Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 68 (1977)

Heft: 16

Artikel: Energiewirtschaftliche Aspekte der Wärmenutzung aus Kernkraftwerken

Autor: Winkens, H. P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915057

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: 16.07.2025

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

Energiewirtschaftliche Aspekte der Wärmenutzung aus Kernkraftwerken [1])

Von H. P. Winkens

662.99 : 621.311.25 : 621.039

1. Vorbemerkung

Fragen der zukünftigen rationellen Energieverwendung, der Umweltentlastung und der Verbesserung der Beschäftigungsstruktur haben in der öffentlichen Diskussion der letzten Monate einen hohen Stellenwert erhalten. Die politische Willensbildung in dieser Richtung nimmt zunehmend klarere Formen an. Im Rahmen dieser Diskussion hat die Fernwärmeversorgung grosse Bedeutung erhalten. Das hierzu von der Regierung der Bundesrepublik Deutschland in Auftrag gegebene umfangreiche Studienwerk ist kürzlich fertiggestellt worden. Die Kurzfassungen der Gesamtstudie [1] [2]) und der vier Planstudien [2] werden in wenigen Wochen gedruckt vorliegen.

2. Gesamtstudie über Fernwärme

Der besondere Wert dieser Studien ist darin zu sehen, dass sie sich nicht auf allgemeine Feststellungen und Zukunftsvisionen beschränken konnten, sondern auf Grund der örtlichen Verhältnisse (Wärmeatlas) und auf Grund von wirtschaftlichen Überlegungen aufzuzeigen hatten, wie und in welchem Umfang ein forcierter Ausbau der Fernwärmeversorgung zu bewältigen ist. In dieser konkreten Frage- und Aufgabenstellung lagen auch die besonderen Schwierigkeiten, auf die komplexen Tatbestände in der Diskussion klare Antworten zu finden.

Der durch die Verwirklichung des aufgezeigten forcierten Ausbaues der Fernwärmeversorgung in der Bundesrepublik Deutschland eintretende volkswirtschaftliche Nutzen lässt sich wie folgt kurz umreissen:

1. Energieeinsparung durch Verminderung des Primärenergieeinsatzes und durch Substitutionen (im wesentlichen von Heizöl extra-leicht) 12...19 Mio tSKE/a (SKE = Steinkohleneinheiten),

[1]) Vortrag, gehalten anlässlich der SEV/VSE-Informationstagung über «Wärmenutzung aus Kernkraftwerken» am 28. Juni 1977 in Zürich.

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

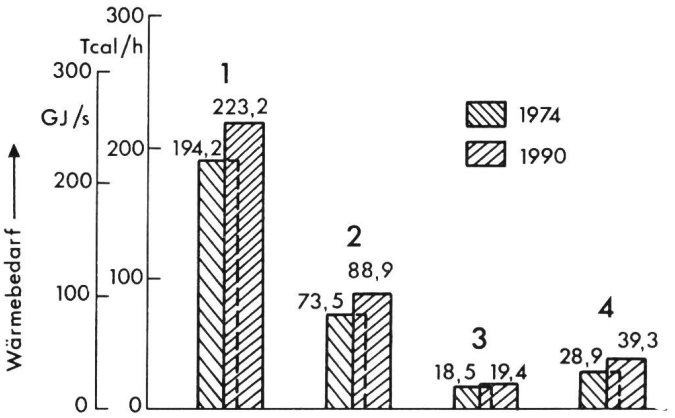

Fig. 1 Wärmebedarf 1974 und 1990 in der Bundesrepublik Deutschland einschliesslich Berlin (West), geordnet nach Verbrauchergruppen

1 Haushalte einschliesslich Brauchwassererwärmung
2 Kleinverbrauch einschliesslich Prozesswärme < 80 °C
3 Industrie, Raumheizung und Prozesswärme < 80 °C
4 Industrie, Prozesswärme zwischen 80 und 200 °C

2. Verbesserung der Umweltbedingungen durch Verringerung der SO_2-Emissionen aus niedriger Höhe um 150 000...200 000 t/a,

3. sichere und bequeme Wärmebereitstellung,

4. Substitution von Importenergien (1,5...2,6 Mrd DM/a) durch Investitionen (20...30 Mrd DM bei den Versorgungsunternehmen und bis zu rund 6 Mrd DM bei den Kunden durch Umstellung der Heizung) und

5. Schaffung von 50 000...80 000 zusätzlichen Arbeitsplätzen.

Die Summen der ermittelten Wärmebedarfswerte sind für 1974 und 1990 in Fig. 1 [3] wiedergegeben. Nennenswerte Bedarfszuwachswerte in den Jahren bis 1990 sind ausser bei den Wohnungen nur im Tertiärbereich und bei der Prozesswärme zu erwarten.

In den für eine Fernwärmeversorgung in Frage kommenden Gebieten besteht das Problem einer sinnvollen Abgrenzung der Anwendungsbereiche der leitungsgebundenen Energieträger untereinander, da insbesondere für die Fernwärme- und Gasversorgung eine Parallelversorgung von Gebieten auf die Dauer wirtschaftlich in der Regel nicht zu vertreten ist. Die verschiedenen Möglichkeiten der elektrischen Raumwärmeversorgung sind nicht als generelle Alternative zur Fernwärmeversorgung, sondern als eine sinnvolle Ergänzung für eine energiesparende und umweltfreundliche Raumwärmeversorgung zu sehen. Das gilt auch für elektrisch angetriebene Wärmepumpen. Anders liegen die Verhältnisse bei der Gasversorgung. Sie bleibt eine geeignete Alternative zur Fernwärmeversorgung, auch in Verdichtungsräumen. Es wurden daher Entscheidungsmodelle für den durchzuführenden Kostenvergleich zwischen Gas- und Fernwärmeversorgung bei zellenweiser Betrachtung in den einzelnen Städten erarbeitet [4].

Fasst man die Ergebnisse unter Einschluss der Planstudien zusammen, so könnten die in Tab. I angegebenen Potentiale künftig wirtschaftlich mit Fernwärme über Heizkraftwerke versorgt werden. Die Zahlenangaben sind in Bereichsgrenzen angegeben, da die Ausgliederung des fernwärmewürdigen Wärmebedarfs mit Hilfe der beiden in Fig. 2 wiedergegebenen Kostenkurven für einen oberen und unteren Grenzbereich für kanalverlegte Leitungen vorgenommen wurde.

