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: Einsatz bestehender und im Bau befindlicher Kernkraftwerke der Schweiz für Wärmenutzung

Autor: Stoll, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915059

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

Einsatz bestehender und im Bau befindlicher Kernkraftwerke der Schweiz für Wärmenutzung [1])

Von P. Stoll

621.311.25(494):621.039:620.97

Nach einer grundsätzlichen Diskussion der wirtschaftlichen und technischen Grunddaten der Kraft-Wärme-Kupplung, insbesondere der speziellen Eigenschaften der nuklearbeheizten Entnahme-Kondensations-Dampfanlage werden die schweizerischen Projekte und Studien vorgestellt. Es wird gezeigt, dass Wärme aus Kernkraftwerken mit grosser Zukunft als Grundlast in ein grösseres, zweckmässig ausgebautes Fernwärmenetz eingespeist werden kann.

1. Historischer Überblick

In der Herbstsession 1971 hat der damalige Vorsteher des Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartementes auf das Postulat von Nationalrat Bieri betreffend Ersatz von Ölheizungen geantwortet: «Das erwähnte Postulat setzt in trefflicher Weise Schwerpunkte auf die zwei Hauptprobleme, die sich unserem Lande durch die Zunahme von Ölheizungen stellen: Einerseits die allmählich unerträglich werdende Luftverseuchung, andererseits das Übergewicht eines Energieträgers mit all seinen Risiken für unsere Versorgungssicherheit.» Die Substitution von Öl hat sich inzwischen zu einer Hauptfrage jeder Energiepolitik entwickelt, und die Frage der Luftverschmutzung durch Einzelfeuerung hat sich in keiner Weise entschärft.

Der VSE hat 1972 auf den geringen Anschlusswert von rund 330 Gcal/h (1971) der Fernheizungen der grössten Schweizerstädte aufmerksam gemacht und festgestellt, dass der bescheidene Anschlusswert der damals bestehenden Fernheizungen nur als Perspektive für eine weitere Entwicklung betrachtet werden muss. In der Arbeit der Studiengruppe «Elektrizität und Wärme» [1][2]), bestehend aus VSE, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie und Gebrüder Sulzer AG wurde 1975 erneut festgestellt, dass die Entwicklung der Fernheizungen schleppend vor sich geht, und an einem Beispiel gezeigt, dass, wenn die acht grössten Schweizerstädte von 1975 an bis zum Jahr 2000 einen intensiven Ausbau von Fernwärmenetzen betreiben und dafür beispielsweise jährlich pro Stadt 10 Mio Fr. investieren würden, im Jahre 2000 alle Fernwärmenetze der Schweiz zusammen nur höchstens 6 TWh/a abgeben könnten. Da liegt die eigentliche Problematik des Einsatzes von nuklear beheizten Entnahme-Kondensations-Heizkraftwerken. Die folgenden Ausführungen sollen zeigen, dass eine Wärmeeinspeisung aus einem Kernkraftwerk in grössere Fernheiznetze mit Hilfe einer Heisswassertransportleitung über grössere Entfernungen technisch möglich ist und in günstig gelagerten Fällen jetzt schon realisiert werden könnte.

Die Substitution von Öl mit einer Verringerung der Umweltbeeinträchtigung verlangt ihren Preis. Wäre dies nicht der Fall, so hätte sich die Energiewirtschaft schon längst der saubersten Energieträger bedient. Ein Konzept, das den Umweltforderungen genügen soll, kann praktisch nie wirtschaftlich optimiert werden. Dagegen ist es möglich, innerhalb eines Gesamtkonzeptes einzelne Teilbereiche kostenoptimal zu gestalten. Die politische Dimension des Problems scheint wesentlich grösser zu sein als die technische.

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

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

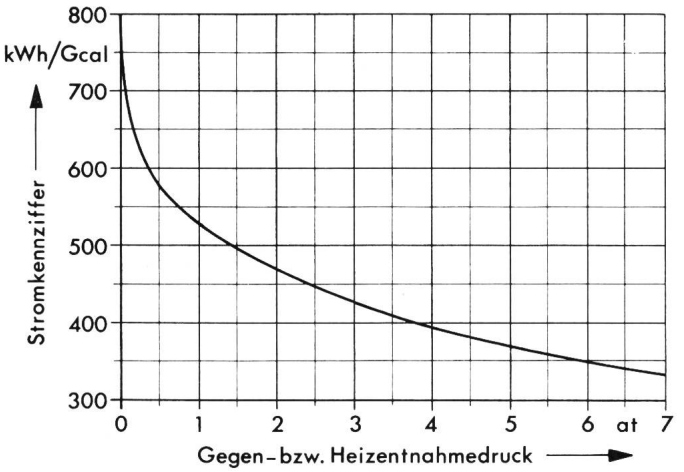

Fig. 1 Stromkennziffer in Abhängigkeit vom Heizentnahmedruck bzw. Gegen-Entnahmedruck für einen Frischdampfzustand von 150 bar, 540 °C

