

NUKLEARE UND KONVENTIONELLE HEIZKRAFTWERKE

Von

A. LÉVAI

Lehrstuhl für Wärmekraftwerke, Technische Universität Budapest

1. Einleitung

In der Entwicklung der Heizkraftwerke für die Versorgung kommunaler und industrieller Heizungs- und Lüftungsaufgaben ist eine weltweite und rasche Zunahme zu verzeichnen. Bezeichnend hierfür ist, daß gemäß einer Analyse der Weltenergiekonferenz [1] in den Jahren 1961 bis 1966 die durch Fernwärmeversorgung gelieferte Heizenergie in 21 untersuchten Ländern um jährlich 15—20% zugenommen hat, während die Zuwachsrates der elektrischen Energieversorgung in der Größenordnung von 7—10% pro Jahr liegt. In der Sowjetunion, die im Ausbau der Fernwärmeversorgungssysteme an der Spitze steht, werden 48% des gesamten Wärmebedarfes aus Heizkraftwerken geliefert, welche 32% der gesamten elektrischen Energielieferung des Landes bzw. 40% der in den Wärmekraftwerken erzeugten elektrischen Energie produzieren. Allein in der Sowjetunion werden heute 780 Städte ferngeheizt. (Im erwähnten WEK Bericht sind neben Moskau 220 andere Städte außerhalb der Sowjetunion untersucht.)

Die Gründe dieser raschen Entwicklung sind naheliegend:

— die Fernheizung ist unter allen Heizungsarten vom Standpunkt der Bewohner betreffs Hygiene, Bequemlichkeit usw. unübertreffbar;

— die allgemeine Umweltverseuchung ist im Falle einer richtigen technischen Lösung (Konzentration in große Einheiten, hohe Kamine, Disposition womöglich fern von der Stadt) weitaus am geringsten;

— die richtig angewendete Wärme-Kraft-Kopplung kann Energieersparnisse in der Größenordnung von 25—30% bringen;

— der Massenwohnbau mit vorfabrizierten Bestandteilen läßt kaum eine andere Heizungsart als die Zentralheizung zu.

Die bis heute gebauten Heizkraftwerke werden beinahe ohne Ausnahme mit konventionellen Energieträgern betrieben. Außer einigen ganz kleinen Einheiten in den Vereinigten Staaten und in der Sowjetunion von 1—2 MW für ganz besondere Zwecke, arbeitet derzeit — immerhin bereits seit 1964 — nur in Schweden das nukleare Heizkraftwerk Ågesta mit einer Kapazität von

12 MW über 40 000 Betriebsstunden und mit sehr günstigen Betriebserfahrungen. Industrielle Kernkraftwerke, hauptsächlich zur Entsalzung von Meerwasser, sind im Bau in der Sowjetunion, in den Vereinigten Staaten, in Israel, Frankreich, usw.

Heutzutage, wo einerseits die für das Errichten eines nuklearen Heizkraftwerkes unumgänglich notwendige Konzentration in vielen Städten der Welt vorhanden ist, andererseits sich die — noch auf die Zeiten der Atombomben zurückzuführende und verständliche — Zurückhaltung der Bevölkerung gegenüber allem, was mit Kernenergie in Verbindung steht, abzubauen beginnt, werden die Bedingungen für die Errichtung von nuklearen Heizkraftwerken immer günstiger.

Es ist auffallend, daß Schweden bis 1980 nukleare Heizkraftwerke mit einer Gesamtkapazität von 1000—1800 MWe zu bauen beabsichtigt [2]. In der Sowjetunion liegt die vorgesehene Kapazität ebenfalls zwischen 1000—2000 MWe [3], in der Bundesrepublik Deutschland sollen nach 1975 2—3 industrielle Kernkraftwerke von je etwa 600 MWe errichtet werden. In den Vereinigten Staaten hört man über Projekte zur Fernheizung von New York und für Industrieanlagen. In der Tschechoslowakei beschäftigt man sich mit Plänen zur Fernheizung von Prag und Brünn [4].

