

ENTWICKLUNGSTENDENZEN IN DER KREISLAUFANFANGSTEMPERATUR IM KONVENTIONELLEN UND ATOMKRAFTWERKSBAU*

Von

A. LÉVAI

Lehrstuhl für Wärmekraftwerke, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 25. Juli, 1966)

Entsprechend dem bekannten Gesetz der Thermodynamik zeigt sich im zeitgemäßen Kraftwerksbau der letzten 50 Jahre allgemein die Tendenz, die Anfangstemperatur des Wasserdampfkreisprozesses zu erhöhen. Das theoretisch denkbare Ziel, die theoretische Verbrennungstemperatur, die bei den herkömmlichen Brennstoffen in der Nähe von $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt, läßt sich natürlich unmöglich errechnen. Die unvermeidliche Irreversibilität der Verbrennung, die Dissoziation der Verbrennungsgase usw. machen selbst in der Brennkammer eines modernen Hochleistungskessels — je nach dem Brennstoff — höchstens Temperaturen von $1200\text{—}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, in Schmelzkammerkesseln bis $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreichbar. Die Anfangstemperatur des überhitzten Dampfes dagegen liegt heute zufolge technologischer, materialbedingter und wirtschaftlicher Beschränkungsfaktoren bei $540\text{—}570\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bekanntlich müssen bei Dampftemperaturen in der Nähe von $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ und darüber die berührten Teile der Überhitzer, bei $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ und darüber außerdem auch die Hauptdampfleitungen und die Hochdruckteile der Turbine usw. aus hochhitzebeständigem Stahl hergestellt werden, was neben den technologischen Schwierigkeiten auch wirtschaftlich einen schwerwiegenden Faktor in die gesamte Ökonomie der Kraftwerke hineinträgt.

Der Effekt jeder technischen Verbesserung muß natürlich wirtschaftlich ausgewertet werden. Im Kraftwerksbau ist als eindeutige Kennziffer der Wirtschaftlichkeit der Einheitspreis der dem Verbraucher gelieferten elektrischen Energie am Verbrauchsort aufzufassen. Wie bekannt, werden überall große Anstrengungen gemacht, um diesen Einheitspreis bzw. die Einheitskosten zu senken, wobei heute weit weniger jene Kosten im Vordergrund stehen, die mit dem Kreisprozeß verbunden sind, als diejenigen, die von der Seite der Investitionskosten oder der Brennstoffe her auflaufen. Der Ausbau großer Wärmekraftwerke mit Leistungen bis über 1000 MW , die Vergrößerung der Einheitsleistungen auf 500 MW und darüber, die Verwendung billiger Brennstoffe, wie Erdgas, Öl, Tagebau-Lignit, usw. tragen viel ein-

* Vortrag vor dem Außeninstitut der Technischen Hochschule Graz (4. III. 1966).

schneidender zur Herabsetzung der Erzeugungskosten bei als die am thermischen Kreisprozeß noch möglichen Verbesserungen. Dem Ziel meines Vortrages entsprechend werde ich trotzdem die Entwicklungstendenzen in der Festlegung der Kreislaufanfangstemperatur in ihrer Rückwirkung auf die Wirtschaftlichkeit der Energieerzeugung, d. h. auf die Einheitskosten der elektrischen Energie untersuchen, wobei die Aufgabe so formuliert werden kann, daß die Kreislaufanfangstemperatur so lange zu erhöhen ist, bis die Einheitskosten der elektrischen Energie sinken. Alle anderen oben genannten sehr wichtigen Umstände, die heute zur Verminderung der Einheitskosten beitragen, müssen bei einer solchen Untersuchung naturgemäß ausgeschaltet bleiben.

Im Kraftwerksbau ist der Begriff der *kalorischen Kostenäquivalenz* bekannt, unter dem das Verhältnis $(\Delta q/\Delta a)$ zu verstehen ist, welches angibt, wie groß die mittlere spezifische Wärmeersparnis (Δq) ist, die erzielt werden muß, um eine Erhöhung der spezifischen Anlagekosten um eine Einheit (Δa) zu rechtfertigen, ohne daß sich die Einheitskosten der erzeugten Energie ändern. Der reziproke Wert, d. i. das Verhältnis der zulässigen spezifischen Investitionskosten (Δa) , bezogen auf die Einheit des erreichbaren spezifischen Wärmeverbrauchs (Δq) , d. h. also $(\Delta a/\Delta q)$ kann dem sog. *Grenzwirtschaftlichkeitsfaktor* (δ) gegenübergestellt werden. Dieser ist von den wirtschaftlichen und betrieblichen Verhältnissen des untersuchten Kraftwerkssystems abhängig. Als wichtigste unter diesen sind zu nennen: der Wärmepreis (p_q) , die Jahresbenutzungsdauer (t_{sp}) , der Jahresfaktor der Investitionen (α) , der Reservefaktor (r) und der Eigenbedarfsfaktor (ϵ)

$$\delta = \frac{p_q \cdot t_{sp}}{\alpha \cdot r \cdot (1 + \epsilon)}$$

Die Bedingung für die Wirtschaftlichkeit ist, daß

$$\frac{\Delta a}{\Delta q} \leq \delta$$

sei.

Während in früheren Jahren mit der Abnahme der spezifischen Investitionskosten der Kraftwerke (a) eine eindeutige Verringerung des spezifischen Wärmeverbrauchs (q) einherging, so daß beide Maßnahmen selbstverständlich eine Verringerung der Energiekosten mit sich brachten und somit berechtigt waren, sind wir heute mit den erwähnten Dampftemperaturen von 540—570 °C an einem Punkt angelangt, bei dem sich die spezifischen Investitionskosten nicht weiter senken lassen, bei dem somit das Problem der Grenzwirtschaftlichkeit klar zutage tritt.

Untersucht man unserer Zielsetzung entsprechend die *Grenzwirtschaftlichkeit nur vom Gesichtspunkt der Kreislaufanfangstemperatur* aus, gelangt

man unter den Verhältnissen in Ungarn zu Resultaten, wie sie in Abb. 1 dargestellt sind. Aus der Abbildung ist in Abhängigkeit von der Anfangstemperatur (t) einerseits die eindeutige, aber relativ immer geringer werdende Abnahme des spezifischen Wärmeverbrauchs (q) bei Kraftwerken ohne bzw. mit einfacher und doppelter Zwischenüberhitzung und andererseits die zunächst langsame, oberhalb des Temperaturbereiches von 560–570 °C wegen des Überganges zu austenitischen Stählen die rasch ansteigende Zunahme der

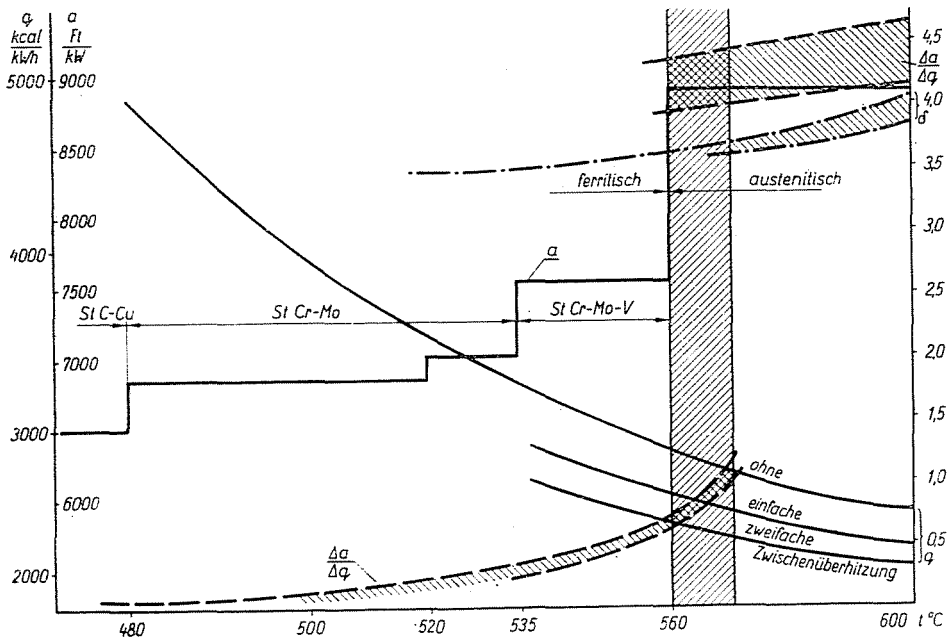


Abb. 1. Untersuchung der Grenzwirtschaftlichkeit (δ) in Funktion der Kreislaufanfängstemperatur

