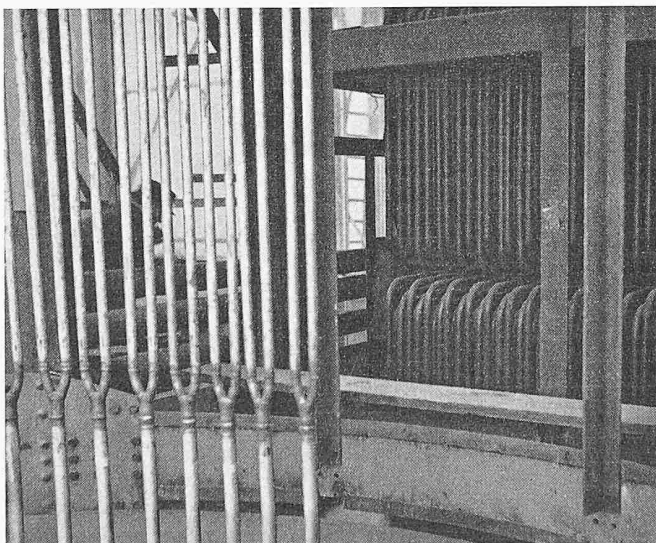


Bild 15. Ausschnitt aus dem Strahlungsteil des Lufterhitzers während der Montage, hinten Rohrbündel des Konvektionsteils

unten nach oben, treten dann mit etwa 480° C in den Ljungström-Luftvorwärmer 9 ein, um schliesslich mit 150 bis 160° C über einen Staubabscheider vom Saugzugebläse abgesogen und dem Hochkamin zugeführt zu werden. Bei der Umlenkung vom Strahlungsteil 4 zum Konvektionsteil 2 wird der Hauptteil der Asche ausgeschleudert. Diese gelangt durch zwei Trichter auf den Nassentschlacker 12, der auch die im Staubabscheider anfallende Asche aufnimmt.

Die Kreislauf Luft tritt am oberen Ende des Konvektionsteils bei 1 mit etwa 400° C ein und gelangt im Kreuz-Gegenstrom zu den Rauchgasen durch die Rohrbündel nach unten, wo sie mit rd. 470° C von einem Sammler aufgenommen wird. Von diesem führen sechs ausserhalb liegende Rohre 3 nach dem im oberen Teil des Strahlungserhitzers liegenden, gegen die Brennkammer 4 isolierten Ringsammler, der aus sechs Elementen besteht, so dass sich die Wärmedehnungen frei auswirken können. Vom Ringsammler führen Rohre von 32 mm Aussendurchmesser und 2,5 mm Wandstärke die Luft nach unten. Kurz über der Einschnürung werden je zwei Rohre zu einem von 44 mm Aussendurchmesser und 3 mm Wandstärke zusammengefasst, Bild 15. Diese laufen weiter nach unten bis nahe zum unteren Ende des Strahlungsteils, biegen dort um 180° um, führen in einem äusseren Rohrkranz wieder nach oben bis dicht unter die Einschnürung, wo sich wieder zwei Rohre zu einem von 70 mm Aussendurchmesser und 4 mm Wandstärke vereinigen. Diese grösseren Rohre, in denen die Luft 660° C aufweist, treten nun durch die Wand nach aussen in seitlich angebrachte Endsammler. Die Rohre des Strahlungsteils von 32, 44 und 70 mm Aussendurchmesser bestehen aus austenitischem Stahl, alle übrigen aus ferritischem. Bei Vollast nimmt die Kreislauf Luft 30 % der insgesamt zugeführten Wärme im Konvektionsteil und 70 % im Strahlungsteil auf. Bei Teillast ist der Anteil des Strahlungsteils noch grösser.

Von den beiden Schläger-Kohlenmühlen ist die eine für einen Durchsatz von 0,8 t/h, die andere für einen solchen von

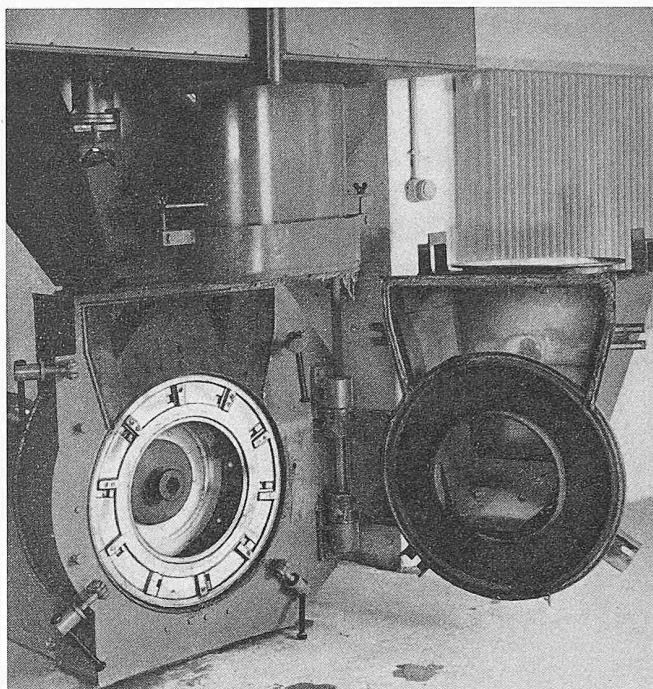


Bild 16. Schläger-Kohlenmühle

0,4 t/h ausgelegt, Bild 16. Diese Aufteilung erlaubt eine gute Anpassung an wechselnde, namentlich auch kleinere Belastungen. Die Mühlen erhalten auf 430° C vorgewärmte Primärluft, die sich mit dem Kohlenstaub mischt, ihn trocknet und den Brennern zuführt. (Schluss folgt)

