Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 75 (1957)
Heft: 18

Artikel: Die thermische Maschine im Atomkraftwerk
Autor: Lalive d'Epinay, J. / Lundgren, C.E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-63349

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: 13.07.2025

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

37 Mld kWh betragen wird. Die ausgeprägteste Zuwachstendenz weisen die Wärmeanwendungen auf; der Wärmebedarf in der allgemeinen Industrie wird noch weiter steigen. Demgegenüber wäre die elektrische Raumheizung aufzuhalten und das elektrische Kochen nicht besonders intensiv zu fördern. Mittels der Preispolitik ist eine optimale wirtschaftliche Koordinierung des Energieverbrauchs anzustreben. In der Elektrochemie und Elektrometallurgie kann die Elektrizität durch keine andere Energiequelle ersetzt werden, und die betreffenden Industrien sind gefährdet, wenn die benötigte Energie einmal nicht mehr in genügender Menge und zu einem tragbaren Preis zur Verfügung stehen würde. Auf diesem Gebiet zwingen soziale und volkswirtschaftliche Ueberlegungen zu einer gewissen Rücksichtnahme gegenüber den alteingesessenen Industrieunternehmungen. Zusammenfassend stellte der Referent fest, dass im Laufe der Zeit dort eine Erhöhung der Preise für Elektrowärme ins Auge zu fassen sei, wo die Elektrizität mit Brennstoffen im Wettbewerb stehe. Dadurch werde eine gewisse Verlangsamung der Verbrauchszunahme eingeleitet werden können. Unter Berücksichtigung aller dieser Ueberlegungen ist anzunehmen, dass der für das Jahr 1975 auf 37 Mld kWh geschätzte Elektrizitätsverbrauch nur etwa 34 Mld kWh betragen wird.

Im zweiten Teil seines Vortrages befasste sich Dir. Aeschimann mit der Frage, wie der steigende Energiebedarf gedeckt werden kann. Die ausbaubaren Wasserkräfte werden auf Grund neuester Studien auf 32 bis 35 Mld kWh geschätzt. In bezug auf das Tempo des Ausbaus spielen bautechnische Bedingungen und die Finanzierungsmöglichkeiten eine wichtige Rolle, wie es auch eine Frage ist, ob die Projektierungsbüros und das Baugewerbe in der Lage sind, die sich stellenden gewaltigen Arbeiten zu bewältigen. Solange wir nicht über Atomenergie verfügen, kommen zur Beschaffung der fehlenden Energie nur drei Möglichkeiten in Frage, nämlich die thermische Elektrizitätserzeugung im Inland mit Kohle oder Oel, der Bezug von hydraulischer oder thermischer Energie aus dem Ausland, der Energieaustausch. Obwohl wir heute noch während einigen Wintern mit angespannter Versorgungslage rechnen müssen, ist es wahrscheinlich berechtigt, den vorläufigen Verzicht auf grosse Dampfzentralen, deren Erstellung früher erwogen wurde, nicht zu bereuen. Die Stromeinfuhr erscheint etwas gewagt, da sie uns unmittelbar vom Ausland abhängig macht; die Geldkredite für die Erschliessung ausländischer Wasserkräfte sind viel schwerer erhältlich; und besonders jetzt, da die Finanzierung der eigenen Kraftwerke den schweizerischen Kapitalmarkt mehr als genug in Anspruch nimmt, wäre der Vorteil einer solchen Operation zweifelhaft. Bei Bezug thermischer Energie aus dem Ausland ist die nötige Geldinvestition relativ kleiner, besonders wenn es sich darum handelt, in bestehenden Dampfzentralen zusätzliche Gruppen aufzustellen. Dabei wird nicht verlangt, dass wir Jahr für Jahr die gleiche Energiemenge unbedingt beziehen.

Im vergangenen Winter hat uns besonders Deutschland mit sehr bedeutenden Lieferungen ausgeholfen, zum grössten Teil aus den Braunkohle-Kraftwerken des RWE. Auch haben einige schweizerische Werke sich im letzten Sommer einen ansehnlichen Stock amerikanischer Kohle verschafft, der teilweise in einer französischen Dampfzentrale zu Gunsten von Energielieferungen nach der Schweiz verbraucht wurde. Schliesslich kann hier der Vertrag erwähnt werden, den die ATEL für eine Dauer von zwanzig Jahren mit belgischen Kohlenbergwerken abgeschlossen hat. Er sichert unserem Lande eine jederzeit verfügbare Leistung, die innert dreier Jahre von 20 000 auf 70 000 kW steigen wird, und eine jährliche Bezugsmöglichkeit, die 300 bis 400 Mio kWh erreichen könnte. Solche Lösungen, wenn sie sich weiter ausbauen lassen, hätten den Vorteil, die Zukunft besonders im Hinblick auf die Atomenergie nicht zu präjudizieren.

Mehr theoretisch wäre die zuletzt erwähnte Möglichkeit des reinen Stromaustausches mit dem Ausland. Wenn wir in die Lage kommen, einen Teil der wertvollen Energie der im Bau sich befindenden Speicheranlagen zu entbehren, so könnten wir sie mit der entsprechenden Leistung während der Höchstlastzeit nach dem Ausland liefern und dafür eine grössere Energiemenge während der übrigen Zeit zurückbeziehen. Einen sehr grossen Beitrag zum Ausgleich unserer Energiebilanz dürfen wir aber von solchen Austauschgeschäften nicht erhoffen.

Da alle diese Möglichkeiten weder sicher noch sehr ergiebig sind, entlasten sie uns jedenfalls nicht von der dringenden Pflicht, unsere Wasserkräfte möglichst rasch auszubauen, die erzeugbare Energie möglichst vollständig auszunutzen und haushälterisch zu bewirtschaften, d. h. sie in erster Linie für diejenigen Anwendungen einzusetzen, die den besten Nutzeffekt erzielen.