spezifischen Investitionskosten (a) ersichtlich. Aus den in Ungarn derzeit geltenden Bedingungen des kooperierenden Systems und aus den Wirtschaftlichkeitsfaktoren sind die Kurven der Grenzwirtschaftlichkeit (δ) errechnet, wobei selbstverständlich auch der Umstand berücksichtigt ist, daß sich mit der Verringerung des spezifischen Wärmeverbrauchs auch die Jahresbenutzungsdauer der betreffenden Kraftwerke erhöht. Aus der Gegenüberstellung der Grenzwirtschaftlichkeit (δ) und der auf die Einheit der Wärmeverbrauchsabnahme bezogenen spezifischen Investitionsmehrkosten ($\Delta a / \Delta q$) geht eindeutig hervor, daß heute Dampftemperaturen über 560–570 °C für uns in Ungarn wirtschaftlich einfach untragbar sind. Dies ist bestimmt keine Ausnahme, sondern entspricht der allgemeinen Lage in der ganzen Welt. Hier haben wir also eine eindeutige Antwort auf die Frage: »Wie ist heute

die Anfangsdampftemperatur im konventionellen Großkraftwerksbau zu wählen?« Dabei möchte ich nochmals betonen, daß diese Untersuchungsart alle anderen Einflußgrößen, so z. B. auch die koordinierte Wahl von Druck und Temperatur außer acht läßt.

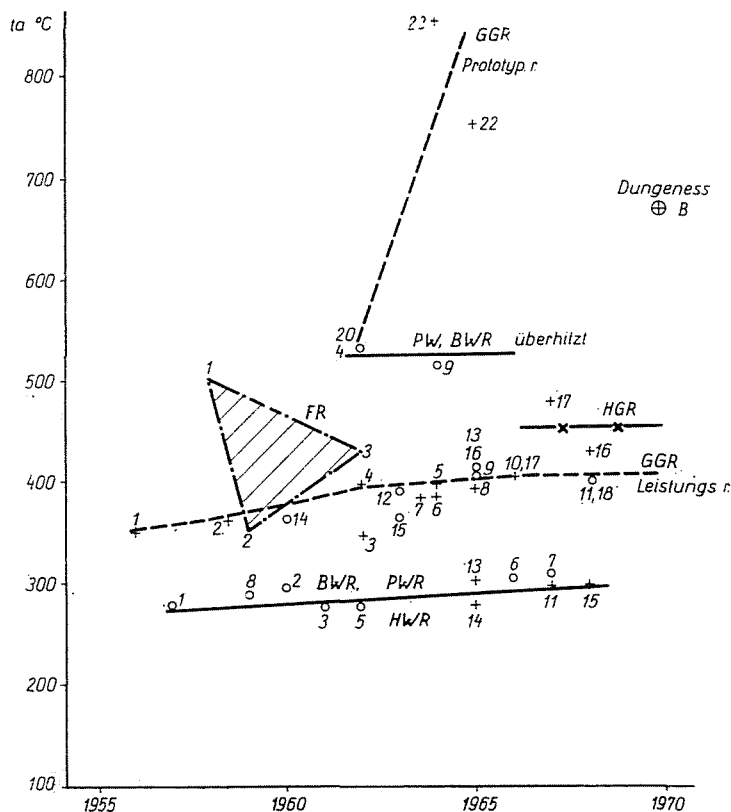


Abb. 2. Kühlmittel-Endtemperaturen gebauter und im Bau befindlicher großer Leistungs- und Prototypenreaktoren. Die Ziffern weisen auf folgende Atomkraftwerke hin: *GGR-Leistungsreaktoren*: 1 Calder Hall, 2 Chapelcross, 3 Berkeley, 4 Bradwell, 5 Hunterston, 6 Hinkley Point, 7 Trawsfynydd, 8 Dungeness A, 9 Sizewell, 10 Oldbury, 11 Wylfa, 12 Latina, 13 Tokai Mura, 14 G3, 15 EDF-1, 16 EDF-2, 17 EDF-3, 18 EDF-4. *GGR-Prototypenreaktoren*: 20 AGR, 22 Dragon, 23 AVR. *Wasserreaktoren Type PWR, BWR, HWR (Staddampferzeugung)*: 1 Shippingport-1, 2 Shippingport-2, 3 Yankee, 5 Woronesch-1, 6 Sena, 7 Zorita, 8 Dresden, 11 Oyster Creek, 13 Candu, 14 Karlsruhe, 15 Marwiken. *Wasserreaktoren Type PWR, BWR (Überhitzung)*, 4 Indian Point, 9 Belojarsk. *HGR-Schwerwasser-Gasreaktoren*: 16 Bohunice, 17 EL-4. *FR-Flüssigmetallgekühlte Reaktoren*: 1 BR-5, 2 Dounreay, 3 Enrico Fermi

Gehen wir aber auf das Gebiet der Kraftwerke der nächsten Zukunft, d. h. auf das Gebiet der *Atomkraftwerke* über, dann bietet sich uns bei weitem kein so eindeutiges Bild. Rein äußerlich gesehen, hat dies seinen Grund in der Vielzahl der heute in Frage kommenden Typen energetisch brauchbarer Kraftwerksreaktoren. Um uns nur auf die wichtigsten zu beschränken, seien

hier als solche nur der Gas-Graphit-Reaktor (GGR), der Druckwasserreaktor (PWR), der Siedewasserreaktor (BWR) und der Schwerwasserreaktor (HWR) bzw. einige mögliche Kombinationen dieser Typen genannt. Um Ihnen ein Bild des derzeitigen Standes auf diesem Gebiete zu geben, sind in der nächsten Abbildung (Abb. 2) die Kühlmittel-Endtemperaturen(t_a) der bisher gebauten oder in Ausführung begriffenen großen Leistungsreaktoren als Funktion des Jahres der Inbetriebsetzung aufgetragen. Wie aus dieser Abbildung ersichtlich, ist nur bei den Gas-Graphit-Reaktoren eine zeitweilige ausgesprochene Tendenz zur Erhöhung der Gastemperatur festzustellen, die übrigen Leistungsreaktoren sind im Laufe der Zeit mehr oder weniger auf demselben Niveau geblieben. In dieser Abbildung sind neben den Gas-Graphit-Reaktoren (GGR) die verschiedenen Typen der Satttdampf erzeugenden Wasserreaktoren (PWR, BWR, HWR) zusammengefaßt aufgetragen, da diese vom Gesichtspunkt der untersuchten Temperaturentwicklung aus keine wesentlichen Abweichungen voneinander aufweisen. Die Wasserreaktoren mit äußerer oder nuklearer Überhitzung sowie die gasgekühlten Schwerwasserreaktoren (HGR) sind separat gruppiert. Ebenfalls separat figurieren die flüssigmetallgekühlten Reaktoren (FR). In der Abbildung finden sich neben den vorerwähnten Leistungsreaktoren auch einige bedeutende Prototypen der weiterentwickelten Gas-Graphit-Reaktoren.