2. Wirtschaftliche und technische Grunddaten der Kraft-Wärme-Kupplung

Es sollen insbesondere die speziellen Eigenschaften der nuklear-beheizten Entnahmekondensations-Dampfanlage diskutiert werden. Grundsätzlich unterscheidet man bei der Kraft-Wärme-Kupplung drei Arten: Gegendruck-, Entnahmekondensations- und Gasturbinen-Heizkraftwerke. Kombinationen sind möglich. Der Entnahmekondensationsbetrieb schafft die Möglichkeit, Heizwärme und elektrische Leistung in einem weitgehend unabhängigen Verhältnis zu liefern. Der Kondensationsteil nutzt die nicht für Heizzwecke verwendete Dampfmenge zur Stromerzeugung. Der Dampf für die Aufwärmung des Heizwassers wird in der Regel in einer oder mehreren Stufen der Turbine entzogen (Anzapfdampf). Die generellen Möglichkeiten bei Leichtwasserkernkraftwerken (LWR-Kraftwerken) werden nachher behandelt. Vorerst sind einige Kenngrössen, die allgemeinen Charakter besitzen, zu diskutieren. Eine der wichtigsten für die Wirtschaftlichkeit ist die durch die technische Auslegung gegebene Stromkennziffer in kWh/Gcal. Sie gibt an, welche elektrische Arbeit je Gcal abgegebene Heizwärme im Kraftwerk erzeugt werden kann. Diese Kenngrösse ist in erster Linie vom Wärmegefälle des Heizdampfes abhängig und um so höher, je niedriger der Heizdampfdruck und je höher der Frischdampfzustand liegt. An einem Beispiel aus der Literatur [2] soll das Gesagte erklärt werden.

Aus Fig. 1, Stromkennziffer in Abhängigkeit vom Heizentnahmedruck für einen Frischdampfzustand von 150 at, 540 °C, können wesentliche Schlussfolgerungen gezogen werden, die auch für einen Frischdampfzustand von 270 °C (LWR-Kraftwerk) ihre Gültigkeit haben. Um einen möglichst hohen Gewinn an elektrischer Energie zu erreichen, soll die Entspan-

nung des Dampfes auf einem möglichst tiefen Heizentnahmedruck erfolgen. Das ist beim Wärmeträger Dampf nur bedingt möglich, da Dampfnetze einen Anfangsdruck von 4 bis 7 bar benötigen. Bei Wasser liegt die Situation wesentlich anders. Um Wasser auf 120 °C erwärmen zu können, muss die Temperatur des entnommenen Dampfes etwa 125 °C betragen, das entspricht etwa 2,4 bar. Man liegt im günstigen Bereich der Kurve. Auch aus diesen Gründen hat sich Wasser als Wärmeträger für Heizzwecke durchgesetzt. Es ist daher nicht unwesentlich, ob die Vorlauftemperatur 180 °C oder 130 °C beträgt.

Hier beginnt aber schon der Sachzwang. Die bestehenden schweizerischen Fernwärmenetze sind nicht nach diesen Kriterien ausgelegt. Sowohl im Beispiel Stadt Bern als bei der Einspeisung in das Netz der Stadt Basel ab Kaiseraugst muss mit 180 °C gerechnet werden. Bei LWR-Kraftwerken wäre die Entnahmestelle «Zwischenüberhitzer Zü» für ungefähr 128 bis 135 °C Vorlauftemperatur ideal. Es ist aber eine wirtschaftliche Utopie, wenn man verlangen würde, dass sich die bestehenden Netze an die optimale Temperatur der Entnahmestellen im LWR-Kraftwerk anzupassen haben. Umgekehrt ist auch eine Nachheizstufe im Fernheizwerk, die zusätzliche Brennstoffkosten (Fossil) und betriebliche Erschwernisse bedeuten würde, bei einer allfälligen Realisierung kaum zu verantworten.

Die Kraft-Wärme-Kupplung weist erhebliche energiewirtschaftliche Vorteile auf. Bei der Entnahme von Dampf aus einem Kondensationsturbosatz tritt eine von der Entnahmemenge und vom Entnahmedruck abhängige Leistungsminderung ein. Wird diese Minderleistung beispielsweise durch erhöhte Wärmezufuhr des Kraftwerkes wieder ausgeglichen, so beträgt dieser Mehrwärmeaufwand für einen LWR nur etwa 55 % der sonst vom Abnehmer zu erzeugenden Wärme. Bei fossil geheizten Kesseln mit Dampfdaten um 540 °C sind es sogar nur 18...25 % [3]. Die Kupplung von Strom- und Heizwärmeerzeugung ergibt die wirtschaftlichste Ausnutzung der Brennstoffe.

3. Wärmeschaltplan bei einer Fernwärmeentnahme aus einem Leichtwasser-Kernkraftwerk

Es gibt viele Varianten möglicher thermischer Schaltungen. Diskutiert werden sollen drei Schaltungen, nämlich solche aus dem Projekt «Fernwärme für die Stadt Bern» [4] und «Wärmelieferung aus dem Kernkraftwerk Kaiseraugst an das Fernheiznetz Basel»[3]). Die Planung für das erstgenannte Projekt sieht als Maximalvariante die Einspeisung von 50 Gcal/h vor. Als kostenoptimal für die speziellen Gegebenheiten (180 °C Heizwasser) hat sich die Heizung aus Anzapfung 3 der Hauptturbine herausgestellt (Fig. 2).

Die aufwendige Schaltung einer Frischdampfheizung mit unsymmetrischer Doppelgegendruckturbine sieht thermodynamisch bestechend aus, scheitert aber an den hohen Investitionskosten (Fig. 3).