Mit den Zahlen von Tab. I würde die auf die öffentlichen Heizkraftwerke entfallende Jahresfernwärmeabgabe auf den 3,6...4,9fachen Wert bzw. von ca. 149 000 TJ/a (einschliesslich Heizwerke) im Jahre 1975 auf 496 000...715 000 TJ/a im Jahre 1990 anwachsen. 318 000 TJ/a entfielen auf die industrielle Kraftwärmekupplung. Bezogen auf den nutzbaren Endenergieverbrauch (bis 200 °C) ohne industrielle Kraftwärmekupplung würde damit ein Anteil von 17 bis 25 % auf die Fernwärme entfallen.

Die so ermittelten Potentiale reagieren nicht nur empfindlich auf die Höhe der Wärmeverteilungskosten, sondern ebenso auf Veränderungen des Energiepreisniveaus. Unterstellt man eine inflationsbereinigte Erhöhung derselben um 2,4 DM/GJ, so ergibt sich eine Erweiterung des wirtschaftlich geeigneten Fernwärmepotentials um rund 40 %.

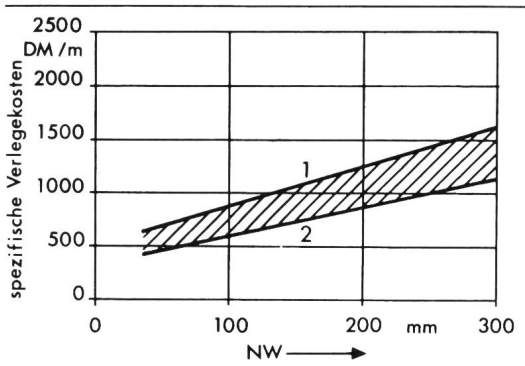

Fig. 2 Spezifische Verlegekosten für Heisswasserleitungen (Stand 1975)
1 obere Bereichsgrenze
2 untere Bereichsgrenze

In Fig. 3 sind die 25 grössten Fernwärmepotentiale ohne Industrieversorgung, der Grösse nach geordnet, aneinandergereiht. Etwa 60 % des wirtschaftlich fernwärmegeeigneten Bedarfs ohne Industrie, mit Anschlusswerten über 1000 MJ/s, liegt in 13 bis 16 Grosspotentialen, d. h., es genügen 13 bis 16 stadtnahe Grosskraftwerke, auch Kernkraftwerke (KKW), um mehr als die Hälfte des fernwärmegeeigneten Bedarfspotentials der Bundesrepublik und Westberlins zu bedienen. Die übrigen 40 % des Bedarfs verteilen sich auf rund 150 mittlere und kleinere Potentiale. Etwa ⅓ davon kann möglicherweise ebenfalls aus Grosskraftwerken gedeckt werden, der Rest erfordert mindestens hundert Heizkraftwerke, die speziell für den Zweck der Kraftwärmekopplung errichtet bzw. erweitert werden müssten.

Das so ermittelte wirtschaftliche Fernwärmepotential entfällt damit im wesentlichen auf die rund hundert Städte mit mehr als 100 000 Einwohnern und nur zu einem kleinen Teil (mit einem Anteil von nur 3...10 % am gesamten Wärmebedarf unter 200 °C) auf 34 bis 90 der rund 900 untersuchten Städte mit 10 000 bis 100 000 Einwohnern.

3. Wirtschaftliche Probleme der regionalen Fernwärmeversorgung aus Kernkraftwerken

Über regionale Fernwärmeversorgungssysteme liegen noch keine Erfahrungen vor. Es handelt sich hierbei um technisch, wirtschaftlich und organisatorisch komplizierte Gebilde. Es war daher notwendig, die damit in Zusammenhang stehenden Fragen anhand von Planstudien näher zu untersuchen. Diese wurden für die Gebiete Berlin (B), Bonn/Köln/Koblenz (BN/K/KO), Oberhausen/Westliches Ruhrgebiet (OB) und Mannheim/Ludwigshafen/Heidelberg (MA/LU/HD) erstellt.

Wenn man die Ergebnisse der einzelnen Planstudien (Tab. II) kritiklos betrachtet, so ist man geneigt, bis auf wenige Ausnahmen die Zweckmässigkeit der regionalen Fernwärmeversorgung in Frage zu stellen. Selbst bei wirtschaftlichen Ergebnissen ist diese gegenüber örtlichen Lösungen mit höheren Anlaufverlusten und einer zeitlich längeren unwirtschaftlichen Anlaufphase verbunden. Es stellt sich daher die Frage, ob es zweckmässig war, für ihre Betrachtung so viel Aufwand zu treiben. Die Vorteile regionaler Fernwärmeversorgungssysteme gegenüber örtlichen Lösungen sind jedoch:

1. Bei langfristiger Betrachtung ergeben sie die Möglichkeit, die elektrizitätswirtschaftlichen Ziele, nämlich die Stromerzeugung aus möglichst grossen Einheiten, insbesondere aus KKW, zu erhöhen, mit denen der Wärmeversorgung in Einklang zu bringen.
2. Die Wärme lässt sich aus solchen Einheiten mit dem niedrigsten zusätzlichen Energieaufwand auskoppeln.
3. Sie gestatten am ehesten die angestrebte Verlagerung der Strom- und Wärmeerzeugung auf Kohle und Kernenergie.
4. Für Verdichtungsräume können sie raumplanerischen und umweltentlastenden Gesichtspunkten am besten Rechnung tragen.