Zum Verständnis der bisherigen und der möglichen zukünftigen Entwicklung soll hier kurz auf die inneren Zusammenhänge eingegangen werden.

Bei den mit Natururan arbeitenden gasgekühlten Graphit-Reaktoren (GGR), die heute allein etwa die Hälfte der derzeit im Betrieb bzw. im Bau befindlichen Leistungsreaktoren ausmachen, sind die Temperaturgrenzen einerseits durch die Umwandlungstemperatur des Natururans ($662\text{ }^\circ\text{C}$), andererseits durch die zulässige Höchsttemperatur der Umhüllung (bei der heute verwendeten Magnesium-Aluminium Legierung $480\text{ }^\circ\text{C}$) gegeben. Innerhalb dieser Schranken ist die bereits stattgefundene nicht unbedeutende Erhöhung der Austrittstemperatur des Kühlgases um ca. $65\text{ }^\circ\text{C}$ (von $345\text{ }^\circ\text{C}$ auf $410\text{ }^\circ\text{C}$) in den Jahren von 1962 bis 1965 teilweise der Verringerung der Sicherheitsmarge gegenüber der maßgebenden Uran- bzw. Umhüllungstemperatur, teilweise dem Umstand zuzuschreiben, daß die Brennstoffelemente immer intensiver gekühlt werden. Bezeichnend hierfür ist die nächste Abbildung (Abb. 3), in der als Funktion des Kühlgasdruckes (p) die spezifische Belastung der Brennelemente ($\xi_{\bar{n}}$) — ausgedrückt als elektrische Leistung pro Tonne Brennstoff — aufgetragen ist. Aus der Abbildung ist ersichtlich, daß bei den in der vorherigen Abbildung eingetragenen Leistungsreaktoren der Natururan-Gas-Graphit-Type der Druck des Kühlgases ständig erhöht und im Zusammenhang damit die spezifische Wärmeleistung wesentlich vergrößert wurde. Allerdings zeigt sich in der Entwicklung der englischen und der französischen Reaktoren ein wesentlicher Unterschied, der dem Umstand zuzu-

schreiben ist, daß man in England am Bau der Brennelemente mit Heringgräten festhielt, während man in Frankreich bei den neuesten Reaktoren auf die doppel­seitige Kühlung der hohlstabartig ausgebildeten Brennelemente übergeht. Dessenungeachtet scheint in beiden Ländern die obere Grenze der erreichbaren höchsten Gasaustrittstemperatur bei dieser Reaktor­type erreicht zu sein.

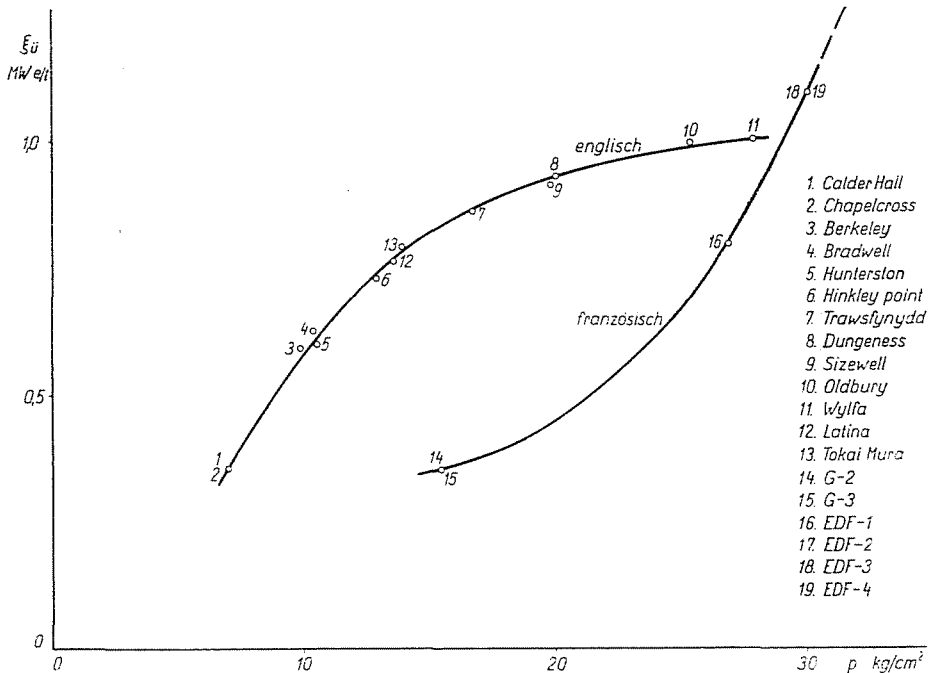


Abb. 3. Spezifische Leistung der Brennelemente ($\xi_{\bar{u}}$) als Funktion des Kühlgasdruckes (p) bei großen Leistungsreaktoren der Type GGR

Wenn damit auch die Kreislaufanfangstemperatur festgelegt ist, so ist dies beim Kreislaufwirkungsgrad keineswegs der Fall. Interessant ist in dieser Hinsicht die nächste Abbildung (Abb. 4), an der an Hand englischer Untersuchungen resp. Ausführungsbeispiele der Kreislaufwirkungsgrad (η_{kr}) als Funktion der Gaseintrittstemperatur (t_e) aufgetragen ist. Als Parameter dient die Gasaustrittstemperatur (t_a). Diese Abbildung ist für Zweidruckkreisprozesse ausgearbeitet worden. In diesem Sinne wäre eine Erhöhung sowohl der Gaseintritts- als auch der Austrittstemperatur zu begrüßen. Dem wird aber durch die Endfeuchtigkeit des Dampfes ($1-x$) eine Grenze gesetzt (etwa bei 14% Feuchtigkeit entsprechend etwa 200° C Gaseintrittstemperatur). Die Endfeuchtigkeit kann durch verschiedene Kunstsaltungen resp. durch Zwischenüberhitzung mit Frischdampf oder Anzapfdampf verringert werden, wie dies in einigen englischen Anlagen gemacht wird. Das sind Möglichkeiten,

die aber teuer sind und die Gefahr betrieblicher Komplikationen in sich bergen. Ähnlich kann auch die fremdbeheizte Zwischenüberhitzung bzw. Überhitzung des Frischdampfes beurteilt werden, mit dem weiteren wirtschaftlichen Nachteil, daß einerseits teure fossile Brennstoffe nicht in Frage kommen, und andererseits billige deshalb ausscheiden, weil an Orten, wo solche zur Verfügung stehen, das Atomkraftwerk an und für sich heute noch nicht wettbewerbsfähig ist.

In England hat man mit dem Bau des kürzlich in Auftrag gegebenen Kraftwerkes *Dungeness B* einen grundsätzlich neuen Weg beschritten. Dieses

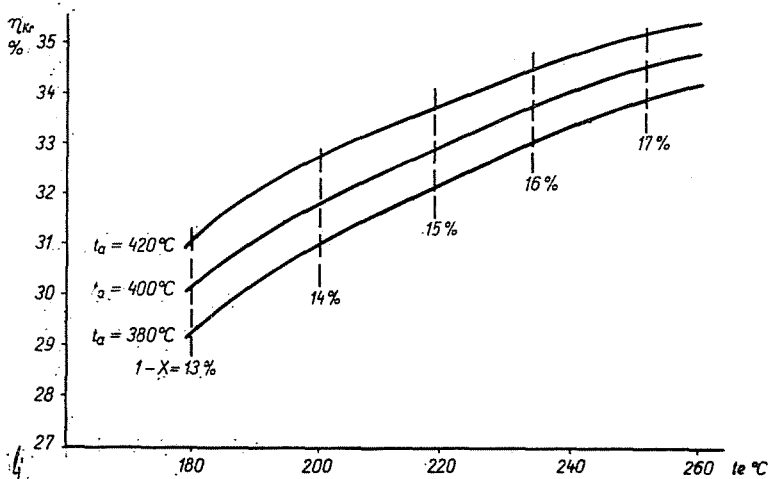


Abb. 4. Kreislaufwirkungsgrad (η_{kr}) englischer Atomkraftwerke (Type GGR) in Funktion der Gaseintrittstemperatur

Kraftwerk benutzt statt des natürlichen bereits leicht angereichertes Uran (Anreicherung durchschnittlich 2%). Es hat mit einer völlig anders gearteten Brennelementumhüllung, die statt aus der Magnoxlegierung bereits aus nichtrostendem Stahl besteht, die Möglichkeit, eine Gasendtemperatur von 675° C und entsprechend eine Dampfanfangstemperatur von 565° C zu erreichen (s. Abb. 2). Ich werde auf diese Entwicklungstendenz später noch zurückkommen.

