

KfK 5126  
März 1993

# **Zur energie- und umweltpolitischen Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung**

**F. Conrad**  
Abteilung für Angewandte Systemanalyse

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



**KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE**

**Abteilung für Angewandte Systemanalyse**

**KfK 5126**

**Zur energie- und umweltpolitischen Bedeutung  
der Kraft-Wärme-Kopplung**

*F. Conrad*

**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe**

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## **Zur energie- und umweltpolitischen Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung**

### **Zusammenfassung:**

In der Energie- und Umweltpolitik gilt die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als besonders energiesparende und somit umweltschonende Energietechnik. Der vorliegende Bericht zeigt, daß diese Einschätzung energiewirtschaftlich und energietechnisch nur bedingt berechtigt ist. Die realisierbare Energieeinsparung weist eine große Bandbreite auf, in Abhängigkeit von den technischen Parametern der Koppel-Anlagen, den konkreten Einsatzbedingungen und den Eigenschaften der zum Vergleich herangezogenen Einzelanlagen. Diesbezügliche Überschätzungen hängen auch mit der Gepflogenheit zusammen, den energetischen KWK-Vorteil vollständig der Fernwärme gutzuschreiben. Wird dieser Vorteil auf beide Koppelprodukte aufgeteilt, so ermöglicht der mit über 80% Wirkungsgrad erzeugte Koppelstrom eine besonders effiziente Raumbeheizung. Die zeitgleiche Verwertung der Koppelprodukte für den gleichen Zweck könnte der KWK mehr Ausbreitungschancen eröffnen, als es die energiewirtschaftlich problematische Einspeisung des Koppelstroms während der Heizperiode zur allgemeinen Verwendung erlaubt.

Der zweite Schwerpunkt des Berichts liegt auf der CO<sub>2</sub>-Vermeidung mittels KWK. Koppelanlagen auf Erdgasbasis sind klimapolitisch sehr günstig, besonders wenn man mit Stromerzeugung aus alten Kohlekraftwerken und mit alten Ölkesseln vergleicht. In der Bundesrepublik stellt allerdings Steinkohle und nicht Erdgas den wichtigsten HKW-Brennstoff dar, was deren CO<sub>2</sub>-Vorteil stark verringert. Bezieht man GuD-Kraftwerke und Gas-Brennwertkessel in den Vergleich ein, so sind HKW klimapolitisch der Kombination fortschrittlicher Einzelanlagen unterlegen.

Es zeigt sich ferner, daß der spezifische CO<sub>2</sub>-Vorteil des Erdgases in modernen Einzelanlagen besser genutzt werden kann als in KWK-Anlagen.

## **The role of combined heat and power (CHP) in energy and climate policy**

### **Summary**

In the energy- and environment context CHP is said to be especially energy saving and climate preserving. This report shows that from the standpoint of energy economics as well as under technical aspects this judgement holds true only under special conditions. Depending on the technical parameters, the concrete circumstances of operation and the characteristics of the power plants and heating systems compared to CHP-plants the range of realistic energy savings turns out to be very large. Related overestimations are to a good extent caused by the traditional practice of granting the energetic advantage of CHP exclusively to the district heating. If this advantage is credited to heat and power as equal shares space heating with cogenerated power of 80% efficiency reveals to be very energy conserving.

The *uno actu* utilization of cogenerated heat and power, for the same purpose could facilitate the expansion of CHP, since the problems related to the feeding of cogenerated power into the grid for general purposes would disappear.

The second main issue of this report concerns the abatement of CO<sub>2</sub>-emissions with the aid of CHP. Fuelled with natural gas, CHP-plants are attractive instruments for climate policy. This is especially true if CHP is compared to old coal-based power plants and oil-fuelled old heating systems. In the FRG, however, hard coal, and not natural gas, will be the main fuel for future CHP, lowering its CO<sub>2</sub>-advantage considerably.

On the other hand high efficient combi-power plants (gas turbine plus condensing turbine) and gas heating systems have to be included in the comparative analyse. Compared to these advanced systems the CO<sub>2</sub>-characteristics of CHP are inferior. Moreover, the specific CO<sub>2</sub>-advantage of natural gas is better used by such modern mono systems rather than CHP-plants.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
<b>Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>1. Teil: Zur energiepolitischen Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)</b>	<b>6</b>
<b>2. Teil: Zur klimapolitischen Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung</b>	<b>42</b>
<b>3. Teil: Kraft-Wärme-Kopplung als Ausstiegshilfe?</b>	<b>72</b>
<b>4. Teil: Zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung durch Kraft-Wärme-Kopplung</b>	<b>81</b>



## Vorwort

Dieser KfK-Bericht besteht aus 4 Papieren, die aufgrund der Zielvereinbarung 21.11.07.P03A und im Rahmen der Zuarbeit für das Grundsatzreferat 311 des BMFT zwischen Juni 1991 und Juli 1992 entstanden sind.

Ausgangspunkt war der Gegensatz zwischen dem hohen Stellenwert der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in der energie- und umweltpolitischen Diskussion einerseits und der geringen Transparenz des zugrundeliegenden energietechnischen Sachverhalts sowie der Uneinheitlichkeit der energiewirtschaftlichen Einordnung andererseits.

Zu den bekanntesten Kurzbeschreibungen der energiepolitischen Vorteilhaftigkeit der KWK gehört die Aussage, in Heizkraftwerken (HKW) werde die eingesetzte Energie mehr als doppelt so gut genutzt wie in normalen Kraftwerken. Diese Aussage ist zwar richtig, wenn man das Output/Input-Verhältnis eines Heizkraftwerks von 0,80-0,90 mit dem Erzeugungswirkungsgrad eines reinen Kraftwerks von 0,38-0,42 vergleicht. Die Frage ist nur, welche energiepolitischen Schlüsse daraus gezogen werden, bzw. welchen energiepolitischen Standpunkt diese Aussage stützen soll.

Im allgemeinen wird sie so verstanden, als könne man in HKW elektrischen Strom mit höchstens halb so viel Energie erzeugen wie im normalen Kraftwerk. Die dominierende Stromerzeugung in Kondensationskraftwerken wird als Energievergeudung empfunden, die man durch forcierten HKW-Bau abstellen sollte. Dabei wird übersehen, daß HKW in einer gewissen Bandbreite nur in Abhängigkeit vom Fernwärmebedarf während der Heizperiode Strom produzieren können und daher keine Alternative zu den strombedarfsorientierten Kondensationskraftwerken sein können, sondern lediglich eine Ergänzung. Die Forderung „Koppelstrom statt Kondensationsstrom“ übergeht die von den sehr unterschiedlichen Bedarfsverläufen bei Strom und Wärme ausgehenden energiewirtschaftlichen Zwänge.

Ferner ist sich der Laie nicht bewußt, daß diese Interpretation der besagten Effizienz-Aussage im Widerspruch zu der bekannten Propagierung der Fernwärme aus HKW als besonders energiesparende Energieform für die Raumwärmeversorgung steht. Im Zweifel ist er der Meinung, die energiesparende Stromerzeugung sei ein zusätzlicher Grund für starken Fernwärmeausbau. Daß dieser trotz

jahrzehntelanger Befürwortung und Förderung nur langsam vorankommt, nährt seine Zweifel an der Rationalität unserer Energiepolitik.

Die Fernwärme-Propagierung seit der ersten Ölkrise 1973 beruht auf der dogmähnlichen Konvention, den energetischen Vorteil der KWK allein der Fernwärme zugute kommen zu lassen. Dabei ergibt sich für die Koppelwärme ein rechnerischer Erzeugungswirkungsgrad von weit über 1, wie es z.B. bei Wärmepumpen der Fall ist. Diese starke energetische Bevorteilung der Fernwärme ist für die Fachwelt aus thermodynamischen Gründen gerechtfertigt. Über die Konsequenz für den Koppelstrom bleibt die energiepolitisch interessierte Öffentlichkeit allerdings im unklaren. Sie besteht darin, daß der KWK-Strom energetisch genau so ungünstig erzeugt wird wie reiner Kondensationsstrom.

Gemäß der herrschenden energiewirtschaftlichen Lehre beträgt der Erzeugungswirkungsgrad des Koppelstroms 0,38-0,42, und nicht 0,80-0,90, wie es die populäre KWK-Effizienzaussage suggeriert. Stellt man sich aber auf den Standpunkt, der hohe Wirkungsgrad von KWK-Anlagen habe für den Koppelstrom zu gelten, so ist die Koppelwärme energetisch nicht günstiger als Fernwärme aus einem normalen Heizwerk.

Diese Zweideutigkeit der energetischen Vorteilhaftigkeit überträgt sich zwangsläufig auf die Einschätzung der Umweltschonung, insbesondere der CO<sub>2</sub>-Vermeidung durch KWK-Anlagen. Vermeiden sie CO<sub>2</sub>, indem sie Kohlestrom aus Kondensationskraftwerken ersetzen, oder indem sie alte Ölheizungen durch Fernwärme aus Gas substituieren, oder beides? Ist vielleicht der effiziente Koppelstrom eine besonders günstige Heizenergie? Zur Klärung dieser Fragen im Hinblick auf eine realistische Einschätzung der Möglichkeiten und Grenzen der KWK als energie- und umweltpolitisches Instrument soll dieser Sammelbericht beitragen.

1) Der erste Teil behandelt produktionstheoretische und thermodynamische Grundfragen der KWK und deren Bedeutung für die energiepolitische Beurteilung von HKW. Bezüglich der wichtigen Frage der Koppelproduktbewertung, d.h. der Aufteilung des Inputs auf die beiden Produkte Strom und Fernwärme, wurde eine Literaturrecherche 1961-1991 durchgeführt, um die Bedeutung des Exergiebegriffs für die KWK zu klären. Es ergaben sich keine Anhaltspunkte dafür, daß dieser Begriff für eine energiepolitische KWK-Strategie hilfreich sein könnte.

Am plausibelsten erscheint uns die Bewertung der Koppelprodukte nach ihrem Energiegehalt (kalorische Input-Aufteilung). Dabei wird dem Koppelstrom praktisch die hohe Effizienz der KWK zuerkannt mit der Folge, daß das Verheizen von Strom aus HKW zur energetisch günstigsten der herkömmlichen Heizmethoden wird. Ferner entfallen die mit dem Einspeisen von Koppelstrom ins Netz zur allgemeinen Verwendung verbundenen Probleme der Lastverteilung und Reservehaltung.

- 2) Im zweiten Teil wird zunächst der in einer Studie für das Land Hessen aufgestellten Behauptung nachgegangen, gasbefeuerte HKW zeichneten sich durch eine negative CO<sub>2</sub>-Emission aus und seien daher klimafreundlicher als Atomkraftwerke. Um die wissenschaftliche Fragwürdigkeit dieser Behauptung zu verdeutlichen, war eine neuerliche Beschäftigung mit der Problematik der Koppelprodukt-Bewertung in Theorie und Praxis erforderlich. Für die zu negativen CO<sub>2</sub>-Werten führende Saldierung von HKW-Emissionen mit Emissionen hypothetisch ersetzter Ölheizungen gibt es keine wissenschaftlich stringente Begründung, die es beispielsweise verbieten würde, einem Kernkraftwerk die CO<sub>2</sub>-Emissionen ersetzter oder verhinderter Braunkohlenkraftwerke gutzuschreiben, da es keine Fernwärme liefert.

Zur Beurteilung der CO<sub>2</sub>-Wirkung verschiedener Stromerzeugungs- und Heizsysteme enthält der Bericht strom- und wärmebezogene Emissionsberechnungen von KWK- und Einzelanlagen auf unterschiedlicher Brennstoffbasis. Um energiepolitisch relevante Aussagen machen zu können, werden realistische Referenzfälle definiert, wie z.B. Kohle-HKW im Vergleich zu GuD-Kraftwerk und Brennwärtekessel. In diesem Falle ist die KWK-Lösung klimapolitisch unterlegen.

Neben der spezifischen, auf die Energiedienstleistung bezogene CO<sub>2</sub>-Vermeidung interessiert das absolute CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotential der KWK in der Bundesrepublik. Es wird vom Bedarf an Mittellaststrom während der Heizperiode limitiert, nicht vom Fernwärmepotential. Auf Kohlebasis ist es klimapolitisch unerheblich. Nimmt man Erdgas als Brennstoffbasis an, so sind Einzelanlagen klimapolitisch den Koppelanlagen mindestens gleichwertig.

- 3) Der dritte Teil besteht in der Kurzfassung eines Vortrages, der auf der Jahrestagung Kerntechnik im Mai 1991 gehalten wurde. Es geht hier um die in Ausstiegsszenarien vertretene Auffassung, KKW könnten weitgehend durch KWK-Anlagen ersetzt werden. Unter Elektrizitätswirtschaftlichen Aspekten

ist die Substitution von Grundlaststrom durch Koppelstrom bei Industrie-KWK-Anlagen denkbar, die in der Wärme-Grundlast für Fertigungsprozesse arbeiten. Inwieweit im Zuge einer starken Fernwärme-Expansion Atomstrom ersetzt werden kann, ist eine Spezialfrage für versorgungswirtschaftliche Fachleute, wobei freilich normale ökonomische Maßstäbe weitgehend zurückstehen müssen. Demgegenüber stellt unser Beitrag weniger die Frage „möglich (richtig) oder unmöglich (falsch)“ als vielmehr die Frage „sinnvoll oder nicht“. Für die Kernenergie-Kontroverse ist es typisch, daß immer wieder Contra-Behauptungen aufgestellt werden, über deren partielle oder totale Richtigkeit die Experten endlos streiten können, so daß sich das Contra-Argument schließlich verselbständigt und höchstens noch abgeschwächt, aber nicht mehr ausgeräumt werden kann. Deswegen sei vorgeschlagen, daß die Pro-Seite zunächst einmal versucht, die Contra-Behauptung zurückzuweisen, indem man sie ins Leere laufen läßt, ad absurdum führt, oder sie durch Aufzeigen innerer Widersprüche sich selbst neutralisieren, aufheben läßt.

