Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 51 (1960)

Heft: 12

Artikel: Kostenvergleich von nuklearer und konventioneller Energieerzeugung

Autor: Guck, R.W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-917039

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

Kostenvergleich von nuklearer und konventioneller Energieerzeugung

Von *R. W. Guck*, Zürich

657.478.8 : 621.311.25 + 621.311.22/.23

Ausschlaggebend für die Errichtung von Kernkraftwerken zum Zwecke der Erzeugung elektrischer Energie ist deren Wirtschaftlichkeit. Anhand der heutigen Verhältnisse werden die Kosten der nuklear erzeugten elektrischen Energie verglichen mit der in Steinkohlenkraftwerken oder in einem Netzverband mit gemischter Erzeugung gewonnenen Energie. Als wichtigste Einflussgrössen sind die Leistung und der Betriebseinsatz, also die Benutzungsdauer der entsprechenden Leistung eingehend diskutiert. Die Vergleiche basieren auf Verhältnissen, wie sie etwa für den südwestdeutschen Raum zutreffen. Darüber hinaus stellen aber die ermittelten Ergebnisse ein Charakteristikum der heutigen allgemeinen Situation dar.

C'est leur rentabilité qui est déterminante lorsqu'il s'agit d'édifier des usines nucléaires destinées à la production d'énergie électrique. En partant des conditions actuelles, l'auteur compare les coûts de production de l'énergie nucléaire et de l'énergie provenant d'usines thermiques au charbon, ou bien d'un ensemble de réseaux à production mélangée. Il examine en détail les facteurs les plus importants, soit la puissance disponible et ses modalités d'intervention, c'est-à-dire la durée d'utilisation de la puissance considérée. Ses comparaisons se basent sur les conditions qu'on rencontre dans la région sud-ouest de l'Allemagne, mais les résultats auxquels il arrive caractérisent la situation générale à l'heure qu'il est.

1. Aufgabenstellung

Der Entschluss, heute ein Kernkraftwerk zu bauen, wird von den verschiedensten Faktoren, die in jedem einzelnen Falle weitgehend differieren, beeinflusst. Einer dieser Faktoren kann auch die Absicht sein, die Entwicklung einer bestimmten Reaktorkonstruktion zu fördern; im allgemeinen jedoch wird die Wahl des Types offen bleiben und — falls man sich auf bereits erprobte Typen beschränkt — von Sicherheitsbetrachtungen, dem technischen Risiko und der Wirtschaftlichkeit der Energieerzeugung abhängen. Bei allen Untersuchungen, die einem Baubeschluss vorangehen, kann besonders der Frage der Wirtschaftlichkeit eine weitreichendere Bedeutung beigemessen werden als den anderen Faktoren. Dies gilt um so mehr dann, wenn ein Elektrizitätswerk oder eine Gruppe von Unternehmungen das Bauvorhaben aus eigenen Mitteln finanzieren will und dazu noch das wirtschaftliche Risiko des Betriebes der Anlage selbst tragen muss.

Als Vergleichsgrössen für die Feststellung der Wirtschaftlichkeit kommen in Frage: gleiche Anlagen mit anderen Reaktoren (Typenwahl), die Erzeugungskosten der Energie in einem Kohlenkraftwerk gleicher Grösse oder derjenigen eines ganzen Netzes, mit dem das Kernkraftwerk zusammenarbeiten soll. Immer spielt dabei neben dem Reaktortyp auch die Leistung des Kraftwerkes eine wichtige Rolle.

Es ist allgemein üblich, die Erzeugungskosten der Kernkraftwerke für eine relative Benutzungsdauer [1]) von 0,8 (7000 Stunden pro Jahr) zu berechnen, um so ein günstiges Ergebnis zu erhalten, und diese dann mit irgendwelchen konventionellen Werten zu vergleichen. Die Berechtigung für diesen hohen Belastungsfaktor wird aus dem bedeutenden Kapitalaufwand für den Bau einer solchen Anlage abgeleitet, und man setzt deshalb von vorneherein einen *Grundlastbetrieb* voraus. Das mag bei einer kleinen Anlage, die für ein grosses Netz nur wenig Leistungszuwachs bringt, angehen (doch wird gerade ein solches Werk aus anderen Gründen wieder nicht mit einem hohen Belastungsfaktor betrieben werden); aber eine im Vergleich zum Netz grosse Anlage wirkt mit ihrem Grundlastbetrieb zurück auf den Einsatz der anderen Werke im Netz, hat eine schlechtere Ausnutzung jener zur Folge und verursacht damit Zusatzkosten. Die Wirtschaftlichkeit eines Kernkraftwerkes kann somit in Frage gestellt sein, auch wenn man sich mit der erwähnten Methode günstige Werte errechnet hatte.