Mit einiger Zurückhaltung beantwortete Dir. Aeschimann im dritten Teil des Vortrages die Frage, wann die *Atomenergie* dem Engpass, in dem sich die Energieversorgung der Schweiz befindet, ein Ende bereiten wird. Sowohl in bezug auf die Dauer des noch bevorstehenden Uebergangsstadiums als auch auf die zu erwartenden Gestehungskosten der Atomenergie waren seine Ausführungen eher skeptisch. Schweizerische Elektrizitätswerke, welche die Aufstellung eines Versuchs-Atomkraftwerkes planen, sind sich bewusst, dass sie einen hohen kWh-Preis in Kauf nehmen müssen. Eine grosse deutsche Elektrizitätsunternehmung, welche auf Grund von konkreten Offerten und eingehenden eigenen Studien im Begriffe ist, den Bau eines ersten Atomkraftwerkes zu beschliessen, rechnet mit Gestehungskosten in der Grössenordnung von 15 Pf./kWh.

Die für die Forschung und die Entwicklung der Atomenergie pro Kopf der Bevölkerung aufgewendeten Beträge waren bis jetzt in der Schweiz zehn- bis zwanzigmal kleiner als in England, USA und Frankreich. Bald werden der Bundesversammlung Kreditanträge für die Zwecke der Atomforschung unterbreitet werden, die gesamthaft den Betrag von 100 Mio Fr. wesentlich überschreiten. Neben einer notwendigen Erweiterung des Programms der Reaktor AG. in Würenlingen werden zwei weitere wichtige Vorhaben bald bestimmte Form annehmen, nämlich der Bau eines Reaktors für die ETH in Zürich zwecks Wärmeproduktion in Verbindung mit dem Fernheizkraftwerk, und sodann der Zusammenschluss dreier Ueberland-Elektrizitätswerke zur Vorbereitung des Baues eines Versuchs-Atomkraftwerkes mit einer elektrischen Leistung von 10 000 bis 15 000 kW. Auch in der Westschweiz hört man von einer Gruppierung der interessierten Kreise zum praktischen Studium der Atomenergie, und man darf bestimmt hoffen, dass diese Bestrebungen sich mit denjenigen der deutschen Schweiz koordinieren lassen werden.

Dank ihren internationalen Abkommen, ihrer günstigen politischen Stellung und der Beziehungen ihrer Industrien und Banken hat die Schweiz gute Aussichten, den Kontakt mit den auf dem Gebiet der Kernenergie fortgeschrittenen Nationen zu festigen. Es ist zum Beispiel nicht von vorneherein ausgeschlossen, dass eines der internationalen Versuchskraftwerke, um welche sich die OECE bemüht, auf unserem Boden zur Aufstellung gelangt. Die erste Voraussetzung für spätere Erfolge ist die Ausbildung einer genügenden Anzahl spezialisierter Physiker sowie Konstruktions- und Betriebsingenieure. Dies ist der erste Zweck der Anlage in Würenlingen und der andern erwähnten Vorhaben.

Die thermische Maschine im Atomkraftwerk

Schluss von S. 257 DK 621.039:621.1

Von Dipl. Ing. **J. Lalive d'Epinay** und Dipl. Ing. **C. E. Lundgren**, AG. Brown, Boveri & Cie., Baden

3. Wirtschaftlich optimale Prozesse

Wir wollen jetzt untersuchen, wie die in einem Wärmeträger enthaltene Wärme am wirtschaftlichsten in mechanische oder elektrische Energie verwandelt werden kann. Wir setzen dabei voraus, die spezifische Wärme des Trägers könne mit genügender Genauigkeit als endlich und konstant betrachtet werden, und der Wärmeträger komme selber als Treibmedium nicht in Frage, sondern müsse seine Wärme vorerst an ein Arbeitsmedium übertragen. Verschiedene Prozesse stehen uns für die Lösung dieser Aufgabe zur Verfügung: in erster Linie Dampferzeuger mit Dampfturbinen und Gaserhitzer mit Gasturbinen. Wie sollen diese Maschinen geartet sein? Es ist klar, dass im konkreten Fall eine Reihe von Faktoren zur Entscheidung beitragen, die durch die örtlichen Verhältnisse bedingt sind und nicht verallgemeinert werden können. Trotzdem kann man aus der Mannigfaltigkeit der Zu-

sammenhänge gewisse Gesetzmässigkeiten erkennen, aus welchen man rasch zu einer Annäherung an die richtigen Lösungen gelangt. Gewisse optimale Verhältnisse, welche als Masstab für die Güte der praktischen Ausführungen dienen, können zum voraus berechnet werden, was nachfolgend gezeigt werden soll.

a) Verwertung der Wärme in einer Dampfturbine

Wir müssen uns für drei Grössen, über welche wir innerhalb gewisser Grenzen frei verfügen können, entscheiden; es sind dies die Speisewasser-Vorwärmtemperatur t_C, die Verdampfungstemperatur (d. h. der Kesseldruck p), die Ueberhitzungstemperatur t_F. Der Wirkungsgrad der Umwandlung der Wärme in mechanische Energie ist eine Funktion dieser drei Grössen. Die exakte Bestimmung des absoluten Optimums ist kompliziert. Wir haben daher eine einfache und anschauliche Methode ausgearbeitet, die genügend genau ist und die im folgenden dargelegt werden soll:

Wenn eine Wärmemenge dQ von einem Wärmeträger der Temperatur Θ auf ein Arbeitsmedium von der Temperatur $T < \Theta$ übertragen wird, so wird die für mechanische Arbeitsleistung verfügbare Energie um den Betrag

$$dQ\left(\frac{T_0}{T} - \frac{T_0}{\Theta}\right)$$

vermindert, wobei T_0 die Umgebungstemperatur ist. In der Dampfturbine wird die Wärme im Kondensator bis in die Nähe der Temperatur T_0 ausgenützt (im Gegensatz zur Gasturbine), und der wirkliche Verlust entspricht daher der oben angegebenen Entwertung, multipliziert mit dem thermodynamischen Wirkungsgrad der Turbine, der in der Grössenordnung von 80 % liegt. Es ist somit klar, dass man die Temperatur T möglichst nahe an Θ heranbringen muss. Dieser Annäherung ist jedoch eine Grenze durch den Preis des Wärmeaustauschers gesetzt, der um so höher ausfällt, je kleiner $\Theta - T$ ist. Wenn wir uns über den Geldbetrag A klar sind, den wir für die Erstellung der Anlage ausgeben dürfen, um ein kW Leistung zu gewinnen oder ein kW Verlust zu vermeiden, dann können wir die Verlustleistung kapitalisieren und das Minimum an Gesamtkosten für die Verluste und für den Austauscher berechnen. Die Gesamtkosten der Wärmeübertragung sind:

$$C\,dQ = A\,dQ\,\eta_T\left(\frac{T_0}{T} - \frac{T_0}{\Theta}\right) + B\,\frac{dQ}{k\,(\Theta - T)}$$