In diesem Sinne erfolgt hier eine argumentative Verwertung des im ersten Teil dargelegten Sachverhalts, daß der mit einem Wirkungsgrad von 0,80-0,90 im KWK erzeugte Strom die neben dem Gas-Brennwertkessel effizienteste und umweltfreundlichste Heizung ermöglicht, nämlich die Elektro-Direktheizung mit Koppelstrom. Wird aber der Strom aus HKW vernünftigerweise verheizt, so steht er natürlich als Ersatz für Atomstrom dem Netz für allgemeine Zwecke nicht zur Verfügung. Damit ist der Idee KKW durch HKW zu ersetzen der sachliche Boden entzogen.

- 4) Der vierte Teil ist ein Artikel, der für die Zeitschrift „Energiewirtschaftliche Tagesfragen“ verfaßt wurde. Er basiert auf dem als Teil 2 abgedruckten Papier über KWK und CO<sub>2</sub>-Problem und unterzieht die der KWK in der heutigen Klimadiskussion nachgesagten Vorzüge einer kritischen Prüfung anhand von typischen Anlagen. Dabei geht es vor allem um die Trennung des energietechnischen CO<sub>2</sub>-Effekts (Energieeinsparung) vom energiepolitischen Effekt der Brennstoffbasis. Über die Hälfte der von KWK-Anlagen erwarteten CO<sub>2</sub>-Vermeidung beruht auf den Prämissen, daß HKW mit dem klimafreundlichen Erdgas betrieben werden und daß sie Strom sowie Raumwärme aus alten Kohlekraftwerken bzw. Ölheizungen ersetzen. Für die Bundesrepublik realistischer ist die Steinkohle als HKW-Brennstoff, in welchem Falle die CO<sub>2</sub>-Vermeidung im Vergleich zu Kohlestrom und Ölwärme nicht mehr erheblich

ist. Sie schlägt sogar ins Gegenteil um, wenn man Kohle-HKW mit GuD-Kraftwerken plus Gas-Brennwertkesseln vergleicht.

Die KWK-Technik vermeidet nur unter ganz bestimmten, nicht sonderlich realistischen Annahmen im erheblichen Maße CO<sub>2</sub>.

Darüberhinaus zeigt das Papier, daß die bekannte Klimaschonungswirkung des Erdgases in Einzelanlagen besser zum Tragen kommt als in KWK-Anlagen. In HKW läßt sich die heimische Steinkohle effizient und klimaschonend einsetzen. Insofern nutzen sie mehr der Kohle als dem Klima.

**1. Teil:                    Zur energiepolitischen Bedeutung der  
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)**

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
1.    Produktionstheoretische Grundlagen der KKW	7
2.    Ein Paradoxon der energiepolitischen KWK-Diskussion	9
3.    Energetischer Wirkungsgrad und thermodynamische Bewertungen	12
4.    Umweltentlastung durch KWK?	17
5.    Energiewirtschaftliche und energiepolitische Problematik der heutigen Koppelstrom-Einspeisung bei bestehendem Bewertungsdogma	23
6.    Wärmeversorgung mit Koppelstrom	27
 Anmerkungen und Literatur	 29
 4 Anlagen	

## Zur energiepolitischen Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung

Die Koppelproduktion von Strom und Fernwärme ist als „Kraft-Wärme-Kopplung“ (KWK) ein regelmäßiges Kapitel in energie- und umweltpolitischen Berichten, Gutachten und Szenarien<sup>1)</sup>. Sie soll Energieeinsparung und Umweltentlastung in erheblichem Ausmaß bewirken, die Versorgungssicherheit auf dem Wege der Substitution von Heizöl durch Fernwärme aus heimischer Kohle erhöhen, als Symboltechnik einer rechtlich-organisatorischen Umstrukturierung zur „Kommunalisierung“ unserer Energieversorgung beitragen, und neuerdings auch den Verzicht auf die Kernenergienutzung erleichtern<sup>2)</sup>. In Anbetracht so vieler energie-, umwelt- und gesellschaftspolitischer Eignungen der KWK liegt die Frage nahe, warum diese Energietechnik in der Raumwärmeversorgung über einen bescheidenen Anteil von etwa 7 % noch nicht hinausgekommen ist und noch keinen wesentlichen Beitrag zur Lösung der energie- und umweltpolitischen Probleme leistet. Im vorliegenden Bericht wird diesen Fragen nachgegangen und ein Abhilfeschlag gemacht.

### 1. Produktionstheoretische Grundlagen der KWK

Aus wirtschaftswissenschaftlicher Sicht handelt es sich bei der simultanen Erzeugung von Strom und Heißwasser für Fernwärme in festem oder in Grenzen variierbarem Verhältnis um einen Fall von starrer oder elastischer Kuppel- oder Koppelproduktion<sup>3)</sup>. In der modernen axiomatischen oder aktivitätsanalytischen Produktionstheorie stellt die Kuppelproduktion als „Spaltung“ von Produktionsfaktoren in Produkte den dualen, d. h. in einem gewissen Sinne inversen Fall zur „Kombination“ von Produktionsfaktoren zu Produkten dar.

*Typisches Beispiel:* „Zerlegung“ von Rohöl in leichte bis schwere Fraktionen in der Raffinerie.

Die einfachste Integrationsaktivität der Gütertransformation, die *Kombination zweier Faktoren* zu einem Produkt, hat ein produktionstheoretisch duales Gegenstück in Form der *Desintegration eines Faktors* in zwei Produkte (ideal-typische Elementaraktivitäten).

Die beiden zueinander dualen Produktionsprozeßtypen begründen entsprechend spezifische betriebswirtschaftliche *Optimierungsprobleme*. Dem traditionellen Problem des kostenminimalen Faktoreinsatzes (Inputproblem „Minimalkostenkombination“) entspricht das relativ wenig behandelte Problem der erlös- oder gewinnmaximalen Produktionsausbringung (Outputproblem „Maximalerlösprogramm“)<sup>4</sup>). Es ist für unseren Zusammenhang besonders zu beachten, daß es für die Unlösbarkeit des Problems der Ertragszurechnung auf die kombinierten Produktionsfaktoren eine Analogie bei der Faktorzerlegung gibt: Es ist logisch unmöglich, den Faktoreinsatz verursachungsgerecht auf die Kuppelprodukte zu verteilen.

Der Begriff Kuppelprodukt umfaßt die dem Produktionsziel entsprechenden *Hauptprodukte*, die zwangsläufig entstehenden *Nebenprodukte* und die verwertbaren Abfallstoffe. Daher sind reale Produktionsprozesse normalerweise Mischungen der beiden Aktivitätstypen, wobei je nach Art des Unternehmens entweder der eine oder der andere Typus als Hauptaktivität dominiert und das Betriebsgeschehen bestimmt. Betriebswirtschaftlich relevante Kuppelprodukte sind eher die Regel als die Ausnahme, und sie gewinnen im Zeichen der Ressourcen- und Umweltschonung, der Resteverwertung und der Rezyklierung an Bedeutung. So ist beispielsweise die Stromerzeugung in Kohlekraftwerken durch die Gips-Entstehung bei der Rauchgasentschwefelung zu einem Fall von Kuppelproduktion geworden.

Von dieser betriebswirtschaftlichen Betrachtung sei festgehalten, daß von der Produktionstheorie her gesehen die KWK durch eine *Outputproblematik* gekennzeichnet ist, und zwar durch ein Problem der optimalen Zusammensetzung der Ausbringung und Produktverwertung. Das Faktorkombinationsproblem, d. h. die Frage, wie man am rationellsten oder am kostengünstigsten gleichzeitig Strom und Heißwasser herstellt, hat hier eine untergeordnete Bedeutung.

Einen besonderen Schwierigkeitsgrad erhält das Kuppelproduktionsproblem im Falle der KWK dadurch, daß die beiden energetischen Kuppelprodukte nicht im üblichen Sinne gelagert werden können wie etwa Öl oder Kohle. Abgesehen von der sehr begrenzten Möglichkeit der Pumpspeicherung erfolgen Erzeugung und Verbrauch von elektrischem Strom zeitgleich. Die Speicherung von heißem Wasser für Fernwärmezwecke ist zwar in gewissem Umfang praktikabel, aber aufwendig und mit zusätzlichen Energieverlusten verbunden (Heißwasser-Erd-

speicher). Sie kann das Produktionsverwertungsproblem der KWK nur graduell abschwächen.

Im Gegensatz zur problemtypologischen Einordnung und betriebswirtschaftlichen Charakterisierung der KWK als *Produktverwertungsproblem* (Outputproblem) von speziellem Schwierigkeitsgrad, wird in der energiepolitischen Diskussion die Kraft-Wärme-Kopplung als besonders rationeller Einsatz von Rohstoffen (Kohle, Gas) zur Erzeugung von energetischen Endprodukten (Strom, Fernwärme) verstanden und geschätzt, d. h. als gut gelöstes *Faktorverwertungsproblem* (Inputproblem). Wenn die KWK trotz langjähriger Praktizierung und Propagierung noch immer einen nur bescheidenen Versorgungsbeitrag leistet, so dürfte ein tieferer Grund für diese allgemein als unbefriedigend empfundene Situation zu einem guten Teil in dem gerade aufgezeigten Mißverständnis bezüglich ihres ökonomischen Problemcharakters bestehen. Daß die KWK eine sehr effiziente Energieumwandlungstechnik ist, weiß man in der Industrie seit über 50 Jahren zu schätzen. Aber bezüglich der Art und Weise, wie mit Hilfe der KWK eine nachweisbare signifikante Steigerung der Rationalität unseres Energieversorgungssystems realisiert werden könnte, gibt es nur mehr oder weniger fragmentarische Konzepte ohne ausreichende systemanalytische Basis. Das (sekundäre) Erzeugungsproblem wird für gelöst gehalten, das (primäre) Verwendungsproblem wird verkannt oder unterschätzt.

## 2. Ein Paradoxon der energiepolitischen KWK-Diskussion

Die hohe energiepolitische Attraktivität der KWK beruht auf einem Sachverhalt, den die verschiedensten Beschreibungen ihrer energetischen Vorteilhaftigkeit im Kern beinhalten, nämlich eine besonders gute Verwertung der eingesetzten Energie. In KWK-Anlagen können je nach Typ und Betriebsweise bis zu 85 % des eingesetzten Brennstoffs, namentlich die Primärenergien Steinkohle und Erdgas, *uno actu* in die Endenergien Strom und Fernwärme (Heizwasser) umgewandelt werden. Wie allgemein bekannt, ist ein Umwandlungs- oder *Erzeugungswirkungsgrad* von 0,80 – 0,85 mehr als doppelt so hoch wie bei einem ausschließlich Strom erzeugenden Kraftwerk und deutlich höher als bei den heute üblichen Ölheizungen (vgl. Anlage 1a und b). Vergleichsweise wenig bekannt ist dagegen die Tatsache, daß die Alleinerzeugung von Fernwärme in einem *Heizwerk* (Fernheizwerk) etwa genauso effizient ist, und zwar weitgehend unabhängig vom Anlagentyp und der Betriebsweise<sup>5)</sup>. Vom Gesamtwirkungsgrad der Anlagen her gesehen ist also KWK nicht notwendig, wenn es um eine effiziente Wärmeversor-

gung geht. Sie wird notwendig, wenn man während der Heizperiode auf besonders effiziente Weise Strom erzeugen will.

Die Fernwärme stellt neben dem Erdgas die wichtigste Option im Hinblick auf die unvermeidliche Ablösung des Heizöls im *Raumwärmebereich* dar<sup>6)</sup>. Sie ist auf Kohlebasis versorgungssicher, kann umweltschonend erzeugt und emissionsfrei mit Komfort angewendet werden. Mit einem Erzeugungswirkungsgrad von 0,85 ist sie energetisch erheblich günstiger als die zu ersetzenden Ölkessel, worauf es ja in Ölsubstitutionsstrategien besonders ankommt. Wird die Fernwärme in reinen Heizwerken erzeugt, so entfallen die oben von der Theorie her angesprochenen und noch zu erläuternden energiewirtschaftlichen Kuppelproduktionsprobleme der KWK, namentlich die Verwertung von zwei mehr oder weniger fest gekoppelten, schlecht speicherbaren Energieformen in sehr unterschiedlich strukturierten Märkten. So weit man also eine energiepolitische Strategie zur rationellen und umweltschonenden Umstrukturierung unserer Wärmeversorgung zur Vorbereitung des Nachölkalters konzipieren möchte, kommt man ohne KWK aus<sup>7)</sup>.

Diese Einschätzung fordert die Doppelfrage heraus, wieso Versorgungsunternehmen KWK praktizieren, und wieso man in vielen energiepolitischen Strategien, Szenarien und Programmen für Heizkraftwerke plädiert<sup>8)</sup>, anstatt es bei einfachen Fernheizwerken bewenden zu lassen.