Die Einspeisung ab Kernkraftwerk Kaiseraugst (KWK) in das grösste geplante Fernwärmesystem der Schweiz, nämlich die Stadt Basel mit einem jährlichen Wärmebedarf von 0,48 Mio MWh (412000 Gcal) und einer Spitzenlast von 160 MW, stellt neue Probleme hinsichtlich der Auslegungsgrundlagen im Kernkraftwerk (KKW). Gemäss Fachkommission für die regionale Energieversorgung Baselstadt/Baselland wird für 1990 eine Wärmehöchstlast von 480 MW, im Jahre 2000 von 920 MW erwartet. Davon sollte die Wärmelieferung ab Kernkraftwerk jeweils nur die Hälfte, also 240 bzw. 460 MW betragen. Als Wärmeträger wird im bestehenden Fernwärmesystem Heisswasser mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 180 °C und konstanter Rücklauftemperatur von 75 °C verwendet. Gerade hier muss gefordert werden, dass die hohe Vorlauftemperatur von 180 °C auf 160 °C gesenkt werden kann, damit ein ungünstiger Wärmeschaltplan in der Fernheizzentrale des KKW und damit auch ein unwirtschaftlicher Betrieb vermieden werden kann. Bei dieser grossen Leistung hat es sich

[3]) Unveröffentlichte Studie von Motor Columbus AG, Baden, freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

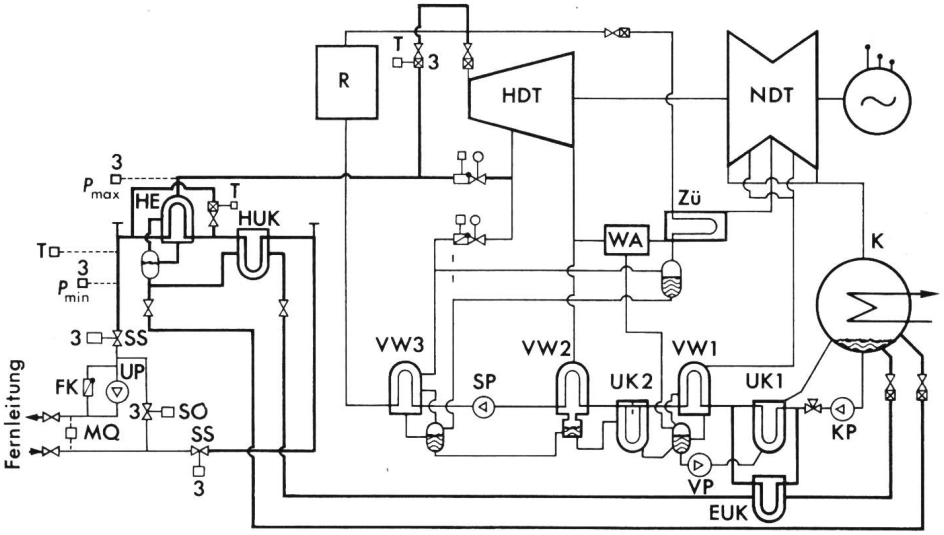

Fig. 2
Fernwärme-Studie. Thermische Schaltung. Heizung aus Anzapfung 3 der Hauptturbine

R	Reaktor	SP	Speisepumpe	SS	Schnellschluss-Schieber
HDT	Hochdruckturbine	KP	Kondensatpumpe	UP	Heisswasser-Umwälzpumpe
NDT	Niederdruckturbine	VP	Vorwärmerpumpe	FK	Freifluss-Rückschlagklappe
WA	Wasserabscheider	K	Kondensator	T	Heisswasser-Vorlauftemperatur (konstant)
Zü	Zwischenüberhitzer	MQ	Messung Wärmestrom	3	Durch P_{min}, P_{max} und P_{min}-P_{max} betätigte Organe
VW1, VW2	ND-Vorwärmer Nr. 1 bzw. Nr. 2	HE	Heisswassererzeuger		
VW3	HD-Vorwärmer Nr. 3	HUK	Heizdampfkondensat-Unterkühler		
UK1, UK2	Unterkühler 1 bzw. 2	EUK	End-Unterkühler		
		SO	Schnellöffnungs-Schieber		

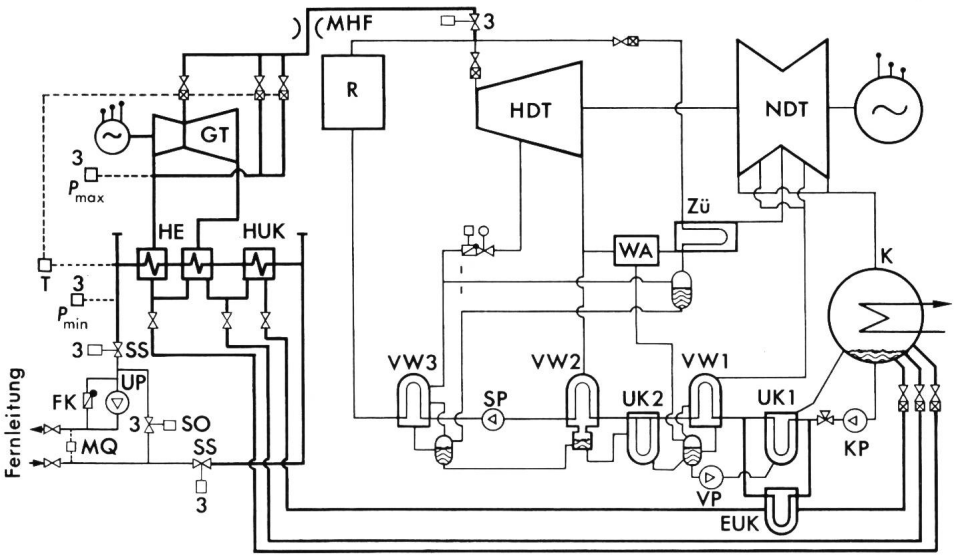

Fig. 3
Fernwärme-Studie. Thermische Schaltung Frischdampf-Heizung mit unsymmetrischer Doppel-Gegendruckturbine
GT Gegendruckturbine
MH_F Messung Heizfrischdampfmengen
Übrige Bezeichnungen siehe Fig. 2

gezeigt, dass eine dreistufige Erwärmung des Heizwassers (aus Verfügbarkeitsgründen zweisträngig) vorzuziehen ist, wobei die entsprechenden Anzapfungen der Niederdruckturbine und die Verbindungsleitung zwischen Hochdruckturbine und Wasserabscheider-Überhitzer (Zü) den Heizdampf liefern. Die aufgrund dieser Schaltung berechneten Wärmebilanzen ergeben an der Generatorklemme folgende Einbussen an elektrischer Leistung:

