

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 56 (1965)
Heft: 13

Artikel: Thermische Erzeugung von Spitzen- und Ergänzungsenergie
Autor: Wahl, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916382>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 04.02.2026

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

Je nach Grösse und Lage der Anlage kommen als besondere Massnahmen in Betracht:

1. Einbau von Rauchfiltern, am besten Elektrofilter
2. Verwendung von schwefelarmem Brennstoff (Erdgas, Erdöl oder Kohle). Allenfalls ist neben billigerem schwefelhaltigem Brennstoff auch schwefelarmer oder schwefelfreier Brennstoff in besonderen Lagern bereit zu halten, damit bei kritischen atmosphärischen Bedingungen solcher verbrannt werden kann.

Und bei den Atomkraftwerken muss unser Augenmerk darauf gerichtet werden, möglichst jede radioaktive Verschmutzung zu vermeiden. Das ist aber ein so selbstverständliches Ziel, weil es schon allein für die Sicherheit der Belegschaft notwendig ist, dass es kaum eines besonderen Anstosses zu dessen Innehaltung bedarf.

Adresse des Autors:

H. Wüger, Direktor der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), Zürich.

Thermische Erzeugung von Spitzen- und Ergänzungsenergie

von J. Wahl, Genf

1. Die Hauptarten der thermischen Kraftwerke

Die in den Brennstoffen enthaltene Wärmeenergie kann in verschiedenen Maschinenarten über mechanische in elektrische Energie umgewandelt werden; am meisten verbreitet sind die klassischen Kolbenmaschinen und die Dampfturbinen.

1.1 Die in den elektrischen Zentralen verwendeten *Kolbenmaschinen* arbeiten meist nach dem Dieselfverfahren und zeichnen sich durch einen hohen Wirkungsgrad aus; ihre Leistung ist aber nach oben ziemlich begrenzt. Ihrer niedrigen Drehzahl wegen eignen sich Motoren mittlerer oder grosser Leistung schlecht zum Antrieb elektrischer Generatoren. Dagegen erfolgt der Anlauf der Maschine sehr rasch.

1.2 Die *Dampfturbinenanlagen* kleiner Leistung haben einen weniger hohen Wirkungsgrad und ihr Betrieb ist weniger elastisch. Dagegen können sie einen guten Dauerbetrieb gewährleisten und ihre Drehzahl kann an diejenigen von wirtschaftlichen Generatoren angepasst werden.

Bevor die Gasturbinen mit Axialverdichter und Brennkammer sowie die von Freikolbengaserzeugern gespeisten Turbinen auf dem Markt erschienen, gab es einen ziemlich weiten Leistungsbereich, in dem weder die Kolbenmaschinen noch die Dampfturbinen eine vollkommen zufriedenstellende Lösung ergaben.

1.3 Die *Gasturbinen mit Axialverdichter* wurden hauptsächlich im Flugzeugbau als Turboprop- oder Strahltriebwerk entwickelt und zwar wegen ihrer hohen Leistung pro Gewichtseinheit. Sie werden auch in elektrischen Zentralen eingesetzt. Wird die Gastemperatur zur Erreichung einer langen Turbinenlebensdauer herabgesetzt, dann wird der Wirkungsgrad des Verfahrens ungefähr bei 20 % liegen, für eine Einheit von 10 000 PS. Dieser Wirkungsgrad kann durch Anwendung komplizierter Verfahren verbessert werden, jedoch gehen dadurch die Vorteile der einfachen Gasturbine (einfache Bauart und geringes Gewicht) verloren.

Der Gebrauch von Gasturbinen mit Axialverdichter scheint deshalb auf jene Anwendungen, wo ein schlechter Wirkungsgrad annehmbar ist, beschränkt, sei es wegen des

niedrigen Preises des verwendeten Brennstoffes oder mit Rücksicht auf die Betriebsbedingungen, z. B. bei Verwendung als Hilfsgruppe oder zur Spitzendeckung. Aus den Erfahrungen geht jedoch hervor, dass solche Gruppen durch das rasche Anwachsen des Energiebedarfs auf allen Gebieten oft für einen weit grösseren Bereich verwendet werden, als dies bei der Ausarbeitung des Projektes vorgesehen war.

1.4 Die *Freikolbenanlagen* sind aus der Verbindung von Kolbenmotor und Turbine hervorgegangen. Der Treibgaserzeuger kann mit einem aufgeladenen Dieselmotor verglichen werden, indem die Expansion nur bis auf den Betriebsdruck des Turboladers geht. Die Verbrennungsgase sowie die überschüssige Spülluft expandieren in einer Turbine, welche die Nutzleistung abgibt.