Etwas anders als bei den Gasreaktoren, liegen die Verhältnisse bei den verschiedenen Typen der *Wasserreaktoren* (Druckwasser, Siedewasser, Schwerwasser). Bei all diesen Typen ist die Endtemperatur des Kühlmittels, also des Wassers, durch den Verdampfungsdruck gegeben. Da man diesen aus konstruktiven Gründen nicht beliebig erhöhen kann, ergibt es eine Grenztemperatur in der Nähe von 300° C. Damit findet natürlich auch der bekanntlich schlechte Kreislaufwirkungsgrad sämtlicher wassergekühlter Reaktoren seine Begründung. Der Vorteil dieser Typen liegt bekanntlich in den verhält-

nismäßig niedrigen Investitionskosten, ein Vorteil, den man durch eine erhöhte Wärmeleistung des Reaktors noch ständig zu steigern sucht, wofür die nächste Abbildung (Abb. 5) charakteristische Unterlagen liefert. Diese Abbildung zeigt die Erwärmung des Kühlwassers (Δt_w) im Reaktor bei den in den letzten Jahren gebauten großen Druckwasserreaktoren; sie wurde beinahe auf den doppelten Wert erhöht.

Die Temperaturbegrenzung entfällt natürlich bei den Systemen, die eine innere (nukleare) oder äußere (fossile) Überhitzung des Dampfes vorsehen. Hierbei sind Dampftemperaturen von 510—540° C erreicht worden bzw. vorgesehen, die aber heute noch mit Komplikationen verbunden sind und

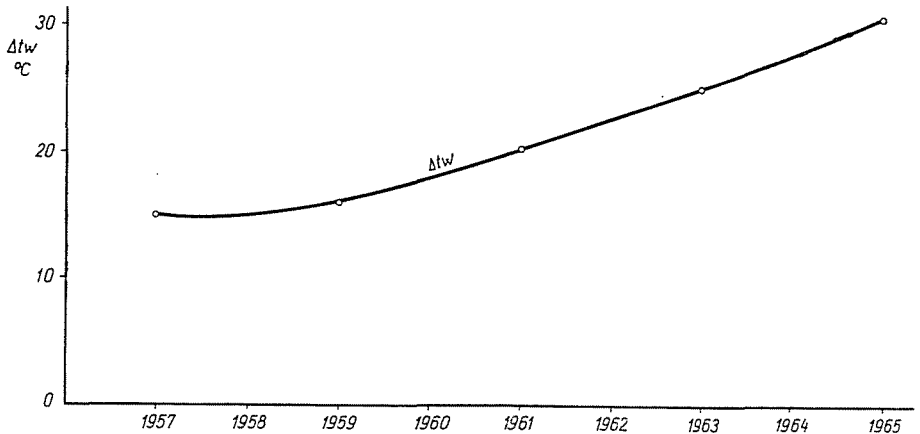


Abb. 5. Kühlwassererwärmung in Druckwasserreaktoren

deren wirtschaftlicher Nutzen sich — wie bereits früher angedeutet — noch nicht eindeutig nachweisen läßt.

Zwischen den Haupttypen der Leistungsreaktoren ist der *gasgekühlte Schwerwasserreaktor* (HGR in der Abb. 2) zu erwähnen, der aber bisher nur in je einem Exemplar in der Tschechoslowakei und in Frankreich gebaut wird. Mit rund 450° C Kühlmitteltemperatur liegt diese Type zwischen dem gasgekühlten Natururanreaktor und dem mit Überhitzung arbeitenden Wasserreaktor.

Obwohl bisher noch kein Leistungsreaktor großer Leistung aus der Type der *flüssigmetallgekühlten Reaktoren* (FR) gebaut wurde, sind in die Abbildung 2 der Vollständigkeit halber drei Prototypen solcher Reaktoren eingetragen. Die erreichten Kühlmitteltemperaturen liegen zwischen 350 und 500° C, bieten also gegenüber den konventionellen Kraftwerken, vom Gesichtspunkt der Kreislaufanfangstemperatur gesehen, keine Vorteile. Anders verhält es sich bei den *fortentwickelten Gas-Graphit-Reaktoren* der englischen (AGR), der Euratom (Dragon) und der Bundesrepublik Deutschland (AVR)-

Type. Es sind dies wieder nur Prototypen, die aber mit ihrer eindeutigen Tendenz zur Erhöhung der Kreislaufanfangstemperatur sicherlich einen möglichen Weg der Zukunft bahnen (s. Abb. 2).

Wollte man den Versuch machen, aus den bisher mitgeteilten Daten – ähnlich, wie bei den konventionellen Kraftwerken – allgemeine Schlüsse auf die wirtschaftliche Zweckmäßigkeit der Erhöhung der Kreislaufanfangstemperatur bei Atomkraftwerken zu ziehen, so wäre das ein aussichtsloses

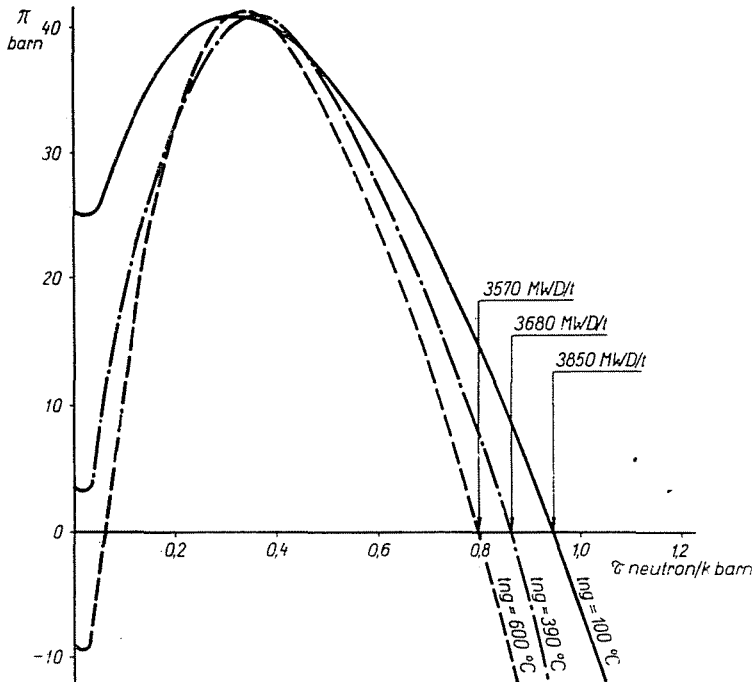


Abb. 6. Bestimmung des Ausbrandes (Q_0) aus der Produktivität (π) und aus der Bestrahlung (τ)

Unternehmen. Die Gründe sind vielseitig: Verschiedenheit der wirtschaftlichen Verhältnisse und der Finanzpolitik in den einzelnen Ländern, verschiedene Größe der Kraftwerke und der Blockeinheiten, ständige technologische und konstruktive Verbesserungen im Reaktor- und im Kraftwerksbau, verschiedenartige Bewertung der Sicherheitsfaktoren und vieles andere mehr. Um irgendeinen Zusammenhang zwischen Kreislaufanfangstemperatur und Wirtschaftlichkeitsfaktoren zu finden, müssen wir also den indirekten Weg beschreiten, d. h. uns zunächst auf die Untersuchung beschränken, welche Energiekostenfaktoren von der Kreislaufanfangstemperatur beeinflusst werden.