Darin bedeuten:

A die zulässige Investition für den Gewinn von 1 kW,
η_T den Turbinenwirkungsgrad,
B die Kosten des Wärmeaustauschers pro Quadratmeter,
C die Gesamtkosten der Uebertragung einer Wärmeeinheit pro Zeiteinheit,
k den Wärmedurchgangskoeffizienten des Wärmeaustauschers.

Wir kennzeichnen die Uebertragungskosten durch eine Ziffer ψ, welche wir aus einer Division der Gleichung für $C\,dQ$ durch $A\,dQ\,\eta_T$ erhalten:

$$\psi = T_0\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{\Theta} + \frac{\alpha^2}{\Theta - T}\right)$$

mit

$$\alpha^2 = \frac{B}{A\,k\,T_0\,\eta_T}$$

ψ ist möglichst klein zu halten. Den minimalen Aufwand erhält man durch Differentiation:

$$\frac{d\psi}{dT} = -\frac{T_0}{T^2} + \frac{\alpha^2\,T_0}{(\Theta - T)^2} = 0$$

woraus

$$\frac{T}{\Theta} = \frac{1}{1+\alpha}$$

Wenn wir jetzt die veränderliche Temperatur Θ des Wärmeträgers in Funktion der abgegebenen Wärme durch eine Gerade (entsprechend der konstanten spezifischen Wärme) darstellen, so liegen die Temperaturen der günstigsten Wärmeaufnahme auf einer zweiten Geraden, die im Verhältnis $1/(1+\alpha)$ unter der ersten liegt und diese auf $T = 0$ schneidet (Bild 13). Unter und über dieser optimalen Geraden ist die Ziffer ψ um einen Betrag $\Delta\psi$ grösser. Man kann verschiedene Geraden zeichnen und sie mit den entsprechenden Teilbeträgen $\Delta\psi$ oder $\Delta\psi/\psi_{opt}$ bezeichnen. Nun liegt es nahe, einen Dampfprozess nach Bild 6 derart aufzustellen, dass er zwischen zwei Strahlen zu liegen kommt, die möglichst kleine Teilbeträge $\Delta\psi$ aufweisen. Man erhält so zwar kein streng richtiges Optimum, aber mit Bestimmtheit Lösungen, die vom Bestwert wenig abweichen. Eine Kontrolle ergab z. B. eine Abweichung von nur etwa 0,5 %.

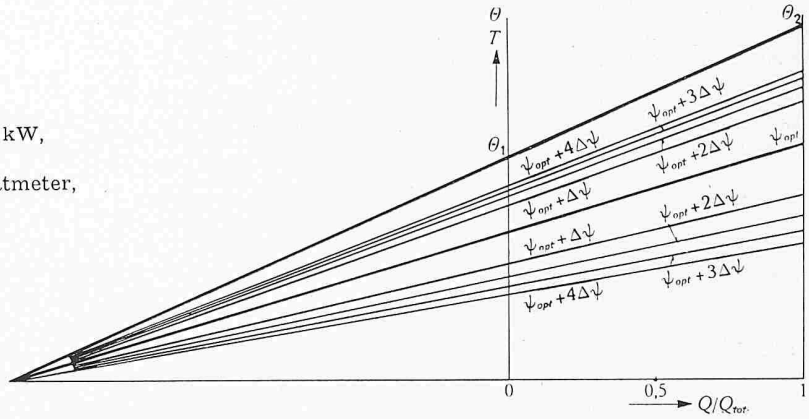


Bild 13. Temperaturdiagramm mit Linien gleicher Wirtschaftlichkeit. Der Verdampfungsprozess nach Bild 6 ist so in das Temperaturdiagramm hineinzulegen, dass die Punkte C, E und D, F je auf Linien mit gleichem $\Psi + \Delta\Psi$ zu liegen kommen.
Θ_1 und Θ_2 sind die gegebenen Temperaturen des Wärmeträgers (sekundäres Medium) bei Aus- und Eintritt aus dem sekundären Wärmeaustauscher

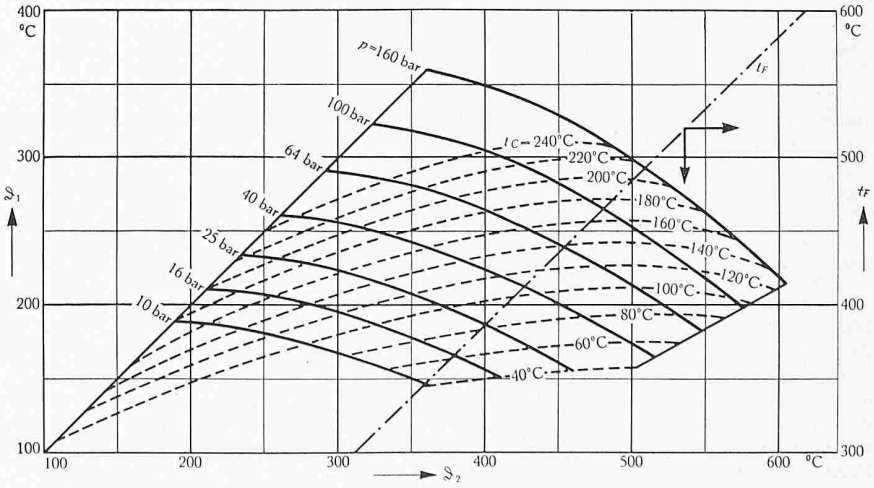


Bild 14. Charakteristische Grössen optimaler Dampfturbinenprozesse in Abhängigkeit der unteren und der oberen Grenztemperatur des Wärmeträgers