Die vergleichenden Untersuchungen haben erkennen lassen, dass bei etwa gleichen Rechenansätzen die wirtschaftlichen Ergebnisse der einzelnen Planstudien nicht sehr weit auseinanderliegen, da bei aller Unterschiedlichkeit der örtlichen Gegebenheiten die mittlere Wärmedichte und die spezifischen Kosten des Antransportes nicht sehr weit auseinanderliegen. Insofern kann also die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die sich aus den Planstudien ableitende Modellbetrachtung für die Gesamtstudie eine in der Verallgemeinerung weitgehende Aussagekraft hat. So haben die Untersuchungen der Planstudie BN/K erkennen lassen, dass ein Antransport der Wärme aus dem Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich für den Raum Köln/Bonn (also etwa 50 km) unter den heute gegebenen Voraussetzungen wirtschaftlich nicht vertreten werden kann. Damit wird auch die Aussage der Gesamtstudie bezüglich der Begrenzung der Antransportent-

Wirtschaftlich fernwärmegeeignete Bedarfspotentiale Tabelle I

	Planstudiengebiete Tcal/h	Detail-untersuchung 92 Städte Tcal/h	Sonstige Städte 10000 bis 100000 Einwohner Tcal/h	Summe Tcal/h
Bereits durch Fernwärme gedeckt (1974/75)	3,9	13,6	2,1	19,6
Potentialuntergrenze	12,3 [3])	14,3	4,0	30,6
Zusätzlich erschliessbares Potential bei Kostenuntergrenze für die Verlegeverfahren	2,5 [4])	15,7	4,1	22,3
Summe ohne Industrie	18,7	43,6	10,2	72,5
Industrie	1,1	5,0	5,5	11,6
Summe (Klammer Potentialgrenze)	19,8 (17,3)	48,6 (32,9)	15,7 (11,6)	84,1 (61,8)

[3]) mit ortsüblichen Verlegeverfahren
[4]) geschätzt, weil in den Planstudien nicht untersucht

Planstudienergebnisse: Wärmekosten beim Abnehmer in DM/GJ Tabelle II

	B	BN/K	MA/LU/HD	OB
Wärmeerzeugung	3,31	6,02 (7,01)	4,91 (5,17)	4,04 (6,28)
Wärmetransport mit Übergabestationen	–	1,71 (1,71)	1,95 (1,95)	1,78 (4,96)
Verteilung und Hausstationen	5,67	4,46 (5,54)	4,17 (4,17)	4,94 (7,10)
Verwaltung und Vertrieb	0,73	0,96 (0,81)	0,90 (0,90)	0,84 (–)
	9,71	13,15 (15,07)	11,93 (12,19)	11,60 (18,34)

Erklärungen siehe im Text

fernung auf max. 20...30 km durch die praktische Untersuchung bestätigt. Die Verwirklichung von überregionalen «Schienenprojekten» kann daher aus heutiger Sicht nicht nur unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten beurteilt werden.

Die einzelnen Planstudien gehen von zum Teil unterschiedlichen Ansätzen aus. Das erschwert einerseits ihren Vergleich, anderseits ermöglicht dies eine kritische Betrachtung und führt zu der Erkenntnis, dass eine regionale Fernwärmeversorgung nur unter eng begrenzten Voraussetzungen wirtschaftlich entwickelt werden kann. Hierfür waren die Planstudien besonders geeignet, da sie von detaillierten Planungen und einer Kosten- sowie Erfolgsbetrachtung über die Zeit bis 1990 ausgehen. Die wesentlichen Ergebnisse des Planstudienvergleichs sind:

1. Selbst unter günstigsten Voraussetzungen, wie sie z. B. Berlin bezüglich Wärmedichte, Antransport und Wärmeerzeugungskosten aufzuweisen hat, führt eine grossräumige Wärmeversorgung zu Anlaufverlusten.

2. Wie die Planstudien OB und K/B zeigen, ist der Ansatz eines weitgehenden Anschlusses der Zentralheizungen und von 60 % der heute noch ofenbeheizten Gebäude für die Entwicklung regionaler Fernwärmeversorgungssysteme unerlässliche Voraussetzung. Ohne flankierende Massnahmen [5], die dieses Ziel zumindest annähernd in wenigen Jahren erreichen lassen, lässt sich eine regionale Wärmeversorgung mit vertretbaren Anlaufkosten nicht aufbauen. Sie verbessern das wirtschaftliche Ergebnis der Rechnungen für die Planstudien OB und BN/K um durchwegs rund 2 DM/GJ.

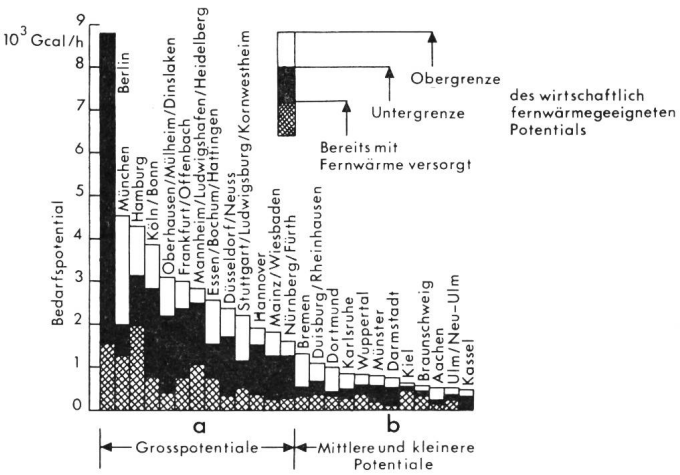

Fig. 3 Die grössten Fernwärme-Bedarfspotentiale in der Bundesrepublik einschliesslich Berlin (West)

a Deckung: konventionelle oder nukleare Grosskraftwerke

b Deckung: vereinzelt Grosskraftwerke, sonst kleinere Heizkraftwerke, die nach dem Wärmebedarf dimensioniert werden

3. Die in den Planstudien detailliert ermittelten Kosten für die Mittel- und Unterverteilung bestätigen die in der Gesamtstudie angegebenen Kostenabschätzungen unter der Voraussetzung des entsprechenden spezifischen Kostenansatzes für Heizleitungen (Fig. 4). Trotz der unterschiedlichen Struktur der einzelnen Planstudiengebiete liegt die mittlere Wärmedichte der fernwärmewürdigen Gebiete mit Ausnahme von OB bei etwa 40 MJ/s · km² Höchstlast. Die für die Planstudie Oberhausen ausgewiesene geringere Wärmedichte von 28 MJ/s · km² führt je nach Verlegeverfahren zu um 0,8...1,3 DM/GJ höheren Verteilungskosten.