Vor einer ins Detail gehenden Beschreibung der Freikolbenmaschine ist es nützlich, die Analogien und die Unterschiede zu den drei vorher genannten Maschinenarten kurz zusammenzufassen:

Analogien:

a) zum Dieselmotor

- hoher Wirkungsgrad, wegen der Verbrennung bei hoher Temperatur und unter hohem Druck
- schnelle Inbetriebsetzung
- hin und her bewegte Kolben

Unterschiede:

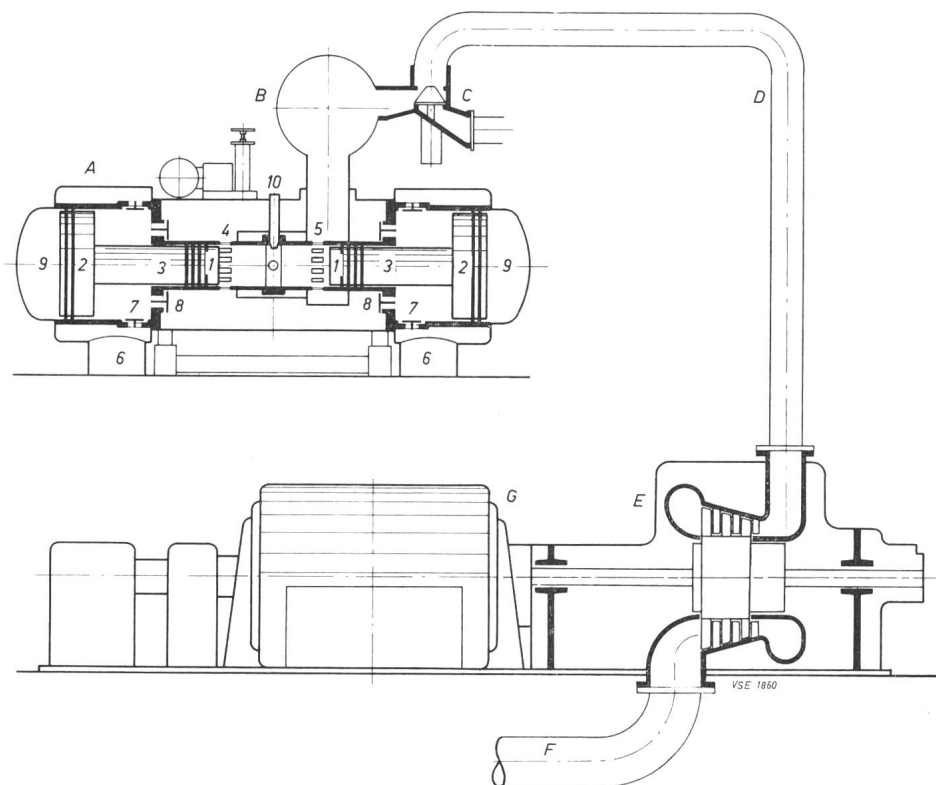
- geringes Gewicht und kleinerer Platzbedarf
- ausgeglichene bewegte Massen
- keine Pleuelstangen und keine Kurbelwelle
- elastischer Betrieb und Betriebssicherheit infolge Wegfalles einer mechanischen Verbindung zwischen den Zylindern einer Gruppe
- Möglichkeit, sämtliche Brennstoffe (bis 3500 Redwood. s) sowie Erdgas zu verbrennen
- hohe Drehzahl der Antriebswelle (Turbine)

Fig. 1

**Schema einer Stromerzeugungsanlage
mit Abwärmeverwertung in einer
Kesselanlage**

- A Treibgaserzeuger Gs. 34¹⁾
 B Abgasdruckbehälter
 C Ablassventil
 D Gasleitung
 E Turbine
 F Abgasleitung
 G Drehstromgenerator
 1 Arbeitskolben
 2 Verdichterkolben
 3 Kolbenstange
 4 Spülschlitze
 5 Auslassschlitze
 6 Ansaugstutzen
 7 Einlassventile
 8 Rückflussklappen
 9 Luftpuffer
 10 Brennstoffeinspritzdüsen

¹⁾ Im allgemeinen arbeiten zur Speisung einer Turbine mehrere Treibgaserzeuger im Parallelbetrieb.



b) zur Dampfturbine

- | | |
|---|--|
| niedrige Temperatur des Mediums, mit dem die Turbine gespeist wird | — hoher Wirkungsgrad (bei gleicher Leistung) |
| — Dauerbetrieb, infolge der Möglichkeit, den Unterhalt der Treibgasgeneratoren nacheinander einzeln vorzunehmen | — schnellere Inbetriebsetzung |
| — hohe Drehzahl der Antriebswelle | — geringerer Kühlwasserverbrauch |
| | — geringerer Platzbedarf |
| | — Anwendung beschränkt auf flüssige Brennstoffe und Erdgas |
| | — Leistungsgrenze bei ca. 25 000 kW pro Gruppe |

c) zur Gasturbine mit Axialverdichter

- | | |
|-----------------------------------|--|
| — geringes Gewicht | — hoher Wirkungsgrad |
| — hohe Drehzahl der Antriebswelle | — Möglichkeit, Schweröl zu verwenden, praktisch ohne Beschränkung des Schwefelgehalts (max. 4 ‰) |
| | — niedrige Eintrittstemperaturen der Gase am Turbineneinlass und somit verlängerte Lebensdauer |

2. Stromerzeugergruppen mit Freikolbentreibgasgeneratoren

Die Freikolbenmaschinen werden so bezeichnet, weil sie im Gegensatz zu den klassischen Motoren, in denen die Bewegung der Kolben an diejenigen der Pleuelstangen und der Kurbelwelle gebunden ist, Kolben enthalten, die sich unter der Einwirkung der Drücke frei bewegen.