ϑ_1 untere Grenztemperatur
ϑ_2 obere Grenztemperatur
t_0 Temperatur des kondensierenden Dampfes (27° C)
p Dampfdruck
t_c Speisewassertemperatur
t_F Dampftemperatur nach Ueberhitzer

t_F ist nur von ϑ_2 abhängig ($T_F = \Theta_2/[1+\alpha]$); zur Bestimmung von t_F aus ϑ_2 dient die strichpunktierte Gerade. Beispiel: ϑ_1 = 250° C; ϑ_2 = 400° C. Man findet p = 54 bar, t_c = 165° C; t_F = 386° C

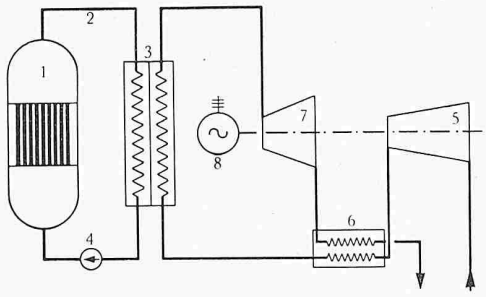


Bild 15. Prinzipschema einer Atomkraftanlage mit Ausnützung der Kernenergie durch eine einfache Gasturbine

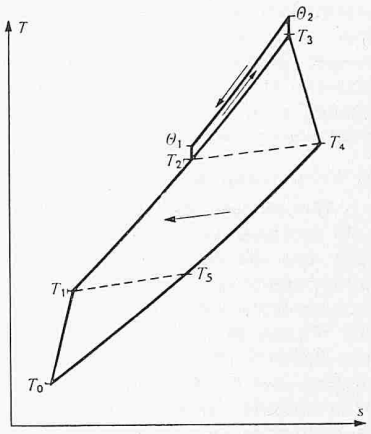
1 Reaktor
2 Wärmeträger-Kreislauf
3 Wärmeaustauscher (Lufterhitzer)
4 Umwälzpumpe zu 2
5 Kompressor
6 Luftvorwärmer
7 Turbine
8 Generator

Bild 15a (rechts). Entropiediagramm der einfachen Gasturbinenanlage nach Bild 15.

Die Arbeitsmitteltemperaturen sind:

T_0 vor dem Kompressor
T_1 nach dem Kompressor
T_2 nach der Erwärmung im Luftvorwärmer
T_3 nach dem Wärmeaustauscher
T_4 nach der Turbine
T_5 nach Abkühlung im Luftvorwärmer

Θ_1 Wärmeträgertemperatur nach Wärmeaustauscher
Θ_2 Wärmeträgertemperatur vor Wärmeaustauscher



Für Wärmeaustauscher, wie sie in Atomenergieanlagen in Frage kommen, ist α verglichen mit 1 recht klein, z. B. $\alpha = 0{,}02$. Wir können deshalb unter Verzicht auf eine genauere Bestimmung die Spitzen D und F der Verdampfungslinie in Bild 6 auf die Gerade $T/\Theta = 0{,}98$ legen. Diese Spitzen sollten streng genommen etwas höher liegen, und es ergäben sich so etwas höhere Wirkungsgrade. Bei der Mannigfaltigkeit der α-Werte, die in Frage kommen, stellen daher unsere Ergebnisse mit $T/\Theta = 0{,}98$ einen vorsichtig ermittelten Durchschnitt dar. Bild 14 zeigt die zu jedem Wertpaar $(\vartheta_1 ; \vartheta_2)$ [1]) gehörenden optimalen Werte für den Dampfdruck, die Speisewasser-Vorwärmtemperatur t_C und die Ueberhitzungstemperatur t_F. Dabei gibt die strichpunktierte Gerade t_F den Zusammenhang zwischen den Temperaturen ϑ_2 und t_F.

b) Verwertung der Wärme in einer Gasturbine

Bild 15 zeigt das Schema einer Gasturbine zur Ausnützung der Energie des Wärmeträgers. Untersucht wird zuerst das einfachste Schema einer Gasturbine mit einfacher Kompression ohne Zwischenkühlung, mit Vorwärmung der Luft durch die Abgase der Turbine, mit Erwärmung der Luft im Wärmeaustauscher und mit einfacher Expansion ohne Zwischenerhitzung. Wir wollen die Temperaturen T_2 und T_3 des Arbeitsmediums vor und nach der Erhitzung im Wärmeaustauscher als gegeben betrachten, indem wir eine längs der Austauschfläche konstante Temperaturdifferenz zwischen den beiden Medien von 15° C annehmen. Der Wirkungsgrad der Gasturbine ist unter Vernachlässigung der Aenderung der spezifischen Wärme und mit den in Bild 15a eingetragenen Bezeichnungen

$$\eta_{th} = \frac{T_3 - T_4 - (T_1 - T_0)}{T_3 - T_2}$$

T_0, T_2 und T_3 sind feste Grössen, T_1 und T_4 sind vom Kompressionsverhältnis abhängig. Wir führen $\tau_i = T_i/T_0$ ein und erhalten

$$\eta_{th} = \frac{\tau_3 - \tau_4 - (\tau_1 - 1)}{\tau_3 - \tau_2}$$

Um den Ausdruck differenzieren zu können, drücken wir τ_4 durch τ_1 aus. Es sei:

$$\frac{p_1}{p_0} = \sigma \frac{p_3}{p_4}$$

wo $\sigma = 1 + \Sigma\Delta p/p$ die Druckabfälle des Wärmeaustauschers und der Rohrleitungen berücksichtigt. Dann ist:

$$\tau_1 = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa \eta_k}}$$

$$\tau_4 = \tau_3 \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{-\frac{\kappa - 1}{\kappa}\eta_e} = \sigma^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}\eta_e} \tau_3 \tau_1^{-\eta}$$

wo η_k und η_e die Kompressions- und Expansions-Wirkungsgrade sind und $\eta = \eta_k \eta_e$.