1. Ca. 80 % des heutigen Fernwärmebedarfs werden aus KWK-Anlagen öffentlicher Versorgungsunternehmen gedeckt. Bei diesen Anlagen handelt es sich ganz überwiegend um „angezapfte“ *Kondensationsturbinen*, bei denen die Dampfentnahme zur Heizwasserbereitung fakultativ und weitgehend stromunabhängig erfolgen kann. Dank der hohen Flexibilität solcher Anlagen und dank des Umstandes, daß sich Erzeugung und Vermarktung der Koppelprodukte in einer Hand befinden, nämlich in EVU-Regie, können die typischen technisch / organisatorischen und ökonomischen Schwierigkeiten der KWK sozusagen betriebsintern gemeistert werden. Die fernwärmeerzeugenden EVU erbringen diese Dienstleistung zusätzlich zu ihren gesetzlichen Stromversorgungspflichten in Verfolgung ihres ertragswirtschaftlichen Unternehmenszieles, quasi als „2. Bein“ ihrer Wirtschaftsaktivität. Sie leisten damit einen energiepolitisch sehr willkommenen Versorgungsbeitrag.

*Musterbeispiel:* Das *Großkraftwerk Mannheim* (GKM) des Badenwerks, der Pfalzwerke und der Stadtwerke Mannheim. Ob dies immer auf die energetisch rationellste Weise geschieht, ist eine andere Frage, die man im Zwei-

fel verneinen muß. Denn die Variabilität des Kuppelproduktverhältnisses „Strom zu Fernwärme“ (Stromkennziffer) bei der Entnahmekondensation hat eine entsprechende Bandbreite des Wirkungsgrades von 40 bis 85 % zur Folge. Betriebsflexibilität und energetische Rationalität stehen bei der KWK grundsätzlich in einer gegensinnigen Beziehung. Mit dem KWK-Anlagentyp, der in der heutigen Fernwärmewirtschaft dominiert, kann Fernwärme höchstens so günstig wie in einem Heizwerk produziert werden, aber auch annähernd so ungünstig wie Strom in einem reinen Kraftwerk.

2. Bei aller Vielfalt der energiepolitischen Berichte, Programme, Studien, Gutachten, Szenarien und Konzepte in Bezug auf Institution, Auftraggeber, gesellschafts- und / oder parteipolitische Orientierung, Methode, Anlaß, Intention etc. besteht hinsichtlich des hohen Stellenwerts der *Fernwärme* weitgehende Übereinstimmung. In Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erzeugt, ist sie zum Inbegriff substantieller Energieeinsparung und entsprechender Umweltschonung im Umwandlungsbereich geworden. Diese Wertschätzung ist in Anbetracht obigen Vergleiches der Koppelwärme mit der ungekoppelten Fernwärme nicht plausibel. Sie wäre aber verständlich, wenn man den *Koppelstrom* als energetisch sehr rationell erzeugtes Nebenprodukt der Fernwärme in deren energiepolitische Bewertung einbeziehen würde. Die im Hinblick auf die Ölablösung strategisch wichtige Fernwärme erscheint als Koppelwärme besonders förderungswürdig, wenn man ihr zugutehält, daß der in Koppelproduktion entstehende Strom nur halb soviel Energieaufwand erfordert wie in reinen Kraftwerken. Bei dieser Betrachtungsweise bieten Koppelanlagen die einzigartige Möglichkeit, Elektrizität mit dem doppelten Carnot-Wirkungsgrad großtechnisch zu erzeugen.

Eine ganz besondere Merkwürdigkeit der energiepolitischen Fernwärme- und KWK-Diskussion besteht nun darin, daß diese *elektrische* Vorteilhaftigkeit der KWK praktisch nicht vorkommt. Es wird vielmehr so argumentiert, man solle viel KWK betreiben und das Netz solle jeden Koppelstrom aufnehmen, damit die energetisch so günstige KWK-Fernwärme vorankomme. Dies ist umso verwunderlicher, als der Wirkungsgrad unserer Kraftwerke von durchschnittlich 38 % ein Hauptkritikpunkt des heutigen Energiesystems darstellt. Eine Steigerung auf mehr als das Doppelte kann mit sonst keiner verfügbaren und auch nicht mit einer in Aussicht stehenden Stromerzeugungstechnik annähernd erreicht werden. Die Verringerung der vielkritisierten Energieverluste im Umwandlungssektor (Kraftwerksabwärme) müßte das

plausibelste, unmittelbar einleuchtende Argument für die KWK in der energiepolitischen Diskussion sein. Dem ist aber ganz und gar nicht so. Selbst in Energiestudien, in denen es speziell um eine strukturelle Änderung unserer Stromversorgung geht (z. B. Kernenergieausstieg), ist von einer hohen Effizienz der Stromerzeugung in KWK-Anlagen nicht die Rede, sondern von der hohen Effizienz der HKW im allgemeinen und der KWK-Fernwärme im besonderen. Die Lösung des Rätsels beginnt mit der Feststellung, daß in allen einschlägigen Veröffentlichungen explizit oder implizit ein Wirkungsgrad der Fernwärmeerzeugung in KWK-Anlagen von über 100 % unterstellt wird. Man geht also davon aus, daß der Energieinhalt einer bestimmten Menge Fernwärme größer ist als der zugehörige Brennstoffeinsatz. Eine KWK-Anlage erscheint somit als überdimensionale Wärmepumpe.

Diesem Phänomen wird im folgenden nachgegangen.

### 3. Energetischer Wirkungsgrad und thermodynamische Bewertungen

Mit KWK-Anlagen können je nach Typ, Größe und Fahrweise Wirkungsgrade für die in Form von Strom und Heizwasser erzeugte Energiemenge bis zu 85 % erreicht werden.

In energiepolitischen Strategien, namentlich in „dezentralen“, „lokal angepaßten“ oder „kommunalen Versorgungskonzepten“, stehen *Gegendruckanlagen* von 5 – 50 MW<sub>e</sub> für die Versorgung von Klein- und Mittelstädten mit 10 bis 50 000 Einwohnern im Vordergrund. Bei einem nur in engen Grenzen schwankenden *Strom / Wärme-Verhältnis* von 0,25 bis 0,40 kommen sie regelmäßig auf 80 bis 85 % Wirkungsgrad.

#### *Eine energetisch / kalorische Modellrechnung als Referenz*

Es sei angenommen, aus 100 Teilen Primärenergie würden 21 Energieeinheiten Strom und 61 Teile Fernwärme erzeugt (vgl. Anlage 1 a). Der Wirkungsgrad beträgt also 82 % bei einer Stromkennziffer von 0,34. Eine objektiv richtige, verursachungsgerechte *Aufteilung des Primärenergieeinsatzes* auf die beiden Kuppelprodukte kann es, wie unter 1. ausgeführt, nicht geben. Die nächstliegende Aufteilungsmöglichkeit besteht darin, den Einsatz entsprechend dem Ausbringungsverhältnis von 1 : 3, d. h. nach kalorischem Gesichtspunkt zu berechnen. Es wären also 26 Einheiten Brennstoff dem Strom, 74 Einheiten dem Heizwasser anzulasten. Die zwei Einzelwirkungsgrade sind damit gleich dem Gesamtwirkungsgrad

von 82 %. Um einen rechnerischen Fernwärme-Wirkungsgrad von (mindestens) 100 % zu erhalten, müssen vom zugehörigen Energieeinsatz von 74 (mindestens) 13 Teile abgezogen werden, so daß sich ein Output / Input-Verhältnis von 61 zu 61 ergibt. Diese Energiegutschrift an die Fernwärme ist in der *Energiebilanz* der KWK-Anlage dem Strom zu belasten, wodurch sich dessen Wirkungsgrad auf  $21 : 39 = 0,54$  oder um 34 % verschlechtert.

Schreibt man der Fernwärme gar 29 Einsatzeinheiten zu Lasten des Stroms gut, so steigt der Fernwärmewirkungsgrad auf 135 % (61 zu 45), ein Wert, den man als Orientierungswert einschlägiger Studien etc. bezeichnen kann. Entsprechend sinkt dadurch der Stromwirkungsgrad auf 38 % (21 zu 55), wird also an der Untergrenze so ungünstig wie in reinen Kraftwerken. Grundsätzlich ist eine energiebilanzielle Umverteilungsmöglichkeit zugunsten der Fernwärme desto größer (kleiner), je mehr (weniger) Strom im Verhältnis zum Heizwasser erzeugt wird (Stromkennziffer). Allerdings sinkt dann der Anlagenwirkungsgrad unter den Optimalwert von 82 %.

#### *Das KWK-Bewertungsdogma*

Es wäre nun denkbar, daß der dem Heizwasser attestierte, kausal nicht herleitbare hohe Wirkungsgrad von energiepolitischen Zwecken her, d. h. final gerechtfertigt wird. Die günstige Brennstoff-Kostenbewertung der Fernwärme könnte als Anreiz zu deren schnellerer Verbreitung vereinbart worden sein. Die Bereitschaft der deutschen Elektrizitätswirtschaft, den „wirtschaftlichen Vorteil“ der KWK „vollständig der Fernwärme zugute“ kommen zu lassen<sup>9)</sup>, ließe sich im Sinne einer *Anreiz-These* interpretieren. Dieser Interpretation ist entgegenzuhalten, daß sich die mit der einseitigen *Fernwärmebegünstigung* verbundene Benachteiligung der Stromkunden nicht mit dem Gebot des Energiewirtschaftsgesetzes vereinbaren läßt, den Strom möglichst preisgünstig bereitzustellen. Die EVU-Aussage bedeutet vielmehr, daß man der Fernwärme den ihr – aus noch zu erläuternden Gründen – gewährten Bonus nicht vorenthalten will. Ansonsten fehlen Äußerungen des Inhalts, daß der KWK-Vorteil aus diesen oder jenen guten Gründen ausschließlich der Fernwärme zugute kommen müsse. Es gibt keine finale Erklärung für die „Wärmepumpeneigenschaft“ der KWK, d. h. für die positive Energiebilanz, den über 100 % hinausgehenden Wirkungsgrad der Koppelwärme. Die Situation ist vielmehr so, daß die KWK-Fernwärme gerade wegen des ihr von der Fachwelt attestierten großen energetischen und damit auch umweltrelevanten Vorteils gelobt, gefordert und propagiert wird.

Daß die energiepolitischen Diskutanten Aussagen der energiewissenschaftlichen Fachwelt zur KWK übernommen haben, gibt keinen Anlaß zu Kritik. Es ist nicht ihre Sache, fachwissenschaftliche Äußerungen zu hinterfragen und zu beurteilen, von denen sie annehmen dürfen, daß sie auf naturgesetzlichen Zusammenhängen beruhen. Auf unabänderliche thermodynamische Zusammenhänge werden beispielsweise der niedrige Wirkungsgrad von Wärmekraftwerken und die praktische Unmöglichkeit, ihn erheblich über 40 % hinaus zu steigern, zurückgeführt. Kein Energiepolitiker sieht sich veranlaßt, die entsprechende naturwissenschaftliche Erklärung bzw. Beweisführung nachzuvollziehen, bevor er von diesen energiepolitisch sehr gehaltvollen Informationen Gebrauch macht.

Es ist ein besonderes Anliegen dieses Berichts darauf aufmerksam zu machen, daß es für einen Fernwärme-Erzeugungswirkungsgrad von über 100 % keine naturwissenschaftliche Erklärung gibt und nicht geben kann, weil es sich im Unterschied zur 40 %-igen Brennstoffausnutzung im Kraftwerk nicht um einen empirisch überprüfbaren Sachverhalt, nicht um ein erklärungsbedürftiges reales Phänomen handelt, sondern um eine von Prämissen determinierte *Deduktion*, oder m. a. W. um eine wissenschaftliche Ansichtssache, die zu einem Dogma wurde. Im Verlauf einer ausgiebigen, bis in die Gegenwart hinein reichenden Diskussion (vgl. Anlage 3) ist sich die Fachwelt weitgehend darin einig, daß die Bewertung der KWK-Produkte in Übereinstimmung mit dem *II. Hauptsatz der Thermodynamik* zu erfolgen habe<sup>10</sup>). Dieser Satz besagt, daß Energie bei ihrer Umwandlung, Anwendung oder Nutzung insofern an „Qualität“ oder „Wert“ verliert, als ihre Fähigkeit abnimmt, mechanische Arbeit zu leisten. Beim Dampf eines bestimmten HKW ist diese Arbeitsfähigkeit maximal hoch, wenn er mit 60 bar und 450 C auf die erste Turbinenstufe trifft, und praktisch gleich Null, wenn er am Ende der Turbine in den Kondensator strömt. Die vom Dampf in der Turbine geleistete Arbeit wird vom Generator in elektrischen Strom umgewandelt, der seinerseits durch einen Elektromotor zu fast 100 % wieder in mechanische Arbeit zurückverwandelt werden kann.

Man benutzt deshalb den erzeugbaren Strom als Maß für den thermodynamischen Wert eines Dampfes in einem bestimmten Zustand und bezeichnet ihn in dieser Eigenschaft als „Arbeitswert“, quasi eine pragmatische Version des *Exergiebegriffs*. Mit Hilfe des Arbeitswerts bewerten Energiepraktiker üblicherweise die KWK-Produkte: Fernwärme wird mittels weitgehend entspanntem Dampf von beispielsweise 120° C erzeugt, der nur noch relativ wenig Strom liefern könnte, also einen geringen Arbeitswert hat. Sie wird z. B. in der Weise bewertet, daß man

ihr den Primärenergieaufwand belastet, der in einem reinen Kondensationskraftwerk (von ähnlicher Güte wie das HKW) für besagten Arbeitswert, d. h. für die wegen der Fernwärme nicht erzeugte Strommenge erforderlich wäre. Dieser hypothetische Energieaufwand ist geringer als der Energieinhalt des Heizwassers, was den erwähnten *Wärmepumpeneffekt* ergibt. Diese Methode entspricht dem Fall, daß Fernwärme aus einem bestehenden Kraftwerk ausgekoppelt wird.

