

# Wirtschaftliche Betrachtungen zur Erzeugung von Energiespitzen durch Gasturbinen und Betriebserfahrungen mit dem Spitzenkraftwerk Beznau der NOK

Autor(en): **Pfenninger, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **73 (1955)**

Heft 9

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-61861>

## 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.

## Wirtschaftliche Betrachtungen zur Erzeugung von Energiespitzen durch Gasturbinen und Betriebserfahrungen mit dem Spitzenkraftwerk Beznau der NOK

Von Dipl. Ing. H. Pfenninger, Baden

DK 621.438.003.1

### 1. Einleitung

Wenn wir heute Rückschau halten, so können wir feststellen, dass sich die Gasturbine in den letzten Jahren trotz der Einwände von verschiedenen Seiten als Kraftmaschine durchgesetzt hat. Vor einigen Jahren wurde sie von manchem verantwortungsbewussten Ingenieur noch nicht als vollwertige, betriebssichere Maschine betrachtet. In der Zwischenzeit hat sie aber ihre Bewährungsprobe so gut bestanden, dass sie heute nach unserer Erfahrung als zuverlässige und wirtschaftliche Kraftmaschine gilt. Nach unserer Ansicht liegt der interessanteste Leistungsbereich der Gasturbine zwischen 1000 und ~ 25 000 kW pro Einheit. Mit der Weiterentwicklung wird sich dieser Bereich nach unten und oben noch erweitern. Heute sind kleinere Leistungen noch vorwiegend dem Dieselmotor vorbehalten, grössere der klassischen Dampfturbine. Selbstverständlich gibt es Spezialgebiete, in denen sowohl die eine wie auch die andere Kraftmaschine diese etwas summarische Behauptung durchbrechen. So ist zum Beispiel die Gegendruck-Dampfturbine als Industrieturbine die wirtschaftlichste Anlage und wird überall dort, wo neben elektrischer Energie auch noch Heizedampf benötigt wird, wie dies z. B. in Textilfabriken, Papierfabriken und in der chemischen Industrie der Fall ist, den anderen Kraftmaschinen vorgezogen. Aber auch hier beginnt die Gasturbine interessant zu werden. Die relativ grosse Abgasmenge und die hohe Abgastemperatur der Gasturbine sowie der grosse Sauerstoffgehalt dieser Abgase (etwa 16 bis 18 % gegenüber nur etwa 2,5 % bei einer Dampfkesselanlage), ergeben interessante Anwendungsmöglichkeiten der Abgasverwertung, so dass auch in Industriekraftwerken die Anwendung der Gasturbine gegenüber der Dampfturbine Vorteile bietet. Es sei hier nur kurz erwähnt, dass eine Gasturbinenanlage mit nachgeschaltetem Abhitzeessel, ohne Zusatzbrenner, an elektrischer Energie etwa 0,4 kWh/kg Dampf erzeugt, während eine Gegendruckdampfturbine nur 0,1 kWh/kg Dampf liefern kann. Dort, wo das Verhältnis der elektrischen Leistung zur stündlichen Heizedampfmenge gross sein soll und deshalb an Stelle der Gegendruckdampfturbine die Anzapfggendruckturbine verwendet werden muss, ist der Brennstoffverbrauch der Gasturbine mit Abhitzeessel kleiner als der der Dampfanlage.

Nach diesem kurzen Ueberblick wollen wir die Verwendung der Gasturbine zur Erzeugung von Spitzenenergie in der Elektrizitätswirtschaft näher betrachten. Es zeigt sich, dass die Gasturbine diese Aufgabe am besten zu lösen vermag. Es ist dies eine ihrer interessantesten Anwendungsmöglichkeiten.

### 2. Zur Frage der Wirtschaftlichkeit

Der Verbrauch an elektrischer Energie ist in fast allen Ländern stark im Steigen begriffen. Die jährliche Zunahme liegt zwischen 10 und 20 %. Ausserdem treten vermehrt kurzzeitige tägliche und durch die Jahreszeit bedingte Energiespitzen auf. In Ländern mit vorwiegend hydroelektrischer Energieversorgung wie z. B. in Italien, Oesterreich, Schweden, Norwegen und der Schweiz, in denen die Produktionsmöglichkeit stark von der Jahreszeit und den Witterungsverhältnissen abhängt, werden die täglichen und durch die Jahreszeit bedingten Energiespitzen aus Speicherwerken bezogen. Diese Energie ist kostspielig. Der Anlagepreis beträgt je nach baulichen und geologischen Verhältnissen 1200 bis 1500 Fr./kW. Die Reservehaltung von Energie für ganz trockene Jahre würde sehr schlecht ausgenützte Speicherwerke ergeben, die sich wegen dem hohen Anschaffungspreis nicht lohnen. Ueberdies sind die Möglichkeiten des Baues weiterer Speicherbecken beschränkt. Da die sich lohnenden be-

reits weitgehend ausgebaut sind, wird die Erstellung neuer immer kostspieliger. In Ländern mit Kapitalknappheit sind zudem noch lange Abschreibungszeiten unerwünscht. Es drängt sich somit eine Kraftanlage auf, die einen kleinen Anschaffungspreis aufweist und deshalb trotz kurzer jährlicher Betriebszeit rasch amortisiert werden kann.

Wie bereits erwähnt, tritt eine weitere Erschwerung des Versorgungsproblems durch die grösser werdenden Belastungsspitzen der Netze auf. Der vermehrte Energiekonsum im Haushalt durch elektrische Kochherde und andere Haushaltgeräte führt zu kurzzeitigen Tagesspitzen zwischen 10 und 12 h. Diese ergeben eine jährliche Spitzenlast von etwa 700 Stunden. Durch die elektrische Heizung in den Uebergangszeiten, also im Herbst und Frühjahr, treten saisonbedingte Spitzen auf, die je nach Witterung früher oder später einsetzen können und längere oder kürzere Zeit andauern. Im Süden der Vereinigten Staaten treten z. B. durch die vermehrte Installation von Luftkonditionierungsanlagen in den Sommermonaten ausgesprochene Sommertagesspitzen auf, die täglich etwa 6 Stunden während 2 bis 3 Monaten andauern und, für sich allein betrachtet, eine jährliche Betriebszeit von nur 360 ÷ 540 Stunden ergeben würden.