[1]) Die Symbole absoluter Temperaturen (° K) werden mit grossen, jene für Temperaturen nach der Celsiusskala (° C) mit den entsprechenden kleinen Buchstaben geschrieben.

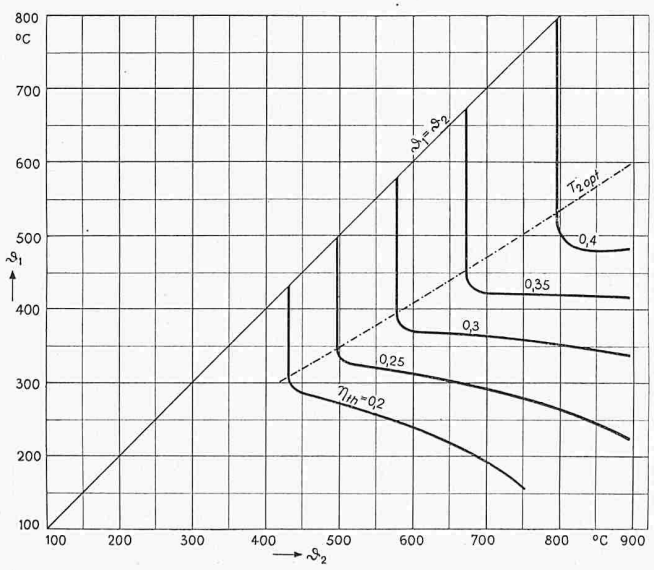


Bild 17. Linien konstanter thermischer Wirkungsgrade einer einfachen Gasturbinenanlage in Abhängigkeit der oberen und unteren Temperaturgrenze des Wärmeträgers

ϑ_1 untere Temperaturgrenze
ϑ_2 obere Temperaturgrenze
η_k Wirkungsgrad der Kompression
η_e Wirkungsgrad der Expansion

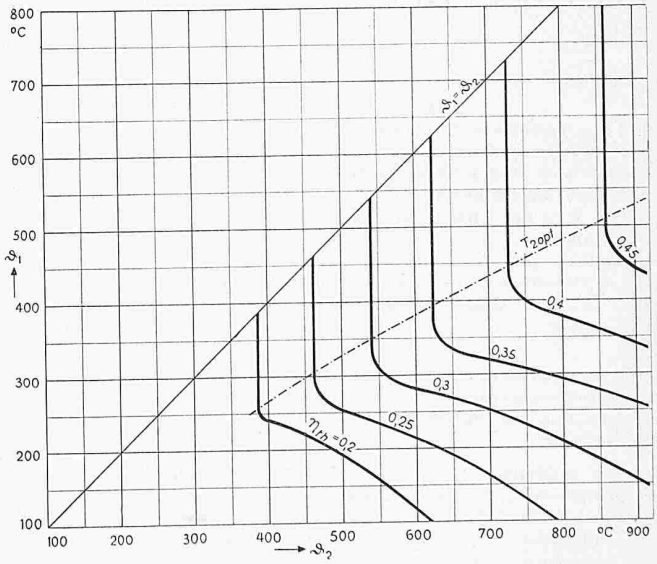


Bild 18. Linien konstanter thermischer Wirkungsgrade einer Gasturbinenanlage mit einer Zwischenkühlung auf eine Lufttemperatur von T_0 + 15° C und sonst gleichen Zahlenwerten wie bei Bild 17

Angenommene Zahlenwerte:
$\eta = \eta_k \cdot \eta_e = 0{,}75$; $\sigma = 1{,}07$; $\varepsilon_{max} = 0{,}9$; $T_0 = 288°$ K

Die strichpunktierten Linien T_{2opt} auf den Bildern 17 und 18 entsprechen den Verhältnissen mit geringstem spezifischem Wärmeverbrauch (Temperaturen T_{2opt} in Bild 16)

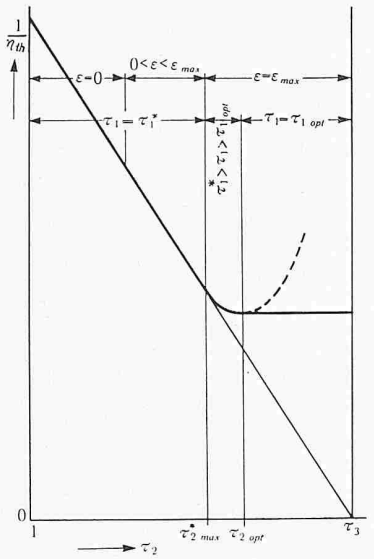


Bild 16 (links). Grundsätzlicher Verlauf des spezifischen Wärmeverbrauchs einer einfachen Gasturbinenanlage bei gegebenen Temperaturen am Eintritt in den Kompressor (T_0) und in die Turbine (T_3), in Funktion der Eintrittstemperatur T_2 des Arbeitsmittels in den Lufterhitzer.

