

Die Oerlikon-Gasturbinenanlage Bône der Electricité et Gaz d'Algérie

Autor(en): **Karrer, W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

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

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

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-63377>

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.

Die Oerlikon-Gasturbinenanlage Bône der Electricité et Gaz d'Algérie

DK 621.438

Von Dr. sc. techn. W. Karrer, Zürich

Einführung

Die Electricité et Gaz d'Algérie betreibt in Bône (Algerien) zwei Dampfkraftwerke, eine ältere Zentrale Bône I und eine neue, sehr schöne Zentrale Bône II. Der elektromechanische Teil des neuen Werkes besteht aus zwei Turbogenerator-sätzen von je 25 000 kW, sowie den zugehörigen Dampferzeugern, die mit schwerem Bunkeröl beschickt werden. Dieses Öl kann nur in vorgewärmtem Zustand gefördert und verfeuert werden. Zum Erwärmen dient Satttdampf von 13 ata, der in zwei Hilfskesseln mit Leistungen von je 3,6 t/h Dampf erzeugt wird. Diese Kessel stehen in Verbindung mit einer Gasturbinenanlage, die von der Maschinenfabrik Oerlikon vorgeschlagen, entworfen und geliefert worden ist. Die dabei verwirklichten Konstruktionsgedanken lassen sich auf die Betriebsdampferzeugung für Grossturbinen anwenden, wobei sich eine beachtliche Steigerung des thermischen Wirkungsgrades der Gesamtanlage ergibt. Im vorliegenden Bericht soll über die neuartigen Hilfsanlagen in der Zentrale Bône II, sowie über die Möglichkeiten berichtet werden, die sich aus den dort verwirklichten Ideen ergeben.

1. Die Aufgabe der Vorwärmanlage

Der in der Zentrale Bône II verwendete Brennstoff ist ein schweres Bunkeröl. Sein Heizwert wird zu 9650 kcal/kg angegeben, sein Aschegehalt beträgt 0,05 %, seine Viskosität 260 c. St. bei 50° C entsprechend etwa 500° Engler bei 20° C, sein Stockpunkt liegt bei etwa 17° C. Die Analyse von Oel-schneepben ergab z. B. einen Vanadium-Gehalt von 24 % und einen Natriumgehalt von 19 %. Dieses Öl ist bei Raumtemperatur schwarz und fast fest. Es soll sich nach den Angaben der Kraftwerkinhaber um eines der schlechtesten Oele handeln, die erhältlich sind.

Der Konstruktionsgedanke der Vorwärmanlage besteht darin, die der Satttdampferzeugung dienenden Kessel mit den heissen Abgasen einer Gasturbinenanlage zu beschicken, um dadurch die diesen Kesseln zuzuführende Wärme zunächst in einer ersten Stufe bei hoher Temperatur zur Energieerzeugung und erst in einer zweiten Stufe zur Satttdampferzeugung auszunützen. Der Mehrbedarf an Wärme für die Energieerzeugung wird auf diese Weise mit bestem Wirkungsgrad umgesetzt. Diese Hintereinanderschaltung erfordert offene Prozessführung bei der Gasturbine. Sie ermöglicht eine sehr weit-

gehende Anpassung an verschiedene Verhältnisse, indem bei Mehrbedarf an Heizdampf die Kessel auch mit zusätzlicher Oelfeuerung betrieben werden können. Da die Gasturbine mit Rücksicht auf die Baustoffe und die Oelaschenablagerungen nur mit begrenzten Gaseintritts-Temperaturen arbeiten kann und die Verbrennung deshalb mit einem grossen Luftüberschuss erfolgt, können die Abgase der Turbine ohne weiteres den Brennern der Kessel als Verbrennungsluft zugeführt werden. Auf diese Weise entsteht ein gemischter Betrieb. Schliesslich kann die Gasturbinenanlage auch für sich allein arbeiten, wozu sie mit einem besonderen Wärmeaustauscher ausgerüstet ist. Ebenso können die Dampfkessel ohne Gasturbine betrieben werden, wobei ihre Brenner durch besondere Ventilatoren mit Luft versorgt werden.

2. Die Anlage und ihre Betriebsweise

Auf dem Schaltbild der Anlage (Bild 2) sind die beiden Abhitzekessel 1 ersichtlich, die den Heizdampf für die Oelvorwärmung und später noch für anderweitige Heizzwecke liefern und hauptsächlich durch die Abgase der Gasturbinenanlage erhitzt werden. Diese besteht aus der Turbine 2, die einerseits den Kompressor 3 und andererseits über ein Reduktionsgetriebe 17 (5300/1500 U/min) einen Drehstromgenerator 18 von 730 kW antreibt. Weiter gehören dazu der Wärmeaustauscher 4 und die Brennkammer 5. Die Abgase der Turbine werden entweder den beiden Abhitzekesseln 1 zugeführt und verlassen diese über die Umschaltklappen 20, um durch das Kamin abzuströmen, oder sie gelangen durch den Wärmeaustauscher 4 und die Klappen 20 ins Kamin. Weiter ist bei 19 eine Leitung vorgesehen, welche sie den Kesseln der Zentrale Bône II zuleitet, um die dort bestehende Rauchgasrückführung zu ersetzen. Diese Ergänzung hat die Electricité et Gaz d'Algérie vorgeschlagen und ausgeführt [2] *).

Das Speisewasser wird im Entgaser 8 vorbehandelt, verlässt diesen mit etwa 100° C und gelangt je nach der Betriebsart entweder direkt oder unter weiterer Temperatursteigerung im Vorwärmer 13 in die Economiser der Kessel 1. Die Apparate 8 und 13 werden durch Dampf aus den Kesseln 1 mit Wärme versorgt. Das Heizöl wird aus dem Behälter 6 mittels der Pumpen 10 durch die Vorwärmer 7 einerseits nach den Brennern der Kessel 1 und andererseits nach denen der Brennkammern 5 gefördert. Auch die Vorwärmer 7 erhalten ihren Heizdampf aus den Kesseln 1.