Beginnen wir mit dem Reaktor. Im Gegensatz zur Energieumwandlung im modernen Hochleistungsdampfkessel sind die reaktortechnischen Vorgänge, schon rein kernphysikalisch gesehen, temperaturabhängig. So ist

bereits die *Wahrscheinlichkeit der Spaltung* der Urkerne (Σ) von der Temperatur abhängig, und zwar im allgemeinen in dem Sinne, daß diese Wahrscheinlichkeit mit zunehmender Temperatur geringer wird.

Andererseits ist die Wärme, die der Volumeneinheit entnommen werden kann, wieder proportional dem *Neutronenfluß* (Φ), der seinerseits mit der Temperatur zunimmt. Nur sind die Verhältnisse keinesfalls in beiden Fällen gleich linear, so daß die für die Energieerzeugung maßgebende Wärmeleistung,

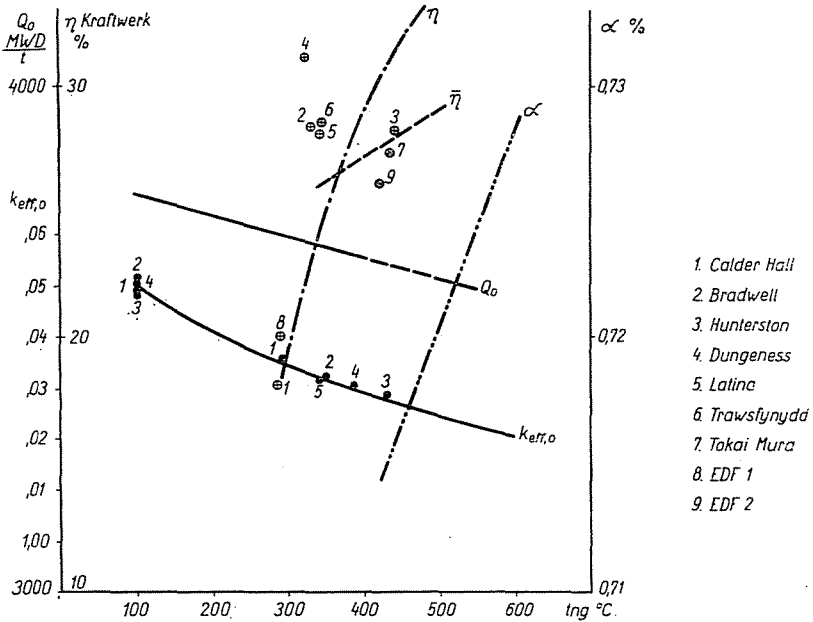


Abb. 7. Ausbrand (Q_0), Kraftwerkswirkungsgrad (η_{kr}), Multiplikationsfaktor ($k_{eff,o}$) und nötige Anreicherung (α) als Funktion der Neutronengastemperatur bei ausgeführten GGR-Reaktoren

die mit dem Produkt ($\Sigma \cdot \Phi$) verhältnismäßig ist, mit der Temperatur keinesfalls invariant bleibt.

Die gesamte je Masseneinheit des Kernbrennstoffes verfügbare Arbeit, das ist die Wärmemenge, die im Laufe einer längeren, von der Reaktorkonstruktion abhängigen Zeit von einigen Wochen bis einigen Jahren frei wird und schließlich in elektrische Energie umzusetzen ist, der sog. *Ausbrand* (Q_0 MWD/t), ist nach sorgfältigen, von uns durchgeführten Berechnungen in den mit Natururan betriebenen Gas-Graphit-Reaktoren eine Funktion der sog. Neutronengastemperatur. In der Abb. 6 ist als Resultat derartiger Untersuchungen der Ablauf der Produktivität (π) als Funktion der Bestrahlung (τ) aufgetragen, wobei als Parameter die Neutronengastemperatur (t_{ng}) dient. Der Endproduktivität $\pi = 0$ ist der erreichbare Ausbrand (Q_0) zugeordnet.

Wie ersichtlich, nimmt der Ausbrand — wenn auch nicht rasch, doch stetig — mit der Temperatur ab (s. auch Abb. 7).

Andererseits nimmt der *Wirkungsgrad* der Energieumwandlung vom Kühlgas bis zu den Generatorklemmen mit der Anfangstemperatur ziemlich rasch zu. In der Abbildung 7 ist außer dem Ausbrand (Q_0) auch der effektive Kraft-

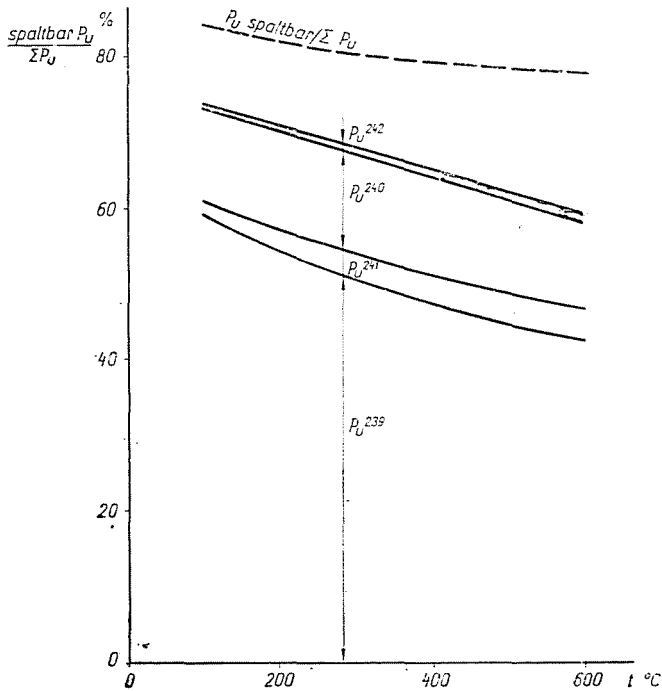


Abb. 8. Menge und Wertigkeit des Plutoniums in GGR-Reaktoren nach erreichtem Ausbrand in Funktion der Temperatur

werkswirkungsgrad aufgetragen, und zwar einmal der tatsächlich erreichte (η) und einmal der unter Ausschaltung sekundärer Einflüsse berechnete ($\bar{\eta}$). Die Abbildung enthält auch den effektiven Multiplikationsfaktor ($k_{eff,0}$) und die bei höheren Temperaturen nötige Anreicherung (α).

Ein Umstand, der bei den herkömmlichen Kraftwerken gänzlich fehlt, ist der Wert des bei den Atomkraftwerken entstehenden spaltbaren Plutoniums, (Abb. 8). Menge und Zusammensetzung, d. h. Wertigkeit dieses Plutoniums ist in den Atomkraftwerken wieder eine Funktion der Temperatur. Dies beeinflusst natürlich die Kalkulation der Energiekosten.

Viel wichtiger als diese ist aber die *Beeinflussung der Investitionskosten* des Reaktors durch die temperaturbedingten Konstruktionen und Baustoffe. Fügt man noch hierzu, daß in der heutzutage geradezu stürmischen Entwicklung der energetischen Kernreaktoren zu immer größeren Einheiten die

zahllosen Vereinfachungen in der Disposition, die Bewertung der Sicherheitsfaktoren usw. das Bild verwischen, ist es leicht zu verstehen, daß man heute im Kernkraftwerksbau noch keineswegs von einer so eindeutigen Entwicklungstendenz bezüglich der Anfangstemperatur sprechen kann, wie im normalen Kraftwerksbau.