4. Das Antransportsystem ist in den Planstudien unterschiedlich lang (B 0 km, BN/K 37 km, OB 41 km und MA/LU/HD 65 km). Die transportleitungsbezogenen spezifischen Werte differieren demgegenüber in wesentlich geringerem Masse (BN/K 17,3 MJ/s · km, OB 23,7 MJ/s · km und MA/LU/HD 23,3 MJ/s · km). Auch die grösste räumliche Ausdehnung des Transportsystems ist mit 35...40 km etwa gleich. Daher differieren die variierten Kostenansätze unter Voraussetzung etwa gleicher Konzeptionen nur wenig.

In den Studien werden jedoch zwei unterschiedliche Transportsysteme betrachtet: Nenndruck ND 40 mit indirekter Wärmeübergabe an die Verteilungsnetze sowie ND 25 mit direkter Wärmeübergabe an die Verteilungsnetze. Das erstgenannte Verteilungssystem führt in der Regel zu wesentlich höheren Transportkosten für Leitungen und Übergabestationen und erhöht zudem die Wärmeerzeugungskosten infolge der Grädigkeit der Wärmetauscher. Darum sollte man dieses System soweit als möglich vermeiden. Wie die Vergleichsrechnungen zur Planstudie OB zeigen, verringern sich die Transportkosten beim Übergang auf ND 25 auf etwa die Hälfte.

5. Wider Erwarten differieren die in den Planstudien ausgewiesenen Kosten für die Wärmeerzeugung erheblich. Erst die unterschiedliche Auslegung der einzelnen Systeme und die unterschiedliche Randbedingung der Planstudien haben die wirtschaftlichen und technischen Probleme klar erkennen lassen, da die Fragen der Wärmeauskopplung aus grossen Turbinensätzen in den Planstudien eingehend untersucht wurden.

Auf Grund der Planstudienergebnisse und der Modelluntersuchungen in der Gesamtstudie lassen sich für regionale Lösungen gegenüber örtlichen Lösungen etwa folgende Grenzbedingungen ableiten:

Die Summe von Wärmeerzeugungs- und Transportkosten dürfen 6.–...7.– DM/GJ nicht übersteigen. Damit sind die Antransportkosten auf 1.50...2.– DM/GJ und die Wärmeerzeugungskosten auf 4.50...5.– DM/GJ begrenzt. Ebenso sind die Vorlauftemperaturen der Wärmeauskopplung auf

110...120 °C nach oben beschränkt und Zweigturbinenlösungen nur dann wirtschaftlich tragbar, wenn ihr wirtschaftlicher Nachteil gegenüber der Wärmeauskopplung aus dem Hauptturbinensatz durch zusätzliche Massnahmen teilweise oder ganz vermindert werden kann. Bei einem KKW bezieht sich dieser wirtschaftliche Nachteil im wesentlichen auf die höheren Festkosten, die durch die zusätzliche elektrische Leistungseinbusse infolge Teilbeaufschlagung des Niederdruckteiles der Hauptturbine bedingt ist. Die Wärmeauskopplung aus grossen Kraftwerksblöcken erfordert daher die sorgfältige Abwägung von Gesichtspunkten der Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung.

Im Planstudienvergleich wurden ausgehend von den unterschiedlichen Planstudienkonzepten die Fernwärmekosten auf der Basis der Ansätze der Gesamtstudie ermittelt. Dabei kommen die in Tab. II ausgewiesenen Wärmekosten frei Abnehmer zustande. Soweit sie zu von den Planstudien abweichenden Ergebnissen führen, sind die Zahlen der Planstudien in Klammerwerten aufgeführt.

In dieser Aufstellung wurde von den Wärmeerzeugungskonzepten der Planstudien ausgegangen. Weitere Minderungen wären durch ebenfalls aufgezeigte Massnahmen wie

– Absenken der Vor- und Rücklauftemperatur (BN/K mit konstanter Auskopplungs-Vorlauftemperatur 140 °C),

– Wärmeentnahme auch aus Hauptturbinen (BN/K), (MA/LU/HD),

– Erteilung von Gutschriften für die Strommehrerzeugung während den Starklastzeiten der Sommermonate,

– verstärkter Einsatz kostengünstiger Verlegeverfahren (B), (BN/K), (MA/LU/HD)

erzielbar. Hierdurch lassen sich die Wärmegestehungskosten frei Abnehmer für alle Planstudien auf weniger als 12.– DM/GJ verringern.

Auch das wirtschaftliche Bild der erfolgsrechnerischen Entwicklung der Fernwärmeversorgung über die einzelnen Jahre lässt sich unter Berücksichtigung der vorgenannten Angleichung bis auf Berlin weitgehend einheitlich beschreiben. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Fernwärmepreise dem allgemeinen Inflationstrend entsprechend angehoben werden können. Für die ersten 4...5 Jahre des Betrachtungszeitraumes ergeben sich Anlaufverluste und danach während eines etwa gleich langen Zeitraumes geringe

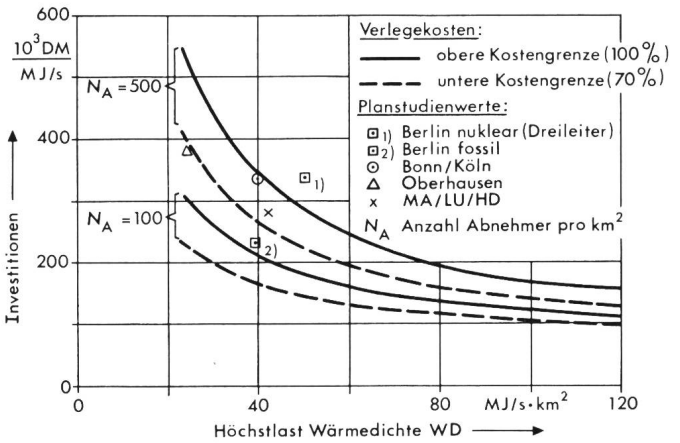

Fig. 4 Spezifische Investitionen der Unter- und Mittelverteilung
Die Kosten der zusätzlichen Mittelverteilung wurden pauschal mit 50000 DM/MJ/s erfasst