Grundsätzlich können fünf verschiedene Betriebsweisen unterschieden werden, nämlich:

- a) Selbständiger Betrieb der Gasturbinenanlage, bei welchem die gesamten Abgase durch den Wärmeaustauscher 4, die Klappen 20 und das Kamin abströmen.
- b) Selbständiger Betrieb der Kesselanlage, wobei die Ventilatoren 16 die Kesselbrenner mit einer Luftmenge entsprechend einer Luftüberschusszahl von etwa 1,5 versorgen.
- c) Verbundbetrieb mit direkter Heizung der Kessel

*) Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf das Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

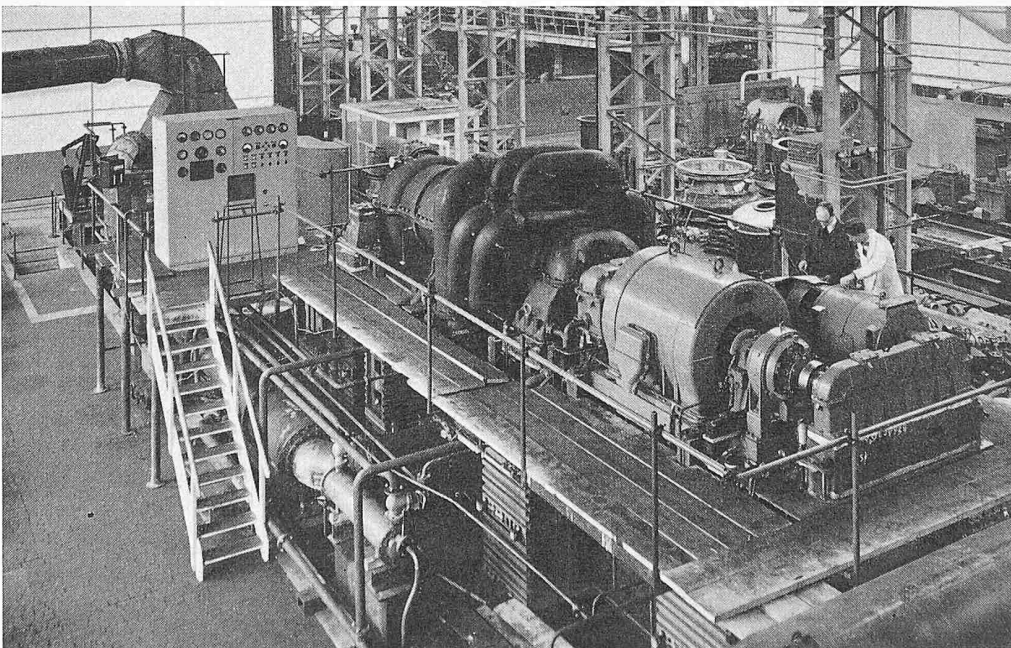


Bild 1. Die Gasturbinengruppe für die Zentrale Bône II auf dem Prüfstand in Oerlikon

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 1 Kessel | 12 Speisewasser- |
| 2 Gasturbine | pumpe |
| 3 Kompressor | 13 Speisewasser- |
| 4 Wärmeaustauscher | Vorwärmer |
| 5 Brennkammer | 14 Regulierorgan |
| 6 Brennstofftank | 15 Reserve-Speise- |
| 7 Heizöl- | wasser-Behälter |
| 8 Ventilator | 16 Ventilator |
| 9 Entgaser | 17 Getriebe |
| 10 Spannungsb- | 18 Generator |
| ehälter | 19 Abzweigung zu |
| 11 Brennstoffpumpe | den Hauptkesseln |
| 12 Pumpe zum | 20 Verteilflügel |
| Entgaser | 21 Bypass |

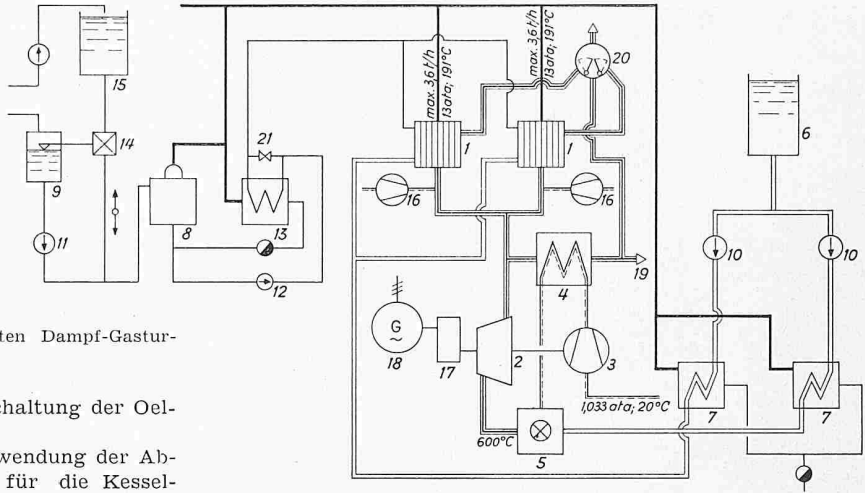


Bild 2. Prinzipielles Schaltschema der kombinierten Dampf-Gasturbinen-Anlage in der Zentrale Bône II

durch die Abgase der Gasturbine unter Ausschaltung der Oelbrenner in den Kesseln.

d) Gemischter Verbundbetrieb unter Verwendung der Abgase der Gasturbine als Verbrennungsluft für die Kesselbrenner.

e) Selbständiger Betrieb der Gasturbinenanlage, bei welchem die Abgase nach dem Wärmeaustauscher 4 durch die Leitung 19 den Hauptkesseln der Zentrale Bône II zugeführt werden.