Zum gleichen Ergebnis gelangt man, wenn man dem erzeugten Koppelstrom den Primärenergieaufwand eines Referenz-Kraftwerks zuordnet, und diesen hypothetischen Energieaufwand vom gesamten Energieeinsatz des HKW abzieht. Der verbleibende Rest stellt den rechnerischen Energie-Input der Fernwärme dar. Zur Veranschaulichung dieser üblichen „*Restwertmethode*“ diene obiges Zahlenbeispiel: Bewertet man den Koppelstrom von 21 Einheiten mittels des Wirkungsgrads eines Referenzkraftwerks von 38 %, so kommt man auf einen hypothetischen Primärenergieaufwand für den Koppelstrom von 55 Einheiten. Die Differenz zum HKW-Gesamteinsatz von 100 Einheiten stellt den Fernwärme-Input dar. Dieser beträgt 45 Einheiten, ist also um 16 Einheiten geringer als der Energieinhalt der Fernwärme in Höhe von 61 Einheiten, so daß sich ein Wirkungsgrad von 135 % ergibt. Dieses Verfahren entspricht dem Fall der Erzeugung von Strom als Zusatzprodukt einer Wärmeerzeugung, d. h. dem historischen Ursprungsfall der KWK<sup>11</sup>).

#### *Zur Plausibilität der thermodynamischen Bewertung*

Es ist festzuhalten, daß die Fernwärme einen Wirkungsgrad von über 100 % nicht *hat*, sondern ihn unter Berufung auf den II. Hauptsatz der Thermodynamik *zugebilligt bekommt*. Von anderen Bewertungsverfahren, namentlich dem energetischen heißt es, sie stünden „im Widerspruch“ zu diesem Satz<sup>12</sup>). Wenn die Fernwärme in energiepolitischen Überlegungen weiterhin mit einem so attraktiven Wirkungsgrad versehen sein soll, so muß dies zumindest einleuchten. Zwingend ist es jedenfalls nicht, eher im Gegenteil, denn die Ableitung einer *Verhaltensnorm*, wie z. B. die in Rede stehende Bewertungsregel, aus einem naturwissenschaftlichen Satz, ist erkenntnistheoretisch fragwürdig (naturalistischer Fehlschluß).

Der II. Hauptsatz definiert eine Energiequalität, die Arbeitsfähigkeit oder *Exergie*, die für den Umgang der Bürger mit Energie bis heute keine Bedeutung erlangt hat. Der Energie-Normalverbraucher müßte zu der Einsicht gebracht werden, daß man der vom Strom gebotenen Möglichkeit höchstwertige Nutzenergie,

nämlich mechanische Arbeit, zu erhalten, nur dadurch gerecht werden kann, daß der Strom mit soviel Primärenergie bewertet wird, wie in einem Wärmekraftwerk dafür eingesetzt werden muß. Er müßte einsehen, daß die *Edelenergie Strom*, die mit Hilfe eines Dampfkessels erzeugt wird, das 2,6-fache an Primärenergie wert ist, wenngleich dieser Dampfkessel nur das 1,22-fache der insgesamt erzeugten Endenergien Strom und Fernwärme an Primärenergie benötigt.

Erheblich größere Plausibilitätsprobleme als das thermodynamisch / dogmatische Koppelstrom-Räsonnement dürfte allerdings die energetische Konsequenz für die Fernwärme bereiten. Das inzwischen erfreulich gut entwickelte allgemeine Energieverständnis wird sicherlich überfordert, wenn aus der thermodynamischen Koppelstrom-Bewertung folgt, daß man mit 45 Energieeinheiten Kohle 61 Energieeinheiten Fernwärme produzieren kann (vgl. Zahlenbeispiel). Einen physikalischen Satz, der als Erklärung dafür dienen könnte, gibt es bislang nicht. Es wäre deshalb vielleicht in Betracht zu ziehen, den Satz von der Energieerhaltung durch ein *Lemma über „Energievermehrung bei KWK“* zu ergänzen.

In Anlage 3 sind 20 *Literaturreferenzen* aus einem Zeitraum von 30 Jahren angegeben, in denen es um die naturwissenschaftlich nicht eindeutig beantwortbare Frage der Koppelprodukt-Bewertung geht. Immer wieder werden die Notwendigkeit einer thermodynamischen oder exergetischen Bewertung und die Inadequanz der energetischen Bewertung betont, obwohl letztere Methode eigentlich von niemand ernsthaft vertreten wird. Dieser Umstand ist als Indiz für das Vorliegen eines *Scheinproblems* zu deuten.

Der gemeinsame Nenner, auf den sich alle nicht-kalorischen KWK-Bewertungen (exergetisch, thermodynamisch, Arbeitswert, Restwert etc.) bringen lassen, besteht darin, daß dem in KWK erzeugten Strom soviel Energieeinsatz zugeordnet wird, wie man zu seiner Erzeugung in einem (irgendwie als Referenz definierten) Kondensationskraftwerk benötigen würde. Je nach Anlagentechnik, Fahrweise und Strom / Wärme-Verhältnis ist dann der der Fernwärme zugeordnete Rest des HKW-Energieeinsatzes unterschiedlich groß. Schon bei einer Stromkennzahl von 0,25 (1 : 4) ist dieser Einsatzrest kleiner als der Energieinhalt der Fernwärme, so daß diese einen fiktiven Erzeugungswirkungsgrad größer als 1 erhält.

#### 4. Umweltentlastung durch KWK?

In allen Fällen, in denen der Fernwärme ein hoher *Energiespareffekt* nachgesagt wird, liegt eine solche Bewertung zugrunde. Dies führt zu teilweise kuriosen Konsequenzen bei der Ermittlung und dem Vergleich der Umweltverträglichkeit von Energietechniken, speziell von Heizungstechniken. Wird z. B. einem Block-Heizkraftwerk eine *Emissionsgutschrift* für die in einem Kondensationskraftwerk vermiedene Stromerzeugung auf fossiler Basis erteilt, so sind mit der Koppelwärme negative Emissionen verbunden. Real interpretiert, bedeutet dies die Absurdität, daß bei Betrieb eines BHKW die Umwelt schwächer belastet wird, als wenn man den betreffenden Strom überhaupt nicht erzeugt (irreführende Saldierung, z. B. Euler 1983<sup>13</sup>).

Das nur langsame Vorankommen der KWK-Fernwärme erscheint so gesehen als energiepolitischer Schwachpunkt. Dies ist aber ein sowohl auf unzureichender Kenntnis der oben beschriebenen Verwertungsproblematik als auch auf vordergründiger Betonung des Wirkungsgrad-Vorteils der KWK beruhender Trugschluß.

Man unterscheidet 3 *Kategorien von energiewirtschaftlichen Maßnahmen*, die an drei *umweltrelevanten Sachverhalten* im Energieversorgungssystem ansetzen:

1. Jegliche Energieumwandlung ist mit Umweltbeeinträchtigung in irgendeiner Form verbunden. Je geringer der Energieaufwand für gegebene Energiedienstleistung, desto kleiner die Umweltbeeinträchtigung. Der Energieaufwand für gegebene Zwecke kann insbesondere durch höhere Effizienz der Energieumwandlung (Wirkungsgradsteigerung) gesenkt werden. Z. B. Kraft-Wärme-Kopplung versus Kraftwerk.
2. Die verschiedenen Primärenergieträger und Sekundärenergieformen beeinträchtigen bei ihrer Umwandlung die Umwelt in qualitativ und quantitativ sehr unterschiedlicher Weise. Z. B. Wind- oder Wasserkraft versus Kohlen zur Stromerzeugung, Fernwärme versus Öl zur Raumheizung.
3. Die von Energiegewinnung, -umwandlung und -verteilung ausgehenden Umweltbeeinträchtigungen können durch technische Maßnahmen weitgehend abgeschwächt oder korrigiert werden. Z. B. Rauchgasreinigung, Erdkabel, Rekultivierung. Dieser Punkt kann hier außer Betracht bleiben.

ad 1 und 2: *Erzeugungseffizienz, Umweltbelastung, Substitution*

Man möchte einen rationellen und sparsamen Energieeinsatz auf allen Stufen des Energiesystems, um die benötigte *Energiedienstleistung* mit möglichst geringem Primärenergieaufwand zu erbringen. Es wird also ein möglichst günstiges Verhältnis Nutzenergie / Primärenergie bei allen Arten der Energieverwendung und damit ein möglichst hoher Wirkungsgrad des gesamten Energieversorgungssystems angestrebt. Dies ist z. B. auch das Anliegen des in den USA aufgekommenen *Integrated Resource Planing (IRP)*<sup>14</sup>.

Dahinter steht die Vorstellung, die heutigen Umweltschädigungen durch Schadstoffe, Abwärme, CO<sub>2</sub> etc. würden durch Senkung des spezifischen Energieaufwands oder Verbesserung der Umwandlungseffizienz reduziert.

Es wird dabei übersehen, daß Ausdrücke wie „rationelle Verwendung“, „Verbesserung des Wirkungsgrades“ u. ä. *ökonomische*, keine ökologischen Begriffskategorien sind. Sie bezeichnen das Verkleinern energetischer Input / Output-Relationen, wie es das *ökonomische Prinzip* fordert. Für die ökonomische Rationalität des Umgangs mit Energie ist die *absolute* Höhe des Energieeinsatzes nicht von Belang, wohl aber für die *ökologische*. Bei ihr geht es um Schutz der *Gesundheit der Bevölkerung* und der *natürlichen Lebensgrundlagen*, also um Güter, die nach *absoluten* Maßstäben zu beurteilen sind, nicht in Relation zu ökonomischen Größen. Am Beispiel der bisher spektakulärsten Schädigung der natürlichen Lebensgrundlagen, nämlich dem *Waldsterben*, wird klar, daß eine Verbesserung nur von einer Verringerung der *Gesamtmenge* der u. a. auch bei Energieumwandlungsprozessen freiwerdenden Schadstoffe erhofft werden kann. Für die gewünschte Emissionssenkung ist aber eine Verbesserung des *Wirkungsgrades* der schadstoffbehafteten Energieumwandlungsprozesse weder notwendig noch hinreichend. Ob SO<sub>2</sub> energetisch rationell oder unrationell erzeugt wird, spielt für seine Schädlichkeit keine Rolle. Entscheidend ist die Menge. Von den hier nicht zu besprechenden *Rückhaltmaßnahmen* abgesehen (REA, DENOX), ist es zur Verbesserung der Gesundheit und der Lebensgrundlagen bereits hinreichend, wenn bei bestehendem Wirkungsgrad des Energiesystems der *Verbrauch* von schadstoffbehafteten Energieträgern, insbesondere von fossilen Brennstoffen, absolut reduziert wird, wie es z. B. der Arbeitskreis Energie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft schon 1983 gefordert hat.

Zweifellos *kann* durch mehr Kraft-Wärme-Kopplung ein Umweltentlastungseffekt eintreten, aber nur *dann, wenn dieselben* „Energiedienstleistungen“ (Nutz-

energiebedürfnisse) mit geringeren Mengen an schadstoffbehafteten Energiearten erbracht werden. Aber einerseits ist die Annahme stagnierenden Bedarfs an Energiedienstleistungen bei wirtschaftlicher Aufwärtsentwicklung und steigenden Komfortwünschen (Elektrifizierung) gerade im vereinten Deutschland unrealistisch, andererseits kann man nicht generell sagen, daß z. B. neue Kraft-Wärme-Anlagen, die ja überwiegend Kohle verarbeiten sollen, ein geringeres *Schadstoffpotential* hätten als die dadurch ersetzten oder vermiedenen Energieumwandlungsanlagen. Auf jeden Fall wird der *HKW-Standort* deswegen mehr belastet, weil das HKW wegen der Stromerzeugung mehr Brennstoff verbrennt, als die Wohnungen vor dem FW-Anschluß verbrannt haben (Immissionserhöhung).

Was den energetischen *Wirkungsgrad* der in diesem Zusammenhang regelmäßig in den Vordergrund gestellten *Kraft-Wärme-Kopplung* anbetrifft, so reicht dessen Schwankungsbreite in Abhängigkeit von der verwendeten Definition, von der Konzeption und von der Fahrweise des Heizkraftwerks von 65 % bis 330 %. D. h. er kann so schlecht sein wie der eines älteren Ölkessels oder so gut wie der einer gasbetriebenen Wärmepumpe.

Wenn die KWK als gutes Beispiel für Wirkungsgradverbesserung hervorgehoben wird, so ist anzunehmen, daß Berichte über die Energieeinsparung durch Heizkraftwerke und Fernwärmeversorgung vorliegen. Im Modellfall der *Stadtwerke Flensburg* beispielsweise erzeugt ein HKW-System auf Kohlebasis im Jahresdurchschnitt Strom und Fernwärme im Verhältnis 1 : 2,9 (Stromkennzahl 0,35) mit einem Erzeugungswirkungsgrad von 82 % (82 SKE aus 100 SKE Einsatz). Würden Strom (21 SKE) und Wärme (61 SKE) im gleichen Verhältnis nicht im HKW, sondern in räumlich getrennten Anlagen im Kraftwerk bzw. Heizwerk erzeugt, so betrüge der Erzeugungswirkungsgrad nur 64 % (Einsatz 128 SKE). Anders ausgedrückt, führt die KWK zu einer Energieeinsparung im *Erzeugungsbereich* von 22 % (28 SKE von 128 SKE). Diese Darstellung verdeutlicht sozusagen den „*Grundtatbestand der Wirkungsgradverbesserung und Energieeinsparung*“ durch die großtechnische Kraft-Wärme-Kopplung. Dabei ist zu beachten (was regelmäßig unterlassen wird), daß diese Einsparung nur für die *Heizperiode* gilt. Übers ganze Jahr gesehen spart das HKW im Vergleich zum Heizwerk plus Kondensationskraftwerk nur etwa 17 %. Der energetische Koppelvorteil gilt nur in 7 bis 8 von 12 Monaten (Industrie-Prozeßwärme-KWK hier außer Betracht).