Größter Vorteil der nuklearen Fernheizung ist die theoretisch überhaupt erreichbare maximale Reinhaltung der Luft. Dazu kommt die in den meisten Ländern der Welt infolge einer größeren Unabhängigkeit von den Rohöl- bzw. Erdgaslieferungen ausdrücklich gewünschte Elastizität in der Auswahl der Energieträger. Nicht zu unterschätzende Nachteile sind aber neben der bereits erwähnten psychologischen Beeinflussung der Bevölkerung auch die verlangte zusätzliche Sicherheit und die heute noch thermodynamisch niedrigeren Anfangsparameter des nuklearen Heizkraftwerkes. Allerdings sind dies Nachteile, die in die wirtschaftliche Betrachtung miteinbezogen werden können. Für die Sicherheit, mit welcher man heute Kernkraftwerke in dicht besiedelten Gegenden disponiert, ist u.a. das englische Großkernkraftwerk Hartlepool (1200 MWe) bezeichnend, wo in einem Umkreis von 10 Meilen rund 250 000 Menschen wohnen [5]. Eine ähnliche Situation ist beim englischen Kraftwerk Heysham (150 000 Menschen in einem Umkreis von 5 Meilen).

2. Prinzipielle Grundlagen und Schaltungen

Zusammenfassend soll vorweggenommen werden, daß nachstehende grundlegenden Bedingungen im Falle der Errichtung eines Fernheizkraftwerkes erfüllt werden müssen:

— wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit mit den neuen großen Kondensationskraftwerken sowohl hinsichtlich der thermischen Parameter wie auch der Einheitsleistungen, Betriebssicherheit usw.;

— die elektrische Leistungsfähigkeit soll dem kooperierenden Kraftwerkssystem jederzeit mit genügender Sicherheit zur Verfügung stehen;

— das Fernheizwerk soll gegenüber unvorhergesehenen Änderungen im zeitlichen Ablauf oder in der geographischen Verteilung des Heizbedarfes eine notwendige Elastizität aufweisen;

— das Heizkraftwerk muß Ersparnisse und Erleichterungen in der nationalen Energiewirtschaft bringen;

— die gegenüber anderen Lösungen meistens notwendige größere Investition muß durch die Ersparnisse in vernünftiger Zeit aufgewogen werden.

Nachstehend werden solche Schaltungen von Heizkraftwerken gezeigt, die allen obigen Forderungen gerecht werden. Anschließend werden auch die energetischen Kennziffern dieser Lösungen auf Grund eingehender Untersuchungen mitgeteilt.

a) Konventionelle Heizkraftwerkseinheit

Abb. 1 zeigt das Wärmeschema eines Heizkraftwerkblockes mit einer nominellen elektrischen Leistungsfähigkeit von 215 MWe für eine Wärmeleistung von 316 Gcal/h. Die Anzapf-Kondensationsheizturbine hat prinzipiell denselben Aufbau, wie die reine Kondensationsturbine derselben Leistung. Bloß die Drosselklappen in den Überführungsleitungen bedeuten zusätzliche Einrichtungen. Der Kessel von 670 t/h ist mit Ausnahme geringer Änderungen