Auch die Beleuchtung der Grosstädte (Strassenbeleuchtung, Lichtreklame usw.) verursacht für einige Stunden erhöhten Stromkonsum. Im Winter ergibt sich eine Kulmination gegen die Abendstunden, weil einerseits in der Industrie, im Gewerbe und in den Bureaux noch gearbeitet wird, andererseits die öffentliche und private Beleuchtung bereits eingeschaltet werden muss. Auch in Ländern, in denen der grösste Teil der elektrischen Energie durch Wärmekraftmaschinen, vor allem durch grosse Dampfkraftwerke erzeugt wird, ist das Problem der Erzeugung der Spitzenenergie nicht leicht zu lösen. Grosse moderne Dampfkraftwerke mit kleinem Brennstoffverbrauch müssen für hohe Drücke und Temperaturen gebaut werden. Sie eignen sich hauptsächlich zur Grundlastdeckung, weil die dickwandigen Leitungen, die schweren Turbinengehäuse und die Rotoren mit relativ langen, dünnen Stopfbüchsen rasche Temperaturänderungen nicht ertragen, ohne Schaden zu nehmen. Das selbe gilt auch für moderne Hochdruckkessel-Anlagen. Man sucht diesen Nachteilen durch Unterdruckhalten der Kesselanlage und Warmhalten der Turbinen während der Wartezeit, oder sogar durch Schleppen der Turbinen mit dem Generator und beständiges Heizen der Turbinen während diesen Perioden auf nahezu volle Betriebstemperatur entgegenzutreten, was aber zusätzliche Brennstoff- und Personalkosten bedeutet.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, dass für die Grundlast hochgezüchtete Dampfanlagen verwendet werden sollten, während die Kraftmaschinen zur Deckung der Spitzenlast folgende Eigenschaften aufweisen sollten:

- a) Kleiner Anschaffungspreis der Kraftmaschine.
- b) Kleiner Platz- und kleiner Raumbedarf, um die Kosten für das Grundstück und das Gebäude klein zu halten und um die Anlage im Schwerpunkt des Energieverbrauchs aufstellen zu können.
- c) Keine oder geringe Wartung im Stillstand.
- d) Rasche Betriebsbereitschaft und kurze Startzeit vom kalten Zustand auf Vollast.
- e) Wenig Betriebspersonal, da man dieses nicht nur für die kurze tägliche oder jährliche Betriebszeit entlohnen kann und die Beschäftigung während der langen Stillstandszeit schwierig oder sogar unmöglich ist.

Tabelle 1. Vergleich der Energiegestehungskosten von Gasturbinen-, Dampfturbinen- und Dieselmotorzentralen bei einer jährlichen Betriebsstundenzahl von 2000  
Von allen Lösungen ist die Gasturbine ohne Luftvorwärmer die wirtschaftlichste Anlage

| Anlage Nr.                                    |              | Gasturbinenanlage<br>ohne Luft-<br>vorwärmer |        |        |            |          | Dampf-<br>turbinen-<br>anlage |   | Dieselmotorenanlage |   |
|-----------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------|--------|--------|------------|----------|-------------------------------|---|---------------------|---|
|                                               |              | 1                                            | 2      | 3      | 4          | 5        | 3                             | 4 | 5                   | 5 |
| Klemmenleistung                               | kW           | 25 000                                       | 25 000 | 25 000 | 2 × 12 500 | 8 × 3100 |                               |   |                     |   |
| Erstellungskosten <sup>1)</sup>               | Fr./kW       | 350                                          | 480    | 450    | 650        | 600      |                               |   |                     |   |
| Wärmeverbrauch                                |              |                                              |        |        |            |          |                               |   |                     |   |
| Brennstoff/Klemmen                            | kcal/kWh     | 3300                                         | 2760   | 2870   | 2390       | 2400     |                               |   |                     |   |
| Brennstoffpreis                               | Fr./Mio kcal | 10                                           | 10     | 10     | 14         | 14       |                               |   |                     |   |
| unterer Heizwert                              | kcal/kg      | 10 000                                       | 10 000 | 10 000 | 10 000     | 10 000   |                               |   |                     |   |
| <b>a) Betriebskosten</b>                      |              |                                              |        |        |            |          |                               |   |                     |   |
| Brennstoffkosten                              | Rp./kWh      | 3,3                                          | 2,76   | 2,87   | 3,34       | 3,36     |                               |   |                     |   |
| Schmierölkosten                               | Rp./kWh      | 0,005                                        | 0,005  | 0,007  | 0,14       | 0,17     |                               |   |                     |   |
| Wasserkosten                                  | Rp./kWh      | 0,050                                        | 0,050  | 0,150  | 0,05       | 0,05     |                               |   |                     |   |
| Unterhaltskosten                              | Rp./kWh      | 0,100                                        | 0,120  | 0,200  | 0,60       | 0,70     |                               |   |                     |   |
| Betriebskosten total                          | Rp./kWh      | 3,455                                        | 2,935  | 3,227  | 4,13       | 4,28     |                               |   |                     |   |
| <b>b) feste Kosten</b>                        |              |                                              |        |        |            |          |                               |   |                     |   |
| Personalkosten                                | Fr./kW, Jahr | 2,0                                          | 2,5    | 8,0    | 2,5        | 5,0      |                               |   |                     |   |
| Kosten des Kapital-<br>dienstes <sup>2)</sup> | Rp./kWh      | 2,1                                          | 2,88   | 2,70   | 3,9        | 3,6      |                               |   |                     |   |
| Personalkosten                                | Rp./kWh      | 0,1                                          | 0,125  | 0,40   | 0,13       | 0,25     |                               |   |                     |   |
| feste Kosten total                            | Rp./kWh      | 2,2                                          | 3,005  | 3,10   | 4,03       | 3,85     |                               |   |                     |   |
| Gestehungskosten total                        | Rp./kWh      | 5,655                                        | 5,94   | 6,327  | 8,16       | 8,13     |                               |   |                     |   |

<sup>1)</sup> Die Erstellungskosten umfassen die ganze Anlage, einschl. Landerwerb, Gebäude, Gleisanschluss, Oeltank für einen Vorrat von 2000 Betriebsstunden Vollast, Transformatoren mit Netzanschluss, Bauleitung usw.