Moderne Öl- oder Gaskessel haben einen Wirkungsgrad oder Jahresnutzungsgrad von 75 %, bei Gaskesseln mit Brennwertgerät hat man 95 %, bei Elektroheizungen 94 – 98 %. Verbesserung des Wirkungsgrads bei der Energieumwand-

lung ist also keine Besonderheit der KWK. Im einen Fall wird allerdings Primärenergie, in unseren Gegenbeispielen Sekundärenergie umgewandelt. Nun soll ja die Sekundärenergie „Fernwärme“ andere Sekundärenergie, vor allem Heizöl, aber auch Erdgas und Strom im Raumwärmebereich unter erheblicher Energieeinsparung ersetzen bzw. deren zusätzlichen Einsatz verhindern. Will man die KWK mit diesen Heizsystemen bezüglich des Wirkungsgrads vergleichen, um gewisse Schlüsse auf den letztlich entscheidenden *Energiespar-Nettoeffekt* einer Fernwärme-Strategie ziehen zu können, so muß in allen zu vergleichenden Fällen der gesamte Umwandlungsprozeß von der Primärenergie über die Sekundärenergie bis zur Nutzenergie „Raumwärme“ erfaßt und mittels, einer Output/Input-Kennziffer, dem sogenannten *Systemwirkungsgrad*, oder Jahresgesamtnutzungsgrad charakterisiert werden. Dieser *Systemwirkungsgrad* beträgt bei modernen Öl- und Gasheizungen mindestens 65 %, bei E-Heizungen 32 %. Die Fernwärme verliert auf ihrem Weg zum Verbraucher und bei der Umwandlung in Nutzenergie 20 – 30 %. Bei einem Erzeugungswirkungsgrad von 0,82 ist also der Systemwirkungsgrad der Koppelwärme bestenfalls so hoch wie bei modernen Öl- oder Gassystemen. Da Fernwärme durchweg auf Kohlebasis propagiert wird und Kohle bezüglich CO<sub>2</sub> erheblich, bezüglich anderer Schadstoffe deutlich ungünstiger ist als Öl und erst recht als Erdgas, so kann Koppelwärme nicht umweltentlastend wirken.

Die Frage ist, ob der mit 0,82 Wirkungsgrad erzeugte Koppelstrom den stereotyp vorgebrachten Umweltvorteil der KWK begründet. Dies hängt davon ab, welche Art von Strom man sich durch Kohle-Koppelstrom ersetzt denkt. In allen Fällen, in denen der ersetzte Strom aus einem Brennstoffmix besteht, dessen Schadstoff-Faktoren weniger als halb so groß sind wie bei Kohle, tritt keine Umweltentlastung durch Koppelstrom ein, da Wirkungsgrad mal reziproker Schadstoff-Faktor gleich *Entlastungsfaktor*.

**Beispiel:** Wirkungsgrade 0,40 bzw. 0,82. CO<sub>2</sub>-Faktor bei Braunkohle 3,3, Steinkohle 2,7, Öl 2,4, Erdgas 1,6, bei Uran, Wasser, Wind Null. Das Kohle-HKW erzeugt Strom mit dem CO<sub>2</sub>-Entlastungsfaktor  $0,82 \times 1/2,7 = 0,30$ . Wird Kondensationsstrom ersetzt, dessen CO<sub>2</sub>-Faktor kleiner (größer) als 1,3 ist, so tritt keine (eine) CO<sub>2</sub>-Entlastung ein. Der CO<sub>2</sub>-Faktor des bundesdeutschen Stroms 1988 betrug gerade 1,3.

Dies wird nicht die Regel sein, d. h. Koppelstrom aus Kohle wirkt z. B. bei CO<sub>2</sub> normalerweise entlastend. Da er aber nur während der Heizperiode anfällt, und

zwar energiemengenmäßig als Bruchteil der Fernwärme, kann nicht pauschal behauptet werden HKW entlasteten die Umwelt. Möglicherweise wird die dem Koppelstrom gutzuschreibende Entlastung durch ungünstige Substitutionsverhältnisse bei der Koppelwärme überkompensiert. Mit Sicherheit liegt in jeder Hinsicht Mehrbelastung durch Kohle-HKW vor, wenn Fernwärme einer *Erdgasversorgung* vorgezogen wird.

Ob aber eine Wärmeversorgung auf KWK-Basis zu einer *Netto-Energieeinsparung* und Umweltentlastung führt, hängt nicht in erster Linie vom Erzeugungs- oder vom Systemwirkungsgrad des *HKW* ab. Für diese umweltpolitisch entscheidende, aber auch energiepolitisch relevante schwierige Frage kommt es in erster Linie auf den Wirkungsgrad und Belastungsfaktor aller Öl-, Gas-, Kohle- oder Stromheizungen an, die durch den Fernwärmeanschluß ersetzt bzw. wegen des Fernwärmeprojekts nicht neu installiert werden.

Es sei an dieser Stelle klargestellt, daß sich diese Einwände gegen die namentlich von umweltbesorgten, energiepolitisch besonders kritischen Gruppen und Institutionen vorgetragene *Begründung* der Fernwärme- oder KWK-Förderung richten, nicht gegen diese Technologie selbst. Die *energiepolitisch* maßgebliche und ausreichende Begründung des Ausbaus der Fernwärmeversorgung auf der Grundlage steinkohlegefeuerter Heizkraftwerke liegt zuerst in der *Abkopplung der Raumheizung vom Öl* (11,6 Mio Wohnungen, vgl. Anlage 4), *unter Verwendung heimischer Steinkohle*. Wie bei anderen energiepolitischen Strategien, so ist es auch bei der versorgungspolitischen Umstellung der NT-Wärmeversorgung zwingend geboten, die *Belange des Umweltschutzes* weitestgehend zu berücksichtigen. Durch die Wiedervereinigung ist die *Substitutionsaufgabe im Raumwärmebereich* aus Umweltgründen um die Abkopplung von 5 Mio Wohnungen von der Braunkohle erweitert worden. Längerfristig ist auch hinsichtlich der Steinkohle-KWK mit Umweltwiderständen zu rechnen, so daß die nukleare KWK gute Perspektiven erhält, wie z. B. in Schweden, Frankreich, Sowjetunion.

In der einschlägigen Diskussion wird häufig von dem Sachverhalt ausgegangen, daß die *Schadstoff-Immission in Wohngebieten* zurückgeht, wenn Kleinfeuerungsanlagen durch Fernwärmeanschluß ersetzt werden. Als umweltpolitischer Teil einer energiepolitischen Pro-Fernwärme-Argumentation mag das ausreichen. Als Argument einer Gruppierung, die dem Umweltschutz angesichts der Gefährdung von Gesundheit und Lebensgrundlage der Bevölkerung Priorität vor der Versorgungssicherheit einräumt, ist eine bessere *Immissionssituation* allenfalls eine notwendige Nebenbedingung des FW-Ausbaus. Entscheidend ist doch wohl die

Frage, ob der ölersetzende Fernwärmeausbau auf *Kohlebasis* so gestaltet werden kann, daß die *Gesamtemissionen per Saldo abnehmen*. Diese naheliegende Frage nach der zukünftigen *Nettobelastung* wird eigenartigerweise kaum gestellt. Es wird im allgemeinen aus dem der Fernwärme nachgesagten Energiespareffekt auf eine entsprechende „*Einsparung an Umweltbelastung*“ geschlossen. Wie erläutert, hängt jedoch der Einspareffekt bei Heizkraftwerken vor allem davon ab, wie schlecht der Wirkungsgrad der durch Fernwärmeanschluß ersetzbaren Feuerungsanlagen ist (z. B. alte Ölkessel), und wie gut der Wirkungsgrad der Heizsysteme ist, die als Alternative zur Fernwärme im Zuge der Erneuerung und Modernisierung in Betracht kommen, z.B. Gas-Brennwertkessel.

In aller Regel stehen die für Fernwärme-Expansion plädierenden energiepolitischen Diskutanten der *Elektroheizung* skeptisch gegenüber. In Energiespar- und KE-Ausstiegsszenarien gehört die Ächtung der Elektroheizung zum Kern jedes Maßnahmenkatalogs. Dabei werden Stromsparen, Energiesparen, Umweltentlastung, Ressourcenschonung und neuerdings Kernenergieverzicht nicht nachvollziehbar argumentativ miteinander verquickt<sup>15)</sup>.

Dem verstärkten Einsatz von *Elektrizität* stehen GRÜNE und alternative Energiepolitiker in dem Maße besonders skeptisch gegenüber, wie zur Stromerzeugung schadstoffbehaftete Primärenergieträger eingesetzt werden. Die bei der Fernwärme gelobte immissionssenkende Wirkung im *Anwendungsbereich* läßt man bei der Elektrizität nicht gelten. Es liegt hier also der kuriose Fall vor, daß man die Fernwärme unterstützt *obwohl* sie „aus der Kohle“ kommt, den simultan erzeugten Strom jedoch ablehnt, *weil* er „aus der Kohle“ kommt. Das liegt besonders daran, daß ein bei unvoreingenommenen KWK-Überlegungen eigentlich naheliegender Gedanke zugunsten der Stromheizung nicht vorkommt, nämlich der hohe Erzeugungswirkungsgrad und damit der niedrige Umweltbelastungsgrad des Koppelstroms. Es ist ein wesentlicher Punkt dieses Berichts, auf die energiepolitische Bedeutung dieser Koppelstromeigenschaft hinzuweisen. Voraussetzung für die Nachvollziehbarkeit ist allerdings der Verzicht auf das behandelte KWK-Bewertungsdogma. Bei kalorischer oder energetischer Bewertung wird Koppelstrom mit 82 % (bis 85 %) Wirkungsgrad erzeugt. Bei Leistungs- und Anwendungsverlusten von zusammen 10 % ergibt sich für die *Koppelstromheizung* ein Systemwirkungsgrad von typischerweise 75 % (vgl. Anlage 1 b). Sie steht damit an der Spitze aller heute allgemein zugänglichen bzw. anwendbaren Heiztechniken, wenn man von der noch nicht großflächig einkalkulierbaren Gas-Brennwerttechnik absieht.

Es ist besonders zu betonen, daß die vorgetragenen umweltpolitischen Einschränkungen bezüglich der KWK nicht, bzw. nur mittelbar vom Koppelprodukt-Bewertungsverfahren abhängen. Bei bilanzierender Betrachtung ist es natürlich gleichgültig, ob man die Koppelwärme besonders günstig und den Koppelstrom entsprechend ungünstig bewertet, oder ob man beide Produkte anteilmäßig mit Einsatzenergie „belastet“, insofern also energetisch „gleich“ bewertet. Die einfache kalorische Bewertung des Koppelstroms ist für die Energie- und Umweltpolitik deshalb von hoher Relevanz, weil dadurch das *Einsatzpotential der KWK* und damit die Verbreitung öl- und kohlesubstituierender HKW schlagartig vergrößert wird, wie zu diskutieren ist.

##### **5. Energiewirtschaftliche und -politische Problematik der heutigen Koppelstrom-Einspeisung bei bestehendem Bewertungsdogma**

Über 80 % unseres Raumwärmebedarfs werden z. Zt. von der Öl- und der Gaswirtschaft, vom Holz- und Kohlehandel und von Fernheizwerken, also unabhängig von der öffentlichen Stromversorgung, gedeckt.

Für den Rest sorgen elektrizitätswirtschaftliche Unternehmen (EVU), hauptsächlich Stadtwerke, teils in Form von Nachtstrom für Speicherheizungen, teils in Form von Fernwärme aus Kraftwerken mit Wärmeauskopplung. Im einen Fall wird die tagsüber erfolgende Wärmebedarfssteigerung durch Aufladung der E-Wärmespeicher zur relativ stromnachfrageschwachen Nachtzeit sozusagen im voraus gedeckt. Die E-Wärmebedarfsdeckung ist auf diese Weise von der allgemeinen Stromnachfragebefriedigung abgekoppelt.

Im anderen Fall wird bei Wärmebedarf ein Teil des im Kraftwerk erzeugten Dampfes zur Fernwärme-Bereitung der Turbine entnommen (Entnahmekondensation, Turbinenanzapfung). *Spitzenbedarfskessel auf Ölbasis* ergänzen die Wärmeauskopplung. Die damit verbundene Verringerung der Stromerzeugung des Blocks gleicht das EVU innerhalb seines Kraftwerkparks durch verstärkten Einsatz seiner reinen Stromerzeugungsblöcke im Mittellastbereich aus.

In beiden Fällen der Wärmeversorgung durch Kraftwerke eines öffentlichen Elektrizitätsunternehmens wird besagte *Wärme / Strom-Bedarfsdiskrepanz* in eigener Regie überbrückt und das Anpassungsproblem durch Flexibilität des Anlagenparks betriebsintern gelöst. Als typisches Beispiel dafür sei das Großkraftwerk Mannheim (GKM) genannt.