Einfacher als der Vergleich mit der Erzeugung eines ganzen Netzes lässt sich der Vergleich mit Kohlenkraftwerken gleicher Nettoleistung durchführen. Dieser soll den ersten Teil des Aufsatzes darstellen. Ein Vergleich der jährlichen Kosten bei verschiedenen Belastungsfaktoren für das Kernkraftwerk und das Kohlenkraftwerk in Abhängigkeit von der Leistung erleichtert die Wahl der Kraftwerkgrösse, falls das Streben nach einer wirtschaftlichen Anlage stark in den Vordergrund tritt. Daneben sollen auch die Erzeugungskosten der Kernenergie mit den Kosten der Energie im betrachteten Netz verglichen werden.

Die Berechnungen stützen sich auf amerikanische, deutsche und schweizerische Zahlenwerte. [2]) Doch muss darauf hingewiesen werden, dass die ermittelten Kosten für Kernkraftwerke heute noch in den meisten Fällen auf Schätzungen beruhen und dass somit kein Anspruch auf unbedingte Gültigkeit erhoben werden kann. Erst der Bau und der Betrieb mehrerer Kernkraftwerke wird hier zuverlässigere Unterlagen schaffen.

Das Ergebnis der Vergleiche trifft besonders für südwestdeutsche Verhältnisse zu.

2. Basis der Vergleiche

Zufolge der Degression der spezifischen Anlagenkosten mit zunehmender Leistung und zufolge einer besseren Ausnutzung der primären Energie bei grösseren Einheiten ergeben sich mit zunehmender Kraftwerkgrösse für die Kilowattstunde generell sinkende Erzeugungskosten. Dies gilt sowohl für Kernkraftwerke (Atomstrom) [3]) als auch für konventionelle Dampfkraftwerke auf Steinkohlenbasis (Kohlenstrom) (Fig. 4 und 5). Der Grad der Degression sowie die Abhängigkeit von der Kraftwerkgrösse sind nun bei beiden Kraftwerktypen verschieden. Die Differenz zwischen den spezifischen Kosten von Atomstrom und Kohlenstrom weist daher, ebenfalls in Abhängigkeit von der Leistung, einen monotonen Verlauf auf mit einem Nulldurchgang bei Kostengleichheit. Dieser Nulldurchgang bleibt auch beim Vergleich der Jahreskosten (spezifische Erzeugungskosten mal gesamte jährlich ezeugte Energie) bei sonst konstant gehaltenen

[1]) zur Definition siehe Fig. 9.

[2]) Umrechnungsfaktoren: 1 $ = sFr. 4.30 = DM. 4.20.

[3]) Die in Kernkraftwerken erzeugte elektrische Energie wird im folgenden der Einfachheit halber «Atomstrom», die in Kohlenkraftwerken erzeugte elektrische Energie «Kohlenstrom» genannt.

Parametern derselbe, doch bildet sich nun in Abhängigkeit von der Leistung wegen der Gegenläufigkeit des zweiten Faktors im Produkt, der jährlichen Energieerzeugung, ein Maximum in der Kostendifferenz aus. Dieses Maximum hängt wesentlich von den Parametern ab, z. B. von der Kostenstruktur der einzelnen Werke und vom Betriebseinsatz (Benutzungsdauer), um nur die wichtigsten zu nennen.