2.1 Eine Freikolbenstromerzeugergruppe besteht in der Hauptsache aus einer von einem oder mehreren Treibgas-

erzeugern gespeisene Turbine, den Rohrleitungen zur Verbindung von Turbine und Treibgaserzeuger und den Regulierorganen. Die Turbine treibt je nach der Leistung der Gruppe den elektrischen Generator direkt oder über ein Reduktionsgetriebe an.

2.2 Der Treibgaserzeuger (Fig. 1) hat als wesentliche Bestandteile zwei identische bewegliche Vorrichtungen, gebildet je aus einem über eine Rohrschubstange mit dem Kompressorkolben verbundenen Arbeitskolben. Die zwei Vorrichtungen bewegen sich symmetrisch zur Achse des Treibgaserzeugers und sind miteinander über ein leichtes Ausgleichsgestänge verbunden, das fast keine Kräfte zu übertragen hat, aber zur Synchronisation der Kolbenbewegungen und zur Steuerung der Brennstoffpumpe nötig ist.

Das Gehäuse trägt den Arbeits- und Kompressionszylinder. Es dient als Spülluftspeicher. Der Arbeitszylinder, welcher sehr hohen Drücken und Temperaturen ausgesetzt ist, wird durch eine mit zwei gusseisernen Ringmänteln umgebenen dickwandigen Stahlrohr gebildet. Der Spülluftmantel steht durch Schlitze mit dem Gehäuse in Verbindung; der Heissgasmantel verbindet den Arbeitszylinder durch Schlitze mit der Abgasturbine.

Die Kompressionszylinder sind nach aussen durch einen Boden abgeschlossen. Der Raum zwischen den entsprechenden Kompressionskolben und dem Boden schliesst eine bestimmte Luftmenge ein. Diese Luftmenge übernimmt die Aufgabe des Schwungrades an den klassischen Motoren und wird «Puffer» genannt.

Die Arbeitszylinder haben weder Ein- noch Auslassventile. Nachdem die beweglichen Vorrichtungen einen Teil des Expansionshubes zurückgelegt haben, werden die Auslassschlitze vom Arbeitskolben freigelegt und die Abgase beginnen in die Druckleitungen zu strömen. Dann werden die Spülschlitze vom entsprechenden Kolben freigelegt und die im Gehäuse enthaltene Luft spült den Arbeitszylinder und

füllt ihn für den folgenden Hub. Bei Vollast strömt das Gasgemisch etwa bei einer Temperatur von 440° und einem Druck von etwa 3 kg/cm^2 (eff.) aus dem Treibgaserzeuger.

Der Druck in den «Luftpuffern» wird durch ein einfaches Regulierorgan, Stabilisator genannt, nach der abzugebenden Leistung automatisch geregelt. Durch diese Regelung wird der Kompressionshub im Arbeitszylinder an den jeweiligen Betriebszustand angepasst.

Die Brennstoffeinspritzung in den Arbeitszylinder geschieht durch drei Düsen, welche von der durch das Ausgleichsgestänge gesteuerten, pulsierend arbeitenden Pumpe, gespiesen werden.

Man kann den Freikolbentreibgasgenerator als eine besonders günstige Ausführung eines hoch aufgeladenen Zweitakt-Dieselmotors, bei welchem die Expansion in einer Turbine bis auf Atmosphärendruck erfolgen kann, betrachten. Er arbeitet nach einem neuen thermodynamischen Kreisprozess und ermöglicht die Kombination gewisser Vorteile der Kolbenmotoren mit jenen der Gasturbinen. Der Wegfall von Kurbelwelle und jeglicher kraftübertragender Pleuelgestänge stellt nicht nur eine konstruktive Vereinfachung dar. Vielmehr erlaubt diese Bauart, den Hub und dadurch die Totlagen der Kolben an die verschiedenen Betriebszustände anzupassen. Auf diese Art kann der Kompressionsdruck trotz den unterschiedlichen Ladedrücken, die von Null bis zu mehreren kg/cm^2 zwischen Start und Vollast variieren, in zulässigen Grenzen gehalten werden. Hier muss noch hinzugefügt werden, dass die Freikolbenmaschinen weder Kurbelwelle noch Lager haben und dass man deshalb zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades höhere Drücke als in einem Dieselmotor zulassen kann.