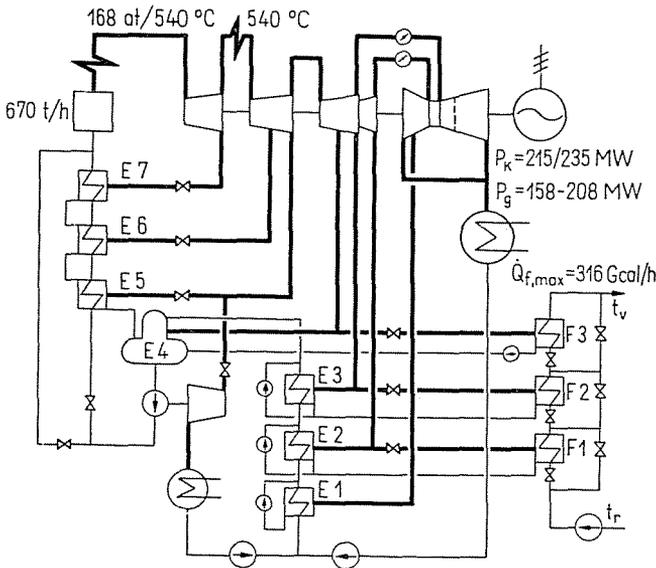


Abb. 1. Wärmeschaltbild des konventionellen Heizkraftblocks

am Economiser unverändert gegenüber dem Kondensationskraftwerk. Dem übrigen unveränderten Speisewassersystem ist in den Niederdruckstufen die dreistufige Vorwärmung des Heizwassers parallelgeschaltet.

Mit einer solchen Einheit kann das Wärmebedarfsdiagramm des Heiznetzes sehr günstig gefahren werden, falls etwa 50% des Heizspitzenbedarfes durch gasbeheizte, zentral angeordnete Heißwasserkessel direkt in das Heiß-

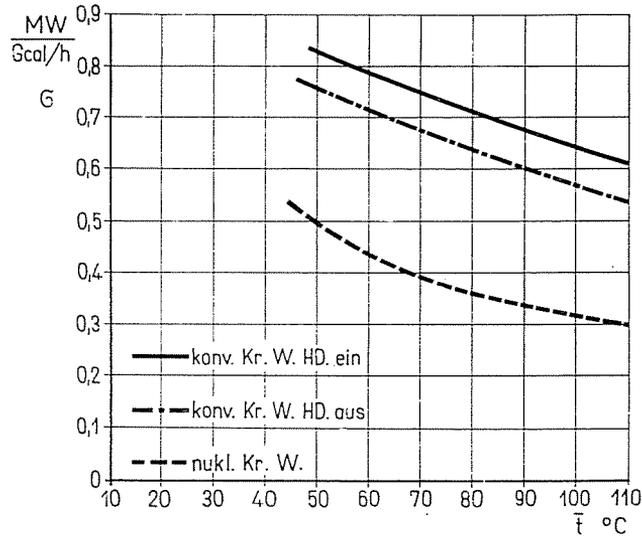


Abb. 2. Energiewirtschaftskennziffer

wassersystem eingespeist werden. Die hohen Parameter des Kraftwerkes (identisch wie im Kondensationskraftwerk), Wegfall der Regelungsverluste, Elastizität in der Lieferung von Wärme und Strom (kurzzeitige Ausschaltung der Wärmelieferung zur Zeit der elektrischen Spitze und voran- respektive nachgehende Zusatzheizung des Systems durch die Turbinenanzapfungen), Versorgung von zusätzlichen Spitzen bis zu 235 MWe in der Strom- resp. in der Wärmelieferung durch Ausschaltung der Hochdruckvorwärmer, usw. lassen alle vorangeführten prinzipiellen Bedingungen erfüllen. Dadurch, daß der größte Teil (etwa 65—70%) der elektrischen Energieerzeugung im Gegen- druckverfahren geschieht, sind sehr günstige energetische Kennziffern der Schaltung zu erreichen. In Abb. 2 sind als Funktion der mittleren Temperatur $\left(\bar{t} = \frac{t_v + t_r}{2}\right)$ des Heizsystems für einen konkret durchgerechneten, den durchschnittlichen ungarischen Verhältnissen entsprechenden Fall die Energiewirtschaftskennziffern (auf die Einheit der Wärmeleistung bezogene elektrische Leistung, σ , MW/Gcal/h) dargestellt. Die vollausgezogene Linie entspricht dem Zustand mit eingeschalteten, die strichpunktierte dem mit ausgeschalteten

HD-Vorwärmern. Kennziffern in der Größenordnung von 0,6—0,8 sind in der Wärme-Kraft-Kopplung als äußerst günstig zu bezeichnen.