Von diesen Betriebsmöglichkeiten sind namentlich die unter c) und d) genannten für die weitere Entwicklung besonders interessant. Sie sind auch in der neuesten technischen Literatur besprochen worden [1] bis [7] und [9].

Die Anlage ist bis Ende Mai 1957 über 3000 Stunden im Betrieb gestanden. Die Abnahmeversuche haben die zum voraus berechneten Zahlen hinsichtlich Leistungen und Wirkungsgrade bestätigt. Bild 1 zeigt den Maschinensatz auf dem Versuchsstand in Oerlikon, die Bilder 3 und 4 in der Zentrale Bône II, wobei Bild 4 während der Montage aufgenommen wurde, Bild 3 dagegen während des Dauerbetriebs.

3. Bemerkungen zur Konstruktion der Anlageteile

Die *Gasturbine* besteht aus fünf Axialstufen, von denen die erste als Aktionsstufe ausgebildet ist, während die andern vier Reaktionsstufen darstellen. Durch diese Massnahme bezweckte man das Umsetzen eines verhältnismässig grossen Wärmegefälles und damit eine entsprechend starke Temperatursenkung im Leitrad der ersten Stufe, um Ablagerungen von Oelasche in den folgenden Laufrädern möglichst zu vermeiden. Sie hat sich im Betrieb als zweckmässig erwiesen. Der Rotor besteht aus bestem Ferritmaterial (H 46) und ist aus dem Vollen geschmiedet. Der Hochdruckteil des Turbinengehäuses ist durch ein Innengehäuse gegen hohe Temperaturen geschützt. Dieses Gehäuse sowie die ersten Schaufelkränze bestehen aus hochhitzebeständigen und korrosionssicheren Materialien (z. B. aus dem englischen Nimonic). Dadurch konnte Korrosionen infolge Oelaschenoxyden mit Erfolg vorgebeugt werden.

Der *Kompressor* weist drei Radialstufen auf, die nach dem von der Maschinenfabrik Oerlikon entwickelten Mehrdiffusorensystem durchgebildet sind [8] und [10]. Er ist gegenüber Verunreinigungen weitgehend unempfindlich und eignet sich daher besonders gut für Orte, an denen die Luft durch Wüstensand, Staub sowie auch durch Flüssigkeitsteilchen usw. verunreinigt ist.

Die *Brennkammer* ist in neuartiger Weise aufgebaut worden derart, dass sie den sehr verschiedenartigen Betriebsbeanspruchungen genügt. Für die Oeleinführung wählte man ein Niederdrucksystem mit verhältnismässig grossen Querschnitten, das sich für Bunkeröl besonders gut eignet. Durch zweckmässige Anordnung und durch Umspülung mit Druckluft ist es gelungen, die höchsten Temperaturen des der Flamme direkt ausgesetzten Innenzylinders unterhalb etwa 600°C zu halten. Dieser ist zudem aus hochhitzebeständigem und korro-

sionssicherem Material hergestellt, so dass keine Korrosionen zu befürchten sind. Keramische Baustoffe wurden nicht verwendet, um die Betriebssicherheit der Turbine nicht irgendwie zu gefährden. Entsprechend den verschiedenen Betriebsweisen musste der Brenner besonders gestaltet werden. Er ist, wie die Brenner der Kessel, von der Maschinenfabrik Oerlikon entworfen und geliefert worden; dagegen stammen die Kessel und der Wärmeaustauscher aus den Werkstätten der Compagnie des Echangeurs de Chaleur, Paris.

4. Sonderaufgaben und ihre Lösung

a) Eine erste Aufgabe stellte die sichere und wirtschaftliche Verarbeitung des schweren Bunkeröls als Betriebsmittel für die Gasturbinenanlage.

Es ist einleuchtend, dass sich ein Verbundbetrieb im oben beschriebenen Sinn in Zukunft nur dann einführen wird, wenn in der Brennkammer der Gasturbine der selbe Brennstoff verfeuert werden kann wie in den Kesseln. Die Schwierigkeiten, die beim grossen Gehalt der Oelasche an Vanadium- und Natriumoxyden zu erwarten waren, gaben Anlass zu eingehenden Untersuchungen der Vorgänge bei der Verbrennung und bei der Strömung der Rauchgase durch Schaufelgitter. Diese wurden u. a. von der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt an einem Gitter von identischer Form durchgeführt, wie sie in der Turbine von Bône II zur Ausführung kamen, wobei mit den selben Gastemperaturen gearbeitet wurde, wie sie im praktischen Betrieb auftreten. Gleichzeitig sind auch Probebetriebe mit dem selben Oel an der werkeigenen Versuchsanlage [8] vorgenommen worden, allerdings bei etwas tieferen Temperaturen. Man stellte durchwegs entweder nur unbedeutende oder gar keine Verunreinigungen fest. Der Betrieb in

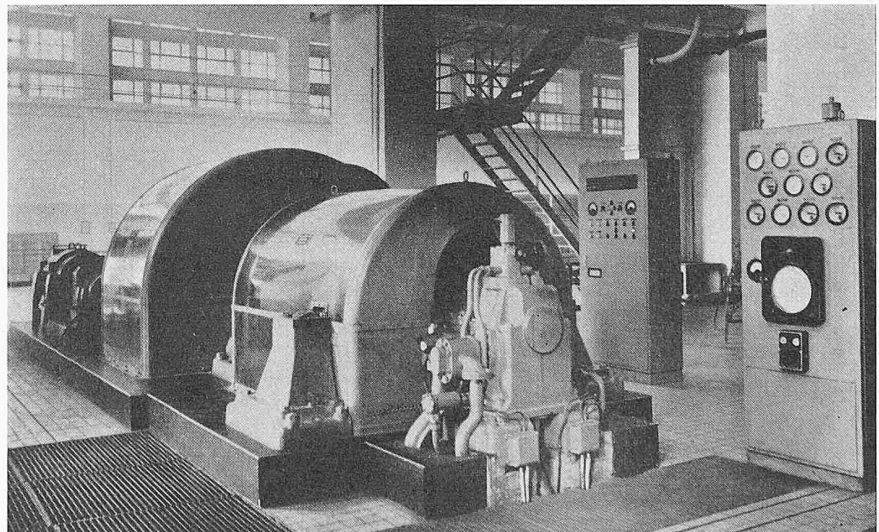


Bild 3. Die Maschinengruppe der Gasturbinenanlage in der Zentrale Bône II, gesehen von der Turbinenseite aus