- 35,5 MW_e bei 240 MW_{th} Entnahme
- 70,5 MW_e bei 460 MW_{th} Entnahme

4. Sicherheit, Regelung und Betrieb

Bei der Planung einer Wärmelieferung aus einem Siedewasser-KKW (Direktkreislauf) spielen sicherheitstechnische Fragen eine wichtige Rolle, da die radioaktive Verseuchung des Fernwärmenetzes auch im ungünstigsten Fall verhindert werden muss. In dieser Hinsicht bietet eine Heisswasserlieferung viel weniger Probleme als eine Dampflieferung. In den Transportleitungen – auch nach Ausfall der Pumpen – herrscht immer der durch die Druckhaltungsanlage aufgezwungene statische Druck, der in allen Betriebsfällen über dem Druck des radioaktiven Primärdampfes liegt. Bei Defekten in den Heizern tritt das Wasser in den Primärkreislauf ein. Es müssen somit lediglich zwei Drücke oder eine Druckdifferenz gemessen werden. Beim Erreichen vorbestimmter Grenzwerte würde automatisch die Dampfzufuhr gestoppt, und die Heisswasser-Transportleitung in Vor- und Rücklauf abgesperrt. Zusätzlich bestehen zwei weitere Barrieren, indem sowohl das örtliche Fernheiznetz von der Transportleitung (Umformerstation) wie auch der einzelne Abonnent vom Fernheiznetz durch Wärmetauscher getrennt sind.

Die Regelung der Vorlauftemperatur des Heizwassers erfolgt über den Dampfdruck und über die Austrittstemperatur des Heisswassers. Im Projekt Stadt Bern würde man bei konstanter Vorlauftemperatur den Heisswasserdurchsatz regeln. Damit verhindert werden kann, dass eine sich ändernde Heizwärmeleistung die Reaktorleistung beeinflusst, muss ein Reaktorlastregler eingebaut werden. Hier handelt es sich um ein spezifisches Problem bei einem Siedewasserreaktor. Die Entwicklung eines solchen speziellen Reglers wird nach eigenen Studien als lösbar betrachtet.

Über den Betrieb und mögliche Betriebszustände könnte man von Projekt zu Projekt spezielle Angaben machen. Es erscheint als Leitsatz wichtig, dass die Wärmeversorgung auch bei Teillast der Turbogruppe aufrechterhalten werden kann und die fossile Reserve nur eingeschaltet werden muss, wenn infolge Betriebsstörungen die Turbine unter einem bestimmten Lastpunkt gefahren werden muss. Beinahe unabhängig von solchen Lastschwankungen der Turbine – Priorität hat die wirtschaftliche Elektrizitätserzeugung nach energiewirtschaftlichem Programm – ist die Schaltung nach Fig. 3.

5. Wärmetransport

Für den Transport kommt hauptsächlich ein Zweirohrsystem (eine Vorlauf- und eine Rücklaufleitung) mit Wasser als Wärmeträger in Frage. Das Transportsystem ist sowohl vom Wärmeerzeugungssystem als auch von den angeschlossenen Teilnetzen durch Wärmetauscher getrennt. Im Projekt «Fernwärme für die Stadt Bern» wurde die Trasseführung vom KKW Mühleberg nach dem Fernheizwerk Bern (13 km) genau studiert [4] und durch Rechnungen der Gebrüder Sulzer AG optimiert. Bei einer Transportleistung von rund 58 MW_{th} ergeben sich z.B. Rohrdurchmesser von 273 mm, Nenndruck 40 bar (Tab. I), wobei als Material nahtlose Siederohre oder spiralgeschweisste Stahlrohre in Frage kommen. Heikle technische Probleme entstehen bei der Trasseführung längs der projektierten Autobahn (Bern-Mühleberg), insbesondere bei der Überwindung von Hügelzügen (geodätische Höhe).

Fernwärmeversorgung der Stadt Bern
Kosten der 13 km Transportleitung Mühleberg–KVA Bern[4]) Tabelle I

Nennleistung	Gcal/h	50	150	400
	MW_{th}	58,15	174,45	465,2
Rohrdurchmesser	mm	273	457	711
Fernleitungsinvestition	Mio Fr.	24,5	33,5	51,3
Umformerstation in der KVA-Bern (mit verschiedener Grädigkeit)	Mio Fr. bei 10 °C	1,2	3,3	4,4
	Mio Fr. bei 4 °C	2,6	7,8	10,6

[4]) KVA Kehrichtverbrennungsanlage

Aus Tab. I sind die mit der Transportleistung stark zurückgehenden spezifischen Leitungsinvestitionskosten ersichtlich. Eine interessante Vergleichszahl bei Nennleistung 50 Gcal/h sei noch erwähnt:

Transportleitung Mühleberg–Bern inkl. Wärmetauscherstationen	27,1 Mio Fr.
Investitionen Heizzentrale Kernkraftwerk Mühleberg	14,2 Mio Fr.
	41,3 Mio Fr.