<sup>2)</sup> Verzinsung, Amortisation, Kapitalsteuern, feste Unterhaltskosten 12 % der Erstellungskosten.

- f) Einfachere, narrensichere Bedienung, da das Personal, das Maschinen nur saisonmässig bedienen muss, aus der Uebung kommt und Bedienungsfehler häufiger vorkommen.  
g) Gute Anpassungsfähigkeit der Anlagekosten an die jährlich gewünschte Betriebsstundenzahl, in dem Sinne, dass bei geringer Betriebsstundenzahl eine billige Anlage mit grösserem Brennstoffverbrauch gewählt werden sollte.

Diesen Eigenschaften wird die Gasturbine bei weitem am besten gerecht. Sie weist ferner noch folgende Vorteile auf: Kleiner Brennstoffverbrauch für den Startvorgang.

Kleiner Wasserbedarf, so dass sie ohne Rücksicht auf das Vorhandensein von Kühlwasser im Schwerpunkt des Energieverbrauchs aufgestellt werden kann, z. B. im Zentrum von Städten; dadurch ist es auch möglich, die Verlegung von zusätzlichen Ueberlandleitungen zum Transport der erhöhten, kurzzeitigen Energielieferung zu vermeiden. Im Gegensatz zu Speicherwerken haben diese Anlagen nur kurze Bauzeit.

Wir wollen dieses ganze Problem an Hand von Zahlenbeispielen näher verfolgen. Wir nehmen an, es soll eine Spitzenzentrale von etwa 25 000 kW aufgestellt werden, die jährlich 2000 Betriebsstunden mit Vollast läuft. Zuerst wollen wir die drei in Betracht kommenden Möglichkeiten, nämlich zwei Gasturbinenanlagen, ein Dampfkraftwerk und zwei Dieselmotoranlagen miteinander vergleichen. Tab. 1 gibt einen Ueberblick über die Anlagepreise, die verschiedenen Betriebs-

kosten und über die Energiegestehungskosten dieser Anlagen. Man sieht hieraus, dass die einfache Gasturbine die kleinsten Gestehungskosten pro kWh aufweist. Die beiden Dieselmotoranlagen schneiden hingegen sehr schlecht ab. Auch die Dampfanlage ergibt etwa 12 % höhere Energiegestehungskosten. Dieses Ergebnis gilt selbstverständlich nur unter den in Tabelle 1 angenommenen Brennstoffpreisen.

Einen besseren Ueberblick erhält man durch graphische Wirtschaftlichkeitsvergleiche. Bekanntlich setzen sich die Energiegestehungskosten einer Kraftanlage aus den festen Kosten, vor allem den Kosten für den Kapitaldienst und den beweglichen Kosten — wir wollen sie Betriebskosten nennen — zusammen. Die festen Kosten sind von der jährlichen Betriebszeit unabhängig. Sie bestehen aus der Verzinsung und aus der Amortisation des Kapitals, aus den Kapitalsteuern sowie aus den festen, von der Betriebszeit unabhängigen Unterhaltskosten. Hierzu gehören auch die Personalkosten, insofern das Personal während dem Stillstand der Zentrale nicht anderweitig beschäftigt werden kann und deshalb sein Lohn einen festen Betrag darstellt, der unabhängig von der Betriebszeit der Anlage voll zur Last gelegt werden muss. Zu den festen Kosten können ferner auch

Pachtverträge und andere Einrichtungen gehören. Die Betriebskosten sind eine Funktion der Betriebsstundenzahl, der Anzahl der Anlassvorgänge und der Belastung der Maschine. Es sind dies vorwiegend die Brennstoffkosten sowie die Schmieröl-, Wasser- und Unterhaltskosten der Maschinen und Apparate.

Wir wollen nun an einfachen Beispielen diese Verhältnisse abklären.

I. Die festen Kosten seien durch folgende Kennzeichen bestimmt:

Anlagepreis:  $A$  Fr./kW  
Amortisation, Verzinsung, Kapitalsteuern, Wasserrecht und feste Unterhaltskosten (unabhängig von der Betriebszeit)  $k \cdot A$  Fr./kW Jahr

II. Die Betriebskosten seien durch folgende Kennzeichen bestimmt:

Wärmeverbrauch der Anlage  $W$  kcal/kWh  
Unterer Heizwert des Brennstoffes  $H_u$  kcal/kg  
Brennstoffpreis  $P$  Fr./kg  
Brennstoffkosten  $B = \frac{W \cdot P}{H_u}$  Fr./kWh  
Schmierölkosten  $x$  Fr./kWh  
Wasserkosten  $j$  Fr./kWh  
Unterhaltskosten  $z$  Fr./kWh  
Personalkosten  $s$  Fr./kWh