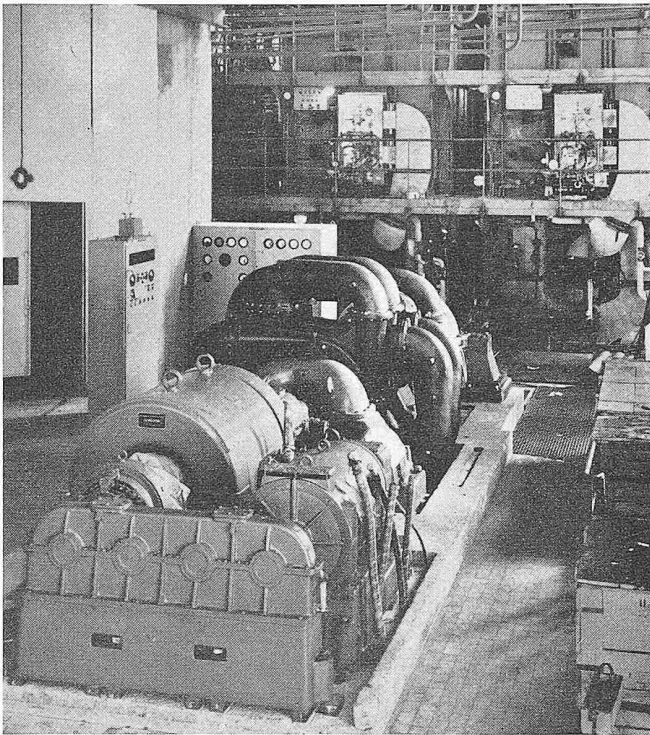


Bild 4. Die Maschinengruppe gesehen von der Generatorseite aus mit den Abhitzekeesseln im Hintergrund

Böne zeigte jedoch, dass eine Zugabe von Kaolin nicht zu vermeiden war. Die dazu nötige Aufbereitungs- und Mischanlage ist in Zusammenarbeit mit der Firma Shell gebaut worden. Dank der Zusätze ist es heute möglich, einen Dauerbetrieb ohne innere Reinigung aufrecht zu erhalten, wobei allerdings vorläufig noch ein langsames Absinken der Leistung infolge Ablagerungen im ersten Leitrad in Kauf genommen werden muss. Die Beobachtungen über das Verhalten der Brennstoffzusätze auf die Ascheablagerungen werden fortgesetzt, und es bestehen berechnete Hoffnungen auf eine wesentliche Verringerung der heute noch auftretenden Verschmutzungen.

b) Bei der konstruktiven Durchbildung der Brennkammer und der zugehörigen Brenner war nicht nur auf den aussergewöhnlichen Brennstoff Rücksicht zu nehmen, sondern auch auf die sehr grossen Unterschiede in der Menge und der Temperatur der Verbrennungsluft. Bei reinem Gasturbinenbetrieb wird die Verbrennungsluft im Wärmeaustauscher bis auf etwa 330° C vorgewärmt; bei gemischtem Betrieb hingegen tritt sie mit einer wesentlich niedrigeren Temperatur

in die Brennkammer ein. Luftmenge und Luftüberschuss verändern sich nicht nur mit der Belastung der Gasturbinenanlage, sondern beim Verbundbetrieb auch mit der Abgasmenge, die den Kesseln zuströmt.

c) Auch die Kesselbrenner waren für einen sehr grossen Regulierbereich durchzubilden. Bei gemischtem Verbundbetrieb, bei dem die Kessel mit den Abgasen der Gasturbine und mit Zusatzverbrennung arbeiten, ist die zugeführte Gasmenge sehr gross; deren Temperatur liegt hoch, und der Luftüberschuss ist ebenfalls reichlich. Bei reinem Kesselbetrieb hingegen erhalten die Brenner Frischluft von Raumtemperatur, wobei die Luftüberschusszahl, wie erwähnt, nur etwa 1,5 beträgt. Die Abgase sind bei allen Betriebsarten und allen Belastungen trotz des schlechten Brennstoffes durchaus rauchfrei, und in den von ihnen bespülten Anlageteilen konnten keine Koksablagerungen festgestellt werden.

d) Die Kessel sind für den ungünstigsten Fall, d. h. für einen Betrieb mit Turbinenabgasen, also für eine grosse Gasmenge von niedriger Temperatur (etwa 400° C) gebaut worden. Sie erhielten demzufolge grosse Querschnitte auf der Gasseite, und die Heizflächen des Verdampfers und des Economisers sind reichlich bemessen. Diese sind bei reinem Kesselbetrieb übermässig gross, so dass die Gefahr einer zu starken Auskühlung der Rauchgase und einer dadurch bewirkten Korrosion infolge auskondensierender Säuren besteht. Um dieser Gefahr zu begegnen, wird in solchen Fällen das Speisewasser im Vorwärmer 13 mit Dampf auf etwa 160° C vorgewärmt.

e) Die Regelung der Dampferzeugung in den Kesseln 1 erfolgt derart, dass der Dampfdruck konstant bleibt. Dazu dient ein Bailey-Druckluft-Servosystem, das sowohl auf die Heizölzuführung zu den Kesselbrennern als auch auf die Klappen 20 einwirkt, die die Verteilung der Abgase vornehmen. Wie aus Bild 2 ersichtlich, bestehen für die Turbinenabgase zwei Wege: Der erste führt durch die Kessel 1 nach den Klappen 20, der zweite durch den Wärmeaustauscher 4. Beim kombinierten Betrieb regelt das Bailey-System mit Hilfe der Klappen 20 das Verhältnis der beiden Ströme und damit die Wärmeabgabe in den Kesseln 1 bzw. im Wärmeaustauscher 4 entsprechend dem jeweiligen Dampfverbrauch.