Im reinen Gegendruckbetrieb leistet der Block je nach Außentemperatur 158—208 MW, ein Umstand, auf welchen beim Wirtschaftsvergleich im Punkt 3 noch zurückgegriffen wird.

b) Nukleare Heizkraftwerkseinheit

Die Schaltung gemäß Abb. 3 gehört zu einem leichtwassermoderierten Druckwasserreaktor von 500 MWe, dem zwei Dampfturbinen von nominell je 244 MWe zugeordnet sind. Der Dampfdurchsatz einer Turbine beträgt 1405

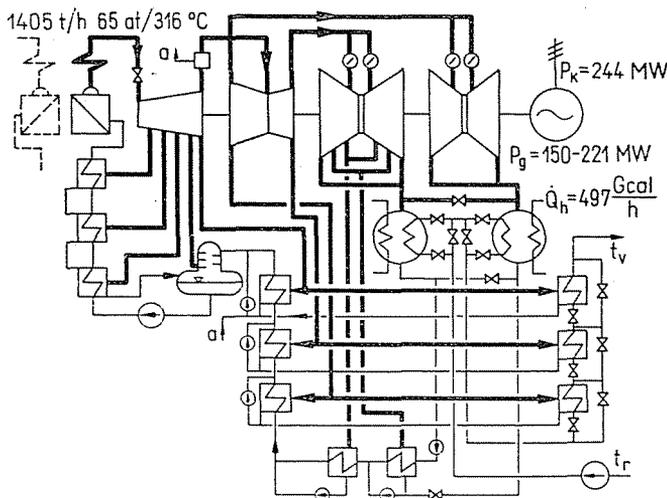


Abb. 3. Wärmeschaltbild des nuklearen Heizkraftwerkes

t/h mit den Frischdampfparametern 65 at, 316 °C. Die abgegebene Wärmespitze pro Einheit ist rund 500 Gcal/h. Der niederen Dampfparameter und der großen Wärmeleistung zufolge ist der Aufbau der ND-Turbinen von denen in der reinen Kondensationsanlage verschieden (die zwei doppelflutig angeordneten ND-Gehäuse werden vom MD-Teil mit Dampf verschiedenen Druckes versorgt). Die beiden Kondensatoren sind mit je zwei Rohrsystemen versehen, welche neben der normalen auch die Kühlung mit dem Rücklaufwasser des Heizsystems ermöglichen. Die reine Gegendruckleistung schwankt zwischen 150 und 221 MWe.

Bei Beibehaltung der für den konventionellen Block erwähnten Vorteile ergibt sich gemäß Abb. 2 selbstredend eine niedrigere Energiewirtschaftskennziffer, was aber noch keinesfalls die Unwirtschaftlichkeit dieser Lösung bedeutet.

3. Vergleichende Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

Um miteinander vergleichbare Lösungen untersuchen zu können, muß man das Problem auf die nationalwirtschaftliche Basis stellen. Dies bedeutet, daß die Konsumenten, d. h. die gesamte Nationalwirtschaft, jederzeit — unabhängig von der gewählten Lösung — die von ihnen verlangte Leistung sowohl an Strom wie auch an Heizwärme erhalten. Die Jahreslieferungen an elektrischer resp. Wärmeenergie müssen auch dieselben sein. Die Resultate vorliegender Untersuchung sind unter Zugrundelegung der oben beschriebenen Heizkraftwerke einerseits und unter Annahme zeitgemäßer Kondensationskraftwerke und zentralisierter Heißwasserkessel andererseits errechnet worden. Die direkte Heizung der einzelnen Wohnungen mit Öl oder Gas ist außer acht gelassen, da bei einer solchen Lösung weder die Massenwohnbauten aus Fertigteilen mit Wärme versorgt werden können, noch eine solche Lösung in großem Maßstab vom Standpunkt des Umweltschutzes aus zulässig ist. Um die fehlende elektrische Leistung der Heizkraftwerke zur Zeit der elektrischen Spitze dem Energiesystem zur Verfügung zu stellen, wurde angenommen, daß diese als entsprechender Anteil eines Gasturbinenspitzenkraftwerkes in Rechnung gestellt wird. Es stehen also einander gegenüber:

- normale Kondensationskraftwerke, Heizwärmelieferung aus Heißwasserkesseln;
- konventionelle Heizkraftwerke mit ergänzenden Heißwasserkesseln und entsprechendem Anteil an Spitzenkraftwerken;
- nukleare Heizkraftwerke mit Ergänzungen wie oben.