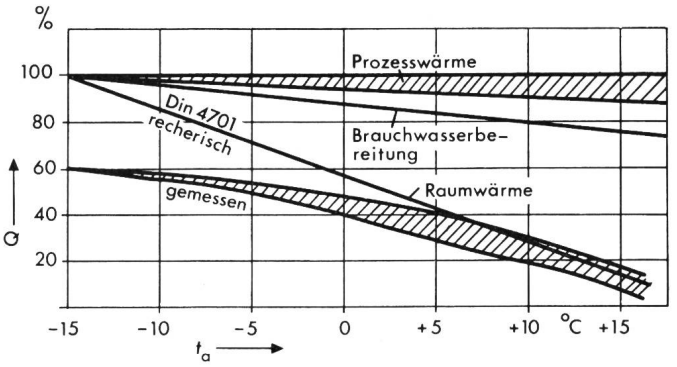

Fig. 5 Wärmebedarf Q in Abhängigkeit von der Aussentemperatur t_a

Gewinne, die jedoch nicht ausreichen, das Eigenkapital in einer angemessenen Weise zu verzinsen. Durch den dann erfolgenden Bau des Antransportsystems tritt in einem bis zwei Jahren nochmals ein kleiner Verlust auf. Danach steigen die Überschüsse durch die dann erst erfolgende Wärmelieferung aus einem KKW rasch auf ein ausreichendes Mass an.

4. Möglichkeiten der Wärmeauskopplung aus KKW-Turbinen

Oft hört man die irrige Auffassung, dass Heizkraftwerke nur eine geringe Benutzungsdauer aufzuweisen hätten und daher eine Wärmeentnahme aus KKW wirtschaftlich nicht sinnvoll sei. In Fig. 5 ist auf die Temperaturabhängigkeit des Wärmebedarfs näher eingegangen. Der Raumwärmebedarf steigt nicht linear mit fallender Aussentemperatur; zu Spitzenzeiten wird bei den grösseren Stadtheizungen nur etwa 60 % des maximalen Wärmebedarfs nach DIN 4701 benötigt. Das hat zur Folge, dass die Stadtheizungen, die im wesentlichen Raum- und Gebrauchswärmebedarf decken, Benutzungsdauern von rund 3000 h bezogen auf die Wärmehöchstlast aufzuweisen haben. Des weiteren ist aus den Jahresdauerlinien des Wärmebedarfs einer Stadtheizung (Fig. 6) zu ersehen, dass auf den Spitzenwärmebedarf, der z. B. 50 % der Jahreshöchstleistung übersteigt, nur 11 % der Jahreswärmeabgabe entfällt. Dieser Teil der Jahreswärmeerzeugung wird in der Regel nicht mit der Stromerzeugung verbunden, sondern aus Spitzenkesseln bereitgestellt. Daher können Heizkraftwerke in der gekoppelten Erzeugung durchaus Benutzungsdauern von 5000....6000 h/a und bei entsprechender Industrieabgabe auch höhere Benutzungsdauern erreichen.

Ist der Einsatz von Spitzenkesseln bei Heizkraftwerken mit Entnahmekondensationsturbinen nicht vorgesehen, so wird die Wärmeabgabe zu Spitzenzeiten des Strombedarfs gegebenenfalls vermindert, um eine grössere elektrische Leistung zu erhalten, und der Ausgleich über Wärmespeicherung im Netz oder über besondere Behälter erreicht.

Die wirtschaftlich zweckmässige Auskopplung der Fernwärme aus KKW bzw. aus Turbinen grosser Leistung wurde in den Planstudien ausführlich untersucht. War man zunächst der Meinung, dass auf Grund günstiger Erzeugungskosten hohe Vorlauftemperaturen und Antransportentfernungen gegenüber konventionellen verbrauchsnahen Kraftwerken in Kauf genommen werden könnten, so zeigte die zwischenzeitlich sich abzeichnende ausserordentliche Ver-

teuerung der KKW bald, dass man sich auch hier möglichst auf Auskopplungsvorlauftemperaturen von 100 bis 120 °C beschränken sollte.

Zu den wichtigsten Merkmalen einer Auskopplungslösung zählt die Leistungseinbusse, die durch die Wärmeentnahme gegenüber dem reinen Kondensationsbetrieb auftritt. Sieht man von der Lastabhängigkeit der spezifischen Leistungseinbusse ab, so ergeben sich bei grossen Turbosätzen mit Kühlturmkühlung die in Fig. 7 dargestellten mittleren spezifischen Leistungseinbussen. Die Untersuchungen zeigten, dass die Unterschiede bei fossilen und nuklearen Kraftwerken in dem untersuchten Temperaturbereich gering sind, so dass man für beide den gleichen mittleren Wert angeben kann. Die Figur zeigt die starke Abhängigkeit der Leistungseinbusse von der Vor- und Rücklauftemperatur. Man sieht, dass eine Absenkung der Rücklauftemperatur nicht nur zu einer Senkung der Verteilungskosten, sondern in ebenso starkem Masse zu einer Senkung der Wärmeerzeugungskosten führt. Wegen der unterschiedlichen Kostenstruktur kommt es bei dem mit sehr hohen Festkosten behafteten KKW besonders auf eine niedrige Leistungseinbusse an.

Für die Wärmeentnahme bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten an: Wärmeentnahme aus dem Niederdruckteil der Hauptturbine oder aus einer parallelgeschalteten Niederdruckturbine.

Die Entnahme aus dem Niederdruckteil der Hauptturbine (Fig. 8) gestattet bis zu Vorlauftemperaturen von 100...110 °C bei zweistufiger Aufwärmung durch Dampfentnahme aus den beiden oberen Entnahmen des Niederdruckteils des 1250-MW-Turbosatzes eine Wärmeentnahme von maximal rund 600 MJ/s (520 Gcal/h), ohne den Turbinenteil in der Beschaufelung wesentlich zu ändern. Soll die Entnahme bei diesem Turbinentyp darüber hinaus gesteigert werden, so kann dies nur durch die zusätzliche Entnahme von Dampf aus der Leitung zum Niederdruckteil der Hauptturbine geschehen, womit das Heizwasser auf maximal etwa 170 °C aufgewärmt werden könnte. Hierdurch vergrössert sich naturgemäss die Stromeinbusse beträchtlich.