Die Gasturbinenanlage ist für eine Leistung an den Generatorklemmen von 730 kW und für folgende ungefähre Gastemperaturen gebaut:

vor Turbine	600° C	nach Turbine	400° C
im Kamin bei Vollastbetrieb des Wärmeaustauschers	220° C	im Kamin bei Abhitzebetrieb der Kessel	140° C
im Kamin bei selbständigem Betrieb der Kessel	170 bis 180° C		

5. Weitere Möglichkeiten des Verbundbetriebs

Durch die Entwicklungsarbeiten, die in Verbindung mit dem Bau der beschriebenen Hilfsanlage für die Zentrale

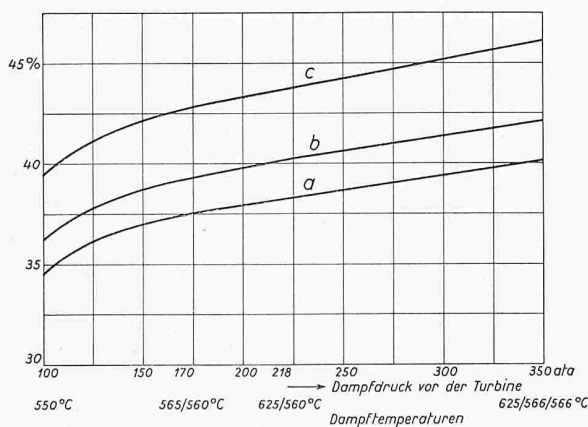


Bild 5. Mögliche thermische Wirkungsgrade bezogen auf die Generatorklemmen, in Abhängigkeit des Dampfdruckes und der Ueberhitzungstemperaturen
 a Dampfturbinenanlage ohne Gasturbinenergänzung
 b Dampfturbinenanlage mit Gasturbinenergänzung, wobei der Leistungsanteil der Gasturbinen 10 bis 15 % beträgt
 c Dampfturbinenanlage mit Gasturbinenergänzung, wobei der Leistungsanteil der Gasturbinen 40 bis 45 % beträgt

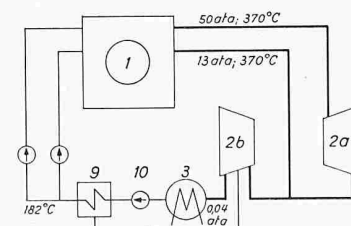


Bild 6. Kernreaktoranlage für die Erzeugung elektrischer Energie mittels Dampf von 50 und 13 ata

Legende zu den Bildern 6 und 7

- 1 Reaktoranlage einschliesslich Wärmeaustauscher
- 2, 2a, 2b Dampfturbinen
- 3 Kondensator
- 4 Austauschler
- 5 Luftvorwärmer
- 6, 6a Brennkammern
- 7 Kompressor

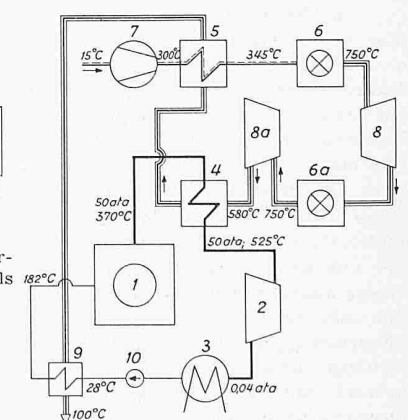


Bild 7. Kernreaktoranlage für die Erzeugung elektrischer Energie mittels Dampf von 50 ata und Gasturbinenergänzung

- 8, 8a Gasturbinen
- 9 Speisewasservorwärmer
- 10 Speisewasserpumpe

Böne II geleistet wurden, sind eine Reihe von Aufgaben bearbeitet worden, die für die weitere Anwendung von Gasturbinen von beträchtlicher Bedeutung sind. Davon sind zu nennen: das Vermeiden von schädlichen Oelascheablagerungen in den Schaufelungen der Turbinen, dann die Verbrennung mit stark wechselnden Luftüberschusszahlen und schliesslich die Möglichkeit, die Kessel wahlweise auf drei verschiedene Betriebsweisen umschalten zu können, nämlich, sie entweder nur mit heissen Abgasen ohne Brenner zu betreiben (reiner Abhitzebetrieb) oder mit Brennern zu arbeiten, wobei ein Teil der heissen Abgase den Brennern als Verbrennungsluft zugeführt wird, oder schliesslich sie unabhängig von der Gasturbine zu heizen, wobei die Kesselbrenner mit reiner Luft beschickt werden.

Darüber hinaus wurden Möglichkeiten der Verwirklichung wirtschaftlich interessanter Verbundbetriebsarten von Gasturbinen- und Dampfturbinenanlagen untersucht, die namentlich bei Heizkraftwerken und bei thermischen Kraftzentralen von Bedeutung werden können [3] [4]. Sowohl in den USA als auch in Deutschland schenkt man kombinierten Lösungen solcher Art grosse Beachtung [5], [6], [7], und es befinden sich bereits ähnliche Ausführungen im Bau. Nachfolgend sollen solche Möglichkeiten an zwei Beispielen gezeigt werden.