Diese Flexibilität auf der Erzeugungsseite ist bei den KWK-Anlagen, die für die Ölablösung im Raumwärmebereich mit hoher energiepolitischer Priorität in Betracht gezogen werden, nicht oder nur in geringem Maße gegeben, nämlich bei den relativ kleinen Gegendruckanlagen und den Blockheizkraftwerken, die in sogenannten *kommunalen Versorgungskonzepten* eine Hauptrolle spielen. Sie zeichnen sich durch ein starres Strom/Wärme-Verhältnis aus. Da sie zur Wärmebedarfsdeckung gebaut werden, kann bei ihnen auf die Charakteristiken des Strombedarfs keine Rücksicht genommen werden. Der Koppelstrom muß also unter Zurückfahren anderer Erzeuger im Netz untergebracht werden. Die *Lastverteilung* muß ihm Priorität geben, obwohl er eigentlich wegen seines zwangsläufigen, strombedarfs-unspezifischen Anfalls „Strom 2. Klasse“ darstellt. Ein ökonomisch nachteiliger Effekt besteht darin, daß die elektrische Kapazität eines kommunalen HKW mindestens teilweise vom EVU nochmals vorgehalten werden muß, soweit das HKW im Sommer nicht produziert, was bei den im Vordergrund stehenden Gegendruckanlagen stets der Fall ist (sogenannte elektrische Doppeldeckung).

Aus den *Mengen- und Zeitdiskrepanzen* zwischen der an die Fernwärmeproduktion gekoppelten Stromerzeugung und dem allgemeinen Strombedarf (vgl. Anlage 2) ergeben sich komplizierte Versorgungsprobleme. Sie werden bei der heute überwiegend von Elektrizitätsunternehmen mit Großkraftwerken betriebenen Fernwärmeversorgung dank der großen Strom/Wärme-Flexibilität der „angezapften“ Kondensationsturbinen sozusagen betriebsintern gemeistert. Sie werden aber um energiepolitische Streitfragen angereichert, wenn es um die mit Begriffen wie „dezentrale Versorgung“ oder „kommunale Energiekonzepte“ gemeinten kleineren KWK-Anlagen zur Wärmeversorgung von Mittel- und Kleinstädten sowie Verbandsgemeinden geht. Dabei handelt es sich im allgemeinen um Gegendruckturbinen, d. h. zum Zwecke der Heizwasserproduktion „*abgehackte*“ Turbinen, sowie um Blockheizkraftwerke (BHKW) auf Motor-Basis, die ein starres Strom/Wärme-Verhältnis aufweisen und energetisch im Durchschnitt günstiger sind als die „Entnahmekondensation“. Von der Verbreitung solcher lokal angepaßten Anlagen wird die Ölablösung in denjenigen Gebieten maßgeblich abhängen, die von den fernwärmebetreibenden EVU und den Gas-Unternehmen wegen geringer Wärmebedarfsdichte und/oder ungünstiger Lage nicht in die Ausbauplanung einbezogen werden.

Aufbau und Existenzfähigkeit einer lokalen Wärmeversorgung in einem ölbeheizten Gebiet und möglicherweise in Konkurrenz zum ebenfalls billigeren Erdgas

hängen entscheidend davon ab, ob und zu welchen Bedingungen, vor allem zu welchem Preis der zeitgleich mit der Fernwärme in relativ starrem Verhältnis anfallende Strom in der allgemeinen Stromversorgung untergebracht, d. h. ins öffentliche Netz eingespeist werden kann. Gemeinden, die ihren Bürgern eine zukunftssichere umweltfreundliche und komfortable Wärmeversorgung bieten möchten, sind darauf angewiesen, daß ein dem Energiewirtschaftsgesetz im allgemeinen Interesse unterworfenen Stromversorgungsunternehmen (siehe EnWiG-Präambel) seine Aktivitäten an die Interessen- und Bedürfnislage einer relativ kleinen Gruppe von Wärmekunden irgendwie anpaßt. Die hier angeschnittenen *Ziel- und Interessenkonflikte* sind auf sachlicher Ebene kaum auflösbar. Auf politischer Ebene kommt es auf die jeweilige *Prioritätensetzung* an. Die langjährige Fernwärmeförderung des Bundes nach dem Investitionszulagengesetz besteht neuerdings nicht mehr. Umso mehr kommt es für kommunale Fernwärmebetreiber auf eine möglichst hohe Vergütung für den ins Netz eingespeisten Koppelstrom an. Nun bedeutet aber bereits eine Vergütung in Höhe der beim Stromversorger im Kondensationskraftwerkspark vermiedenen Brennstoffkosten eine im Hinblick auf Sozialverträglichkeit fragwürdige Begünstigung der Fernwärmebezieher zu Lasten der Stromkunden, die man mit Hilfe unseres Zahlenbeispiels erläutern kann. In unserem Modell-HKW werden aus 100 SKE Primärenergie 21 SKE Einspeisestrom und 61 SKE Heißwasser erzeugt. Die Verluste in den Fernwärmeleitungen sind mit 9 SKE zu veranschlagen, so daß 52 SKE an die Verbraucher verkauft werden können. Für den gelieferten Strom erhält die betreibende Gemeinde (mindestens) den Betrag, den ihr EVU-Partner für Brennstoff hätte aufwenden müssen, wenn er diese Strommenge in seinen eigenen Kraftwerken erzeugt hätte. Zur Erzeugung von 21 SKE Strom sind bei einem anzunehmenden Erzeugungswirkungsgrad von 38 % rund 55 SKE Brennstoff erforderlich. Den Wert dieser Brennstoffmenge erhält der HKW-Betreiber als Einspeisvergütung und zieht ihn an seinen Kosten für die 100 SKE Primärenergieeinsatz ab. Somit verbleiben nur die Kosten für 45 SKE Brennstoffeinsatz zu seinen Lasten. Er ist also in der Lage, die 52 SKE Fernwärme bei seiner Preisfindung so günstig zu kalkulieren, als wäre sie mit einem Wirkungsgrad von  $52/45 = 1,16$  erzeugt worden. Die Gemeinde gibt den über die *Einspeisvergütung* vereinnahmten Brennstoffkostenzuschuß in Form eines entsprechend niedrigeren Fernwärmepreises an ihre Kunden weiter. Auf diese Weise kommt der energetische Vorteil der KWK unter Benachteiligung der ausschließlich Strom nachfragenden Verbraucher allein den Wärmebezieher zu gute. Erfahrungsgemäß reichen auch weit höhere Einspeisvergütungen nicht aus, um die bekanntlich sehr kapitalintensive Fernwärme mit Heizöl und Erdgas konkurrenzfähig und für die Versorger attraktiv zu machen. Das unbefristete

Hoffen auf eine break even-Höhe des Rohölpreises als Energie-Leitpreis kommt einer Spekulation mit hohem gesellschaftlichen Risiko gleich. Darauf darf die Ölabkopplung nicht warten.

Auf die zunehmenden Gefahren einer anhaltend hohen Ölabhängigkeit muß der Staat entsprechend seiner *Krisenvorsorgepflicht* in Form eines energiepolitischen Substitutionskonzepts reagieren, das die allgemeine Energievertéuerung als Folge einer „Zwangsunterbringung“ inländischer Ölsubstitute am Markt als Versorgungssicherheitsprämie plausibel macht, gemäß der Einsicht, daß die teuerste Kalorie die fehlende ist.

Ein solches *energiepolitisches Präventivkonzept* impliziert selbstverständlich staatliche Eingriffe in die bestehende, grundsätzlich marktwirtschaftliche Struktur unserer Energiewirtschaft. An Stelle einer hier zu weit führenden Erörterung der zugehörigen ordnungspolitischen Problematik sei daran erinnert, daß Rohölpreise ohnehin nicht marktwirtschaftlich zustandekommen, keine Knappheitsindikatoren sind und vermutlich niemals eine die Rentabilität heimischer Ölsubstitute auf Kohlebasis gewährleistende Höhe erreichen. Es bedarf also gesetzlicher Rahmenbedingungen, die eine kostendeckende Ausbreitung der Fernwärme auf Kohlebasis zur *Ölsubstitution* ermöglichen, ohne direkte Subventionierung (Investitionshilfen) zu Lasten des Steuerzahlers, und ohne indirekte Begünstigung durch Gutschrift einer Strom-Einspeisvergütung zu Lasten der Stromverbraucher, d. h. unabhängig von Staat und öffentlicher Stromversorgung.

Dies erscheint uns möglich, wenn HKW nicht weiterhin als elektrizitäts- und wärmewirtschaftliche Zwittergebilde, sondern als *Heizenergie-Anlagen* klassifiziert und propagiert werden. Es kommt entscheidend auf die Einsicht an, daß eine ganze Reihe von systemimmanenten Schwierigkeiten der energiepolitisch viel diskutierten KWK, nämlich der kommunalen HKW, entfällt, wenn die simultan erzeugten Produkte Heißwasser und Strom ein- und demselben Zweck zugeführt werden, namentlich der Raumwärmeerzeugung. Auf der Basis des heute üblichen KWK-Bewertungsdogmas steht sich die Fernwärme hinsichtlich ihrer wünschenswerten Ausbreitung quasi selbst im Wege. Erst ihre Abkopplung von der allgemeinen Stromwirtschaft ermöglicht der KWK eine strategische energiepolitische Rolle.

In die Gegenrichtung zielen neuerdings Szenarien zum Kernenergie-Ausstieg wie sie namentlich vom Öko-Institut (für die GRÜNEN) auch von Prognos (für NRW) erstellt wurden. Hier soll Koppelstrom einen großen Teil des Atomstroms erset-

zen, was zu einer enormen *Fernwärme-Expansion* zwingt. War bislang die Koppelstromspeisung ein versorgungswirtschaftliches Problem, so erhebt sich in diesen Szenarien die weit schwierigere Frage, wie die bei der Erzeugung des Atomstrom-Ersatzes anfallende Fernwärme untergebracht werden kann. Im ersten Falle wird das Naheliegende, nämlich die Koppelstromverheizung, aus besagten methodologischen Gründen nicht gesehen, im zweiten Falle darf es das wegen der Ausstiegszielvorgabe nicht geben.

## 6. Wärmeversorgung mit Koppelstrom

Eine besonders rationelle Kohlenutzung stellt der Einsatz in Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) unter Wirkungsgraden zwischen 80 und 90 % dar. Für die energiepolitische Bedeutung dieser Kohlenutzung für die *Ölsubstitution* kommt es entscheidend darauf an, daß der mit der Fernwärme simultan erzeugte Strom in großem Umfang zu Heizzwecken verwendet und nicht als Beitrag zur Deckung des allgemeinen Strombedarfs betrachtet wird. Dafür gibt es zwei energiepolitische Hauptgründe.

### 1. Hohe Effizienz der Heizenergieverwendung

Das Heizen mit Koppelstrom ist besonders energieeffizient, und dementsprechend umweltschonend, denn der Systemwirkungsgrad als Verhältnis von Nutzenergie (Raumwärme) zu Primärenergie (zurechenbarer Kohleverbrauch) beträgt hier etwa 75 % (vgl. Anlage 1 b). Er liegt an der Spitze der z. Zt. allgemein zugänglichen Heizsysteme. Unter Berücksichtigung der ohnehin gegebenen und unbestrittenen Vorzüge der Elektroheizung auf der Anwendungsseite wie Bedienungskomfort, Geruch- und Geräuschlosigkeit, Nullimmission, geringer Investitionsaufwand, minimale Wartung etc., sowie in Anbetracht des vergleichsweise einfachen Verteilungsproblems (Netzertüchtigung), kann die *Koppelstromheizung als fast ideale Briketts- und Ölsubstitutionstechnologie im Raumwärmebereich* gelten. Der in Alternativszenarien, Einspar- und Ausstiegsstudien sehr hervorgehobene einzige energiepolitische Makel des Heizens mit Strom, nämlich der durch einen Kraftwerkwirkungsgrad von ca. 38 % bedingte hohe Primärenergieaufwand, entfällt, wenn der Heizstrom aus KWK-Anlagen stammt<sup>16</sup>).

### 2. Begünstigung der Fernwärmeausbreitung

Zum andern entfallen die technisch / organisatorischen und betriebswirtschaftlichen Probleme, die sich für eine Fernwärmeversorgung auf KWK-Basis aus den

Unterschieden in der *Bedarfscharakteristik* der Heizwärme einerseits und des elektrischen Stroms andererseits ergeben.

Wie man aus Anlage 2 ersieht, schwankt der Heizwärmebedarf im Jahresverlauf sehr viel stärker als die allgemeine Stromnachfrage. Während der Heizperiode (Oktober bis Mai) nimmt er um mehr als 300 % zu. Diese für das gesamte Bundesgebiet dargestellte starke Verschiedenheit des Bedarfsverlaufs gilt im Prinzip genau so für eine Region, eine Gemeinde, wie für den einzelnen Haushalt. In abgeschwächter Form besteht sie auch im Wochen- und im Tagesrhythmus. Sie definiert das versorgungswirtschaftliche Grundproblem der als „*Zwitter-Technologie*“ mißverstandenen KWK. Es zwingt zu rückschrittlich anmutenden Kompensationsmaßnahmen wie die Speicherung überschüssigen Heißwassers in *Erdspeichern* (30 000 m<sup>3</sup> in Flensburg), oder die übliche Abdeckung von Spitzenwärmelast durch *Fernwärme-Ölkessel*. Hinzu kommen die Probleme der Lastverteilung und Reservehaltung.

Die Verwendung von Koppelstrom zu Heizzwecken ist bisher nur ganz vereinzelt und in den letzten Jahren u. W. nicht mehr vorgeschlagen oder gar diskutiert worden<sup>17)</sup>. Abgesehen davon, daß es im Zeichen großer Einsparbemühungen und -absichten zur Klimaerhaltung nicht opportun erscheint irgendeine Art von Elektroheizung zu empfehlen, dürfte ein tieferer Grund im tradierten *Rollenverständnis der EVU* liegen. Sie sind der Elektrizitätsversorgung, nicht der Wärmeversorgung verpflichtet. Zwar werden die heutigen HKW ganz überwiegend von den EVU betrieben, aber nach unserer Einschätzung kann von ihnen nicht die zur Öl- und Brikettsabkopplung notwendige KWK-Expansion erwartet werden. Von der Unterschiedlichkeit der Strom- bzw. Wärmeversorgung her gesehen scheint die Aufgabe der Umstrukturierung der Wärmeversorgung den EVU auch nicht zumutbar zu sein. Es sollten vielmehr Rahmenbedingungen dafür geschaffen werden, daß die neue Wärmeversorgung von *kommunalen Koppel-Anlagen (KKA)* ausgehen kann. Dazu gehört in erster Linie die Regelung der Netzbenutzung und der Netzertüchtigung zur *Durchleitung* des Heizstroms. Die im Zusammenhang mit der Verlängerung der Konzessionsverträge zwischen EVU und Kommunen aufgekommene Frage der Netzübernahme durch Kommunen erscheint unter KKA-Aspekten in einem neuen Lichte.