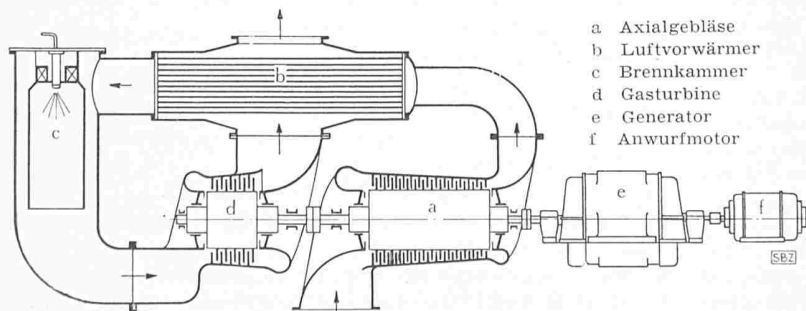


Bild 1. Schema einer Einwellen-Gasturbinenanlage mit Luftvorwärmer, der die Abgaswärme teilweise dem Prozess wieder zuführt

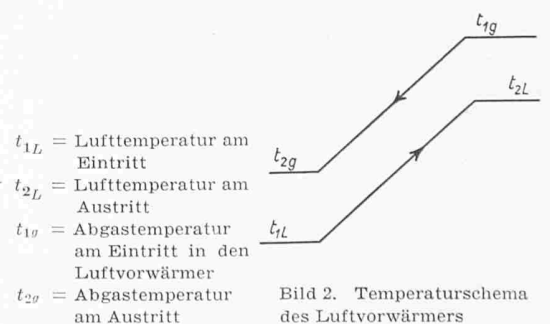


Bild 2. Temperaturschema des Luftvorwärmers

Ferner seien  $h$  die jährliche Betriebsstundenzahl und  $e$  die totalen Energiegestehungskosten in Fr./kWh.

Zur Vereinfachung haben wir im Gegensatz zur Tabelle 1 die Personalkosten zu den beweglichen Kosten gezählt. Man könnte sie aber selbstverständlich, wie das weiter vorn angenommen wurde, zu den festen jährlichen Kosten zählen, worunter aber die Einfachheit und Uebersichtlichkeit der Darstellung etwas leiden würde. Mit den oben angeführten Bezeichnungen und unter der eben erwähnten Vereinfachung erhält man:

$$(1) \quad e = \frac{A \cdot k}{h} + B + s + x + j + z$$

hieraus folgt, wenn  $B + s + x + j + z = C$  ist:

$$(2) \quad e = \frac{A \cdot k}{h} + C$$

Die wirtschaftlichste Anlage muss der Bedingung  $\frac{de}{dA} = 0$  genügen. Damit wird

$$\frac{de}{dA} = \frac{k}{h} + \frac{dC}{dA} = 0$$

und hieraus folgt:

$$(3) \quad \frac{dA}{dC} = -\frac{h}{k}$$

Um verschiedene Anlagen miteinander vergleichen zu können, trägt man zweckmässigerweise die Betriebskosten jeder Anlage, bestehend aus den Kosten für Brennstoff, Schmieröl, Wasser, Unterhalt und Personal, in Abhängigkeit ihres Anlagepreises in ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein. Die jährliche Betriebsstundenzahl, bei der zwei verschiedene Anlagen die gleichen Energiegestehungskosten aufweisen, wird gemäss der nachfolgenden Formel (4) durch den Winkel der Verbindungsgeraden mit der Abszisse definiert. Es ist nämlich gemäss Gleichung (3):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dA}{dC} = -\frac{h}{k}, \text{ woraus}$$

$$(4) \quad h = -k \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Eine Geradenschar mit den Neigungswinkeln  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  usw. entspricht somit den jährlichen Betriebsstundenzahlen von  $h$ ,  $h'$ ,  $h''$ , usw.

Liegen im Diagramm die Werte für die verschiedenen betrachteten Anlagen auf einer Kurve, so findet man den Wert für die wirtschaftlichste Anlage bei einer gegebenen Betriebsstundenzahl  $h$ , indem man die Gerade mit dem Neigungswinkel  $\alpha$  an die Kurve heranschiebt, bis sie diese tangiert. Wir wollen nun an Hand eines Beispiels den Gang einer solchen Wirtschaftlichkeitsberechnung zeigen. Eine einfache Gasturbinenanlage besteht aus den im Schema Bild 1 angegebenen Elementen. Will man eine ganz billige Anlage bauen, so lässt man den Luftvorwärmer weg, was allerdings einen schlechteren thermischen Wirkungsgrad ergibt. Je grösser andererseits der Luftvorwärmer ist, desto kleiner ist der Abgasverlust und desto höher der thermische Wirkungsgrad. Die Anlage wird aber durch die Vergrösserung des Luftvorwärmers entsprechend teurer.

Wir definieren die Grösse des Luftvorwärmers durch den Ausnutzungswirkungsgrad  $\varepsilon$ .

$$(5) \quad \varepsilon = \frac{t_{2L} - t_{1L}}{t_{1g} - t_{1L}}$$

wobei die Bedeutung der Temperaturen aus Bild 2 hervorgeht. Um ein klares Bild zu bekommen, betrachten wir folgende drei Anlagen:

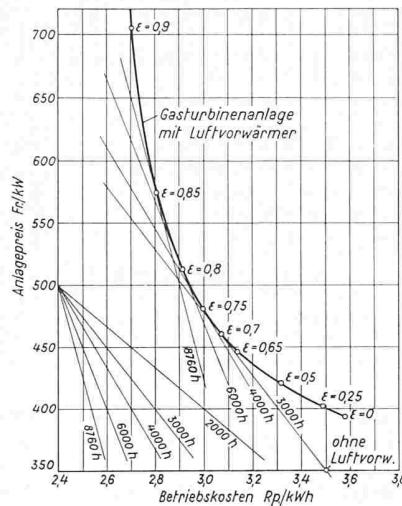


Bild 3. Anlagepreis eines 25 000 kW-Gasturbinen-Kraftwerkes in Abhängigkeit der Betriebskosten bei verschiedenen Ausnutzungswirkungsgraden des Luftvorwärmers.