2.3 Turbine: Bei der Gasturbine mit Axialverdichter und Brennkammer beginnt die Arbeitsabgabe der Gase beim Eintritt in die Turbine. Der Wirkungsgrad des Kreisprozesses ist direkt abhängig von der Gastemperatur in diesem Punkt. Um einen annehmbaren Wirkungsgrad zu erzielen, ist man gezwungen, mit hohen Temperaturen (min. 650°) zu arbeiten, was jedoch schwierige Festigkeits- und Lebensdauerprobleme an den Turbinenkonstrukteur stellt.

Bei durch Treibgaserzeuger gespiesenen Turbinen findet in dem Arbeitszylinder, welcher auch Brennkammer ist, eine Teilexpansion statt.

Der Freikolbengaserzeuger ersetzt somit zugleich Kompressor und Brennkammer der klassischen Gasturbinen. Die Verbrennung erfolgt bei einem so hohen Wirkungsgrad, dass die überschüssige Energie zur Vorkompression der Luft ausreicht. Die durch die Verbrennung bei hohen Temperaturen frei werdende Energie wird zuerst im Arbeitszylinder in mechanische Energie umgewandelt und dadurch werden die Eintrittstemperaturen an der Turbine relativ niedrig. Eigentlich wird nur die restliche Wärme der Turbine zugeführt. Auf diese Art kann man etwa den gleichen Wirkungsgrad wie beim Dieselmotor erreichen.

Wegen der relativ niedrigen Gastemperatur beim Einstromen in die Turbine, stellt diese keine besonderen Probleme an die Warmfestigkeit und man kann deshalb dafür die gleichen Werkstoffe wie für niedrig beanspruchte Dampfturbinen wählen.

Die konstruktiven Einzelheiten sind je nach Fabrikat und Anwendungsbereich verschieden. Die bisher gebauten Turbinen sind 3...9stufig, je nach der Leistung und der Be-

schaufelungsart ausgeführt. Die optimale Drehzahl liegt um so höher, je kleiner die abgegebene Leistung ist. Sie beträgt 11 000 Umdrehungen/min bei einer Turbine von 750 kW; ab einer Leistung von 6000 kW können die Turbinen für den direkten Antrieb eines 3000tourigen Generators ausgeführt werden.

Die Leistungsregulierung der Freikolbenstromerzeugergruppen geschieht durch gleichzeitiges Verändern von Druck, Temperatur und Menge des der Turbine zugeführten Gases. Die Temperaturabhängigkeit vom Druck ist in erster Annäherung eine Charakteristik des Treibgaserzeugers. Das Verhältnis zwischen der Menge und den beiden anderen Faktoren ist durch die Durchströmungsgesetze der Turbine gegeben.

3. Beschreibung einer thermischen 25 MW-Zentrale zur Deckung der Spitzen und des Ergänzungsbedarfs

Die im folgenden beschriebene Musterzentrale wurde auf Grund der nachstehenden Bedingungen ausgearbeitet:

3.1 Zusammenfassung der zugelassenen Hauptcharakteristiken

- in einer einzigen Gruppe zu installierende Leistung 25 000 kW
- Verwendung der Anlage als Spitzen- oder Ergänzungskraftwerk
- vorgesehenes Betriebsprogramm:
 - Variante 1: 2000 Stunden/Jahr
 - Variante 2: 4000 Stunden/Jahr
 - Variante 3: 6000 Stunden/Jahr
- garantierte Dauerleistung: 25 000 kW
- zulässige Höchstleistung während einer Stunde: 27 500 kW

3.2 Betriebsbedingungen

Im folgenden wird angenommen, dass

- die Gruppe im Parallelbetrieb mit dem Netz arbeitet; der Einzelbetrieb ist nicht vorgesehen
- es möglich sein muss, Stadtteile zu beheizen, sei es durch die Abgaswärmeverwertung oder als Zuluft, bei einem Nachverbrennungsverfahren in einer Kesselanlage

3.3 Unterhalt

Man verlangt unter anderem, dass die Anlage weitgehend automatisiert ist und nur eines Minimums an Personal bedarf.

3.4 Brennstoff

Es wurde angenommen, dass der zur Verfügung stehende Brennstoff ein Schweröl von der Art «Bunker C» mit den folgenden Eigenschaften sei:

- Viskosität bei $37,7^{\circ}\text{C}$ (Redwood) max. 3500 s
- Schwefelgehalt max. 4 %
- Conradson'sche Zahl (Kohlenstoffgehalt) 8...12 %
- Gehalt an Sedimentstoffen max. 0,25 %
- unterer Heizwert 9700...10 200 kcal/kg
- maximaler Preis 65.— Fr./t

3.5 Hilfseinrichtungen

Es wurde angenommen, dass die elektrische Energie zum Antrieb der Hilfsanlagen durch das 16 kV-Netz geliefert wird. Weiter wurde angenommen, dass das Kühlwasser in genügender Menge und bei dem erforderlichen Druck zur Verfügung steht.