η_{th} thermischer Wirkungsgrad bezogen auf den Wärmeumsatz im Wärmeaustauscher und die Klemmenleistung

ε Ausnützungsgrad des Luftvorwärmers

Verhältniswerte für die Arbeitsmitteltemperaturen:

$\tau_1 = T_1/T_0$ nach dem Kompressor

$\tau_2 = T_2/T_0$ vor dem Lufterhitzer

$\tau_3 = T_3/T_0$ vor der Turbine

Bei der Differentiation des Wirkungsgrades brauchen wir nur den Zähler des Bruches zu differenzieren, da der Nenner konstant ist; dies ergibt:

$$\frac{d\tau_4}{d\tau_1} = -1$$

also

$$\eta\, \sigma^{\frac{\kappa-1}{\kappa}\eta_e}\, \tau_3\, \tau_1^{*\,-(1+\eta)} = 1$$

τ_1^* bezeichnet den Optimalwert von τ_1:

$$\tau_1^* = \left[\eta\, \sigma^{\frac{\kappa-1}{\kappa}\eta_e}\, \tau_3\right]^{\frac{1}{1+\eta}}$$

Man erhält ferner, wenn man den Wert für τ_1^* mit dem Ausdruck für τ_4 kombiniert:

$$\tau_4^* = \frac{\tau_1^*}{\eta}$$

Mit diesen Optimalwerten ergibt sich der Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{1 + \tau_3 - \frac{1+\eta}{\eta}\left[\eta\, \sigma^{\frac{\kappa-1}{\kappa}\eta_e}\, \tau_3\right]^{\frac{1}{1+\eta}}}{\tau_3 - \tau_2} = \frac{Z}{\tau_3 - \tau_2}$$

Betrachten wir die Gasturbinen nach Bild 15 für eine gegebene obere Temperaturgrenze τ_3 (ausgedrückt durch ihr Verhältnis zu T_0) und verschiedene Temperaturen τ_2, so stellen wir fest, dass sowohl das optimale Druckverhältnis von τ_2 als auch der Zähler Z des Ausdruckes für η_{th} von τ_2 unabhängig sind. Der reziproke Wert des Wirkungsgrades, der Wärmeverbrauch, ist eine lineare Funktion von τ_2:

$$\frac{1}{\eta_{th}} = \frac{\tau_3 - \tau_2}{Z}$$

Dieser Ausdruck hat aber nur einen Sinn, wenn T_2 unter T_4 liegt, so dass ein Temperaturgefälle für den Wärmeaustausch besteht, d. h.

$$\tau_2 \leqq \tau_2^* \equiv \tau_1^* + \varepsilon\,(\tau_4^* - \tau_1^*) = \tau_1^*\left(1 + \varepsilon\,\frac{1-\eta}{\eta}\right)$$

$\varepsilon = (\tau_2 - \tau_1)/(\tau_4 - \tau_1)$ ist der Ausnützungsgrad des Luftvorwärmers und ε_{max} der höchste Ausnützungsgrad, welchen man ihm zumuten kann. Die Wärme, die zur Erhitzung von τ_2 auf τ_2^* dient, bringt keinerlei zusätzliche Leistung, sondern nur eine Ersparnis an Austauschfläche. Wenn τ_2 unterhalb τ_1^* liegt, fällt auch dieser Vorteil weg. Bei den noch hohen Kosten der Kernenergie wird man vermeiden müssen, dass τ_2 wesentlich unter τ_2^* sinkt.

Ist $\tau_2 > \tau_2^*$, so können wir das Druckverhältnis nicht mehr nach den bisherigen Optimalbedingungen wählen, sondern müssen es so weit senken, dass

$$\tau_2 - \tau_1 = \varepsilon_{max}\,(\tau_4 - \tau_1)$$

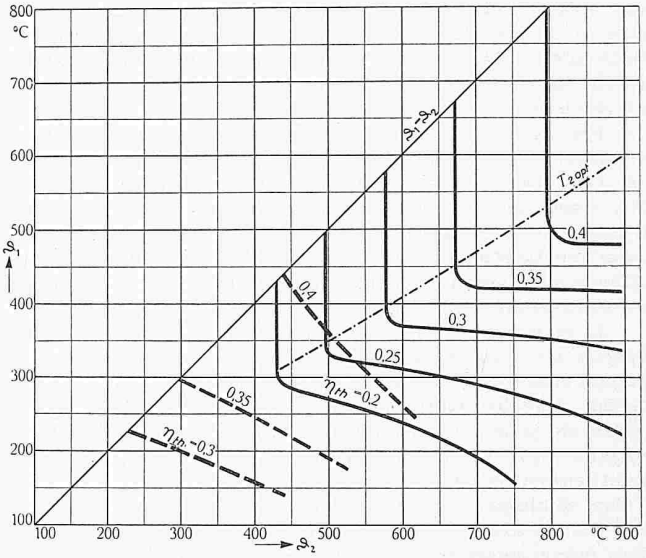


Bild 19. Vergleich der Linien konstanter thermischer Wirkungsgrade von einfachen Dampf- und Gasturbinenanlagen (ohne Zwischenkühlung) in Abhängigkeit der unteren und oberen Temperaturgrenze des Wärmeträgers.
Ausgezogen: η_{th} für Gasturbinen
gestrichtelt: η_{th} für Dampfturbinen
strichpunktiert: günstigste Arbeitsmitteltemperatur nach dem Lufterhitzer beim Gasturbinenprozess

Wie Bild 16 zeigt, nimmt mit zunehmendem τ_2 der Wärmeverbrauch zunächst ab. Er erreicht bei $\tau_{2\,opt}$ ein Minimum und würde nachher wieder ansteigen. Es hätte aber keinen Sinn, bei steigendem τ_2 eine Wirkungsgradeinbusse in Kauf zu nehmen. Man verzichtet auf die zu Anfang dieses Kapitels geforderte konstante Temperaturspanne zwischen Wärmeträger und Arbeitsmedium längs des Wärmeaustauschers und belässt die untere Temperaturgrenze auf dem Optimalwert τ_{2opt}. Dabei spart man zudem an Austauschfläche. In einem Kernreaktor ist eine Senkung der unteren Temperaturgrenze ohnehin willkommen.

Bild 17 gibt die Wirkungsgrade der Gasturbine in Funktion von (ϑ_1 ; ϑ_2) an, Bild 18 mit einer Zwischenkühlung im Kompressor. Die Berechnung der Anlage mit Zwischenkühlung folgt den selben Linien, wie sie vorstehend angegeben wurden, und soll hier nicht wiederholt werden. Lediglich sei erwähnt, dass in diesem Falle für $\tau_2 \leqq \tau_2^{**}$ ähnliche Beziehungen wie früher entstehen.

$$\tau_1^{**} = \left[\eta\, \sigma^{\frac{\kappa-1}{\kappa}\eta_e}\,(1 + \delta\tau_0)^{\eta}\,\tau_3\right]^{\frac{1}{1+2\eta}} \qquad \tau_4^{**} = \frac{\tau_1^{**}}{\eta}$$

wo $\delta\tau_0 = \delta T_0/T_0$ die Temperaturspanne im Zwischenkühler bedeutet.