Die Kostenstruktur ist für Atomstrom und Kohlenstrom dem Aufbau nach die gleiche: Kapitalabhängige Kosten, Brennstoffkosten und Kosten für Bedienung und Unterhalt. Aber je nach Werksgattung und Benutzungsdauer kommt den einzelnen Anteilen ein verschiedenes Gewicht zu. So gilt für den hier näher untersuchten Leistungsbereich von 10 bis 500 MW etwa die folgende Aufteilung (Werte in Prozenten der Gestehungskosten):

Kostenarten	Relative Benutzungsdauer 0,8		Relative Benutzungsdauer 0,4	
	Atomstrom	Kohlenstrom	Atomstrom	Kohlenstrom
	%	%	%	%
Kapitalabhängige Kosten .	54—61	20—36	66—72	31—48
Brennstoffkosten	38—28	73—53	25—18	60—39
Bedienung und Unterhalt .	7—13	6—12	7—14	8—15

Die Verschiebung in der Aufteilung liegt ganz in dem unterschiedlichen Verhältnis zwischen kapitalbedingten Kosten und Brennstoffkosten begründet. Die Fig. 1 bis 5 geben hierzu weitere Einzelheiten.

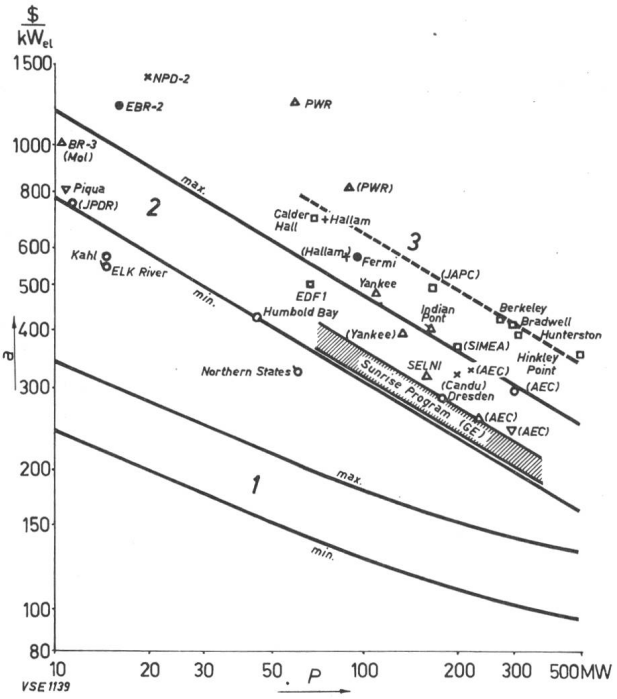

Fig. 1

Spezifische Anlagenkosten von Atomkraftwerken und konventionellen Dampfkraftwerken auf Steinkohlenbasis

a spezifische Anlagenkosten
P Nettoleistung
1 konventionelle Dampfkraftwerke
2 Atomkraftwerke (US-Typen)
3 Atomkraftwerke Typ Calder Hall

Reaktortypen:

o Siedwasser
▲ Druckwasser
▽ organisch moderiert
▫ gasgekühlt
× D_2O — moderiert
+ Natrium-Graphit
● schneller Brüter
\ mit fossilem Überhitzer
( ) Projekte bzw. Möglichkeiten bei ausgeführten Anlagen

Die Fig. 4 und 5 zeigen die auf Grund der Untersuchungen ermittelten spezifischen Erzeugungskosten für Kernkraftwerke und Kohlenkraftwerke im Leistungsbereich von 10 bis 500 MW, jeweils für relative Benutzungsdauern 1,0 bis 0,2 (8760 bis 1750 Stunden jährliche Benutzungsdauer der Nettoleistung), wobei der relativen Benutzungsdauer 1,0 nur theoretische Bedeutung zukommt. Im einzelnen wurden für diese Berechnungen die folgenden Annahmen getroffen, die möglichst allgemein gehalten sind, um zu einem generell gültigen Ergebnis zu gelangen.