3.6 Beschreibung der Anlagen

Auf Grund der vorgenannten Charakteristiken (§ 3.1...3.5) wäre eine Freikolbenstromerzeugeranlage in die drei folgenden Abteilungen aufzuteilen:

- Treibgaserzeugerhalle (15 Gasgeneratoren)
- Halle für die Turbogeneratorgruppe
- Kommandoraum, zugehörige Räume und Brennstoffreinigungsanlage

In der Treibgaserzeugeranlage sind 15 Zweizylindermaschinen vom Typ SIGMA.GS.2.34 aufgestellt. Grob umschrieben besteht der GS.2.34-Generator aus zwei in den vorhergehenden Abschnitten behandelten Treibgaserzeugern, welche zu einer Einheit zusammengefügt sind. Er kann deshalb bei etwas höheren Betriebsdrücken arbeiten.

Jeder Generator ist mit der im Kellergeschoss verlaufenden Sammelleitung verbunden. An die Treibgaserzeugerhalle schliesst sich die Turbogeneratorgruppe an. Der Leistungstransformator ist im Freien aufgestellt. Die Turbine ist hochdruckseitig an die Sammelleitung, niederdruckseitig an die Abgasleitung angeschlossen.

Der im Freien in den Tanks gelagerte Brennstoff macht die Zentrale während 200 Stunden unabhängig von den Zufuhren.

Charakteristiken der Treibgaserzeuger

- Anzahl 15 Einheiten GS.2.34
- Bohrung des Arbeitszylinders 340 mm
- Bohrung der Verdichtierzylinder 900 mm
- Kolbenhub 380...450 mm
- Hubzahl 450...650/min.
- Gasdruck 3,10 kg/cm² eff. (bei Vollast)
- Temperatur 440 °C (bei Vollast)
- Adiabatische Gasleistung 2660 PS pro Einheit
- Gewicht einer Einheit 15 t

Charakteristiken der Turbine

- Eingehäusige Ausführung
- Dauernennleistung an der Welle ca. 34 600 PS
- Drehzahl 300 U/min.

Charakteristiken des Wechselstromgenerators

- Direkter Antrieb durch die Turbine
- Leistung ($\cos \varphi = 0,85$) 29 500 kVA
- Klemmenspannung 10 500 V
- Drehzahl 3000 U/min.
- Wirkungsgrad 97,8 %

Betriebseigenschaften der ganzen Anlage

- Umgebungstemperatur 20 °C
- Druck 760 mm Hg
- Leistung an der Welle des Turbogenerators 25 500 kW
- Einströmtemperatur an der Turbine 435 °C
- Absoluter Einströmdruck 4,05 kg/cm²
- Gasdurchfluss 123,75 kg/s
- Wärmeverbrauch der Treibgaserzeuger $61,2 \cdot 10^6$ kcal/h
- Spezifischer Wärmeverbrauch 2478 kcal/kWh
- Wirkungsgrad der Anlage 34,8 %
- Spezifischer Schmierölverbrauch 2 g/kWh

4. Beteiligungsmöglichkeiten einer Freikolbenzentrale an der städtischen Fernheizung

4.1 Eine von Treibgaserzeugern gespeiste Gasturbinenstromerzeugeranlage eignet sich vorzüglich, um gleichzeitig

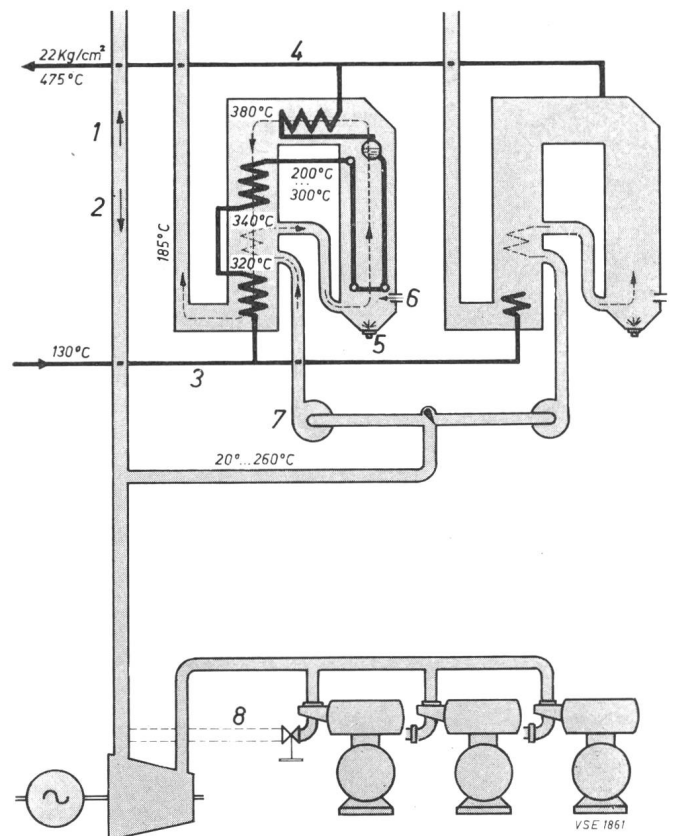


Fig. 2

Schema einer Stromerzeugergruppe

- | | | | |
|--------|----------|------------|-----------------|
| 1 Gas | 3 Wasser | 5 Öl | 7 Gebläse |
| 2 Luft | 4 Dampf | 6 Sägemehl | 8 Ablassleitung |