Es sei ausdrücklich bemerkt, dass unsere Ergebnisse sowohl für eine offene Gasturbine gelten, welche Luft von der Atmosphäre ansaugt und die Abluft wieder an die Atmosphäre ausstösst, als auch für eine geschlossene Gasturbine, bei welcher die Abluft (oder das Arbeitsgas) auf den Anfangszustand rückgekühlt wird. Endlich gelten die Ueberlegungen auch für die direkte Aufheizung des Arbeitsgases im Reaktor, wenn man Θ mit T gleichsetzt, vorausgesetzt, dass T_2 nicht grösser als $T_{2\,opt}$ ist.

Dampf- oder Gasturbine?

In Bild 19 sind zwei Kurvenscharen von Wirkungsgraden günstigster Dampf- und Gasturbinenprozesse in einfacher Schaltung vereinigt. Vor allem sieht man daraus, dass die Gebiete der Dampf- und der Gasturbine sich gar nicht überdecken. Die Temperaturen, welche schon recht gute Dampfturbinen mit Drücken bis 160 bar ermöglichen, sind für Gasturbinen viel zu tief.

Im Temperaturbereich, der für die Gasturbine günstig ist, kann man zwar eine Dampfanlage nicht mehr so auslegen, dass sie die thermodynamischen Möglichkeiten der betreffenden Temperaturen ausschöpft, sofern man sich an eine einfache Dampfanlage mit unterkritischen Drücken hält. Es ist

aber möglich, die Wärme auf tiefere Temperaturen zu «drosseln» und ebenso gute Wirkungsgrade zu erhalten wie im Bereich unserer Diagramme, sogar etwas bessere, da man höher überhitzen kann, ohne das Gebiet gewöhnlicher Dampfanlagen zu verlassen.

Man kann aber auch auf überkritischen Druck und auf mehrfache Zwischenüberhitzung gehen und den Wirkungsgrad der Gasturbine noch ernsthafter konkurrenzieren, allerdings mit einem bedeutenden Aufwand, der nur bei sehr grossen Leistungen in Frage kommt. Bei hohen Temperaturen und mässigen Leistungen hat die Gasturbine, je nach Umständen, offener oder geschlossener Bauart, sicher ihre Berechtigung, wobei auch die örtlichen Verhältnisse eine Rolle spielen.

In manchen Fällen ist der Temperaturbereich des Wärmeträgers nicht von vornherein bestimmt, wie wir hier vorausgesetzt haben, sondern steht im Gegenteil zur Diskussion. Wir hoffen, dass die Diagramme hier gute Dienste leisten werden, indem sie über die Konsequenzen der Temperaturwahl sofort Auskunft geben und ein Hilfsmittel zur wirtschaftlichen Gesamtkonzeption bieten.

Zum Schlusse möchten wir betonen, dass die hier angegebenen Zahlen keinen Anspruch auf Endgültigkeit erheben, sondern nur grundsätzliche Zusammenhänge verdeutlichen sollen. Selbstverständlich muss sich das Studium einer konkreten Anlage mit allen Einzelheiten des Reaktors, seinen physikalischen, technologischen, thermischen Aspekten und seiner Sicherheit auseinandersetzen. Bei den hohen Kosten der Reaktoren wird es sich aber lohnen, alle Mittel zu prüfen, um die Energieausbeute zu erhöhen und dabei alle Möglichkeiten auszunützen, welche eine hochentwickelte Praxis thermischer Anlagen bieten kann.

WETTBEWERBE

Stadtspital II und Maternité im Triemli in Zürich-Wiedikon (SBZ 1957, S. 227). Die Ausstellung der Wettbewerbsentwürfe erfolgt vom 4. bis und mit 19. Mai in den beiden Turnhallen des Sekundarschulhauses Letzi in Zürich-Wiedikon, werktags von 10 bis 12 und 15 bis 19 h, sonntags von 10 bis 12 und 14 bis 17 h.

Dekorative Gestaltung von Wandflächen im Primarschulhaus Auhof in Zürich-Schwamendingen. Teilnahmeberechtigt sind alle im Kanton Zürich verbürgerten oder mindestens seit 1. Januar 1955 im Kanton niedergelassenen Künstler. Die Entwürfe sind bis 1. Juli 1957 abzuliefern. Für die Prämiierung von fünf oder sechs Entwürfen und allfällige Ankäufe stehen 15 000 Fr. zur Verfügung. Fachleute im Preisgericht: Architekt Ernst Gisel, Zürich, und die Maler Hans Fischer, Zürich-Meilen, Albert Schnyder, Delsberg, Otto Staiger, Basel, Max Truninger, Zürich; Ersatzleute: Hans Tobler, Architekt, Städtisches Hochbauamt, Emanuel Jakob, Maler, Zürich. Im städtischen Hochbauamt, Zimmer 303, können die Unterlagen gegen Hinterlegung von 10 Fr. bezogen werden.

Sonnengeheizter Wohnsitz bei Phoenix, Arizona, USA. Die Architekten und Architekturstudenten der Erde werden eingeladen, am Internat. Wettbewerb «Living with the sun» teilzunehmen. Dieser Wettbewerb soll die Speicherung und Verwendung von direkter und indirekter Sonnenenergie [1]) im Hause, sowie die Schaffung eines angenehmen und wohnlichen Klimas für den Menschen fördern. Das Haus soll sofort nach dem Preisgerichtsentscheid im Nordosten von Phoenix gebaut werden. Erster Preis $ 2500 und Bauauftrag. 2. Preis $ 1500, 3. Preis $ 1000, 4. Preis $ 500, 5. Preis $ 500. Das Preisgericht setzt sich wie folgt zusammen: Pietro Belluschi, F. A. I. A., Dekan für Architektur und Planung an der Technischen Hochschule Massachusetts; Carlos Contreras, Hon. F. A. I. A., Architekt und Planer der Stadt Mexiko; Thomas A. Creighton, A. I. A., Herausgeber von «Progressive Architecture»; Nathaniel Owings, F. A. I. A., Architekt bei Skidmore, Owings und Merill; James Elmore, A. I. A., Professor für Architektur am Arizona State College. Einschreibungen von Wettbewerbsteilnehmern können bis am 1. Juni 1957 erfolgen an: James M. Hunter, F. A. I. A., Professional Advisor, 1126 Spruce Street, Boulder, Colorado USA, der die Unterlagen abgibt. Einreichungstermin 15. August 1957.