Kapitalabhängige Kosten: Für die Anlagenkosten wurden Minimalwerte (Kosten für das Kraftwerk allein auf idealem Baugrund, ohne Bauzinsen, Landbeschaffung, Anschluss an Netz, Bahn und Strasse usw.) sowie Maximalwerte (einschliesslich aller Zusatzkosten) angenommen (Fig. 1). Die Lebensdauer betrage für alle Werke einheitlich 20 Jahre, was bei einem Kapitalzins von 6 % pro Jahr (etwa

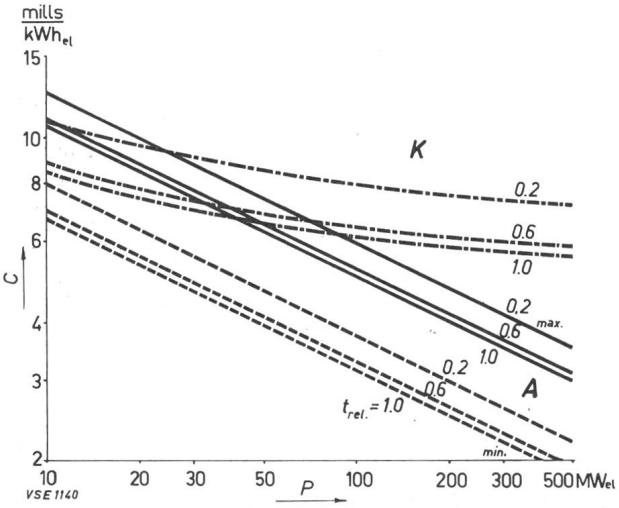

Fig. 2

Brennstoffkosten von Atomkraftwerken und konventionellen Dampfkraftwerken

C Brennstoffkosten
P Nettoleistung
A Atomstrom
K Kohlenstrom
$t_{rel.}$ relative Benutzungsdauer

Die Brennstoffkosten umfassen
beim Atomstrom
— alle Kosten des Brennstoffzyklus
— 4 % (pro Jahr) Uran-Leihgebühr
— beim OMR auch die Kosten für den Kühlmittelersatz
beim Kohlenstrom
— Kosten für Kohle, Transport und Haldenverluste (Basis \$ 2.55/10^6 kcal)
— 6 % (pro Jahr) Zinsen für Kohlenlager für einen Betrieb von 2 Monaten

deutsche Verhältnisse) eine Annuität von 8,7 % ergibt. Zusammen mit den Aufwendungen für Steuern und Versicherungen beträgt die jährliche Kapitalbelastung für Kernkraftwerke 12,5 % pro Jahr und für die Kohlenkraftwerke 12,0 % pro Jahr.

Bei Kernkraftwerken beschränkt sich der Vergleich auf erprobte Reaktortypen im Sinne des zwischen den USA und der EURATOM abgeschlossenen Vertrages. In Fig. 1 sind wohl auch englische

Werke und einige andere amerikanische angeführt, werden aber für den weiteren Vergleich nicht benutzt.

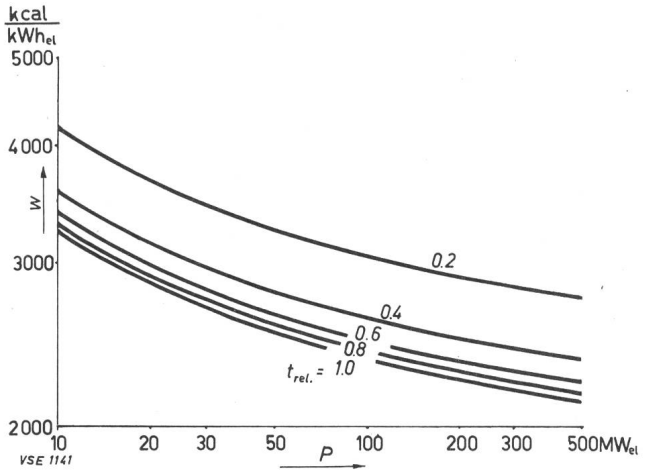

Fig. 3
Wärmeverbrauch von konventionellen Dampfkraftwerken (bezogen auf die abgegebene kWh$_{el}$)