Meine erwähnten Folgerungen, daß mit der Erhöhung der Anfangstemperatur eine Herabsetzung des Ausbrandes, der Wertigkeit des Plutoniums und gleichzeitig ein Ansteigen der spezifischen Investitionskosten verbunden ist, haben daher nur für eine, und zwar für die untersuchte Type der Gasreaktoren, und auch für diese nur in einem verhältnismäßig beschränkten Temperaturbereich — etwa bis zu einer Austrittsgastemperatur von max. 430° C — Geltung. Das ist auch die höchste Grenze, bis zu der man heute gasgekühlte Natururan-Reaktoren baut.

Der thermodynamisch bedingten allgemeinen Tendenz in Richtung zu einer Erhöhung der Anfangstemperatur entsprechen die in neuerer Zeit in England vorhandenen Bestrebungen, einen entscheidenden Schritt zur Annäherung an die in den herkömmlichen Kraftwerken benutzte Dampftemperatur von über 500° C zu machen. Dies geschieht, indem man als Brennstoff des Gas-Graphit-Reaktors nicht mehr natürliches, sondern leicht angereichertes Uran verwendet. Diese Reaktortype (AGR genannt) bildet die Grundlage des neuen Dungeness-B-Projektes. Bei diesem sind im Vergleich zu den gleichgroßen Reaktoren des als fortschrittlichst genannten Wylfa-Kraftwerkes der Natururan-Gas-Graphittype die spezifischen Investitionskosten von 124 L/kW auf 92 L/kW gesunken, während der Kraftwerkswirkungsgrad von 31,5% auf 41,5% und der spezifische Ausbrand von 4000 auf 18 000 MWD/t gestiegen ist. Selbst wenn man den 3,7fachen Preis des Kernbrennstoffes berücksichtigt, ergibt sich eine Senkung des Energiepreises von 0,63 d/kWH auf 0,46 d/kWH, d. h. um 27%. Dieser Energiepreis ist nach den offiziellen Angaben der englischen Kraftwerksverwaltung um 12% niedriger als im modernsten Kohlenkraftwerk (Cottam). Die Kühlgastemperatur beträgt bei diesem Reaktor bei Reaktorausritt 675° C und soll vor der Dampfturbine die Erzielung einer Frischdampftemperatur von 565° C ermöglichen, d. h. den praktischen Höchstwert im konventionellen Kraftwerksbau.

Aus diesen Ausführungen ergibt sich, daß man bei Atomkraftwerken die Frage der Grenzwirtschaftlichkeit nicht als Verhältnis des spezifischen Investitionskostenzuwachses zur spezifischen Wärmeverbrauchsabnahme auffassen darf, daß man vielmehr hier die Investitionsmehrkosten (Δa) den arbeitsabhängigen Energiemehrkosten (k_p) gegenüberstellen muß. Letztere sind vereinfacht als Produkt aus dem spezifischen Wärmepreis des Kernbrennstoffes (p_q) und dem spezifischen Wärmeverbrauch (q) aufzufassen [$\Delta(p_q \cdot q)$]. Sie alle sind ziemlich komplizierte und analytisch kaum erfaßbare Funktionen der Temperatur. Doch ergibt sich aus durchgerechneten Beispielen, die auf

verläßlichen Mitteilungen der englischen Kraftwerksbehörde beruhen, daß gegenüber dem gleichgroßen Atomkraftwerk Wylfa (Natururan, Kühlgas-temperatur 404 °C) bei Dungeness B (angereichertes Uran, Kühlgas-temperatur 675 °C) sowohl die spezifischen Investitionskosten als auch die arbeitsabhängigen Energiekosten mit der Temperatur abnehmen. Allerdings dürften hier auch Verbesserungen konstruktiver Art eine nicht unbedeutende Rolle spielen.

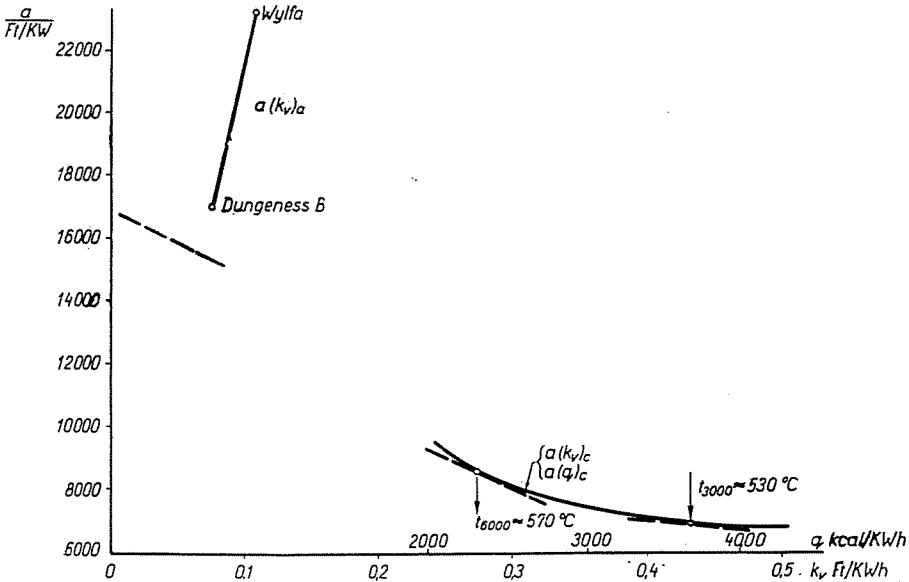


Abb. 9. Darstellung der Grenzwirtschaftlichkeit bei konventionellen und bei Atomkraftwerken

In der Abb. 9 sind für die beiden obengenannten Atomkraftwerke einerseits die spezifischen Investitionskosten (a) als Funktion der variablen Kosten (k_v) aufgetragen ($a/k_v/a$), anderseits — entsprechend der Abb. 1 — derselbe Zusammenhang für Kohlenkraftwerke ($a/k_v/c$, resp. $a/q/c$). Zu diesen Funktionen soll im Sinne der Ausführungen zu Abb. 1 der durch p_q dividierte Grenzwirtschaftlichkeitsfaktor (δ) errechnet und mit diesem Wert die Tangente an die $a(k_v)$ -Kurve konstruiert werden. Der Berührungspunkt ergibt den optimalen Ausbau, da dort $\frac{da}{dk_v} = \frac{\delta}{p_q}$ ist. Man ersieht aus Abb. 9, daß bei konventionellen Kraftwerken ein solches Optimum existiert. (Bei einer Jahresbenutzungsdauer von $t_{sp} = 6000$ h/Jahr etwa bei dem ablesbaren Wert von k_v , resp. q .) Bei den Atomkraftwerken sind dagegen heute beide maßgebende Faktoren noch im Abnehmen begriffen, d. h. von einem Optimum kann vorläufig noch nicht die Rede sein (siehe die zu t_{6000} parallele Linie bei den Atomkraftwerken).