Neuere Entwicklung der Saurer-Fahrzeugdieselmotoren

DK 621.436:625.2:629.113

Nach Angaben der Aktiengesellschaft Adolph Saurer, Arbon

Schon im Jahre 1908 trat die Firma Saurer mit Dr. Rudolf Diesel in Verbindung, um unter dessen persönlicher Mitwirkung einen schnellaufenden Automotormotor zu entwickeln. Die Arbeiten, die vielversprechende Anfängerfolge zeitigten, jedoch während des Ersten Weltkrieges bis 1923 unterbrochen werden mussten, sind später hauptsächlich unter der initiativen und umsichtigen Leitung von Hippolyt Saurer stark gefördert worden.

Ausgehend vom Acro-Luftspeicher-Verbrennungsverfahren entstand in dessen Abwandlung das Saurer-Kreuzstromverfahren. Der 1934 erfundene Saurer-Doppelwirbelungsmotor mit direkter Einspritzung begründete dank seines günstigen Brennstoffverbrauches und des leichten Startvermögens den ungeahnten Aufschwung des Nutzfahrzeugdieselmotors in der Schweiz. Ueber diese Entwicklung ist hier verschiedentlich berichtet worden¹⁾. Das Saurer Doppelwirbelungsverfahren haben in neuerer Zeit viele Firmen im In- und Ausland in ähnlicher Form übernommen und es hat eine grosse Verbreitung gefunden.

Noch vor dem Zweiten Weltkrieg kam die C-Motorenreihe auf den Markt, mit Gehäusen aus Silumin-Gamma, einer hochfesten Leichtmetalllegierung, womit eine bedeutende Gewichtsverminderung erzielt werden konnte. Die seitherigen Arbeiten richteten sich vor allem auf die Steigerung der Leistung dieser Motoren, die schliesslich zu einer Leistungsverdoppelung bei gleichzeitiger Verringerung des Leistungsgebietes von 7,2 auf 4,3 kg/PS führten. Ueber die Mittel und Wege, die zu diesem Ergebnis verhalfen, soll nachfolgend berichtet werden.

1. Massnahmen zur Leistungssteigerung

Beim Dieselmotor ist die Höchstleistung durch die Unvollständigkeit der Verbrennung, also durch den Gehalt der Auspuffgase an CO und Russ begrenzt. Eine sachliche Be-

urteilung der Leistung setzt daher eine genaue Messung der Rauchentwicklung und eine international festgelegte und allgemein anerkannte Definition der Rauchgrenze voraus. Noch fehlt heute eine derartige Regelung, weshalb ein eindeutiger Vergleich der Leistungsangaben verschiedener Fabrikate leider nicht möglich ist. Die Firma Saurer hat ein handliches Rauchprüfgerät entwickelt. Es beruht darauf, dass ein Liter Rauchgas durch ein Filterpapierchen abgesaugt wird²⁾. Der Schwärzungsgrad der Filterprobe ist ein Mass für den Russgehalt im Auspuffgas. Dieses Gerät hat sich seit über 15 Jahren sowohl für die Motorenentwicklung als auch die Serieprüfung sehr gut bewährt.

Um die Einführung einer internationalen Regelung der Frage der Rauchgrenzleistung zu erleichtern, hat die Firma Saurer ihr Rauchprüfgerät der Firma Bosch in Stuttgart zur Herstellung und zum Vertrieb übergeben. Es ist zu hoffen, dass diese einfache Rauchmessmethode zur internationalen Festlegung der Rauchgrenze herbeigezogen wird.

Von den Massnahmen, die zur Leistungssteigerung getroffen wurden, seien hier die folgenden vier genannt:

1. Die Vergrösserung von Bohrung und Hub unter Beibehaltung der Grundkonstruktion und des Raumbedarfs.
2. Die Steigerung der Drehzahl. Mit Rücksicht auf die Standfestigkeit und den Brennstoffverbrauch ging man über 2000 U/min nicht hinaus. Die Fahrbedingungen in der Schweiz und die wachsenden Ansprüche bezüglich Lebensdauer legten es nahe, mit der Drehzahl Mass zu halten.
3. Die Verbesserung der Verbrennung. Die Anstrengungen galten der Verfeinerung des Doppelwirbelungsverfahrens mit dem Zweck, im ganzen Lastbereich einen rauchfreien Auspuff

¹⁾ SBZ Bd. 95, S. 151* und 170*, Bd. 101, S. 250* (1933); Bd. 107, S. 121* (1936)

²⁾ SBZ, Bd. 113, Nr. 6, 1939