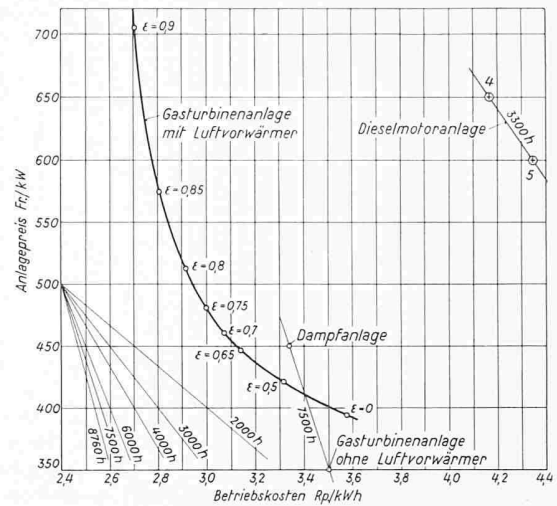


Bild 4. Vergleich des Anlagepreises und der Betriebskosten von Gasturbinen-, Dampfturbinen- und Dieselmotor-Kraftwerken für eine Leistung von 25 000 kW

- Eine Gasturbinenanlage ohne Luftvorwärmer.
- Eine Gasturbinenanlage, die mit allen Rohrleitungen, Fundamenten usw. für einen Vorwärmer ausgerüstet ist, bei der aber die Wärmeaustauschfläche  $\varepsilon$  gleich Null ist.
- Gasturbinenanlagen mit Luftvorwärmer von steigenden Werten  $\varepsilon$ .

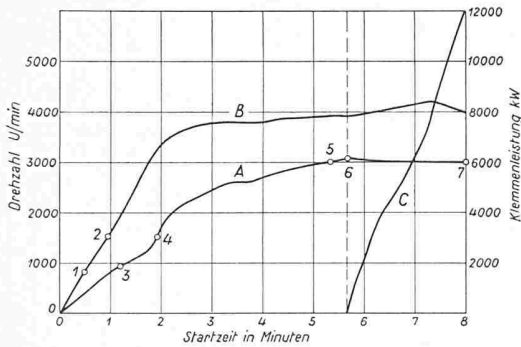
Bild 3 zeigt das Ergebnis. Die Abszisse enthält die Betriebskosten einschliesslich Personalkosten und die Ordinate den Anlagepreis einer vollständigen Zentrale, einschliesslich Landerwerb, Gebäude, Gleisanschluss, Brennstofflagerung, Schaltanlage, Transformatoren und Netzanschluss. Zusätzlich kann man nach Formel (4) das Strahlenbündel eintragen, das verschiedenen Betriebsstundenzahlen entspricht. Brennstoffpreis, Betriebskosten, Kapitaldienst und Personalkosten entsprechen den Werten der Tab. 1. Die Tangente an die Kurve, die durch den Punkt geht, der die Anlage ohne Luftvorwärmer angibt, zeigt, dass unterhalb einer jährl. Betriebsstundenzahl von 3000 die Anlage ohne Luftvorwärmer allen Gasturbinenanlagen mit Luftvorwärmern bis zu einem Wert von  $\varepsilon = 0,73$  wirtschaftlich überlegen ist. Es wäre somit unrentabel, eine Anlage mit einem Luftvorwärmer bauen zu wollen, dessen Ausnutzungswirkungsgrad  $\varepsilon < 0,73$  wäre. Man sieht ferner aus Bild 3, dass Anlagen mit durchgehendem Betrieb ( $h = 8760$ ) unwirtschaftlich werden, wenn der Ausnutzungswirkungsgrad  $\varepsilon > 0,85$  ist, weil der Anlagepreis im Verhältnis zur Abnahme der Betriebskosten zu stark ansteigt. Sucht man die wirtschaftlichste Anlage für eine gegebene jährliche Betriebsstundenzahl  $h$ , so findet man sie dort, wo die Gerade, die der verlangten Betriebsstundenzahl  $h$  entspricht, die Kurve tangiert.

Aus Bild 3 ergeben sich somit folgende Feststellungen:

- Gasturbinenanlagen, bei denen der Ausnutzungswirkungsgrad  $\varepsilon < 0,73$  ist, sind unwirtschaftlich, da die Anlage ohne Luftvorwärmer dank ihres geringen Anschaffungspreises die kleineren Energiegestehungskosten aufweist.
- Gasturbinenanlagen, bei welchen der Ausnutzungswirkungsgrad  $\varepsilon > 0,85$  ist, sind unwirtschaftlich, weil der Anlagepreis zu hoch ist.
- Bei jährlichen Betriebsstundenzahlen zwischen 4000 und 8760 sind Gasturbinenanlagen zu wählen, die einen Ausnutzungswirkungsgrad  $\varepsilon = 0,75$  bis 0,85 aufweisen.

Wir wollen nun diese verschiedenen Gasturbinenanlagen mit den in Tabelle 1 aufgeführten Dampfturbinen- und Dieselmotoranlagen vergleichen. Zu diesem Zweck tragen wir die Werte dieser Zentralen in ein gleiches Diagramm, Bild 4, ein. Man sieht hieraus, dass die beiden Dieselmotoranlagen trotz ihrem viel höheren thermischen Wirkungsgrad unter den hier vorausgesetzten Bedingungen unwirtschaftlich sind. Die Gasturbinenanlage ohne Luftvorwärmer ist bis etwa 7500 Betriebsstunden pro Jahr der Dampfanlage überlegen. Ferner ersieht man, dass man immer eine Gasturbinenanlage



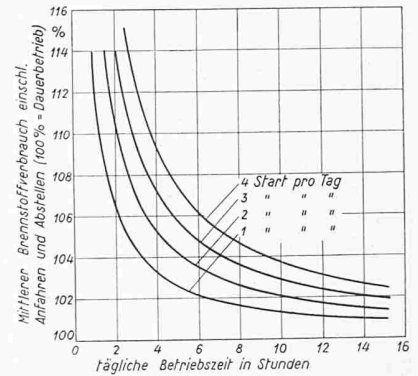


A Drehzahl der HD-Gruppe, B Drehzahl der ND-Gruppe  
C Klemmleistung

Bild 5 (links). Startdiagramm einer zwei-stufigen Gasturbinenanlage ohne Luftvorwärmer. Die Vollast wurde in acht Minuten erreicht.