6. Wirtschaftlichkeit und Reservehaltung

Bei einem Kraftwerk für die Erzeugung von elektrischer und Wärmeenergie ist eine eindeutige Zuordnung der Gesamtkosten zur Stromerzeugung und z. B. zur Prozessdampferzeugung nicht möglich. Es besteht eine lineare Abhängigkeit zwischen Strom- und Prozessdampferzeugungskosten, die von der Art des Kraftwerkes, der Stromkennziffer und den einzelnen Parametern der Wirtschaftlichkeitsberechnung bestimmt wird. Als Methode der Beurteilung haben sich die sog. Grenzkostenkurven [5] bewährt. Auf der y-Achse eines Diagramms werden die Prozessdampferzeugungskosten, auf der x-Achse die Stromerzeugungskosten aufgetragen. Die Grenzpunkte auf Abszisse und Ordinate erhält man dadurch, dass in einem Fall bei vollem Betrieb der Anlage der erzeugte Strom bzw. Dampf mit 0 Rp/kWh bewertet wird, also die gesamten Kosten durch den sich dann ergebenden Dampf- bzw. Strompreis gedeckt werden müssen.

$$K_{\text{Strom}} = \frac{(K_{\text{Fest}} + K_{\text{Arbeit}}) \cdot 10^2}{P_{\text{Netto}} \cdot B_{\text{h}}} \quad \text{Rp/kWh}$$

$$K_{\text{Dampf}} = \frac{K_{\text{Fest}} + K_{\text{Arbeit}}}{\Sigma D_{\text{h}} \cdot B_{\text{h}}} \quad \text{Fr./t}$$

K_{Fest} Festkostenanteil (Kapitalkosten + Betriebskosten + Brennstoffkosten) in Fr./Jahr

K_{Arbeit} Arbeitskostenanteil, also Brennstoffkosten resp. Wärmeenergiekosten (Gcal/a × Wärmepreis am Austritt des Dampferzeugers in Fr./Gcal)

P_{Netto} Elektrische Nettoleistung

B_{h} Vollast-Stunden pro Jahr

ΣD_{h} Gesamte abgegebene Prozessdampfmenge

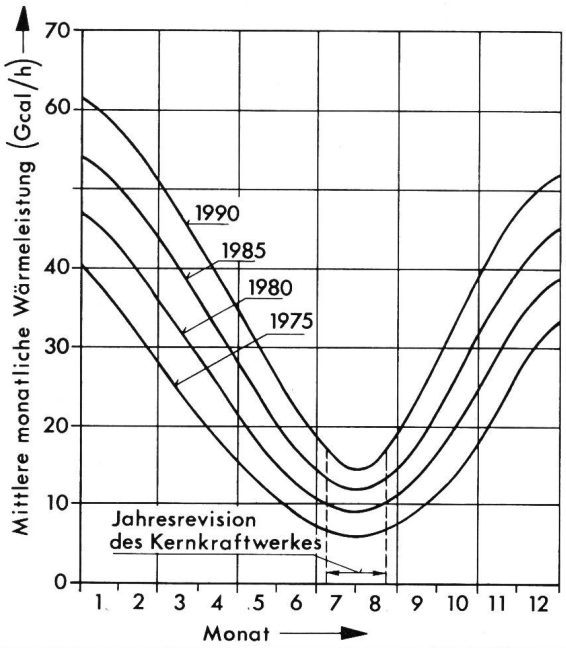

Fig. 4 Wärmeleistung der Berner Fernheizung ohne KVA

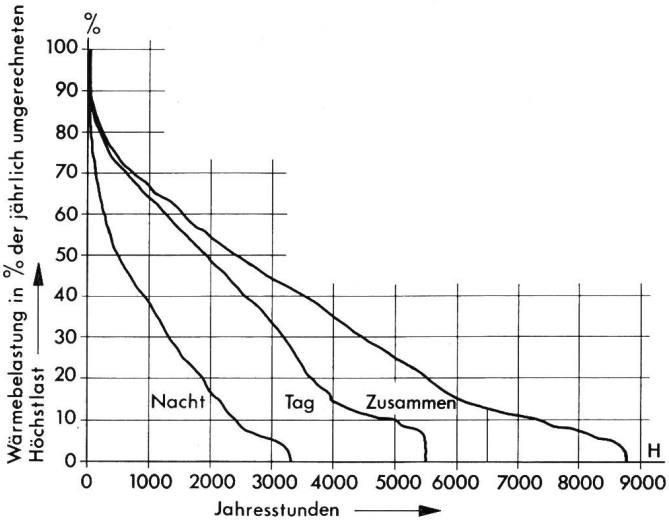

Fig. 5 Wärmelieferung ab Kernkraftwerk Kaiseraugst an das Fernheiznetz Basel. Dauerkurve der normierten Fernheizleistungen
Jahresbenutzungsstunden der Höchstlast: 2989 h

Die Grenzkostenkurve ist eine Gerade; ihre Neigung wird u. a. von der Stromkennziffer bestimmt. Die Auswertungen in [5] zeigen, dass ein Wirtschaftlichkeitsvergleich Kernkraftwerk/Ölkraftwerk nur bei grossen Blockleistungen (400...900 MW_e, 2000 t/h Prozessdampf bei 18 bar 265 °C) sinnvoll ist (Beispiel KKW-Projekt der BASF). Im gerechneten Fall betrug das Verhältnis von Festkostenanteil zu Arbeitskostenanteil beim KKW 76 % zu 24 %, beim Ölkraftwerk 38 % zu 62 % (Ölwärmepreis 8 DM/Gcal)[5]). Bei kleineren Blockleistungen schneidet das KKW (hohe Investitionskosten) schlecht ab, ebenso für den Mittellastbetrieb von 1000 bis 3000 Vollaststunden/a. Dieses Gebiet ist den konventionellen Kraftwerken mit niedrigen spezifischen Investitionen und Wärmeverbräuchen von 2200...2400 kcal/kWh vorbehalten. Aus diesen Gründen ist die Idee von Kleinreaktoren in Ballungszentren wirtschaftlich nicht realisierbar.