Der Grundgedanke des Verbundbetriebs in *Kraftzentralen* besteht darin, dass als Verbrennungsluft für die Dampferzeuger die Abgase einer Gasturbinenanlage verwendet werden, die nach dem offenen Verfahren ohne Wärmeaustauscher und ohne Zwischenkühlung im Kompressor arbeitet. Die sehr bemerkenswerte Steigerung des thermischen Wirkungsgrades, die sich dadurch erzielen lässt, geht aus Bild 5 hervor.

Kurve a zeigt die Wirkungsgrade von selbständigen Dampfanlagen ohne Gasturbinenergänzung in Funktion des Dampfdruckes. Hierbei sind die Dampftemperaturen mit steigenden Drücken ebenfalls ansteigend (entsprechend den Angaben längs der Abszisse) angenommen worden. Ferner ist im unteren Druckbereich der Kurve a mit keiner, im mittleren Druckbereich mit einer, und bei den höchsten Drücken mit zwei Zwischenüberhitzungen gerechnet worden. Die Kurven b und c zeigen die thermischen Wirkungsgrade von kombinierten Gas-Dampfanlagen, bei welchen die Gasturbinenabgase in den Dampfkesseln als Verbrennungsluft verwendet werden. Hierbei hat man die gleichen Steigerungen der Dampftemperaturen und die gleiche Anwendung der Zwischenüberhitzungen vorgesehen, wie bei der Berechnung reiner Dampfanlagen entsprechend der Kurve a. Auf der Gasturbinenseite sind mit steigenden Dampfdrücken auch die Temperaturen und die Anzahl Zwischenerhitzungen ansteigend angenommen worden. So ist z. B. bei 100 ata Dampfdruck mit einer Gasturbinen-Eintrittstemperatur von 750° C und keiner Zwischenerhitzung gerechnet worden, bei 200 ata wurde die höchste Gastemperatur ebenfalls zu 750° C und eine Zwischenerhitzung vorgesehen, während man bei 350 ata mit 800° C und zwei Zwischenerhitzungen rechnete.

Kurve b bezieht sich auf eine Kombination, bei welcher die Gasturbinenleistung nur etwa 10 bis 15 % der Gesamtleistung und die Brennstoffmenge der Gasturbinenseite etwa 20 bis 25 % der gesamten Brennstoffmenge beträgt. Kurve c wird dagegen erreicht bei Kombinationen mit etwa 40 bis 45 % Leistungsanteil der Gasturbine und etwa 70 bis 90 % Brennstoffanteil der Gasturbinenseite.

Die Kurven zeigen, dass die Kombination von Dampfturbine und Gasturbine eine wesentliche Erhöhung der thermischen Wirkungsgrade von Wärmekraftwerken bringen kann, und zwar im ganzen Druckbereich, d. h. auch dort, wo bei überkritischen Dampfdrücken die Wirkungsgrade von Dampfanlagen allein schon verhältnismässig hoch liegen. Den Kurven liegen Annahmen zu Grunde, welche in bezug auf Maschinenwirkungsgrade, Drücke und Anzahl Zwischenerhitzungen auf der Dampf- und Gasseite heute als ohne weiteres zulässig angesehen werden. Bei den höchsten Dampfdrücken wurden für den Gasturbinenprozess entsprechend hohe Temperaturen in Rechnung gestellt. In vielen Fällen wird es vorteilhaft sein, die Gasturbinenkombination mit normalen Dampfdrücken zu verwenden, statt ohne Gasturbine die Dampfdaten überkritisch zu wählen. Aus dem Vergleich der Kurven a und c geht hervor, dass annähernd der gleiche thermische Wirkungsgrad mit nur 100 ata Dampfdruck, einfacher Gasturbinenergänzung und ohne Zwischenerhitzung von Dampf

und Gas erreicht werden kann, wie er ohne Gasturbine nur mit überkritischen Dampfdrücken von etwa 300 ata und zwei Zwischenüberhitzungen erhalten würde.

Das zweite Beispiel bezieht sich auf ähnliche Kombinationsmöglichkeiten auf dem Gebiete der Reaktoranlagen. Bild 6 zeigt die Schaltung einer *Reaktoranlage* von ähnlicher Bauart, wie sie heute in Bradwell (England) zur Ausführung gelangt. Bei einer Gesamtdampfmenge von etwa 260 t/h ist eine Nettoleistung von 50 000 kW vorgesehen. Es wurden zwei Verdampferteile mit verschiedenen Drücken (50 ata und 13 ata) sowie eine Vorwärmung des Speisewassers von 182° C zu Grunde gelegt. Der Wirkungsgrad einer solchen Anlage dürfte etwa 28 % erreichen; er liegt also wesentlich über demjenigen des Atomkraftwerks «Calder Hall», erreicht aber noch nicht den Wert einer modernen Dampfkraftanlage bisher üblicher Bauart. Der Wirkungsgrad kann bei gleichen Arbeitsbedingungen im Reaktor erhöht werden, wenn der Dampf noch in einem besonderen Ueberhitzer auf höhere Temperatur gebracht wird. In den Vereinigten Staaten ist eine solche Anlage im Bau, bei der der Dampfüberhitzer mit Oel geheizt wird. Die Ueberhitzung steigert sowohl den Wirkungsgrad wie auch die Leistung.