- 1 Zündung der HD-Brennkammer
- 2 HD-Anwurfmotor abgeschaltet
- 3 Zündung der ND-Brennkammer
- 4 ND-Anwurfmotor abgeschaltet
- 5 Normaldrehzahl erreicht
- 6 Die Gruppe wird belastet
- 7 Vollast erreicht

Bild 6 (rechts). Mittlerer Brennstoffverbrauch einer Gasturbinenanlage von 25000 kW in Abhängigkeit der täglichen Betriebszeit und der Anzahl der Inbetriebsetzungen pro Tag.



bauen kann, die wirtschaftlicher ist als eine Dampfanlage. Eine Gasturbinenanlage mit dem gleichen Preis wie die Dampfanlage weist kleinere Energiegestehungskosten auf. Es sei hier nochmals betont, dass diese Vergleiche nur unter den in Tabelle 1 angeführten Annahmen für den Brennstoffpreis und den Kapitaldienst gelten. In Ländern, in denen die Dampfanlage mit sehr billiger einheimischer Kohle betrieben werden kann, kommt man zu etwas anderen Ergebnissen, weil die Gasturbine heute noch nicht mit Kohle arbeiten kann.

Man kann aber auch verschiedene Kraftanlagen untereinander rein algebraisch vergleichen, ohne dass man die graphische Darstellung zu Hilfe nehmen muss. Wir wollen auch hierfür einige Beispiele anführen. Es sei uns die Aufgabe gestellt, diejenige jährliche Betriebsstundenzahl zweier verschiedener Anlagen zu suchen, bei der die Energiegestehungskosten gleich hoch werden. Zu diesem Zwecke formen wir die Gleichung (3) etwas um. Wir nehmen an, dass die Personalkosten  $S$  zu den festen jährlichen Ausgaben gehören, wie dies auch in Tabelle 1 angenommen wurde.

Der Grenzwert der Betriebsstundenzahl wird dann:

$$(6) \quad \lim h = - \frac{\Delta A \cdot k + \Delta S}{\Delta C}$$

Diese Gleichung besagt folgendes: Betrachten wir eine Anlage mit den jährlichen festen Kosten  $A \cdot k$ , den jährlichen Personalkosten  $S$  und den Betriebskosten  $C$  und vergleichen wir sie mit einer anderen Anlage, bei der die jährlichen festen Kosten  $A' \cdot k'$ , die jährlichen Personalkosten  $S'$  und die Betriebskosten  $C'$  sind, so erhält man die jährliche Betriebsstundenzahl  $h$ , bei der beide Anlagen gleich wirtschaftlich sind, durch folgenden Ausdruck:

$$\lim h = - \frac{(A \cdot k + S) - (A' \cdot k' + S')}{C - C'}$$

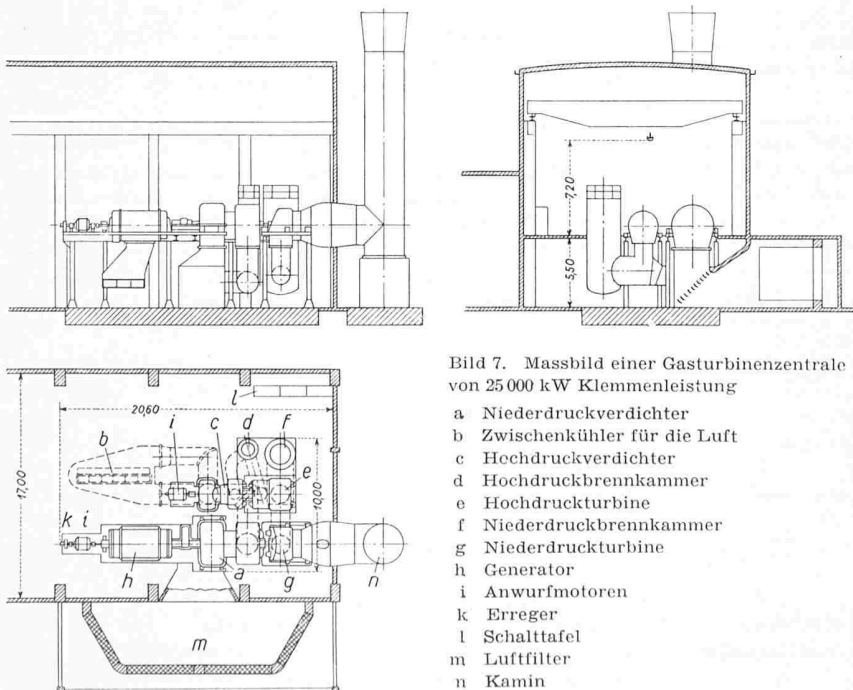


Bild 7. Massbild einer Gasturbinenzentrale von 25000 kW Klemmleistung

- a Niederdruckverdichter
- b Zwischenkühler für die Luft
- c Hochdruckverdichter
- d Hochdruckbrennkammer
- e Hochdruck turbine
- f Niederdruckbrennkammer
- g Niederdruck turbine
- h Generator
- i Anwurfmotoren
- k Erreger
- l Schalttafel
- m Luftfilter
- n Kamin

Die Analyse dieses Ausdruckes ergibt folgendes: Unterhalb dem erhaltenen Wert von  $h$  ist die Anlage mit den kleineren festen Jahreskosten wirtschaftlicher, oberhalb dieses Wertes  $h$  diejenige mit den grösseren festen Jahreskosten. Wird der Wert von  $h$  negativ, so scheidet die teurere Anlage aus. Wenn der Nenner gleich 0 wird, so erhält man für  $h$  den Wert  $\infty$ , das bedeutet, dass die teurere Anlage im ganzen Betriebsbereich unwirtschaftlich ist. Wird dagegen der Zähler gleich 0, so wird der ganze Ausdruck gleich 0. In diesem Falle ist die Anlage mit den höheren Betriebskosten schon bei den kleinsten möglichen Betriebsstundenzahlen uninteressant. Als Beispiel nehmen wir die Gasturbinenanlage 1 und die Dieselmotoranlage 5 der Tabelle 1. Dies ergibt:

$$\lim h = - \frac{(42 + 2,0) - (72 + 5)}{3,455 - 4,280} \cdot 100 = - 4000$$

Da der Wert von  $h$  negativ wird, scheidet die Dieselmotoranlage als unwirtschaftlich aus.