Der Aufsatz soll sich aber in erster Linie mit der Abgabe von Grundlastwärme in ein bestehendes Fernwärmenetz beschäftigen, wobei die Wärmeabgabe im Vergleich zur Elektrizitätserzeugung lediglich sekundären Charakter aufweist. Die Jahreskostenrechnung für Wärme loco Kraftwerk fällt bei den in Abschnitt 5 und 6 besprochenen Projekten durchaus konkurrenzfähig aus im Vergleich zur fossilen Erzeugung. Jahreskosten für Wärmeerzeugung:

$$k \cdot E_{\text{W}} = \Delta I \cdot a + I \cdot b \frac{\Delta P_{\text{E max}}}{P_{\text{E nom}}} + E_{\text{W}} \frac{\Delta P_{\text{E max}}}{P_{\text{W max}}} \; k_{\text{B}}$$

$$E_{\text{W}} \cdot \frac{\Delta P_{\text{E max}}}{P_{\text{W max}}} + E_{\text{el}} = E_{\text{el ursp}}$$

k spezifische Wärmekosten (Fr./MWh)

E_{W} jährlicher Wärmeenergiebedarf (MWh/a)

I Totalinvestition des Kernkraftwerkes (Fr.)

ΔI Zusatzinvestitionen für Fernheizzentrale (Fr.)

a prozentuale Jahreskosten der Investition (%/a) inkl. prozentualen Zuschlag für Betrieb, Unterhalt, Administration, Steuern und Versicherung der Fernheizzentrale

b prozentuale Jahreskosten der Investitionen

[5]) Die Ergebnisse sehen 1977 mit Schwerölpreisen von 24 Fr./Gcal nicht anders aus, da die Investitionskosten für KKW beinahe im gleichen Verhältnis gestiegen sind.

$\Delta P_{E\,max}$ maximale Einbusse an elektrischer Nettoleistung (MW)
$P_{E\,nom}$ elektrische Nettoleistung des Kraftwerkes (MW)
$P_{W\,max}$ maximale Wärmeleistung (MW)
E_{el} jährlicher elektrischer Energiebedarf (MWh)
$E_{el\,urspr}$ ursprüngliche Energieerzeugung, ohne Dampfentnahme (MWh)
k_B spezifische Brennstoffkosten (Fr./MWh) inkl. spezifischer Kostenanteil für Betrieb, Unterhalt, Administration.

Rechnet man am Beispiel Fernwärme Stadt Bern für den Fall 58-MW-Leistung über 6000 h bei einer maximalen Mindererzeugung des Kraftwerkes von 19 MW die spezifischen Wärmekosten loco Mühleberg aus, so erhält man 16 Fr./MWh. Wird aber berücksichtigt, dass die Wiederbeschaffungskosten für die Minderenergie wesentlich höher liegen als die spezifischen Produktionskosten für elektrische Energie in Mühleberg, erhöhen sich die spezifischen Wärmekosten auf 24...26 Fr./MWh. Die Wärmeerzeugung loco Kernkraftwerk Mühleberg hält in bezug auf Kosten einem Vergleich mit fossil befeuerten Kesseln durchaus stand. (1976: Schwerölpreis 240.– Fr./t; Wirkungsgrad 80 %, Wärmeabgabepreis 26 Fr./MWh).

In die Kostenstruktur geht die Reservehaltung nicht ein, die beim nuklearen Fernheizkraftwerk auch bei der Anwendung der relativ flexiblen Kraft-Wärme-Kupplung (Anzapfdampf) ein Problem darstellt. Voraussetzen muss man daher ein voll ausgebautes, nötigenfalls fossil beheizbares Fernwärmenetz, wobei die Kernenergie die Grundlast zu übernehmen hätte. Auf eine weitere, oft geäusserte These über die Kostenstruktur der Fernwärmeversorgung bei Wärmebezug aus einem abgeschriebenen Kernkraftwerk muss insofern eingegangen werden, als man sich in der Regel darüber falsche Hoffnungen gemacht hat. Nach der Abschreibungsdauer von 18...20 Jahren sind Reserven anzulegen, damit entweder umfangreiche Erneuerungsarbeiten in Angriff genommen werden können oder eine allfällige Totalentsorgung am Ende der Druckkessellebensdauer finanziert werden kann.