elektrischen Strom und Heizwärme zu erzeugen. Sie gibt mechanische Energie an der Turbinenwelle ab und ist zugleich eine Warmluftquelle. Die Turbinenabgase enthalten noch etwa 80 % Luft und können somit als Zuluft für eine weitere Verbrennung dienen.

Eine solche Kombination liefert viele Vorteile. Unter anderen sind zwei wichtige Argumente besonders erwähnenswert:

- a) grosser Anteil der elektrischen Energie bei einem ausgezeichneten Gesamtwirkungsgrad (90 % beim Kessel mit Abwärmeverwertung)
- b) grosse Anpassungsfähigkeit zur Veränderung der elektrischen und thermischen Anteile, welche die Anlage liefert und daraus ein wirtschaftlicher, gut angepasster Betrieb.

4.2 Es sind verschiedene Schaltarten möglich; z. B. die in Fig. 2 dargestellte.

Die Arbeitsweise der in Fig. 2 dargestellten Anlage kann wie folgt zusammengefasst werden: Für die Bedürfnisse des Heizkessels wird die Fördermenge des Gebläses S geregelt. Die Gasmenge der Treibgaserzeuger wird durch den Bedarf an elektrischer Energie geregelt. Die beiden Produktionen sind unabhängig.

In Verbindung mit anderen bestehenden Anlagen sind weitere Schaltarten möglich. Man kann z. B. die Kombination einer Freikolbenanlage mit einer Kondensationsdampfgruppe vorsehen.

4.3 Die aus der Turbine ausströmenden Gase haben die nachfolgenden Eigenschaften (25 MW-Zentrale):

Tabelle I

Last (in % der Nennleistung)	100 %	75 %	50 %
Austrittstemperatur (°C)	248	220	200
Austrittsdruck abs. (kg/cm ²)	1,035	1,035	1,035
Luftanteil (‰)	79	82	85
Gasmenge (kg/s)	123,8	110,4	96

Die expandierten Gase können deshalb vom Turbinenaustritt zu einem Abwärmeverwertungskessel als Zuluft geführt werden und auf diese Art den Gesamtwirkungsgrad der Anlage auf ca. 90 ‰ bringen.

Aus den Turbinenabgasen der beschriebenen Zentrale könnte man also die in Tabelle II angegebenen Wärmemengen zurückgewinnen:

Tabelle II

Last (P _N = 25 MW)	100 %	75 %	50 %
zu verwertende Wärmemenge (bei Verwendung der Gase als Zuluft in einer Feuerungsanlage)	23,6 · 10 ⁶ kcal/h	18,5 · 10 ⁶ kcal/h	14,45 · 10 ⁶ kcal/h

5. Berechnung der Gestehungskosten der in einer 25 MW-Zentrale erzeugten Energie

5.1 Diese Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde für 3 Betriebsprogramme aufgestellt:

Variante 1: Zentrale zur Deckung der Spitzen; Betrieb während 250 Tagen mit 2000 Stunden/Jahr, bei einem täglichen Betrieb von:

2 Stunden Vollast

6 Stunden Teillast (75 ‰ der Vollast)

Jahresproduktion: 40,5 GWh (Benutzungsdauer 1620 h)

Variante 2: Zentrale zur Deckung des Ergänzungsbedarfs; Betrieb während 250 Tagen mit 4000 Stunden/Jahr, bei einem täglichen Betrieb von:

12 Stunden Vollast

4 Stunden Teillast (75 ‰ der Vollast)

Jahresproduktion: 94 GWh (Benutzungsdauer 3760 h)

Variante 3: Zentrale zur Deckung des Ergänzungsbedarfs; Betrieb während 300 Tagen mit 6000 Stunden/Jahr, bei einem täglichen Betrieb von:

12 Stunden Vollast

4 Stunden Teillast (75 ‰ der Vollast)

4 Stunden Teillast (50 ‰ der Vollast)

Jahresproduktion: 128 GWh (Benutzungsdauer 5120 h)