Als weiteres Beispiel vergleichen wir die Gasturbinenanlage 1 mit der Dampfanlage 3 der Tabelle 1. Hier erhalten wir:

$$\lim h = - \frac{(42 + 2,0) - (54 + 8)}{3,455 - 3,227} \cdot 100 = + 7900$$

Die totalen Energiegestehungskosten der Dampfanlage sind somit erst bei einer jährlichen Betriebszeit von 7900 Stunden der Gasturbinenanlage ebenbürtig und erst darüber geringer. Es ist auch interessant festzustellen, dass bei jährlichen Kapitalkosten der Dampfanlage von 54 Fr./kW Jahr (entsprechend 12 % Kapitaldienst), die Personalkosten 8 Fr./kW Jahr betragen. Die Personalkosten belasten somit die festen Kosten beträchtlich, sie betragen nicht weniger als 15 % der Kapitalkosten. Aus dieser Vergleichsrechnung geht eindeutig hervor, dass die billige Gasturbinenanlage der Tabelle 1, trotz des relativ niedrigen thermischen Wirkungsgrades, für Spitzenzentralen die wirtschaftlichste Anlage darstellt. Ist der Kapitalzins höher, wie dies in den meisten europäischen Staaten der Fall ist, so wird die Grenze der wirtschaftlichen jährlichen Betriebsstundenzahl der Gasturbine ohne Luftvorwärmer noch höher. Die oben angeführten verschiedenen Vorteile der Gasturbinenanlage seien noch durch einige Betriebsergebnisse veranschaulicht. Die kurze Inbetriebsetzungs- und rasche Belastbarkeit ist aus Bild 5 ersichtlich. Sie zeigt den Anfahrvorgang einer Gasturbinenanlage von 10 000 kW Klemmleistung. Ausgehend vom kalten Zustand war die Maschine nach 8 Min. auf voller Last.

Wie wir weiter vorn erwähnten, ist der relativ kleine Brennstoffverbrauch während der Startperiode ein weiterer Vorteil der Gasturbine. Bild 6 zeigt den mittleren Brennstoffverbrauch in Abhängigkeit der täglichen Betriebsstundenzahl und der Anzahl Starts pro Tag. Wird die Maschine z. B. vormittags fünf Stunden und abends fünf Stunden lang in Betrieb gehalten, so erhöht sich der mittlere Brennstoffverbrauch pro kWh, einschliesslich Start und Entlastung, um nur 2 % gegenüber einem

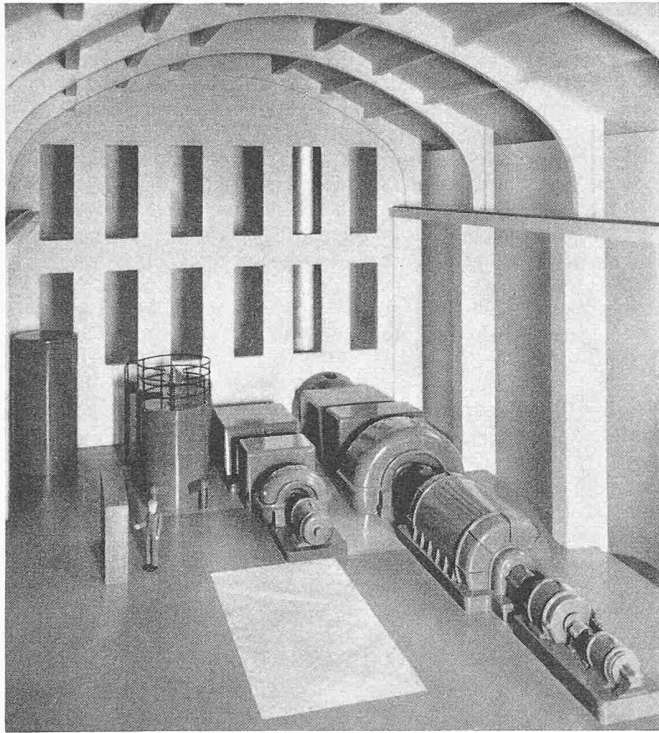


Bild 8. Modell einer 25 000-kW-Gasturbinenzentrale. Von rechts nach links: Niederdruckgruppe mit Generator, Hochdruckgruppe mit Anwurfmotor, Brennkammern, Schalttafel, Brennstoff-Tagestank

kontinuierlichen Betrieb. Bild 7 gibt einen Begriff über den Platzbedarf einer 25 000 kW-Anlage. Er beträgt 0,008 m<sup>2</sup>/kW. Es ist auch erwähnenswert, dass der Kühlwasserverbrauch eines solchen Kraftwerkes nur 1000 m<sup>3</sup>/h beträgt, während ein Dampfkraftwerk von gleicher Leistung rund 6000 m<sup>3</sup>/h benötigt. Gegenwärtig befinden sich vier Anlagen der genannten Grösse bei Brown, Boveri im Bau (Bild 8). Von diesen sind drei für Italien und eine für Schweden bestimmt.