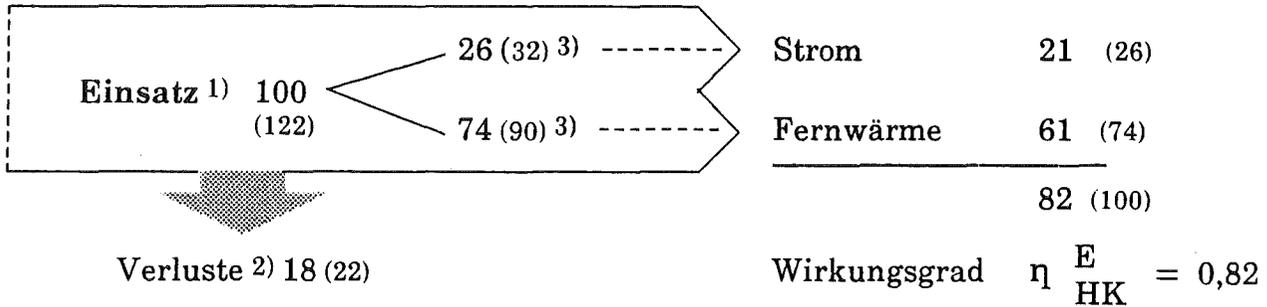
## Anmerkungen und Literatur

- 1) Vgl. z.B. Energiebericht der Bundesregierung 1986, TZ 79 u. 88, sowie Umweltgutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen 1987, TZ 1997, 1999, 2000.
- 2) Vgl. dazu insbesondere die Ausstiegsstudien des PROGNOSE- und des ÖKO-Instituts von 1987 bzw. 1988:  
Rationelle Energieverwendung und -erzeugung ohne Kernenergienutzung, Basel, Dez. 1987, hier bes. S. 217-380.  
Das GRÜNE Energiewende-Szenario 2010, Freiburg 1988, hier bes. S. 41-52  
Zur KWK-Bedeutung für eine "Sonnenenergie-Wirtschaft" vgl. Kohler/Leuchtner/Müschel, Sonnenenergie-Wirtschaft, Freiburg 1987, hier bes. S. 54-66
- 3) Vgl. P. Riebel, Die Kuppelproduktion, Köln 1955
- 4) Zur aktivitätsanalytischen Problemtypologie vgl. F. Conrad, Zur Dualität in der linearen Programmierung und ihrer produktionstheoretischen Interpretation, Diss. Heidelberg 1973, S. 134-149
- 5) Der deutschen Energiebilanz 1988 ist zu entnehmen, daß die Heizwerke mit einem Wirkungsgrad von 0,85, die Heizkraftwerke mit 0,84 arbeiteten.
- 6) 1989 waren 11,6 Mio oder 35 % der Wohnungen im vereinigten Deutschland ölbeheizt gegenüber nur 3,3 Mio oder 11 % fernwärmebeheizten Wohnungen. Vgl. Anlage 4
- 7) Dieser Folgerung steht die noch zu behandelnde eigentümliche Konvention der die Fernwärme begünstigenden Bewertung der HKW-Produkte entgegen.
- 8) Im Schlußbericht der Enquete-Kommission zum Schutz der Erdatmosphäre spielt die KWK als Energiespartetechnik eine beachtliche Rolle bei der anvisierten CO<sub>2</sub>-Minderung. Vgl. BT-Drucksache 11/8030, 24.5.90, Abschnitt E, hier S. 392-444. Ferner S. 474 und S. 476.  
Siehe z.B. auch "Kraft-Wärme-Kopplung: Ein Weg aus der Klimagefahr", Energie-Dialog, Nov. 1990, S. 43-45
- 9) Vgl. Energiebericht der Bundesregierung 1986, Tz. 88.
- 10) Hier endet aber bereits der Konsens der Experten. Prof. Alefeld (München) und Prof. Baehr (Hannover) haben sich 1988 darüber gestritten, ob die exergetische KWK-Bewertungsmethode mit dem II. Hauptsatz vereinbar sei oder nicht. Vgl. dazu die in Anlage 3 unter 1988 angegebenen Literatur-Positionen 1, 2, 4 und 5.
- 11) Zur Arbeitswert- und zur Restwertmethode vgl. W. Piller, M. Rudolph, Kraft-Wärme-Kopplung, 1984, S. 42-59. 2. Auflage 1991, S. 46-63  
Die Arbeitswertmethode ist wie das kalorische und das exergetische Verfahren kausal orientiert und damit thermodynamischer Natur, die Restwertmethode ist final orientiert und damit betriebswirtschaftlicher Natur.
- 12) Alefeld prüft eine ganze Reihe von einschlägigen Kennzahlen, Aufteilungsansätzen und Wirkungsgraden auf ihre Verträglichkeit mit den beiden thermodynamischen Hauptsätzen. Nur die von Piller und Rudolph (a.a.O., siehe Anmerkung 11) als Arbeitswertmethode bezeichnete "Aufteilung nach dem Arbeitswert der Produktströme" hält dieser Prüfung stand.  
Vgl. G. Alefeld, Zur Bewertung von Heizkraftwerken, BWK 6/1988, S. 231-236

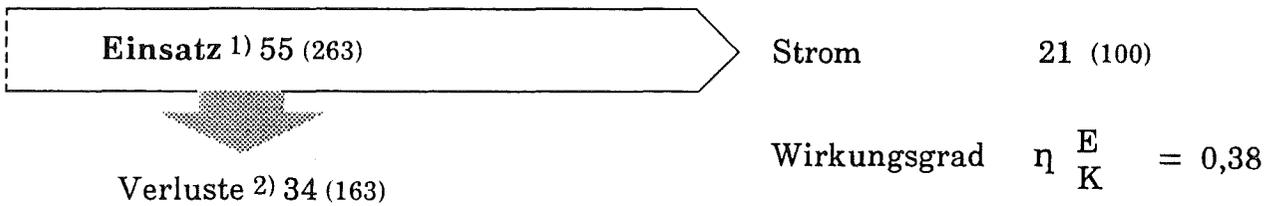
- 13) H. Euler, Umweltfolgen von Wärmeversorgungskonzepten, Vorläufige Fassung, Universität Dortmund, August 1983, S. 40-53, bes. Abb. 5 und 6. 1984 von der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung veröffentlicht.
- 14) Vgl. W. Herppich, T. Zuchtriegel, W. Schulz, Least-Cost Planning in den USA, Oldenburg 1989. "LCP hat zum Ziel, die Kosten der Nutzenergien Licht, Kraft, Wärme etc., also der Energy Services (als Güter) zu minimieren (S. XX). In der Praxis der amerikanischen EVU wird der Begriff LCP zunehmend durch "Integrated Resource Planning" (IRP) ersetzt, wobei volkswirtschaftliche Kostengesichtspunkte berücksichtigt werden.
- 15) Im "Energiewende-Szenario 2010" des Öko-Instituts vom Juli 1988 wird die Stromerzeugung gegenüber 1982 um 28 % reduziert. Der Stromverbrauch soll auf "stromspezifische" Zwecke beschränkt bleiben, und E-Heizungen sollen hauptsächlich durch Fernwärme ersetzt werden.  
Vordergründige Argumentationen gegen die Elektro-Heizung haben die öffentliche Diskussion bereits soweit beeinflusst, daß das Landgericht Düsseldorf 1990 dem RWE die Werbung für die Elektrospeicherheizung aufgrund einer Klage der Verbraucherzentrale NRW untersagte.
- 16) In dem Maße, wie der zum Heizen verwendete Kondensationsstrom aus fossilen Brennstoffen stammt, ist mit dem hohen Primärenergieaufwand eventuell eine im Vergleich zu Öl- oder Gasheizungen höhere Emission an Schadstoffen verbunden. Zu dieser Streitfrage vgl. Freispruch für Strom? Sonderdruck der Zeitschrift ENERGIE 1985/86.  
Soweit man eine höhere Emission im allgemeinen bejaht, entfällt dieser Umwelteinwand gegen die Elektroheizung, wenn diese mit Koppelstrom betrieben wird. Vgl. F. Conrad, Koppel-Heizstrom, die energie- und umweltpolitisch optimale Elektroheizung, ENERGIE, Jan.-Febr. 1986, S. 82-86. In dem erwähnten Sonderdruck enthalten.
- 17) Es sind uns drei Autoren bekannt, die sich aufgrund systemanalytischer Überlegungen für die koppelstrombetriebene Direktheizung aussprechen:
  - R. Hohl, Fernbeheizte Schweiz? BBC-Mitt. 6/73, S. 253-264
  - G. Cwienk, Input-Output-Modelle begründen Korrekturen bisheriger Bewertungsprinzipien in der Energiewirtschaft, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 1/1978, S. 3-17
  - H. Schäfer, Aufgaben und Bedeutung der elektrischen Energie für den Wärmemarkt. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 5/81, S. 694-698Zu verteilungstechnischen Fragen der Koppelstromheizung vgl. V. Schulz, P.-M. Fischer, Heizstrom aus dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen?, BWK3/86, S. 75-80

## Energieflußdiagramme A Endenergie-Erzeugung

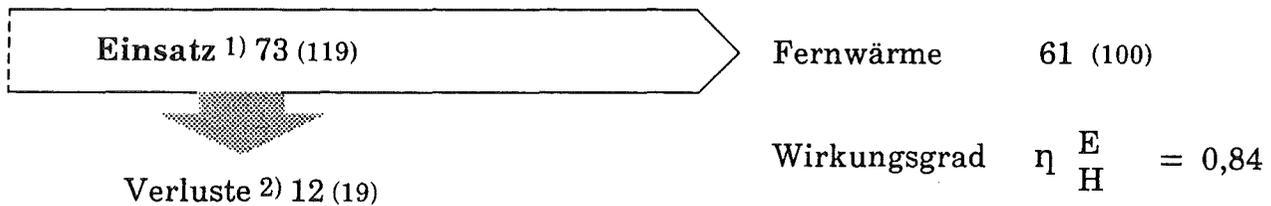
### 1. Heizkraftwerk (HKW)



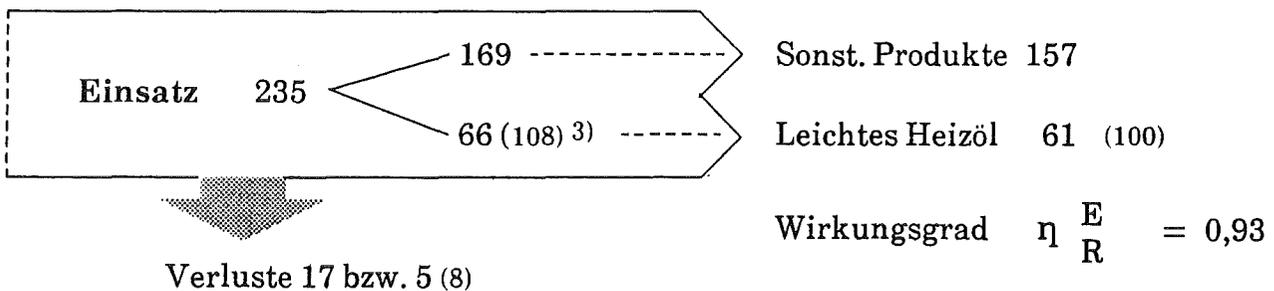
### 2. Kondensationskraftwerk



### 3. Heizwerk



### 4. Raffinerie



1) Primärenergie, z.B. Kohle, Erdgas, oder Sekundärenergie, z.B. Öl, Biogas

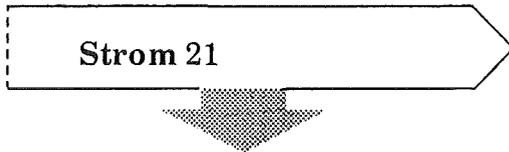
2) Kesselverluste, Prozeßverluste, Eigenbedarf

3) Anteilig entsprechend dem Erzeugungsanteil

## Energieflußdiagramme B

### Verteilung und Verwendung zu Heizzwecken

#### 1. Strom aus Kraftwerk oder HKW für Einzel-Direktheizung



Verluste <sup>1)</sup> rund 2

Nutzwärme 19

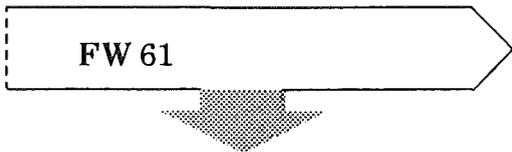
$$\text{Wirkungsgrad } \eta_{\text{St}}^{\text{V}} = 0,92$$

Systemwirkungsgrade (A x B)

$$\text{a) } \eta_{\text{KSt}}^{\text{S}} = \eta_{\text{K}}^{\text{E}} \times \eta_{\text{St}}^{\text{V}} = 0,38 \times 0,92 = 0,35$$

$$\text{b) } \eta_{\text{HKSt}}^{\text{S}} = \eta_{\text{HK}}^{\text{E}} \times \eta_{\text{St}}^{\text{V}} = 0,82 \times 0,92 = 0,75$$