W Wärmeverbrauch
P Nettoleistung
$t_{rel.}$ relative Benutzungsdauer

Brennstoffkosten: Diese wurden für Kernkraftwerke für Nettowirkungsgrade zwischen 25 % bei 10 MW und 29 % bei 500 MW bei einer relativen Benutzungsdauer von 0,8 auf Grund amerikanischer Unterlagen ermittelt (Fig. 2). Sie sind als maximale und minimale Kosten angegeben, um die Streuung zufolge verschiedener Herstellungskosten der Brennstoffelemente und unterschiedlicher Abbrände, welche die massgebendsten Faktoren darstellen, zu erfassen. Im Falle des organisch moderierten Reaktors sind hier ebenfalls die Kosten für den laufenden Kühlmittelzusatz eingeschlossen (ca. 0,2 mills/kWh thermisch). Für Kohlenkraftwerke liegt den Brennstoffkosten der auf die abgegebene Kilowattstunde bezogene Nettowärmeverbrauch gemäss Fig. 3 zugrunde. Ferner basieren sie auf Kohlenkosten, wie sie im südwestdeutschen Raum etwa massgebend sind ($ 17.40/t Kohle frei Kraftwerk, einschliesslich Transport- und Haldenverlusten), entsprechend $ 2.55/10^6 kcal bei 6850 kcal/kg Kohle.

So wie bei den Kernkraftwerken die Verzinsung des gesamten im Kreislauf befindlichen Urans in den Brennstoffkosten enthalten ist (4 % jährlich), wurde auch bei den Kohlenkraftwerken in den Gesamtkosten die Verzinsung eines Kohlenlagers für zweimonatigen Betrieb berücksichtigt (6 % jährlich).

Kosten für Bedienung und Unterhalt: Die gesamten Jahreskosten für Bedienung und Unterhalt sind auf die Minimalwerte der Anlagekosten bezogen, und zwar gelten für Kernkraftwerke 3,0 bis 2,5 % und für Kohlenkraftwerke 5,0 bis 4,0 % (zwischen 10 und 500 MW). Bei den Kohlenkraftwerken stimmen diese Werte mit den deutschen und amerikanischen Verhältnissen etwa überein; bei den Atomkraftwerken dienten ca. 1,0 mills/kWh (Benutzungsdauer 0.8) bei Anlagen in der Grössenordnung von 150 MW als Anhaltspunkt.

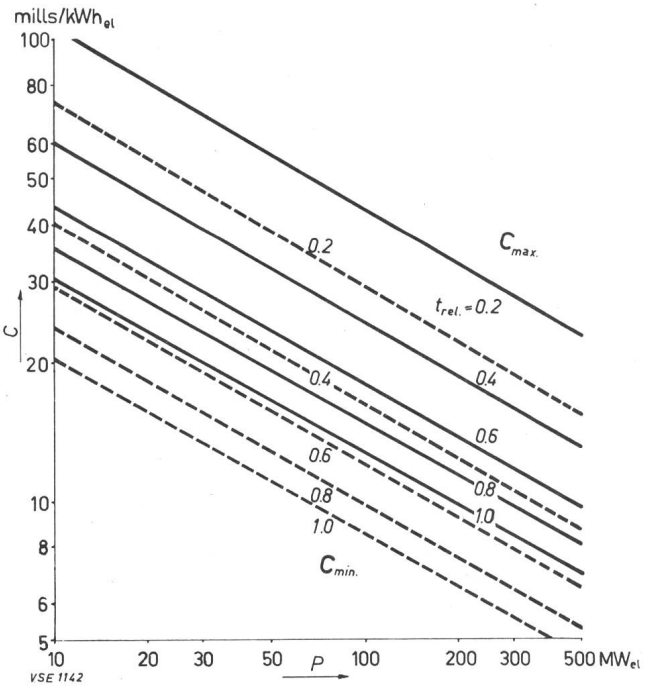

Fig. 4
Gesamte Stromerzeugungskosten von Atomkraftwerken

C Stromerzeugungskosten
P Nettoleistung
$C_{max.}$ maximale Kosten
$C_{min.}$ minimale Kosten
$t_{rel.}$ relative Benutzungsdauer

Die Stromerzeugungskosten umfassen:

— 12,5 % jährliche Kapitalbelastung (Fig. 1)
— Brennstoffkosten (Fig. 2)
— Kosten für Bedienung und Unterhalt (3 bis 2,5 % der min. Anlagenkosten zwischen 10 und 500 MW)