5.2 Der Gestehungspreis der erzeugten Energie setzt sich zusammen:

- aus den Kapitalkosten, entsprechend den Abschreibungen und den Zinsen des investierten Kapitals (Erstellungskosten)
- aus den Ausgaben für Brennstoff
- aus den Ausgaben für Ersatzteile und Betriebsmittel (Kühlwasser, Hilfsenergie, Schmiermittel)
- aus den Betriebskosten, Verwaltung, Direktion, Überwachungs- und Unterhaltspersonal

a) Kapitalkosten

Man nimmt an, dass die jährlichen Kapitalkosten 9,6 ‰ des investierten Kapitals betragen (Abschreibung der Bauten und Ausrüstungen in 15 Jahren: 4,6 ‰; mittlerer Kapitalzins: 5 ‰)

b) Ausgaben für Brennstoffe

Diese wurden berechnet für einen spezifischen Wärmeverbrauch von 2478 kcal/kWh, bei Verwendung eines Brennstoffes von 10 200 kcal/kg unterem Heizwert, dessen Preis Fr. 65.—/t beträgt.

c) Unterhalt

Die Ausgaben für diesen Posten wurden nach den folgenden Ansätzen berechnet:

— Ersatzteile 0,2 Rp./kWh

— Kühlwasser pro memoria

— Hilfsenergie 2 ‰ der Produktion

— Schmieröl 2,0 g/kWh zu Fr. 2.—/kg Öl oder 0,40 Rp./kWh

— Energie zum Vorwärmen des Öls: 1 ‰ der erzeugten elektrischen Energie

d) Betriebskosten, von der Betriebsart der Anlage abhängig:

Tabelle III

Betrieb:	Spitzenkraftwerk (2000 h)	Ergänzungskraftwerk (4000 h)	Ergänzungskraftwerk (6000 h)
	Fr.	Fr.	Fr.
Direktion, Verwaltung, allgemeine Unkosten	100 000	100 000	100 000
Betrieb (Personalbestand)	(4)	(8)	(12)
Ausgaben	100 000	165 000	250 000
laufender Unterhalt	50 000	70 000	100 000
Steuern und Taxen	pro memoria	pro memoria	pro memoria

Die jährlichen Ausgaben und der Gestehungspreis setzen sich wie folgt zusammen:

Tabelle IV

Kraftwerk für die Lieferung von	Spitzenenergie	Ergänzungs-Energie	Ergänzungs-Energie
Betriebsdauer (h)	2000	4000	6000
Benutzungsdauer (GWh/25 MW) (h)	1620	3760	5120
Investition (Millionen Fr.)	20	20	20
Jahreskosten in Millionen Fr.			
a) Kapitalkosten (9,6 ‰)	1,92	1,92	1,92
b) Brennstoff ¹⁾ (Fr. 65.—/t)	0,68	1,58	2,14
c) Unterhalt	0,24	0,56	0,77
d) Betrieb	0,25	0,34	0,45
Total	3,09	4,40	5,28
Nettoproduktion (GWh)	40,5	94,0	128,0
Gestehungspreis Rp./kWh	7,6 ²⁾	4,7 ²⁾	4,1 ²⁾

¹⁾ Angenommen 258 gr/kWh (inkl. 3 ‰ Hilfsenergie). verbrennungsanlage wiedergewonnenen Kalorien abzuziehen.

²⁾ Hiervon wären noch der Wert der eventuell in einer Nachverbrennungsanlage wiedergewonnenen Kalorien abzuziehen.

6. Schlussfolgerungen

Um den tagsüber wechselnden Leistungsbedarf zu decken, werden unsere Netze bald mit am Verbrauchsort aufzustellenden, elastischen Produktionseinheiten, welche auch zur Winterbedarfsdeckung herangezogen werden können, ergänzt werden müssen.

Die kurze vorangehende Abhandlung zeigt die Möglichkeiten auf, welche Treibgaserzeuger eröffnen, die Drehstromgeneratoren gekuppelte, niedrig beanspruchte Turbinen speisen. Der Wirkungsgrad solcher Anlagen ist hoch. Diese Lösung kann durch die Kombination mit einer Warmwasser- oder Dampferzeugungsanlage noch vorteilhafter gestaltet werden.

Da der Betrieb sehr einfach ist, werden zweifelsohne die Produzenten auf diese Lösung zurückgreifen, als Ergänzung zu den Lieferungen grosser thermischer Einheiten oder von Flusskraftwerken.

Die Errichtung einer solchen Zentrale ist in direkter Nähe der Stadtzentren möglich, was sich besonders vorteilhaft für die Kombination mit der Erzeugung von Wärme für Heizzwecke auswirkt.

Zufolge der Möglichkeit, verschiedenartige Brennstoffe zu verwenden, erlangt die Anlage eine weitgehende Unabhängigkeit vom Brennstoffmarkt, was als entscheidender Vorteil gewertet werden muss.

Schliesslich kann die beschriebene Anlage in verschiedenen Varianten, welche den unterschiedlichsten Anforderungen entsprechen, ausgeführt werden.