Eines steht aber fest: Wegen der wesentlich niedrigeren arbeitsabhängigen Kosten der Atomkraftwerke werden diese mit höherer Jahresbenutzungsdauer gefahren werden und demzufolge von den konventionellen Kraftwerken Belastung übernehmen. Als Folge erhöhen sich einerseits die leistungsabhängigen Kosten der letzteren, andererseits — und dies ist vom Standpunkt unserer vorliegenden Untersuchung aus wichtiger — verschiebt sich die

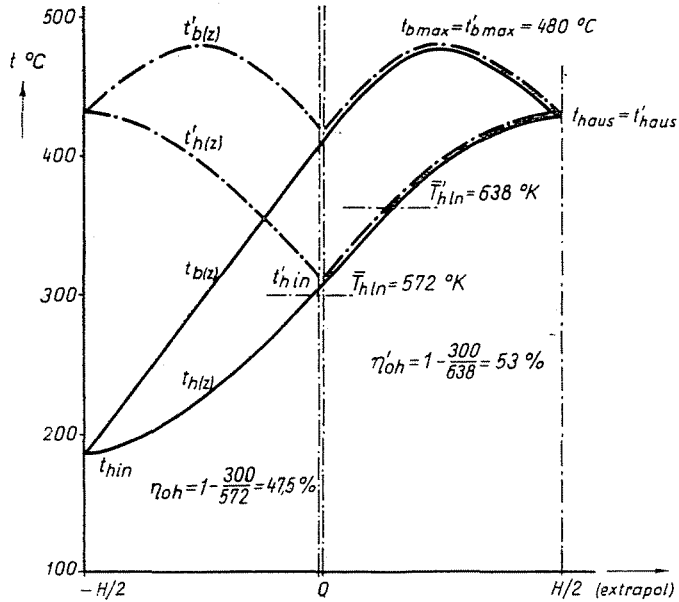


Abb. 10. Kühlgas- und Umhüllungstemperatur entlang der Brennstoffelemente bei Gasströmung in einer Richtung (volle Linien) und bei in der Mitte geteilter Strömung (strichpunktierte Linien)

Grenzwirtschaftlichkeit der konventionellen Kraftwerke in Richtung der niedrigeren Anfangstemperaturen, wie dies etwa für den Fall $t_{sp} = 3000$ h/Jahr ausgerechnet und in Abb. 9 aufgetragen wurde. Ein Grund mehr, die Kreislaufanfangstemperatur unserer heutigen neuen Kraftwerke nicht zu überziehen, da diese doch schon parallel mit Atomkraftwerken gefahren werden.

Auf dem Gebiete der *Thermodynamik der Kernreaktoren* zeichnen sich aber die Umriss einer Entwicklung ab, die möglicherweise auch auf die Frage der Grenzwirtschaftlichkeit einen entscheidenden Einfluß ausüben wird. Dies hängt mit der heute ganz unzulänglichen und — man kann es ruhig sagen — thermodynamisch unrichtigen Kühlung des Reaktors zusammen, wie dies an Hand eines durchgerechneten Beispiels für einen großen Natururan-Gas-Graphit-Reaktor erläutert werden soll (Abb. 10).

Als Folge der reaktorphysikalisch bedingten und praktisch unvermeidbaren ungleichmäßigen Neutronenflußverteilung in der Richtung (z) entlang

der Brennstoffelemente ergibt sich für den nicht reflektierten Reaktor die Erwärmung des Kühlgases im Kanal etwa nach der Linie $t_h(z)$ und die Temperatur der Brennstoffumhüllung nach der Linie $t_b(z)$. Soll im untersuchten Reaktor die Temperatur der Umhüllung den heute als Höchstgrenze angenommenen Wert von $t_{b\max} = 480^\circ \text{C}$ nicht überschreiten, dann ist es klar, daß der Brennstoff im Reaktor nicht überall gleich ausgenützt ist. Führt man die mittlere logarithmische Temperatur des Kühlgases ($t_{h,ln}$) ein und berechnet man mit dieser — idealisiert — nach der bekannten Formel den Carnot-Wirkungsgrad der Reaktorkühlung (η_{0h}), ergibt sich für diesen der niedrige Wert von 47,5% (Umgebungstemperatur 27°C). Würde man das Kühlgas in die Mitte, d. h. also in die heißeste Stelle des Reaktors einführen

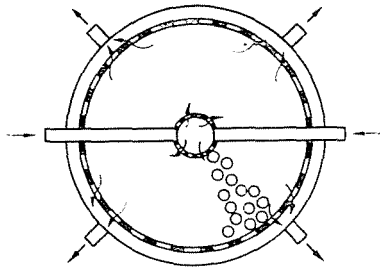


Abb. 11. Kugelhaufenbeschickter Kugelreaktor mit zentraler Gaseinführung (nach G. Büki)

und von dort aus nach beiden Richtungen strömen lassen (s. die strichpunktierten Linien in Abb. 10), ergäbe sich bei derselben zulässigen Umhüllungstemperatur ($t'_{b\max} = t_{b\max}$) und bei derselben Gasaustrittstemperatur ($t_{h\text{ aus}}$) ein Kühlungswirkungsgrad von 53%, also um 11,6% mehr, als im obigen, heute allgemein verwendeten Fall. Eine solche Lösung wurde beim ersten französischen plutoniumerzeugenden Reaktor (G1 genannt) verwendet, doch — wahrscheinlich wegen der damit verbundenen konstruktiven Schwierigkeiten — nicht mehr weiter verfolgt.

Verhältnismäßig leicht würde sich aber eine solche Lösung nach einem Vorschlag von Büki bei einem kugelförmigen, mit Kugelhaufen beschickten Reaktor verwirklichen lassen (Abb. 11). Der Kugelhaufenreaktor mit graphitumhüllten Kugeln aus angereichertem Urankarbid wird derzeit als Prototype in der Bundesrepublik Deutschland gebaut, allerdings in Form eines zylindrischen Reaktors (Typenbezeichnung AVR). Die Begrenzungstemperatur ist dabei durch den Brennstoff selbst bedingt und mit etwa 1870°C angegeben. Der Temperaturverlauf in Längsrichtung des erwähnten deutschen Reaktors ist in der nächsten Abbildung (Abb. 12) mit vollen Linien aufgetragen, u. zw. mit \bar{t}_h für das Kühlgas in einem durchschnittlichen vertikalen Faden des Reaktors, mit $t_{h\max}$ in der Achse der Zylinders und mit $t_{u\max}$ für den Brennstoff in der Achse des Zylinders. Kugelförmige Reaktoren sind, rein kern-

physikalisch gesehen, wegen der kleineren Neutronen-Austrittsverluste günstiger als zylindrische. Verwirklicht man in einem solchen Reaktor mit wahrscheinlich nicht allzugroßen Schwierigkeiten die Einbringung von Kugelhaufen und führt man das kalte Gas in der Mitte in eine Aushöhlung, deren Durchmesser etwa $1/5$ des Reaktordurchmessers beträgt, so ergibt sich das gestrichelt eingezeichnete Temperaturbild für das Kühlmittel längs des Radius und das ebenfalls aus der Abbildung ersichtliche Temperaturbild für den Brennstoff [wieder mit derselben Begrenzungstemperatur ($t_{u, \max}/\max$)]. Nur sind in

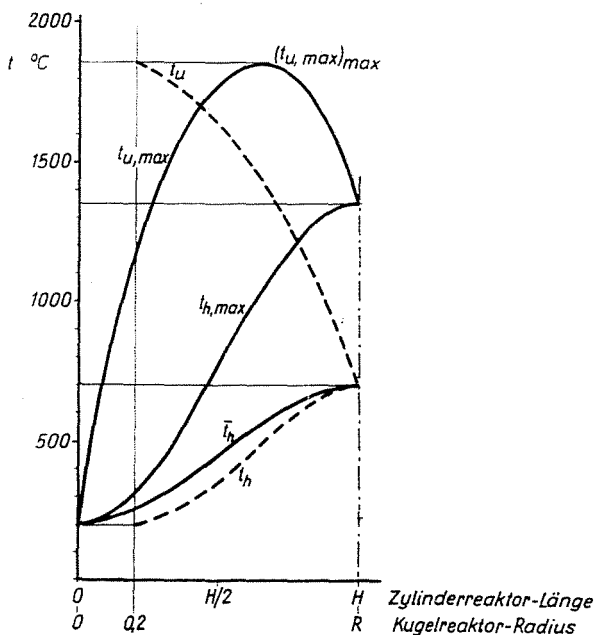


Abb. 12. Vergleich der Temperaturen im einseitig durchströmten Zylinderreaktor und in dem von der Mitte aus gekühlten Kugelreaktor (nicht reflektiert)

diesem Falle alle Richtungen, ausgehend aus dem hohlen Mittelraum des Reaktors, gleich, und es ist leicht einzusehen, daß der Brennstoff weit besser ausgenutzt ist als im vorangegangenen Fall. Aus demselben Brennstoff läßt sich nach überschlägigen Berechnungen etwa die doppelte Leistung herausholen wie beim vertikaldurchströmten zylindrischen Reaktor. Die Folge wäre eine Ermäßigung der Energiekosten um mindestens 50%. Aus dem bisher Gesagten kann also der eindeutige Schluß gezogen werden, daß sich dem Wärmetechniker bei Atomkraftwerken nicht nur in der Kreislaufanfangstemperatur, sondern auch in der Thermodynamik, im vorgeführten Beispiel in der Thermodynamik der Reaktorkühlung, noch sehr lohnende Aufgaben stellen.