Die Dampfüberhitzung kann nun auch durch die Abgase einer Gasturbine mit oder ohne eine weitere Erhitzung der Gase nach der Turbine durch Nachverbrennung in einer dritten Brennkammer erfolgen. Bild 7 zeigt das Schema einer solchen kombinierten Anlage, die für die gleichen Dampfzustände im Reaktor entworfen ist wie die Anlage nach Bild 6. Die Gasturbine weist zwei Stufen 8 und 8a mit Zwischen-erhitzung im Brenner 6a auf. In beide Stufen trete das Gas mit 750° C ein. Die Abgase überhitzen (im auf Bild 7 dargestellten Beispiel ohne vorherige Nacherhitzung in einer dritten Brennkammer) zunächst im Apparat 4 den aus dem Reaktor mit etwa 50 ata und 370° C tretenden Dampf auf 525° C, erwärmen hierauf die Druckluft im Vorwärmer 5 und schliesslich das Speisewasser im Vorwärmer 9. Die Leistung der Dampfturbine 2 steigt nun auf rd. 72 000 kW, die Gesamtleistung auf 98 000 kW gegenüber 50 000 kW bei der reinen Atomkraft-Anlage nach Bild 6. Der thermische Wirkungsgrad erreicht 33 %. Die Differenzleistung von 48 000 kW wird mit einem Wirkungsgrad von etwa 40 % erzeugt. Die Anlage nach Bild 7 arbeitet, wie ersichtlich, mit einfachem Dampfkreislauf. Die beiden Teile einer solchen Anlage können auch einzeln gefahren werden, sofern die hiezu nötigen Massnahmen vorgesehen werden. Der Gasturbinenteil würde dann beispielsweise nur in Zeiten höheren Energiebedarfs (z. B. während der Winterspitze) in Betrieb stehen.

Bei jeder Reaktoranlage, die mit Dampferzeugung verbunden ist, besteht die grundsätzliche Möglichkeit, eine thermische Anlage mit zusätzlicher Verbrennung von bituminösen Brennstoffen anzugliedern, die elektrische Energie mit höheren Wirkungsgraden zu erzeugen vermag, als es bei einer reinen Dampfturbinen- oder Gasturbinenanlage der bisherigen Art der Fall ist. Solange in einem Lande Brennstoffe üblicher Art zur Erzeugung elektrischer Energie verfeuert werden müssen, lohnt es sich, ihre Verwendung in Kombinationen der beschriebenen Art ernsthaft zu prüfen.

6. Zusammenfassung

Die von der Maschinenfabrik Oerlikon entworfene und gelieferte Zusatzanlage für die Zentrale Böne II stellt eine neuartige und bemerkenswerte Verbindung einer Gasturbinenmit einer Kesselanlage dar. Die Leistungen und Dampfdrücke sind zwar bescheiden. Jedoch eröffnen die gestellten Probleme der Gasturbine neue, interessante Anwendungsgebiete, von denen hier als Beispiele auf thermische Grosskraftwerke und Reaktoranlagen für Energieerzeugung hingewiesen wird. Es ist zu hoffen, dass die an der Anlage Böne geleistete Entwicklungsarbeit die Einführung der Gasturbine in diese Gebiete erleichtere.

Literaturverzeichnis

- [1] Prof. Dr. *Walter Traupel*: Die Entwicklung der Gasturbine in der Schweiz, 5. Weltkraftkonferenz, Wien 1956, Bericht G₁203/G₃/9, S. 22 u. f.
- [2] Monsieur *Monprofit*, Directeur adjoint de l'Equipement électrique d'Electricité et Gaz d'Algérie, 5. Weltkraftkonferenz, Wien 1956, Bericht G₁164 G₁/22.
- [3] Transactions of the Fuel Economy Conference, The Hague, 1947, Section C₂, Paper Nr. 13, S. 1161.

- [4] 4. Weltkraftkonferenz, London 1950, Section G, Paper Nr. 1. La turbine à gaz dans l'industrie et dans les Centrales Thermiques.
 [5] First US Gas-Steam Groupe for Georgia groupe. «Electrical World», 24. 12. 56.
 [6] Gas Turbine Exhaust Recovery, «ASME-Paper», Nr. 54-A-194.
 [7] Sonderheft der Tagung über Heizkraft-Kupplung der Zeitschrift «Praktische Energiekunde». Forschungsstelle für Energie-Wirtschaft der Technischen Hochschule Karlsruhe.

- [8] SBZ 1948, Nr. 21, S. 291.
 [9] 5. Weltkraftkonferenz, Wien 1956, Gruppe III, Abt. G₁, Generalbericht von Prof. Melan, Seiten 15—18, ferner die Berichte G₁/11, G₁/20, G₁/13, G₁/6 und G₃/4.
 [10] SBZ 1957, Nr. 16, S. 250.

Adresse des Verfassers: Dr. sc. techn. Werner Karrer, Hofwiesenstrasse 38, Zürich.

Die Brown Boveri-Gasturbinen im Kraftwerk «Luigi Orlando» in Livorno

DK 621.438

Von Dipl. Ing. W. P. Auer, Baden

Die «Società Elettrica Selt-Valdarno» versorgt das Gebiet der Toscana in Italien mit elektrischer Energie. Die installierte Leistung umfasst zum grössten Teil hydraulische Anlagen. Das bestehende Dampfkraftwerk Livorno wird zurzeit mit einem im Bau befindlichen, gemeinsam mit einer anderen Gesellschaft ausgeführten Grundlast-Dampfkraftwerk ergänzt (Zentrale Santa Barbara 2 × 125 000 kW, von Brown Boveri projektiert und schlüsselfertig geliefert).

Bei dieser Zusammensetzung der Energieerzeugungsanlagen zeigte sich die Notwendigkeit, diese durch ein Spitzenkraftwerk zu ergänzen, welches im wesentlichen den folgenden Bedingungen zu genügen hat: a) Erzeugung kurzzeitiger Zusatzenergie während der täglich bzw. halbtäglich auftretenden Belastungsspitzen; b) Ergänzung der von der Wasserführung abhängigen Produktion der hydraulischen Kraftwerke durch ununterbrochene Energielieferung während längerer Perioden; c) Bereitstellung einer Leistungsreserve für Notlagen, wie z. B. Trockenheit, Störungen im Uebertragungsnetz usw. d) Verbesserung des Leistungsfaktors im sich in ziemlicher Entfernung vom Produktionszentrum befindenden Verbraucherschwerpunkt.