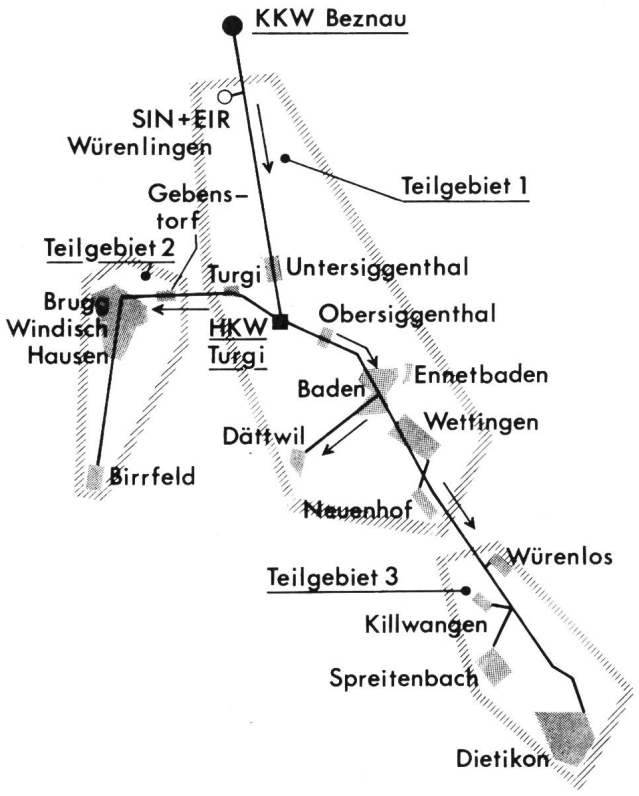

Fig. 6 Fernwärmenetz «Transwaal»

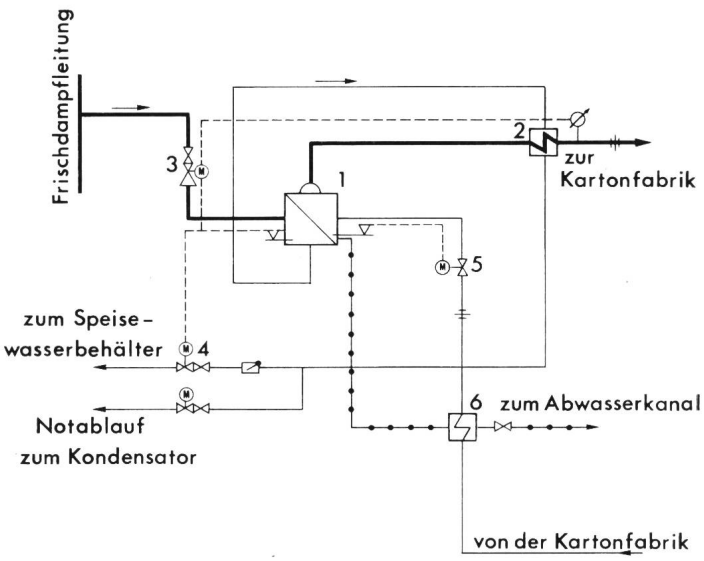

Fig. 7 Schaltschema der Ferndampfversorgung der Kartonfabrik Niedergösgen ab KKW Gösgen-Däniken

1 Verdampfer
2 Überhitzer
3 Druckreduzierstation
4 Heizdampfkondensatablauf-Regelstation
5 Verdampferzulauf-Regelstation
6 Laugekühler (Abschlämmkühler)

Zusammenfassend darf festgestellt werden, dass eine kleine Wärmeabgabe (klein im Vergleich zur produzierten elektrischen Energie) loco Kernkraftwerk jetzt schon wirtschaftlich ist. Die Prognose ist eher günstig, da bei steigenden Ölpreisen die Wärmeabgabepreise ab fossil geheiztem Werk sehr viel stärker reagieren werden (hoher Brennstoffkostenanteil) als vergleichsweise bei einer Verteuerung des Kernbrennstoffes, da bekanntlich die Kernkraft in der Kostenstruktur einen wesentlich kleineren Brennstoffkostenanteil (Faktor 3) aufweist.

7. Übersicht über die schweizerischen Projekte

Die Projektstudie einer Fernwärmeversorgung der Stadt Bern durch das KKW Mühleberg ist ausführlich und teilweise bis ins Detail gehend ausgearbeitet worden [4]. Die technischen Probleme sind unter Gewährleistung der nuklearen Sicherheit mit Bestimmtheit lösbar. Die wirtschaftliche Machbarkeit ist unter den heutigen Randbedingungen jedoch nicht gewährleistet. Bei einer Maximalvariante (58 MW_{th}) und einer Betriebsstundenzahl von 6000 h müsste man mit spezifischen Bezugskosten loco KVA-Bern von rund 32 Fr./MWh (Preisstand 1976) rechnen. Im Vergleich dazu ergibt die Schweröl-verbrennung in der KVA-Bern (240.– Fr./t Schweröl, Wirkungsgrad 80 %) Kosten von rund 26.– Fr./MWh. Bei stark steigenden Ölpreisen und bei einer systematischen Förderung der Fernwärmeversorgung in der Stadt Bern (Einbezug bestehender Quartierheizungen im Westen der Stadt auf einen Anschlusswert von 300...400 MW_{th} könnte der Wärmebezug sogar wirtschaftlich gestaltet werden (Fig. 4: Wärmeleistung der Berner Fernheizung ohne KVA).

Die spezifischen Wärmekosten beim Projektvorschlag Kaiseraugst (Fernwärme für die Region Basel) loco KKW belaufen

sich nach Schätzungen auf etwa 15.– Fr./MWh bei einer Betriebsstundenzahl von 6500 h und der Dauerkurve (Fig. 5) der normierten Fernheizleistungen (Wärmehöchstlast erste Ausbaustufe 480 MW entsprechend jährlicher Wärmelieferung von 1,85 Mio MWh).