Nochmals auf den Anfang dieser Ausführungen zurückkehrend, glaube ich feststellen zu dürfen, daß es selbst bei den heute schon so gut bekannten konventionellen Kraftwerken noch einiges zu tun gibt. Zugegeben, daß man die Kreislaufanfangstemperatur aus den erörterten Gründen heute nicht höher als 540—570° C wählen soll, ergibt sich dennoch die Frage, ob man diese Anfangstemperatur, für die das Kraftwerk projektiert und dimensioniert ist, bei allen Belastungen beibehalten muß. Will man die teuren Heizflächen des Überhitzers richtig ausnützen, ohne das Material einer Überbeanspruchung auszusetzen, ergibt sich, daß man die Anfangsdampf­temperatur bei Belastungen, die oberhalb der Auslegungslast liegen, wegen der notwendigen intensiveren Kühlung des Rohrmaterials herabsetzen könnte. Dem dadurch entstehenden Leistungsausfall je Einheit des Arbeitsmittels stünde aber eine Zunahme der Leistungsfähigkeit des Kessels gegenüber, so daß letzten Endes eine nicht vernachlässigbare Überlastbarkeit des Kraftwerkes entstehen könnte. Ein solches Grundlastkraftwerk, das bei der Auslegungslast und auch darunter mit dem heute erreichbaren besten Wirkungsgrad arbeitet, würde zusätzlich ein äußerst billiges, betrieblich außerordentlich bequem zu handhabendes Spitzenkraftwerk ergeben. Mit spezifischen Investitionskosten wäre diese Spitzenleistung bestimmt unvergleichlich geringfügiger belastet als jede andere Art von Spitzenkraftwerken.

Eine solche Arbeitsweise, d. h. eine Erhöhung der Kreislaufanfangstemperatur bei abnehmender Belastung, hätte bei Atomkraftwerken eine noch größere Bedeutung als bei konventionellen Kraftwerken, da der Unterschied zwischen der begrenzenden Temperatur (z. B. Spaltstoff) und Kühlmittel weit größer ist als im zweiten Fall derjenige zwischen Rohrwand und Dampf­temperatur. Die veränderlichen Parameter können also durch Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades im ersten Fall weit mehr zur Verbesserung der Thermodynamik der Arbeitsprozesse beitragen als im zweiten.

Ansätze dieser Art sind übrigens bei den konventionellen Kraftwerken schon heute bemerkbar, da man viele Kraftwerke derart auslegt, daß die Endtemperatur der regenerativen Speisewasservorwärmung bei Vollast durch Kunstsaltungen niedriger gehalten wird als bei der Auslegungslast. Es ergeben sich dadurch Spitzenleistungen in der Größenordnung von 12—15% mit einem annehmbar guten Wirkungsgrad.

Man könnte noch weitere Beispiele anführen, doch glaube ich, schon aus den bisherigen Ausführungen einige zusammenfassende Folgerungen ziehen zu dürfen. Es steht außer Zweifel, daß im konventionellen Dampfkraftwerksbau derzeit unbedingt eine Stagnation, ja, man kann es ruhig sagen, eher eine rückläufige Entwicklung in der Festlegung der Kreislaufanfangstemperatur zu verzeichnen ist. Der Grund hierfür liegt zweifelsohne in der heute noch mangelnden Wirtschaftlichkeit bei der Anwendung höherer Temperaturen.

Anders ist die Situation bei den Atomkraftwerken, bei denen — zumindest bei den gasgekühlten Typen — eine nicht unbedeutende Erhöhung der Anfangstemperatur noch wahrscheinlich erscheint. Wassergekühlte Reaktoren dagegen sind in der Temperatur sozusagen festgehalten. Der Nutzen der fossilen oder nuklearen Überhitzung ist noch nicht eindeutig geklärt, da die ersten derartigen Atomkraftwerke erst gebaut oder in Probetrieb sind (so z. B. in Belojarsk in der Sowjetunion bei dem wassergekühlten Grafitreaktor mit nuklearer Überhitzung). Zwischenüberhitzung mit Frischdampf kommt nur bei entsprechend hoher Anfangstemperatur, d. h. bei gasgekühlten Reaktoren in Frage.

Parallel mit der Tendenz zur Erhöhung der Anfangstemperatur wird in Atomkraftwerken die thermodynamische Verbesserung der Reaktorkühlung angestrebt, eine Entwicklung, die auch auf die konventionellen Dampfkraftwerke ihre Rückwirkung zu zeigen beginnt, wie es auch im allgemeinen gewiß ist, daß sich die beiden derzeit wichtigsten Bauarten der Großkraftwerke, also die konventionellen und die Atomkraftwerke, gegenseitig beeinflussen werden. Diese Beeinflussung reicht über das kraftwerkssystemtechnische und wirtschaftliche hinaus tief in den Bereich der technologischen und konstruktiven Details. Die Kreislaufanfangstemperatur, die den Gegenstand meines heutigen Vortrages bildete, war nur ein Beispiel dafür.

Zusammenfassung

Unter gewissen vereinfachenden Annahmen läßt sich heute bei konventionellen Wärmekraftwerken die obere Grenze der wirtschaftlichen Anfangstemperatur mit 540–570° C eindeutig festlegen. Im Atomkraftwerksbau mit den bewährten Typen ist derzeit ebenfalls eine — durch die Technologie bedingte — Stagnation in der Tendenz zur Erhöhung der Dampftemperatur bemerkbar. Prototypen- und Erstaufstellungen versuchen hingegen, diese Schranken zu durchbrechen, wobei die Wirtschaftlichkeit — wenigstens bei der näher untersuchten AGR-Type — eindeutig verbessert wird.

Im Gegensatz zu den normalen Wärmekraftwerken ist die Grenzwirtschaftlichkeit noch nicht erreicht. Durch Eingriffe in die Reaktorkühlung und durch Änderungen in der Betriebsart der Atomkraftwerke ließe sich eine thermodynamisch weit bessere Ausnutzung der Temperaturschranken erreichen.

Literatur

- LÉVAI, A.: Stand und Aussichten der Kernenergienutzung (ungarisch). *Energia és Atomtechnika* 4, (1965).
 LÉVAI, A.: Efforts to raise temperatures in conventional and nuclear power stations (*Acta Technica Hung.* 50, 1965).
 An Appraisal of the Technical and Economic Aspects of Dungeness B Nuclear Power Station (Public Relations Branch of the Central Electricity Generating Board, London, 1965).
 BÜKI, G.: Über die thermodynamischen Grundlagen der Reaktorkühlung. *Periodica Polytechnica*. (1962).

Prof. Dr. András LÉVAI, Budapest XI., Műgyetem rkp. 3. Ungarn.