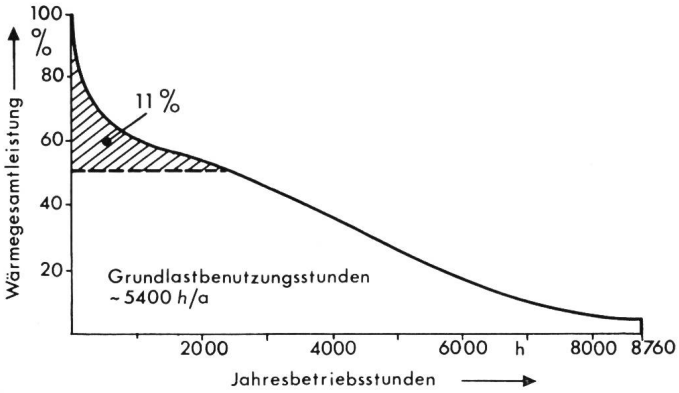

Fig. 6 Jahresdauerlinie der Wärmeabgabe einer Stadtheizung

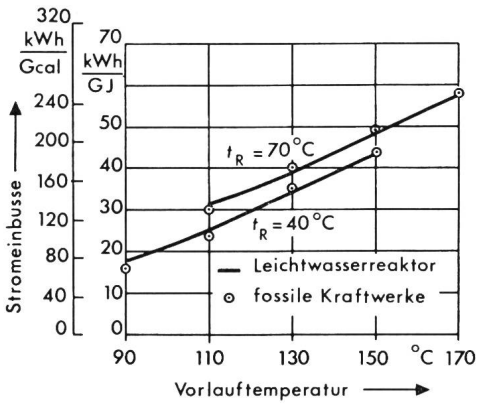

Fig. 7 Stromeinbusse bei Heisswasserlieferung aus Heizkraftwerken (2stufige Aufwärmung, Kondensatordruck 0,09 bar)

Für die Planstudie Berlin wurde die Wärmeentnahme aus einem Turbosatz mit geänderter Beschaufelung untersucht. Die Blockleistung beträgt 600 MW, die maximal mögliche Entnahme aus dem Niederdruckteil rund 465 MJ/s (400 Gcal/h) bei dreistufiger Aufwärmung des Heizwassers auf 110 °C.

Will man aus dem Niederdruckteil eines 1250-MW-Turbosatzes Wärmemengen von 900...1000 MJ/s entnehmen, so ist dies nur bei wesentlicher Umkonstruktion des Norm-Turbosatzes möglich. Die hierfür erforderlichen Entwicklungs- und zusätzlichen Baukosten dürften sich in einem vertretbaren Rahmen halten, jedoch müssen dabei eine Reihe noch nicht zu übersehender Nachteile in Kauf genommen werden, so z. B. eine geringere Leistung im Kondensationsbetrieb und ein zusätzliches Sicherheits- und Verfügbarkeitsrisiko infolge der Sonderbauweise. Unter Voraussetzung von niedrigeren Rücklauftemperaturen von 40...50 °C ist zwar thermodynamisch die unterste Anzapfung eines 1250-MW-Blokkes wie in Berlin zu nutzen, jedoch von der konstruktiven Seite her nicht zu verwirklichen.

Bei der Wärmeentnahme aus einer parallelgeschalteten Niederdruckturbine (Fig. 8) ist es zweckmässig, eine doppelflutige Gegendruckturbine dem Niederdruckteil der Hauptturbine parallel zu schalten. Diese Schaltung vermeidet die vorgenannte Leistungsbegrenzung in Abhängigkeit vom Temperaturniveau bzw. eine Sonderkonstruktion des Niederdruckteiles der Hauptturbine. Die Gegendruckturbine weist einen etwas geringeren inneren und mechanischen Wirkungsgrad auf; zusätzlich entstehen jedoch erhebliche Verluste durch Teilbeaufschlagung der Niederdruckteile der Hauptturbine bei voller Wärmeauskopplung. Bei den in den Planstudien betrachteten Varianten verfügt nämlich die Hauptturbine nach wie vor über ihre volle Schluckfähigkeit, damit während der Sommermonate die Kondensationsleistung voll ausgefahren werden kann.

Es wäre auch möglich, den Kondensationsteil der Hauptturbine um die der Wärmeentnahme entsprechende Dampfmenge kleiner auszulegen. Die Gegendruckturbine müsste dann eine Hilfskondensation erhalten. Diese Lösung wurde nicht näher untersucht, da sie bei den gegebenen Verhältnissen gegenüber den vorher genannten kaum nennenswerte wirtschaftliche Vorteile erwarten lässt.

Um den thermodynamischen Nachteil der Zweigturbine möglichst gering zu halten, bietet sich für die Wärmeauskopplung grosser Leistungen aus einem KKW-Block daher folgende Lösung an: Wärmeentnahme bis etwa 600 MJ/s aus der Hauptturbine, darüber hinaus aus einer kleineren Zweigturbine. Diese Lösung vermeidet weitgehend den Nachteil der schlechten Auslastung des Niederdruckteils der Hauptturbine. Des weiteren könnte man die Spitzenkessel als Niederdruckdampfkessel auslegen und während der Zeiten des

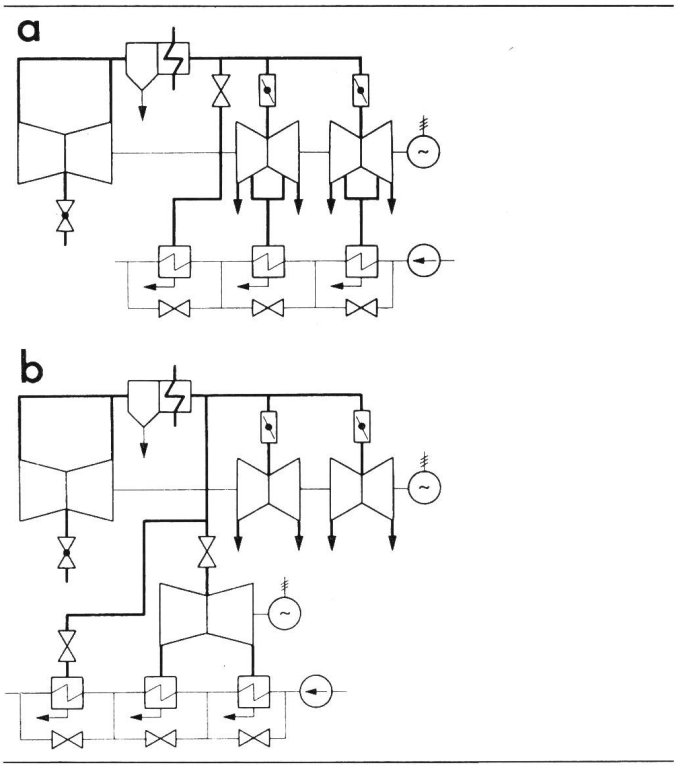

Fig. 8 Schaltungen von Turbinen von Leichtwasserreaktor-Heizkraftwerken
a Entnahme aus ND-Teil der Hauptturbine
b Entnahme aus parallelgeschalteter ND-Turbine