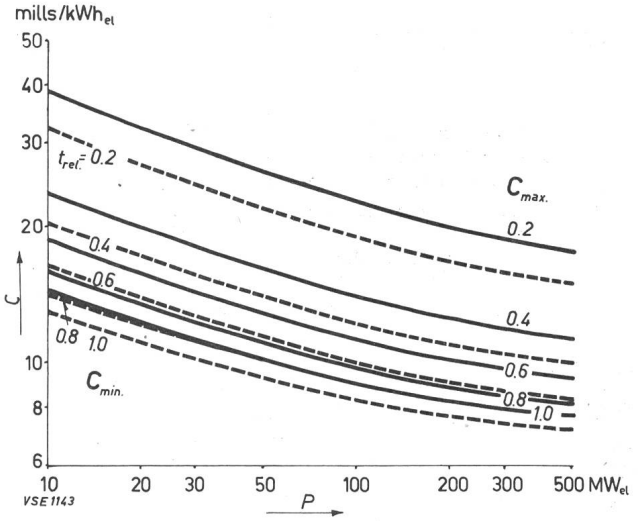

Fig. 5
Gesamte Stromerzeugungskosten von konventionellen Dampfkraftwerken (Steinkohle)

C Stromerzeugungskosten
P Nettoleistung
$C_{max.}$ maximale Kosten
$C_{min.}$ minimale Kosten
$t_{rel.}$ relative Benutzungsdauer

Die Stromerzeugungskosten umfassen:

— 12 % jährliche Kapitalbelastung (Fig. 1)
— Brennstoffkosten (Fig. 3)
— Kosten für Bedienung und Unterhalt (5 bis 4 % der min. Anlagenkosten zwischen 10 und 500 MW)

3. Vergleich von Atomstrom mit Kohlenstrom

Um den ganzen möglichen Streubereich zu erfassen, erstreckt sich die Differenzbildung der Jah-

reskosten von Werken gleicher Grösse auf die beiden extremen Kombinationen

Atomstrom (max.) minus Kohlenstrom (min.)
Atomstrom (min.) minus Kohlenstrom (max.)

d. h. einmal wird der teuerste Atomstrom mit dem billigsten Kohlenstrom verglichen und umgekehrt.

Fig. 6 zeigt das Ergebnis dieses Vergleiches. Kostengleichheit besteht beim Nulldurchgang der Kurven und wird durchweg nur bei grösseren Einheiten erzielt. Alle Kurven weisen ein Maximum

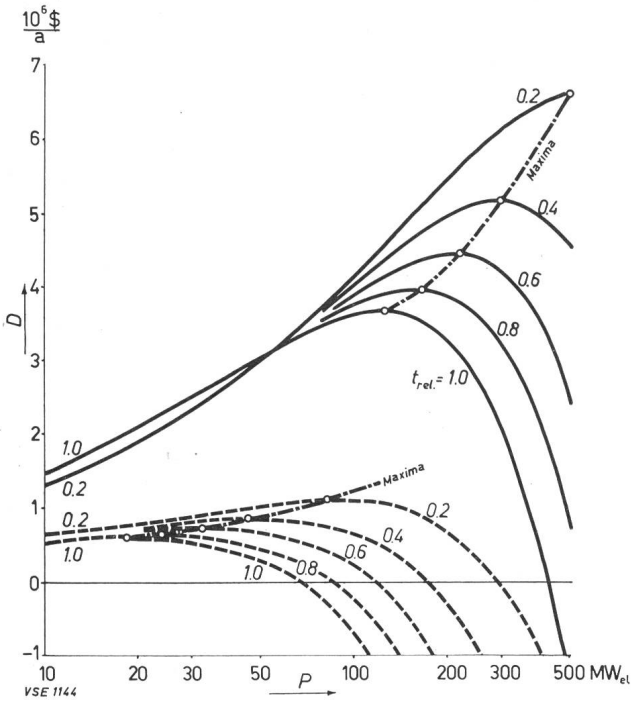

Fig. 6

Jährliche Differenzkosten zwischen nuklearer und konventioneller Stromerzeugung (Atomstrom-Kohlenstrom) in Kraftwerken gleicher Leistung

D jährliche Differenzkosten
P Nettoleistung
$t_{rel.}$ relative Benutzungsdauer
——— Atomstrom (max.) — Kohlenstrom (min.)
– – – Atomstrom (min.) — Kohlenstrom (max.)