Unter Annahme der in Ungarn derzeit üblichen Investitionskosten und Brennstoffkosten wurde eine nationalökonomische Kennziffer errechnet, welche angibt, wie oft die Aufwendungen der Investition innerhalb von 15 Jahren aus dem Nettoeinkommen der Gesellschaft rückerstattet werden. Ohne die absolute Zahl dieser Kennziffer zu nennen, sei angeführt, daß falls diese für die Lösung mit gasgefeuerten Kondensationskraftwerken und gasgefeuerten Heißwasserkesseln 1,0 beträgt, dieselbe für konventionelle Heizkraftwerke mit den entsprechenden Zusatzeinrichtungen — wie oben angeführt — 1,38 und für nukleare Heizkraftwerke und Zusatzeinrichtungen 1,36 ist. D. h. mit anderen Worten: die Amortisationszeit für ein Heizkraftwerkssystem ist um 36—38% kürzer, als für die getrennte Erzeugung von Wärme- und elektrischer Energie.

Zu obigen Daten sei ergänzend bemerkt:

- es sind immer alle Kosten (sowohl investitions- wie auch betriebsmäßig) vom Kraftwerk bis zum Abnehmer berücksichtigt;
- die etwas geringere Wirtschaftlichkeit der nuklearen Lösung gegenüber der konventionellen ergibt sich aus der Wahl des vorhandenen Reaktortyps PWR;

— das Hinzufügen von Industrieverbrauchern würde die Wirtschaftlichkeitskennziffer nicht unbedeutend erhöhen.

Es sei dazu noch bemerkt, daß der manchmal laut werdende Einwand, wonach Heizkraftwerke schon deshalb an Bedeutung verlieren, da der Unterschied zwischen dem spezifischen Wärmeverbrauch eines Kondensations- resp. Gegendruckkraftwerkes immer geringer wird, ist — wenn man die Sache

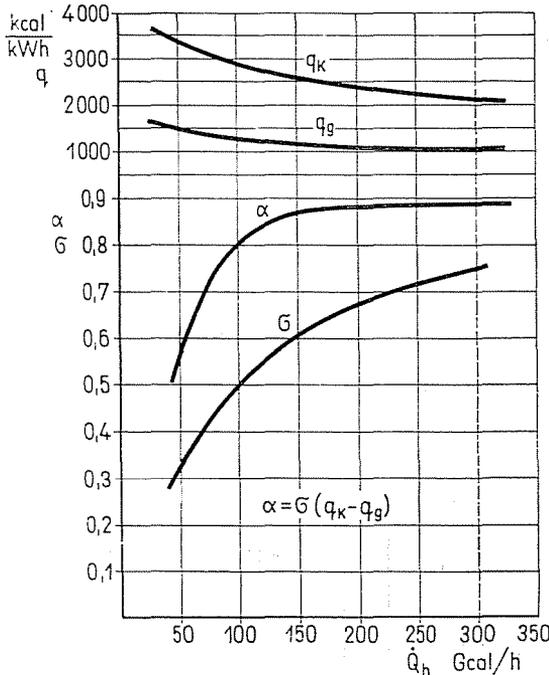


Abb. 4. Kennziffer der Kraft-Wärme-Kopplung für konventionelle Heizkraftblöcke

genauer verfolgt — nicht vertretbar. Werden nämlich im Heizkraftwerk — ähnlich wie im Kondensationskraftwerk durch die Konzentration in große Einheiten — zeitgemäße Parameter für die Anfangsdampfzustände gewählt, so wird durch die Zunahme der energiewirtschaftlichen Kennziffer auch die Ersparnis zunehmen. In Abb. 4 sind als Funktion der abzugehenden Wärmeleistung (Q_n , kcal/h), welche gleichzeitig die Größe des Kraftwerkblockes veranschaulicht (bei Kondensationskraftwerken immer dieselbe Größe vorausgesetzt), einerseits die spezifischen Wärmeverbrauchszahlen (q_k und q_g in kcal/kWh), andererseits die bereits erwähnte Energiewirtschaftskennziffer (σ) (in diesem Fall nur für die konventionelle Lösung) errechnet. Das Produkt (α) aus der Differenz der spezifischen Wärmeverbrauchszahlen und der Energiewirtschaftskennziffer, welches für die Beurteilung der energetischen Wirt-