Nach gründlichen Untersuchungen kam die Gesellschaft zum Schluss, dass sich die gestellten Forderungen am besten durch Gasturbinengruppen mit offenem Kreislauf erfüllen lassen, und dies dank den folgenden, diesem Typ von Energieerzeugungsmaschinen innewohnenden Eigenschaften: a) grosse Einfachheit durch Wegfall eines Zwischenenergieträgers und durch Vorhandensein nur weniger Hilfsbetriebe; b) einfacher und bewährter offener Kreislauf; c) grosse Betriebssicherheit dank robuster Konstruktion und Wegfall störungsanfälliger Hilfseinrichtungen; d) niedrige Installationskosten, geringer Platzbedarf; e) rasche Betriebsbereitschaft: Vollast etwa 20 Minuten nach Anlauf der kalten Maschine; f) geringe Personalkosten, da nur eine kleine Anzahl von Maschinen benötigt werden, an welche zudem, dank der Einfachheit der Anlage und der vorhandenen automatischen Ueberwachungseinrichtungen, keine hohen Anforderungen gestellt werden müssen; g) Möglichkeit, Schweröl zu verbrennen, dank nicht allzu hohen Gastemperaturen, gleichmässiger Temperaturverteilung im Gasstrom, zweckmässiger Konstruktion

und geeigneter Materialien; h) niedrige Unterhaltskosten sowohl im Betrieb als auch im Stillstand; i) geringer Kühlwasserbedarf, welcher in Livorno keinen Ausbau der vorhandenen Anlagen notwendig machte; k) Wirkungsgrade, welche, wenn auch nicht allzu hoch, dennoch durchaus annehmbar sind. Dank den niedrigen Anschaffungskosten der Maschine und ihren anderen günstigen Eigenschaften genügen diese Wirkungsgrade, um bei einer jährlichen Betriebsdauer von bis zu etwa 3000 Stunden die Gasturbinenlösung wirtschaftlicher zu machen als eine Dampfanlage.

Ein von Brown Boveri entwickelter Gasturbinentyp entsprach am besten den Anforderungen der Selt-Valdarno. Diese bestellte im Januar 1954 erst eine, im November 1954 noch eine zweite, identische Gruppe. Die erste Maschine kam am 15. Dezember 1955 in Betrieb, die zweite kurz nachher.

Wie erwähnt, verwenden die beiden identischen Gruppen das einfache und bewährte Prinzip des offenen Kreislaufs. Das Schema der Maschinen ist aus Bild 2 ersichtlich. Sie sind zweiwellig. Ihre Nennleistung an den Klemmen beträgt 25 000 kW. Die Verwendung von Zwischenkühlung und Zwischenerhitzung zwischen den beiden Wellen, sowie die Ausnützung der Abwärme der Hochdruckturbine in der Niederdruckstufe bringen eine Erhöhung der Leistung bei gegebener

Tabelle 1. Auslegedaten und Ergebnisse der Abnahmeversuche an der Gruppe II der Gasturbinenanlage Livorno

		Auslegedaten	Abnahmeversuche gemessen korrigiert	
Lufttemperatur	° C	15	19,68	15
Kühlwassertemperatur	° C	15	21,69	15
Barometrischer Druck	ata	1,033	1,033	1,033
Netto-Klemmenleistung ¹⁾	kW	25 000 ²⁾	24 436	26 000
Therm. Wirkungsgrad ³⁾	%	24,2	24,1	24,72

Drehzahlen

HD-Welle	U/min	4500/4750	4530
ND-Welle	U/min	3000	3020

	Temperaturen in °C		gemessene Drücke in ata
	Auslegung	gemessen	
Vor ND-Gebläse	15	20	1,02
Nach ND-Gebläse		177	4,03
Vor HD-Gebläse		35	3,995
Nach HD-Gebläse		231	—
Vor HD-Gasturbine	max. 650	625	17,25
Nach HD-Gasturbine		421	6,15
Vor ND-Gasturbine	max. 650	623	5,98
Nach ND-Gasturbine	etwa 330	333	1,031

Weitere Auslegedaten

Generator:		Erreger:	
Leistung	31 250 kW	Leistung	94 kW
Spannung	10 000 V	Spannung	200 V
Frequenz	50 Hz	HD-Anwurfmotor	365 kW
Kühlwasserbedarf	1 400 m ³ /h	ND-Anwurfmotor	835 kW

¹⁾ nach Abzug der Leistungsaufnahme der Hilfsbetriebe

²⁾ maximal

³⁾ bezogen auf Generatorklemmen einschl. Hilfsbetriebe

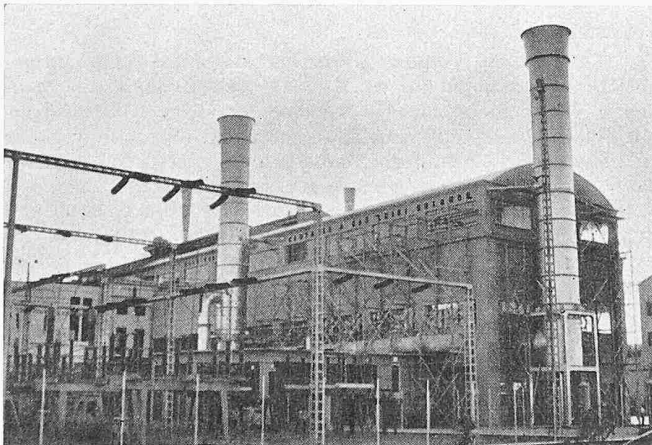


Bild 1. Aussenansicht der Gasturbinenzentrale «Luigi Orlando» in Livorno. Hinter der Freiluftschaltanlage ist die Luftansaugung der Gasturbinengruppe 2 sichtbar. Links, der Schornstein der Gruppe 1, rechts derjenige der Gruppe 2