der Differenzkosten auf, dessen Lage sich mit der Benutzungsdauer ändert. Bessere Ausnutzung der Anlage führt zu geringerer maximaler Kostendifferenz, Maximum und Nulldurchgang liegen dann bei niedrigeren Leistungen. Dies ist eine Auswirkung der unterschiedlichen Kostenaufteilung: Das Kernkraftwerk mit seiner hohen Kapitalinvestition und seinen im Vergleich zum Kohlenstrom geringen Brennstoffkosten bedingt im Vergleich mit dem Steinkohlen-Kraftwerk einen Betrieb mit bester Ausnutzung. Zwischen den beiden Kurvenscharen liegt, je nach den Verhältnissen eines bestimmten Falles, der jeweilige Arbeitspunkt. Die Anlagengrössen, bei denen die Kostengleichheit eintritt, sind nochmals in Fig. 7 besonders dargestellt und zeigen ebenfalls das aussergewöhnlich breite Streuband.

Allgemein kann festgehalten werden: Bei der heutigen Situation erreichen nur grosse nukleare Zentralen die Wirtschaftlichkeit (Kostengleichheit von Atomstrom und Kohlenstrom), und dies um so eher, je billiger der Atomstrom oder umgekehrt je teurer der Kohlenstrom ist, und je besser diese Kraftwerke ausgenützt werden können, d. h. Grundlastbetrieb übernehmen.

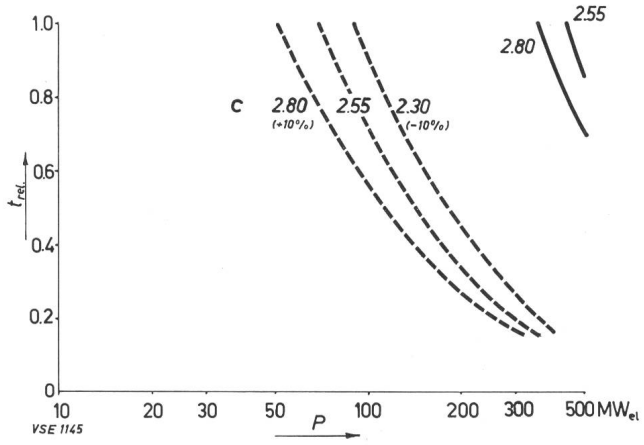

Fig. 7

Anlagengrössen, bei denen Kostengleichheit zwischen nuklearer und konventioneller Stromerzeugung besteht (Atomstrom = Kohlenstrom)

Auswirkung von Änderungen im Wärmepreis
$t_{rel.}$ relative Benutzungsdauer
P Nettoleistung
c Wärmepreis (\$ / 10^6 kcal)
——— Atomstrom (max.) — Kohlenstrom (min.)
– – – Atomstrom (min.) — Kohlenstrom (max.)

Für kleine Anlagen von 10 bis 50 MW wird die Wirtschaftlichkeit nicht erreicht, doch halten sich die mit Kohlenstrom verglichenen finanziellen Verluste in einem ziemlich begrenzten Rahmen. Insbesondere besteht in diesem Bereich nur ein geringer Einfluss der Betriebsweise der Anlage, also der Benutzungsdauer, auf die Höhe der Kostendifferenz: Es kann, wie aus den Kurven für Atomstrom (max.) — Kohlenstrom (min.) in Fig. 6 zu ersehen ist, sogar der Fall eintreten, dass die gut ausgenützte kleine Anlage in ihrer Relation zum konventionellen Kraftwerk ein ungünstigeres Betriebsergebnis aufweist als bei geringerer Benützungsdauer, nämlich dann, wenn die Brennstoffkosten des Atomstromes höher liegen als die des Kohlenstromes. Wie Fig. 2 zeigt, ist dies für die obere Limite der Brennstoffkosten des Atomstromes tatsächlich unterhalb 50 MW der Fall.

Im Gebiete mittlerer Leistungen bildet sich ein Maximum der Kostendifferenz heraus, welches mit abnehmender Benutzungsdauer in seinem Betrag zunimmt und sich dabei nach grösseren Leistungen hin verschiebt. (Fortsetzung folgt)