schaftlichkeit maßgebend ist, steigt — wie aus der Abbildung ersichtlich — eindeutig mit zunehmender Größe der Heizkraftwerkblöcke bis etwa 200 Gcal/h und bleibt nachher auf derselben Höhe. Dieses Produkt besagt, daß im Falle der Wärme-Kraft-Kopplung über 80% des Wärmeverbrauches der im Gegendruck abgegebenen Heizwärme als Ersparnis auftreten.

4. Aussichten der Fernwärmeversorgung aus Heizkraftwerken

Die in der Einleitung angeführten Vorteile und die Möglichkeit der Erfüllung der in Punkt 2 angeführten prinzipiellen Grundlagen der Fernwärmeversorgung lassen eine weitere und immer raschere Zunahme dieser zeitgemäßen Versorgungsart der Konsumenten mit Heizwärme voraussehen. Die weitere Entwicklung des Systems wird wahrscheinlich in jener Richtung liegen, daß man die Heizkraftwerke in größere Entfernungen von den Siedlungen disponieren wird. Dies auch mit dem Zweck, die zusätzliche Belastung der Umluft mit Rauchgasen, welche aus dem nicht allzu weitläufigen, aber doch vorhandenen Kondensationsbetrieb der Heizkraftwerke entstehen, auszuschalten.

Eine technisch und wirtschaftlich einwandfreie Lösung dieser Aufgabe läßt sich durch das sog. Einrohrsystem gemäß der Prinzipskizze in Abb. 5