#### Die zeitlichen Schwankungen des Energiekonsums

Wir wollen als Beispiel die Schwankungen im Bereich des Netzes der grössten schweizerischen Elektrizitätsgesellschaft, nämlich der Nordostschweizerischen Kraftwerke (NOK) betrachten. Bild 9 zeigt den Verlauf der Gesamtbelastung dieses Netzes während des 5. Januar 1954 (Dienstag). Die Wasserführung der Flüsse war zu dieser Zeit relativ gering. Die Laufwerke konnten deshalb nur 18 % des Energiekonsums decken, die thermischen Kraftwerke lieferten rund 20 %. Ein wesentlicher Teil der Energie musste von anderen inländischen Gesellschaften und vom Ausland bezogen werden. Die Speicherwerke wurden nur während der Tages- und Abendspitze eingesetzt. Bemerkenswert ist der starke Anstieg des Energiekonsums zwischen 10 und 12 h. Er rührt von der Kochspitze (elektrische Kochherde) her.

Zum Vergleich wollen wir die Gesamtbelastung dieser Gesellschaft auch an einem Sommertag betrachten. Bild 10 zeigt den Verlauf während des 18. August 1954. Interessant ist, dass die Maximallast um 11.40 h fast gleich gross ist wie im Winter. Sie tritt aber viel ausgeprägter in Erschei-

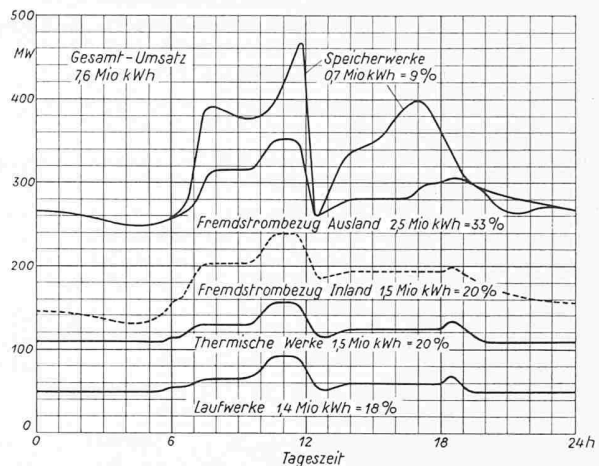


Bild 9. Diagramm der Gesamtbelastung der Nordostschweizerischen Kraftwerke am 5. Januar 1954. Vom gesamten Tagesverbrauch der NOK wurden an diesem Tage 33 % aus dem Ausland bezogen und 20 % aus importiertem Brennöl produziert. Bemerkenswert ist die Kochspitze zwischen 10 h und 12 h.

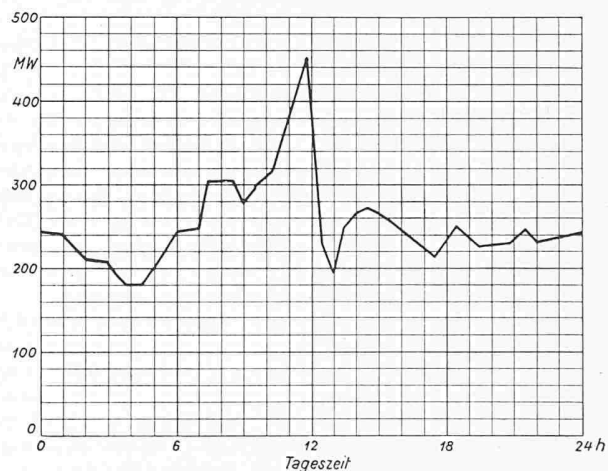


Bild 10. Diagramm der Gesamtbelastung der Nordostschweizerischen Kraftwerke am 18. August 1954. Auffallend ist, dass die durch die Kochspitze bedingte Maximallast fast gleich gross ist wie im Winter

nung, da der Stromkonsum während der übrigen Tageszeit geringer ist. Bemerkenswert ist auch die kurzzeitige Abnahme um 9 h vormittags, die von der Neunuhrpause in den Fabriken herrührt.

Die ausgeprägte kurzzeitige Lastspitze, die eine jährliche Betriebszeit von rund 600 Stunden ergibt, liesse sich sehr wirtschaftlich mittels einer Gasturbine decken. Selbstverständlich können diese Zentralen im Winter auch zur Deckung von weiteren Energieverbrauchsspitzen herangezogen werden. Durch diese Betriebsweise kommt man jährlich auf etwa 2500 Betriebsstunden. Bei dieser Betriebszeit lohnt es sich aber nicht, ein teures Kraftwerk aufzustellen, weil die Kapitalkosten die Energiegestehungskosten zu stark belasten würden.

Schluss folgt

Adresse des Verfassers: Dipl. Ing. H. Pfenninger, Oberingenieur in der AG. Brown, Boveri & Cie., Baden.

## Eidgenössische Bauvorhaben im Zusammenhang mit der ETH

DK 727.3

In der bundesrätlichen Botschaft Nr. 6755 vom 21. Jan. 1955 wird die Notwendigkeit eines weiteren Ausbaues der Eidg. Technischen Hochschule, eines Neubaus für die Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen und der Errichtung einer Hochschulsportanlage in Zürich eingehend dargelegt.

### 1. Ausbau der Eidgenössischen Technischen Hochschule

Bei der ETH handelt es sich vor allem um die Fertigstellung der in der Frühjahrssession 1946 von der Bundes-

versammlung beschlossenen Erweiterungsvorhaben. Vom damaligen Bauprogramm<sup>1)</sup> wurden folgende Erweiterungsbauten ausgeführt: Umbauten im Hauptgebäude, aber unter Verzicht auf den grossen Hörsaal, Physikgebäude (grosser Hörsaal), Maschinenlaboratorium (Aufstockung), Versuchshäuser für Botanik, Aufstockung des land- und forstwirtschaftlichen Gebäudes, Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau, Erweiterungstrakt für organische Chemie und Er-

<sup>1)</sup> Ausführlich dargestellt in SBZ 1948, Nr. 14, S. 190, u. Nr. 51, S. 708