Literatur

- [1] Les générateurs de gaz à pistons libres, par G. Eichelberg, prof. EPF, Zürich. «Le Génie civil», 15. 11. — 1. et 15. 12. 1948.
- [2] Les centrales électriques à générateurs à pistons libres et turbines à gaz, par E. Vallin. «Revue Générale de la Mécanique» N° 98/99–1957 et N° 109–1958.
- [3] Freikolben-Generatoren, par Dr. G. Eichelberg, ETH Zürich. «Schweizerische Bauzeitung» Nr. 48/49–1948.
- [4] Amélioration du rendement des centrales thermiques par l'application du cycle mixte gaz-vapeur avec générateurs à pistons libres, par H. Horgen, Ing.-Dr. et P. Szereszewski, Ing., Rueil-Malmaison, S.-et-O. (France). «Schweizerische Bauzeitung», 25. 10. 1958.
- [5] La centrale de 6000 kW de Cherbourg à générateurs de gaz à pistons libres, par P. Szereszewski, Ing. à la Société d'Etudes Mécaniques et Energétiques (S.E.M.E.). «Le Génie civil» des 15. 11. et 1. 12. 1956.
- [6] Conférence mondiale de l'énergie — Session partielle de Lausanne — Septembre 1964; Section II B: Centrales thermiques. Intervention de M. Szereszewski (France).
- [7] Le Choix d'une centrale énergétique, par Maurice Barthalon, prof. de machines thermiques E.C.L. et C.N.A.M. (Lyon). «Annales des Mines» N° de février 1962.
- [8] Une centrale électrique à Hassi-Messaoud, par G. Costes, Ing. en chef à SOCELEC. «Etudes et Réalisations» de janvier-février 1960.
- [9] Les groupes électrogènes à turbines à gaz alimentées par générateurs à pistons libres, par R. Huber, Ing. dipl. ETH, Directeur technique de la Société d'Etudes Mécaniques et Energétiques (S.E.M.E.), Rueil-Malmaison. «Schweizerische Bauzeitung» Nr. 44/45–1954.

Adresse des Autors:

J. Wahl, ingénieur Société Générale pour l'Industrie, Genève

Anhang I: Bemerkung zum Lärm, den die Freikolbenzentralen verursachen

(nach einer Mitteilung der SIGMA)

Die Lärmquellen in einer Freikolbenzentrale sind:

- die aus der Turbine ausströmenden Gase
- die aus dem Ablassventil des Generators ausströmenden Gase
- der mechanische Lärm der Treibgasgeneratoren
- die Luftansaugung der Generatoren

1. Aus der Turbine ausströmende Gase

Die Expansionsturbinen sind ausgezeichnete Schalldämpfer. Die in der Turbine entspannten Treibgase entweichen unter gleichmässiger und relativ kleiner Geschwindigkeit, also fast geräuschlos ins Freie.

Bis jetzt gab es bei den in Betrieb stehenden Anlagen nie Schwierigkeiten mit den aus den Turbinen ausströmenden Gasen.

2. Aus den Ablassventilen ausströmende Gase

Jeder Freikolbengaserzeuger ist mit einem Ablassventil versehen, das es ermöglicht, die Treibgase ganz oder teilweise direkt ins Freie zu senden.

Beim Normalbetrieb sind die Ablassventile der Gruppen geschlossen. Beim Anfahren oder Abstellen der Turbine und bei aussergewöhnlichen Betriebsbedingungen, die das Zu- oder Abschalten von einigen Treibgasgeneratoren erfordern, wird die Luft ins Freie abgelassen.

Die Gase, welche sich nach dem Ablassventil entspannen ohne Nutzarbeit zu leisten, erzeugen einen ziemlich grossen Lärm, der von einem geeigneten Schalldämpfer geschluckt werden muss.

Die ersten in Betrieb gesetzten Zentralen waren mit Schalldämpfern ausgerüstet, welche viel Lärm durchliessen und dadurch die Umgebung empfindlich störten. Dies brachte einige Klagen der Anwohner ein.

Dieses Problem ist jetzt vollständig durch das Anbringen gut angepasster Schalldämpfer, welche fast keinen Lärm abgeben, gelöst.

3. Mechanischer Lärm der Treibgasgeneratoren

Die Einspritzung und Verbrennung des Öls erzeugt im Innern der Zentrale einen Lärm, der dem von mitteltourigen, nicht aufgeladenen Dieselmotoren ähnlich ist.

Bei richtiger Planung des Gebäudes wird dieses Geräusch nicht ins Freie übertragen.

Im Innern der Zentrale sieht man im allgemeinen einen vom Maschinenraum isolierten Kommandoraum vor, um die Arbeitsbedingungen des Personals zu verbessern.

(Fortsetzung folgt)

Verschleissversuche an Verkleidungen von Wasserkraftbauten

von J. Wahl, Genève

Zahlreiche Bauten von hydroelektrischen Anlagen wie z. B. Wasserüberlaufkanäle, Ablasskanäle oder -Stollen, Zuleitungsstollen, Druckleitungen und Druckstollen können

einem gewaltigen Verschleiss durch die im Wasser enthaltenen Anschwemmungsmaterialien unterliegen. Dies gilt besonders für Anlagen in Gebirgsgegenden. Die so entstehen-