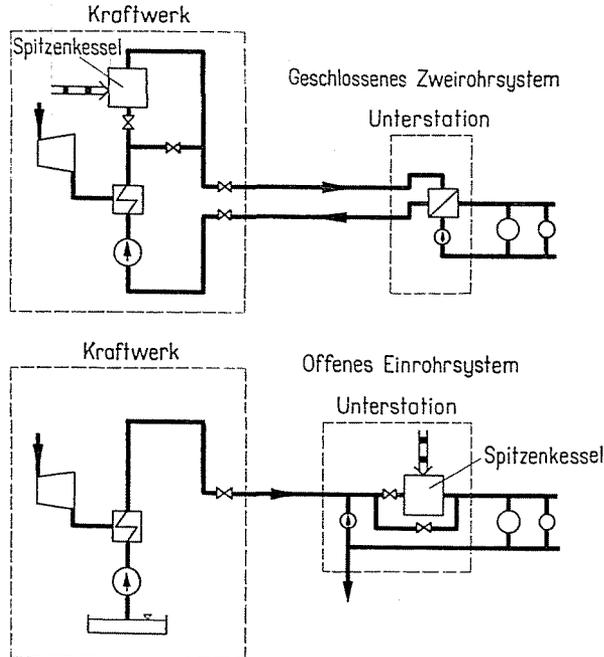


Abb. 5. Prinzipielle Schaltung von Ein- und Zweirohrsystem

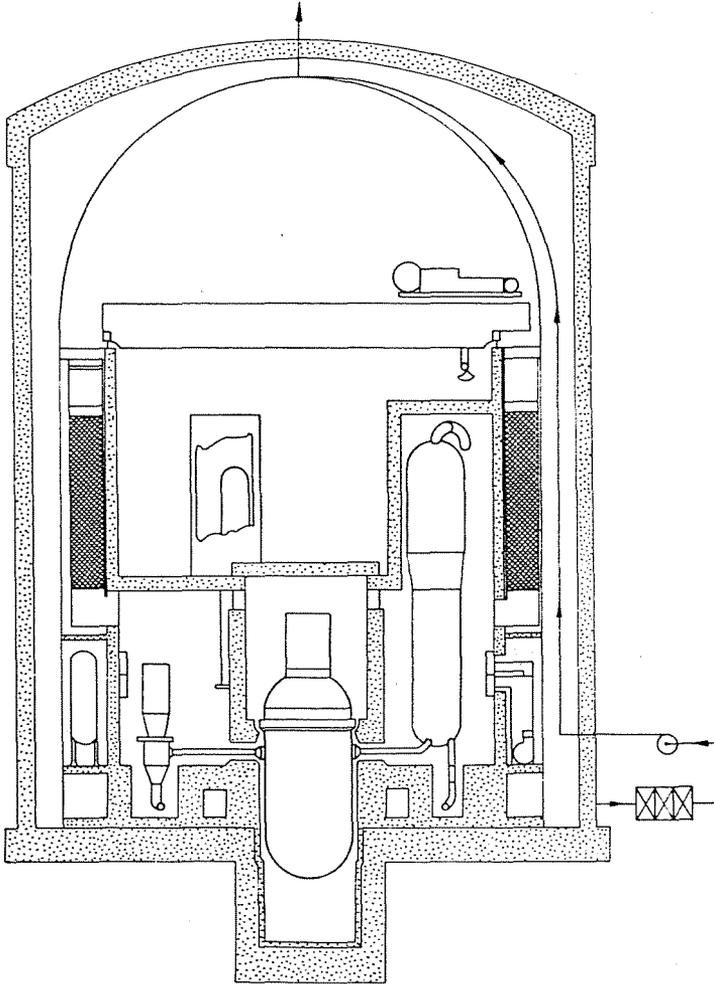


Abb. 6. Reaktorcontainer mit Eiskondensier

verwirklichen. Solche Lösungen sind in der Sowjetunion praktisch erprobt und im Bau [6]. Es läßt sich in diesem Falle das Kraftwerk ohne weiteres in eine Entfernung von 25—30 km und darüber vom Schwerpunkt der Verbraucher anordnen, was einschneidende Vorteile bzw. Reinhaltung der Luft mit sich bringt.

Das Einrohrsystem hat auch betriebliche Vorteile. Das in den Wärmetauschern der einzelnen Häuserblocks abgekühlte Heizwasser wird in das Gebrauchswarmwassersystem der Verbraucher eingespeist und im offenen Anschluß verwendet. Dadurch wird die oft schwierige Wasserbilanz der Großstädte erleichtert, die unangenehmen Korrosionserscheinungen der Warm-

wasserapparate entfallen und es werden nicht unbedeutende Ersparnisse an Installationsarbeit und Material erreicht.

Das System verlangt selbstredend eine womöglich gute Ausgeglichenheit des Heiz- und Warmwasserbedarfes, was nicht allzu leicht zu erzielen ist; ferner im Sommer einen möglichst totalen Verbrauch des gesamten Warmwassers, zusätzliche Wasseraufbereitungsanlagen im Heizkraftwerk um die Trinkwasserqualität des Wassersystems zu gewährleisten usw. Trotzdem scheint diese Lösung gute Aussichten für die Zukunft zu zeigen.

Ganz entschieden kommen diese Vorteile zum Vorschein, wenn das Heizkraftwerk in nuklearer Lösung errichtet wird. Bedenken, welche heute noch vielerorts gegenüber der Errichtung von Kernkraftwerken in der Nähe von großen Siedlungen laut werden, können z. B. durch die Anordnung von sog. Eiskondensern um den Reaktor etwa gemäß Abb. 6 in absolut einwandfreier Weise beantwortet werden [7].

Aber selbst in der Ausführung mit konventionellen Methoden, d. h. im Zweirohrsystem, haben die Kernkraftwerke in der Heizwärmeversorgung ausgezeichnete Aussichten. Heutzutage, als die Technologie der Kernkraftwerke — zumindest mit thermischen Reaktoren — als vollkommen beherrscht angesehen werden kann, treten ihre Vorteile in den Großstädten eindeutig hervor (Reinhaltung der Luft, Wegfall der Transportprobleme der Energieträger).