Spitzenstrombedarfs die Zweigturbine mit deren Dampf beaufschlagen, um damit die Stromerzeugung der Hauptturbine während dieser Zeiten entsprechend zu erhöhen. Überlegungen im Rahmen der Planstudie Mannheim zeigten, dass die Dampfleistung der Spitzenkessel etwa dem Dampfdurchsatz dieser verkleinerten Zweigturbine entspricht.

Bei den Kraftwerksauslegungen ohne konventionellen Kraftwerksanteil entfällt nach dem Konzept der Gesamtstudie mit einem Grundlastanteil von 0,6 der Wärmehöchstlast auf diesen eine Benutzungsdauer von 4600 h. Setzt man für das KKW insgesamt eine mögliche Benutzungsdauer von 7600 h an, so kann mit der von der Wärmeerzeugung «bezahlten» Kraftwerksscheibe mit einer Benutzungsdauer von 3000 h zusätzlich Strom erzeugt werden, dessen arbeitsabhängige Kosten um 2...4 Pf/kWh geringer als die Stromerzeugung aus einem fossilen Kondensationskraftwerk sind. Dieser Vorteil wird sich zumindest während der Starklastzeiten über die Lebensdauer des KKW verwirklichen lassen, so dass der Wärmeerzeugung für eine Benutzungsdauer von 1500 h eine entsprechende Gutschrift erteilt werden kann. Sie beträgt je nach Leistungseinbusse und Strombewertung 0.25...1.– DM/GJ bezogen auf die Gesamtwärmeabgabe. Darüber hinaus kann die Wärmelieferung ohne wesentliche Beeinträchtigung für kurze Zeit jederzeit unterbrochen werden, so dass sich für die Stromerzeugung eine günstige Momentanreserve ergibt.

Werden fossile Heizkraftwerke zur Mittel- und Spitzenlastdeckung eingesetzt, so ergibt sich die Möglichkeit, über Speicherung die Zeiten der maximalen Strom- und Wärmeerzeugung zeitlich zu entkoppeln, wodurch sich die Bereitstellung der Wärme aus solchen Heizkraftwerken entsprechend verbilligen lässt.

Unter Berücksichtigung der aufgezeigten Möglichkeiten und Zusammenhänge kann damit die Wärme aus KKW zu Bedingungen bereitgestellt werden, die nach Überwindung von Anlaufverlusten eine wirtschaftliche regionale Fernwärmeversorgung erlauben. Diese setzt allerdings, und daran soll kein Zweifel bestehen, eine optimale Abstimmung von Strom- und Wärmeerzeugung voraus.

5. Energiewirtschaftliche Rahmenbetrachtungen

Anderseits muss bei diesem Unschärfebereich auch die Einsatzmöglichkeit von anderen energiesparenden Verfahren berücksichtigt werden; denn Fernwärmeversorgung ist nur eine von mehreren Möglichkeiten der rationellen Energieanwendung. Die Fernwärme muss sich daher auch im Hinblick auf den hohen Verteilungsaufwand auf den für sie effektiven Anwendungsbereich beschränken, der eine entsprechende Wärmedichte voraussetzt. Der Anwendung der Sonnenenergie sind in diesen Gebieten von vorneherein noch engere Grenzen gesetzt als bei der Niedrigbebauung. Die Wärmeversorgung über gas- und stromangetriebene Wärmepumpen hat für diese Gebiete nicht den hohen Energieeinsparungsgrad wie die Fernwärmeversorgung über Heizkraftwerke aufzuweisen und führt zudem auch zu wirtschaftlich ungünstigeren Lösungen. Anderseits sei aber darauf hingewiesen, dass für kleinere Bereiche eine Fernwärmeversorgung über grosse Wärmepumpen zu wirtschaftlich und energetisch günstigeren Lösungen führen kann, als diejenige aus Heizwerken. Das war mit ein Grund, die Mindestleistung der für Fernwärmeversorgung über Heizkraftwerke in Frage kommenden Potentiale in der Gesamtstudie auf rund 100 MJ/s anzusetzen.

So wirtschaftlich sinnvoll die Anwendung wärmedämmender Massnahmen bei Neubauten sind, so sind dieser bei der bestehenden Bebauung jedoch Grenzen gesetzt. Vergleicht man die für die Fernwärme aufzubringenden Investitionen mit denen für die Verbesserung der Wärmedämmung bei bestehender Bebauung und bezieht diese auf die jeweils zu erreichende Energieeinsparung, so zeigt sich, dass bei den wärmedämmenden Massnahmen drei- bis vierfach höhere Aufwendungen als für die Fernwärmeversorgung erforderlich sind. In über Heizkraftwerke versorgten Gebieten bringen diese Massnahmen keine nennenswerten zusätzlichen Energieeinsparungen, da der Brennstoffeinsatz für die Wärmeversorgung bereits durch die Heizkraftwerke wesentlich vermindert werden konnte. Die Förderung der Anwendung energiesparender Massnahmen sollte daher gebietsbezogen unterschiedlich nach Ausrichtung auf grösstmögliche Effektivität erfolgen.