[1]) Vgl. Villa Girasole in SBZ Bd. 107, S. 273, (1936), sowie SBZ 1947, S. 426 und 1951, S. 309.

ANKÜNDIGUNGEN

Schweizer Heimatschutz

Das Jahresbott wird am 18./19. Mai im Baselbiet abgehalten. Programm: samstags Besichtigung Kraftwerk Birsfelden, Mittagessen Waldhaus Hardwald, Besichtigung Muttenz, Generalversammlung im Schloss Bottmingen, Besichtigung Arlesheim, Nachtessen Hotel Engel Liestal, Unterhaltungsprogramm. Sonntags Fahrt durch das Baselbiet, Besichtigung Hölstein, Oltingen, Sissacherfluh (Picknick), Sissach, Liestal. Anmeldung umgehend an Schweizer Heimatschutz, Postfach, Zürich 23.

Gesellschaft für Schweizerische Kunstgeschichte

Vom 18. bis 20. Mai 1957 findet die 77. Jahresversammlung statt. Besichtigt werden am Samstag und Sonntag Kirchen und Schlösser am Thunersee und bei Interlaken, wo die Generalversammlung am Samstag um 17.30 h in der Schlosskirche abgehalten wird; um 20 h folgt das gemeinsame Nachtessen im Hotel Beau-Rivage. Der Montag bringt eine Exkursion ins Simmental. Anmeldung bis spätestens 12. Mai an die Gesellschaft für Schweizerische Kunstgeschichte, Postfach Transit, Bern.

Kautschuk im Bergbau

Diese Tagung findet am 17. Mai in der Montanistischen Hochschule Leoben (Steiermark) statt. Veranstalter ist das Internationale Kautschukbüro (Sektion Oesterreich). Referate: Neuentwicklungen auf dem Sektor Kautschuk für Dilatationsfugen (Ir. *Wieringa,* Holland); Technische Forderungen des Bergbaues an das Förderband (Berginspektor Dr. *Kovatsik,* Oesterreich); Förderbänder für den Bergbau (Dipl. Ing. *Sebök,* Oesterreich); Gummi im Kohlenbergbau (Min. a. D. *Wyffels,* Holland); Zur Symbiose von Natur- und Kunst-Kautschuk (Dir. Ir. *van Soest,* Rubber-Stichting). Diskussionsleitung: Prof. Dr. *Hohn,* Technische Hochschule, Wien. Anmeldungen bis spätestens 10. Mai an das Internationale Kautschukbüro, Sektion Oesterreich, Altreuteweg 1, Bregenz.

Heizöl-Tagung

Veranstalter: Schweiz. Verband für die Materialprüfungen der Technik (SVMT) und Schweiz. Kohlenhändlerverband, Heizölgruppe (SKHV)

Freitag, den 24. Mai 1957 im Auditorium I der ETH, Zürich

10.00 Dr. *H. Ruf,* Sektionschef der EMPA, Zürich: «Heizöleigenschaften und Qualitätsrichtlinien».
11.00 Mr. *T. M. B. Marshall* der Shell Petroleum Co., London, vorgetragen in deutscher Sprache von Ing. *E. Jann,* Zürich: «Stability and Compatibility of Fuel Oils».
12.45 Mittagessen im Restaurant «Königstuhl».
15.00 Mr. *G. F. J. Murray,* London: «La corrosion à basse température par les gazes de combustion dans les installations de chauffage au mazout».

Vorgängig der Diskussionstagung findet *Donnerstag, den 23. Mai* eine *Schulungstagung,* veranstaltet vom Schweiz. Kohlenhändlerverband, Heizölgruppe, statt, zu der auch die Mitglieder des SVMT freundlichst eingeladen sind. 10.00 bis 11.45 h im Hörsaal 15c des Physikgebäudes der ETH (Gloriastr. 35), Zürich, *Filmvorführungen* (Suche nach Erdöl, Löschen einer ausgebrochenen und in Brand geratenen Erdölsonde, Bohren nach Erdöl). 12 h Mittagessen im Restaurant «Königstuhl», 14.15 h Obering. *K. Schilling* der Fa. Ing. W. Oertli AG., Dübendorf: «Die Oelfeuerung für Zentralheizungs- und Industrieanlagen». 16 h Besichtigung der Fabrik für Oelfeuerungsanlagen der Fa. Ing. W. Oertli AG. in Dübendorf.

Vorträge

9. Mai (Donnerstag) STV Bern. 20.15 h im Hotel Bristol, grosser Saal. Pilot *H. Geiger,* Sitten: «Transport- und Rettungsflüge in den Alpen».
9. Mai (Donnerstag) S. I. A. Zürich. 20.15 h im Zunfthaus zur Schmiden. Ing. *Hans Zumbach:* «Ueber Luftschutzfragen».
11. Mai (Samstag) Schweizer Stahlbauverband. 10.30 h im Auditorium II des Hauptgebäudes der ETH in Zürich. Prof. Dr. *George Winter,* Cornell University, Ithaca, N. Y., USA (in deutscher Sprache): «Leichtstahlbau in den Vereinigten Staaten von Amerika (kaltgeformte, dünnwandige Stahlkonstruktionen)».

Für den Textteil verantwortliche Redaktion:
Dipl. Bau-Ing. W. JEGHER, Dipl. Masch.-Ing. A. OSTERTAG
Dipl. Arch. H. MARTI