Kernkraftwerke haben heute im allgemeinen eine jährliche Zuwachsrate, die etwa 2—3mal so groß ist wie die der konventionellen. Ihr Kernbrennstoff ist durch die Entwicklung der Brütersysteme und durch Einbeziehung der minderwertigeren Erze und anderer Vorkommen (Meerwasser) auf praktisch unbegrenzte Zeit gesichert. Es erscheint sehr wahrscheinlich, daß die heute in weltweiten Maßstäben aufgegriffene Frage des Umweltschutzes zukünftig andere Lösungen als die Fernheizung mit nuklearer Energie einfach ausschalten wird. Diese Entwicklung wird voraussichtlich nicht allzulange auf sich warten lassen, da die technischen und wirtschaftlichen Bedingungen dafür entweder schon vorhanden sind oder sich zumindest klar abzeichnen beginnen.

Zusammenfassung

Kernkraftwerke hatten ihren Anwendungsbereich bis zur Zeit fast ausschließlich in kooperierenden elektrischen Energiesystemen, da nur hier die Grundbedingung einer wirtschaftlichen Anlage, d. h. die entsprechende Größe des vorgesehenen Kraftwerks gegeben war. Neuerdings wird durch die zentralisierte kommunale Heizwärmeversorgung der ausgedehnten großstädtischen Wohnsiedlungen auch eine Konzentration ermöglicht, die der zweckmäßigen Größenordnung von Kernkraftwerken entspricht.

Die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit erfordert, daß die gekoppelte Heizwärme- und Stromerzeugung auf dem Stand der großen Kondensationskraftwerke mit den modernsten energetischen Kennwerten und zufriedenstellender Betriebssicherheit erfolgt.

Das Heizkraftwerk muß einen organischen Teil des Landeskraftwerkbauprogramms bilden. Zur Befriedigung dieser Forderungen sind besondere Schaltungen notwendig, wobei auch Ansprüche und zeitlicher Verlauf der Fernheizung berücksichtigt werden müssen.

Im Vortrag werden auf der Grundlage eines Stadtteils (etwa 250 000 Wohnungen) mit einem Heizspitzenbedarf von 2000 Gcal/h die Fernheizmöglichkeiten mit Hilfe

- eines erdgasbeheizten Heizkraftwerks,
- eines nuklearen Heizkraftwerks des Typs PWR und
- mehrerer erdgasbeheizten Heizwerke

verglichen.

Um die Systemeinflüsse zu berücksichtigen, werden für jede Variante Ausführungen untersucht, welche auf gleicher volkswirtschaftlicher Basis stehen. Da die Heizwärmeversorgung von vornherein als gleich angesetzt wurde, ist bei den ersten zwei Varianten der Ausgleich der elektrischen Leistungsfähigkeit und Energie durch Spitzenkraftwerke erforderlich

Literatur

1. La situation du chauffage urbain dans le monde (WEC Rep. 1968).
2. BERGSTRÖM, S. O. W. et al.: Combined nuclear heat and power production in Sweden and related safety problems. Fourth United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, Switzerland, 6—16 September, 1971 (A/CONF.49/P/311).
3. SOKOLOV, E. J.: Situation und Aussichten der Wärmeversorgung in der Sowjetunion (russisch). Elektritscheskie Stanzii 4 20 (1970).
4. BERANEK, J. et al.: Nuclear power plants siting in the Czechoslovak Socialist Republic. Fourth United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, Switzerland, 6—16 September, 1971 (A/CONF.49/F/543).
5. Hartlepool Power Station — Nuclear Engineering International, 1969 November, p. 714.
6. Telethermics (World Energy Conference), Report given in 1971 by the ad hoc Committee on Large Scale Transportation of Heat over Long Distances.
7. WRIGHT, J. H., DAVIS, O. H.: Perspective of environmental problems associated with nuclear power plants. Nuclear Engineering International, 15, 617 (1970).

Prof. Dr. András LÉVAI, Budapest II, Fillér u. 56, Ungarn