Bei Zukunftsbetrachtungen, die über das Jahr 2000 hinausgehen, wird man wohl von der Annahme ausgehen müssen, dass sich die Öl- und Erdgasanteile an unserer Energieversorgung gegenüber heute erheblich verringern werden. Kohle- und Kernenergie werden an ihre Stelle treten. Eine Reihe von Studien untersuchen daher auch die Wirtschaftlichkeit von Verfahren der Kohlevergasung mit Hilfe von nuklearer Energie. Sie rechnen damit, dass in Zukunft diese Gase mehr oder weniger das Erdgas, das für Raum- und Produktionswärme benötigt wird, ergänzen und ersetzen werden. Die hierfür ermittelten Kosten liegen naturgemäss niedriger als die Kosten der nuklearen Kondensationsstrom-

erzeugung, aber um ein vielfaches höher als die aufgezeigten Kosten der nuklearen Wärmeerzeugung aus Heizkraftwerken. Das gleiche gilt – wenn auch nicht in dem Ausmass – für die gesamte Energieerzeugung nuklearer Heizkraftwerke, also für Strom und Wärme zusammen.

Im Gegensatz zu den Verfahren der nuklearen Gaserzeugung betragen die Verluste der nuklearen Kraftwärmekopplung nur wenige Prozente. Auch ihre Anlagekosten – bezogen auf die gesamte Energieerzeugung – liegen bei nur der Hälfte der nuklearen Gaserzeugung [9].

Damit eröffnet sich die Möglichkeit, einen grossen Teil des Raum- und Prozesswärmebedarfs durch elektrische Energie zu decken, insbesondere denjenigen, der in den bisherigen Betrachtungen auf Grund seiner geringen Wärmedichte nicht durch Fernwärme und auch nicht durch Gas zu ersetzen wäre. *Hohl* [8] und andere haben solche Modelle einer totalen integrierten Wärmebedarfsdeckung mit Fernwärme und elektrischer Energie aus Heizkraftwerken bereits entwickelt. Dies setzt natürlich voraus, dass die Verteilungskosten der elektrischen Energie in vertretbaren Grenzen bleiben, wobei hier mit Zuwachskosten gerechnet werden kann, da diese Gebiete ohnehin mit elektrischer Energie beliefert werden. Die erforderlichen hohen Benutzungsstunden für die E-Heizung können erreicht werden: durch reine Nachtspeicherheizung, durch eine Kombination von elektrischer Direkt- und Speicherheizung oder durch elektrisch beheizte kleine Fernheizwerke oder Einzelheizungen, die in Spitzenzeiten teilweise oder ganz auf fossile Brennstoffe ausweichen. Im letzten Fall könnten auch Wärmepumpenanlagen bei günstiger Lage des Wärmespenders zu besonders energiesparenden Lösungen führen.

Damit könnte, mit heute bereits bekannten und erprobten Techniken, ein grosser Teil des Wärmebedarfs mit hohen Wirkungsgraden gedeckt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Elektrizitätswirtschaft sich den Gedanken der integrierten Wärmebedarfsdeckung zu eigen macht und ihre Planungen in bezug auf Standorte und technische Ausführung der Erzeugungsanlagen rechtzeitig darauf abstellt. Diese Entwicklung ist umgehend einzuleiten, das gilt insbesondere für die Erstellung neuer KKW. Der Anteil der fossilen Primärenergieträger an der Energiebedarfsdeckung könnte hierdurch wirksam vermindert werden; auch kämen die ökologischen Vorteile zum Tragen.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann die Bedeutung der Fernwärmeversorgung für die Zukunft mit folgenden Thesen festgehalten werden:

– Die Fernwärmeversorgung über Heizkraftwerke ist in der Lage, auf lange Sicht unsere Energiehaushalte durch die Nutzung der bei der Stromerzeugung entstehenden Verluste wesentlich zu entlasten.

– Sie gestattet darüber hinaus eine weitgehende Verlagerung der Energiebedarfsdeckung von Öl auf Kohle und insbesondere auf Kernenergie.

– Sie ermöglicht eine umweltfreundliche Weiterentwicklung von Industrie-, Gewerbe- und Wohnbereichen in unseren Ballungsräumen.

– Sie erlaubt es trotz grosser Energieeinsparung, das Bedürfnis der Menschen nach Komfort und Bequemlichkeit zu befriedigen.

Wir sollten daher schon heute alle unsere Anstrengungen darauf richten, die Systeme der Fernheizung weiter zu entwickeln, um damit die Probleme einer rationellen Energieversorgung von morgen zu meistern.

Literatur

[1] Bundesministerium für Forschung und Technologie: Gesamtstudie Fernwärme «Die wirtschaftlichen und technischen Ausbaumöglichkeiten der Fernwärmeversorgung in der Bundesrepublik Deutschland». 1977.

[2] Ministerium für Forschung und Technologie. Vier Planstudien für die Verdichtungsräume
1. Berlin
2. Oberhausen/Westl. Ruhrgebiet
3. Koblenz, Bonn, Köln
4. Mannheim, Ludwigshafen, Heidelberg

[3] *H. P. Winkens, F. J. Mölter* und *H. Neuffer:* Die wirtschaftlichen und technischen Ausbaumöglichkeiten der Fernwärmeversorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Fernwärme International 5(1976)5, S. 134...152.

[4] *H. P. Winkens:* Der volkswirtschaftliche und wirtschaftliche Einsatz von Heizkraftwerken zur Wärmeversorgung von Ballungsräumen unter Berücksichtigung der beiden anderen leitungsgebundenen Energieträger Gas und Elektrizität. Fernwärme International 5(1976)4, S. 123...128.

[5] Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen aus der Gesamtstudie Fernwärme «Die wirtschaftlichen und technischen Ausbaumöglichkeiten der Fernwärmeversorgung in der Bundesrepublik Deutschland». Fernwärme International 6(1977)2, S. 1...12.

[6] *H. P. Winkens:* Nukleare Fernwärme. Atomwirtschaft 20(1975)7/8, S. 375...380.

[7] *H. P. Winkens:* Vergleichende Betrachtungen von energiesparenden Massnahmen. Fernwärme International 5(1976)2, S. 48...56.

[8] *R. Hohl:* Fernbeheizte Schweiz? Die totale Energieverwertung und ihre mögliche Rolle in einer umweltfreundlichen Gesamtenergieversorgung. Brown Boveri Mitt. 60(1973)6, S. 253...264.

[9] Bundesministerium für Forschung und Technologie «Programmstudie» Einsatzmöglichkeiten neuer Energiesysteme, Teil II.

Adresse des Autors

Dipl. Ing. *H. P. Winkens,* Direktor der Stadtwerke Mannheim Aktiengesellschaft, Luisenring 49, D-68 Mannheim 1.