Das Projekt «Transwaal» (Transport Wärme Aare Limmattal) ist der Öffentlichkeit bereits vorgestellt worden[6]). Die Arbeiten werden aber erst Ende 1977 beendet sein. Die Studie soll die Frage beantworten, ob es wirtschaftlich und technisch realistisch ist, die Ortschaften und Grossverbraucher der Agglomerationen Baden und Brugg – evtl. sogar jene des Zürcher Limmattals – hauptsächlich vom KKW Beznau (400 Gcal/h) und dem Heizkraftwerk (HKW) Turgi (4000 Gcal/h) aus durch ein Fernwärmenetz mit Heisswasser zu versorgen und damit deren Heizwärme- und Warmwasserbedarf zu decken (Fig. 6). Der Wärmebedarf der gesamten Region wird bis zum Jahr 2000 auf etwa 1200 Gcal/h geschätzt, wobei ca. 900 Gcal/h anschlussfähig bzw. anschlusswert sind. Die äquivalente Benützungsdauer der Höchstlast ist etwa 2650 h/a. Als Vorlauftemperatur kommen 120 °C bis 180 °C in Frage. Die Rücklauftemperatur wird voraussichtlich 60 °C betragen. Eine Optimierung des Wärmeschaltplans ist in Arbeit, ebenso die Erarbeitung feinerer Kostenabschätzungen.

Eine Besonderheit ist noch die Ferndampfversorgung der Kartonfabrik Niedergösgen aus dem KKW Gösgen-Däniken[7]). Der maximale Dampfverbrauch dieser Kartonfabrik beträgt gegenwärtig 50 t/h; die Ferndampflieferung wurde unter Berücksichtigung der Produktionssteigerung für 80 t/h ausgelegt. Der Prozessdampf wird zu 84 % in geschlossenen Wärmetauschern kondensiert, zu 14 % für direkte Flüssigkeitsaufheizung verwendet, und die restlichen 2 % sind Verluste. Die gesamten Kondensatverluste von 16 % werden durch eine Zusatzwasseraufbereitung in der Kartonfabrik gedeckt. Der Dampfzustand am Austritt der Verdampferanlage ist 13,73 bar und 222 °C. Das Speisewasser wird mit 19 bar und 101 °C in das KKW zurückbefördert. Der Wärmeschaltplan ist sehr einfach (Fig. 7). Das Verdampfen des Speisewassers erfolgt durch Frischdampf, der vor der HD-Turbine entnommen wird. Der erzeugte Prozessdampf wird mittels Frischdampfkondensat leicht überhitzt. Der Kondensatstrang ist völlig konventionell geschaltet. Die Leistungseinbusse an den Generatorklemmen bei einer Prozessdampfproduktion von 80 t/h muss relativ gross sein (vgl. Abschnitt 2, Fig. 1) und beträgt ungefähr 21 MW. Das Beispiel zeigt die praktischen Möglichkeiten für die Substitution fossiler Brennstoffe auf.

[6]) Unveröffentlichte Studie «Transwaal». Zusammenarbeit von: Städtische Werke Baden (Federführung), Gemeinde Wettingen, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, Kabelwerke Brugg AG, Gebrüder Sulzer AG, Motor Columbus AG, Nordostschweizerische Kraftwerke AG und Baudepartement des Kantons Aargau.

[7]) Die Unterlagen über dieses Projekt sowie über die Studie «Transwaal» wurden dem Autor von Motor Columbus AG freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

8. Zusammenfassung in Thesenform

– Der Anschlusswert der Fernwärmeversorgungen in schweizerischen Städten ist zurzeit im Vergleich zum Ausland bescheiden. Der Ausbau des Fernwärmenetzes in städtischen Agglomerationen ist zu fördern. Durch den Wegfall der Einzelheizungen kann ein bedeutender Beitrag an die Reinhaltung der Luft geleistet werden.

– Der Ausbau der Fernwärmeversorgung ist ein ausgesprochen örtliches und regionales Problem, das auch auf dieser Ebene gelöst werden muss.

– Für die kleinen Fernwärmenetze drängt sich eine fossile Beheizung auf. Die Frage Fernheizwerk oder Einsatz der Kraft-Wärme-Kupplung muss von Fall zu Fall entschieden werden.

– Wärme aus KKW kann mit grosser Zukunft als Grundlast in ein grösseres, zweckmässig ausgebautes Fernwärmenetz eingespeist werden. Die Reservehaltung wird durch die bestehenden fossil beheizten, kleineren Fernheizzentralen besorgt.

– Der Fernwärmetransport über grössere Distanzen mit Warmwasser als Wärmeträger ist nur für hohe Übertragungsleistungen (> 50 MW) wirtschaftlich vertretbar.

– Durch die Einspeisung von Grundlastwärme aus Kernkraftwerken kann ein wesentlicher, wahrscheinlich der grösste Beitrag zur Substitution von Öl geleistet werden.

Literatur

[1] Elektrizität und Wärme. Versorgungskonzept der Schweiz bis zum Jahre 2000. Zürich, VSE/Baden, Brown Boveri & Cie./Winterthur, Gebrüder Sulzer AG, 1975.

[2] *H. Müller:* Wirtschaftliche und technische Probleme der Kraft-Wärme-Kupplung. Wärme 76(1970)3, S. 78...83.

[3] *L. Probst* und *G. Schauenburg:* Heizkraftwerke und Industriekraftwerke. In: K. Schröder: Grosse Dampfkraftwerke. Planung, Ausführung und Bau. Band 2: Die Lehre vom Kraftwerksbau. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1962; S. 346...381.

[4] Nukleare Fernwärme für die Stadt Bern. Bern, Bernische Kraftwerke AG, 1976.

[5] *K. H. Callsen:* Wirtschaftlichkeitsvergleich fossiler und nuklearer Kraftwerke für Strom und Prozessdampf. Atomwirtschaft 14(1969)8, S. 393...396.

Adresse des Autors

P. Stoll, Dr.sc.nat., Direktor der Bernischen Kraftwerke AG, Viktoriaplatz 2, 3000 Bern 25.