#### 2. Fernwärme (FW) aus Heizwerk oder HKW



Verluste <sup>1)</sup> 20

Nutzwärme 41

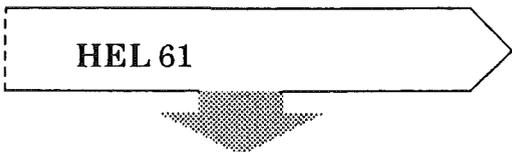
$$\text{Wirkungsgrad } \eta_{\text{FW}}^{\text{V}} = 0,67$$

Systemwirkungsgrade (A x B)

$$\text{a) } \eta_{\text{HFW}}^{\text{S}} = \eta_{\text{H}}^{\text{E}} \times \eta_{\text{FW}}^{\text{V}} = 0,84 \times 0,67 = 0,56$$

$$\text{b) } \eta_{\text{HKFW}}^{\text{S}} = \eta_{\text{HK}}^{\text{E}} \times \eta_{\text{FW}}^{\text{V}} = 0,82 \times 0,67 = 0,55$$

#### 3. Leichtes Heizöl (HEL) für Zentralheizung



Verluste <sup>1)</sup> 18

Nutzwärme 43

$$\text{Wirkungsgrad } \eta_{\text{Ö}}^{\text{V}} = 0,70 \text{ } ^2)$$

Systemwirkungsgrade (A x B)

$$\eta_{\text{Ö}}^{\text{S}} = \eta_{\text{R}}^{\text{E}} \times \eta_{\text{Ö}}^{\text{V}} = 0,93 \times 0,70 = 0,65$$

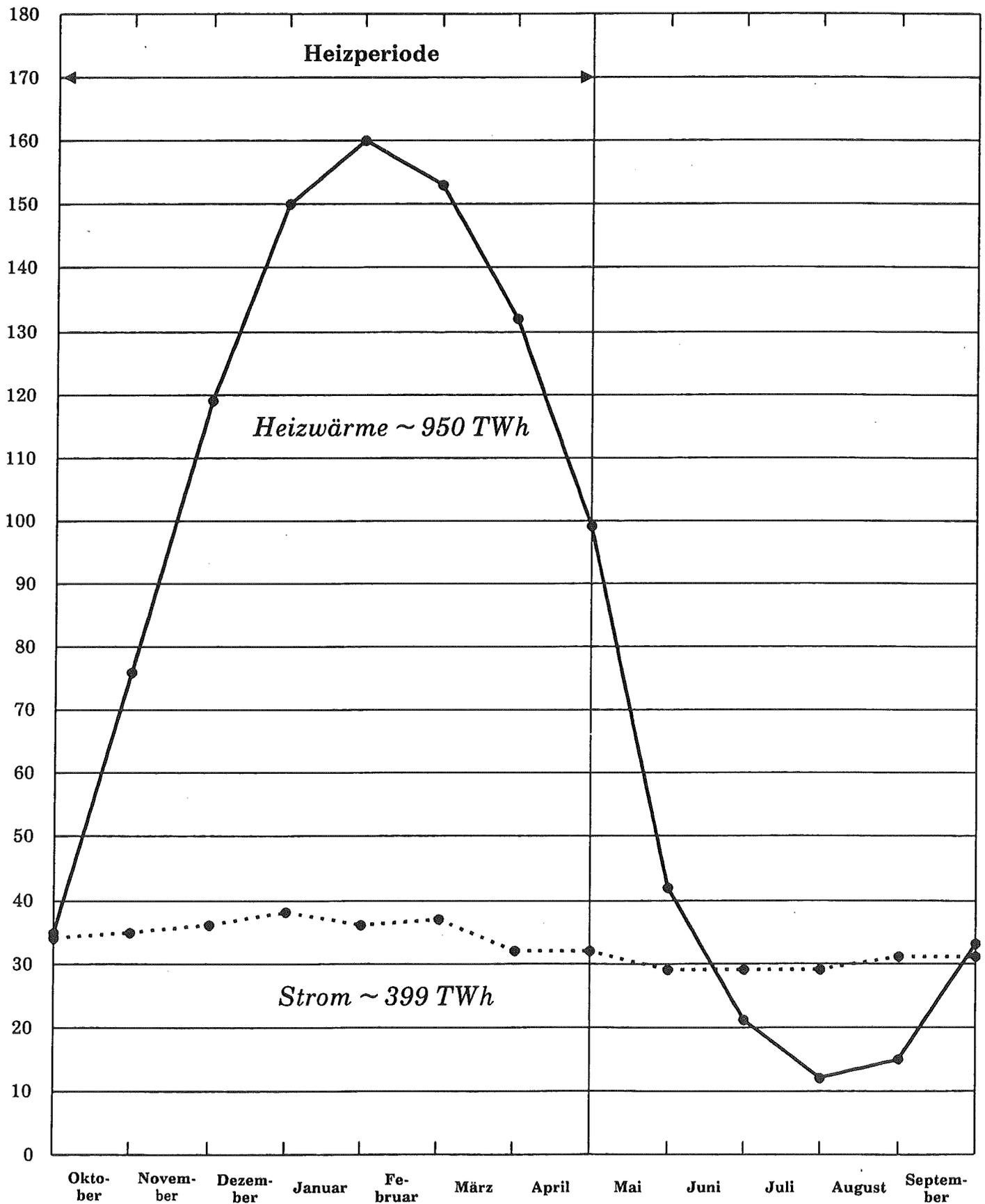
1) Verteilungs- und Anwendungsverluste

2) Es ist vom derzeitigen Ölkesselbestand auszugehen, der durch FW oder E-Heizung substituiert werden soll:  
Schätzwert

Anlage 2

Heizwärme- und Strombedarf in der Bundesrepublik 1984

TWh/Mt



Quellen: *Elektrizitätswirtschaft* 5/85, 13/87  
*Betrieb und Energie* 3/87

### Anlage 3

## Literatur zur Exergie im allgemeinen und zu ihrer Bedeutung für die Kraft-Wärme-Kopplung im besonderen <sup>1)</sup>

(chronologisch geordnet)

1961

xx Fachheft Exergie der Zeitschrift Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK), November 1961, mit folgenden Beiträgen:

P. Grassmann,  
Energie und Exergie, S. 482 - 486

W. Fratzscher,  
Zum Begriff des exergetischen Wirkungsgrads, S. 486 - 493

H. Rögner,  
Exergieverluste im Dampfkraftprozeß, S. 493 - 495

Z. Rant,  
Der Einfluß der Luftvorwärmung auf die Nichtumkehrbarkeiten der Verbrennung, S. 496 - 500

N. Gasparovic,  
Schrifttum über Exergie, S. 502 - 509

Zusammenstellung der wesentlichen in Deutschland bekannt gewordenen einschlägigen Veröffentlichungen von 1889 bis 1961 (116 Arbeiten)

Z. Rant,  
Zur Bestimmung der spezifischen Exergie von Brennstoffen. Allg. Wärmetechnik 10 (1961), S. 172 - 176

W. Fratzscher, R. Nitsch,  
Exergetische Beurteilung heterogener Reaktoren, Kernenergie 1961, Heft 4, S. 269 - 275

---

1) Die mit x bezeichneten Veröffentlichungen sind für die Bewertungsfragen bei der Kraft-Wärme-Kopplung von besonderer Bedeutung.  
Die mit xx bezeichneten Arbeiten befinden sich im Besitz des Autors.

## 1962

H. D. Baehr,  
Thermodynamik, Springer-Verlag 1962, hier S. 379-383

J. Szargut,  
Die Energiebilanz der Wärmeprozesse in der Hüttenindustrie, Freiburger  
Forschungshefte Nr. B 68 (1962), S. 81-103

- x N. Gasparovic,  
xx Eine neue Definition der Wirkungsgrade bei Heizkraftprozessen, BWK, Okto-  
ber 1962, S. 473-474

## 1963

- xx H.D. Baehr, E.F. Schmidt,  
Definition und Berechnung von Brennstoffexergien, BWK, August 1963, S.  
375-381

Z. Rant,  
Die Heiztechnik und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, Gaswärme 12  
(1963), S. 297-304

## 1964

R. Petela,  
Exergy of heat radiation, Heat Transfer 1964, Nr. 2 (May), S. 187-192

G. Rabek,  
Die Exergie als Hilfsmittel zu Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, Wärme 70  
(1964), Nr. 4, S. 125-129

- x R. Nitsch,  
xx Der exergetische Wirkungsgrad der Heizkraftkopplung, BWK, Januar 1964,  
S. 5-7
- xx J. Szargut, T. Styrylska,  
Angenäherte Bestimmung der Exergie von Brennstoffen, BWK, Dezember  
1964, S. 589-596
- xx D. Lell,  
Änderung des thermischen Wirkungsgrads durch geänderte Betriebsbedin-  
gungen bei Wärmekraftprozessen, BWK, Januar 1964, S. 1-5
- x Z. Rant,  
xx Thermodynamische Bewertung der Verluste bei technischen Energieumwand-  
lungen, BWK, September 1964, S. 453-457

1965

- xx H.D. Baehr,  
Definition und Berechnung von Exergie und Anergie, BWK, Januar 1965,  
S. 1-6
- N. Elsner,  
Die Bedeutung und Durchführung exergetischer Untersuchungen in der Ener-  
giewirtschaft, IV. Konferenz für Industrielle Energiewirtschaft, Sektion 1, Ref.  
Nr. 1, S. 1-19, Berlin 1965
- xx W. Fratzscher, G. Gruhn,  
Die Bedeutung und Bestimmung des Umgebungszustandes für exergetische  
Untersuchungen, BWK, Juli 1965, S. 337-341
- H.D. Baehr,  
Exergie und Anergie und ihre Anwendung in der Kältetechnik, Kältechnik  
1965, Nr. 1, S. 14-22
- x R. Nitsch,  
Die exergetische Kostenaufteilung bei der Heiz-Kraft-Kopplung und die Ent-  
wicklung eines exergetischen Heizwärme-Tarifs, Wiss. Zeitschrift der TH Che-  
mie Leuna-Merseburg, 1965, Nr. 2, S. 105-111
- x W. Weingärtner,  
xx Exergiebetachtung des Dampfkraftprozesses. Zur Kostenaufteilung bei der  
Kraft-Wärme-Kopplung, BWK, Juli 1965, S. 330-337
- xx P. Grassmann,  
Freie Enthalpie, maximale technische Arbeit und Exergie, BWK, Februar  
1965, S. 78-79
- xx VDI, Energie und Exergie, Deutscher Ingenieurtag 1964, VDI-Verlag  
Düsseldorf 1965, mit folgenden Beiträgen:
- F. Bosnjakovic,  
Die Bewertung wärmetechnischer Prozesse mit Hilfe der Exergie.
- H.D. Baehr,  
Energie, Exergie, Anergie
- P. Grassmann,  
Anwendungen von Exergiebetachtungen in der Kältetechnik.
- Z. Rant,  
Die Exergieverhältnisse bei der Verbrennung.
- J.J.C. van Lier,  
Der Exergiebegriff im Kraftwerksbereich
- H. Rögner,  
Umrechnung von Versuchsergebnissen an Blockkraftwerksturbinen mit  
Hilfe der Exergie.
- E. Bergmann/K.R. Schmidt,  
Ein Störungsrechnungsverfahren mit der Exergie

**1967**

- xx J. Szargut,  
Grenzen für die Anwendungsmöglichkeiten des Exergiebegriffs, BWK, Juni  
1967, S. 309-313

**1968**

- xx H.D. Baehr,  
Zur Definition exergetischer Wirkungsgrade, BWK, Mai 1968, S. 197-200

**1970**

- xx R. Pruschek,  
Die Exergie der Kernbrennstoffe, BWK, September 1970, S. 429-434
- xx K. Siegel,  
Exergie-Analyse heterogener Leistungsreaktoren, BWK, September 1970, S.  
434-440
- xx W. Weingärtner,  
Die exergetische Betrachtung und ihre Grenzen, Energie und Technik, Heft 4,  
1970, S. 119-121

**1971**

- xx J. Szargut,  
Anwendung der Exergie zur angenäherten wirtschaftlichen Optimierung,  
BWK, Dezember 1971, S. 516-519

**1976**

- xx W. Kast,  
Der exergetische Wirkungsgrad der Wärmepumpe, BWK, August 1976, S. 315-  
318

**1977**

- J. Ahrendts,  
Die Exergie chemisch reaktionsfähiger Systeme, VDI-Forschungsheft 579,  
VDI-Verlag, Düsseldorf 1977
- X W. Burkhardt,  
xx Wirtschaftliche Energienutzung durch Fernwärme, HLH, Oktober 1977, S.  
353-358

## 1978

- xx W. Muschik,  
Einheitliche Definitionen von Exergie und Anergie, BWK, Oktober 1978,  
S. 410-413
- xx J.J. C. van Lier,  
Bewertung der Energieumwandlungen mit dem Exergiebegriff bei der Strom-  
und/oder Wärmeerzeugung, bWK, Dezember 1978, S. 475-484

## 1979

- xx H. D. Baehr,  
Die Exergie der Brennstoffe, BWK, Juli 1979, S. 292-297
- x G. Hörner,  
xx Möglichkeiten und Grenzen der Kraft-Wärme-Kopplung, Deutscher Inge-  
nieurtag 1979 (Vortragsmanuskript)
- xx W. Eisermann,  
Der Exergiebegriff bei chemischen Reaktionen und kerntechnischen Umwand-  
lungen, BWK, Juli 1979, S. 298-302

## 1980

- x F. Peter, H.-J. Dittmer, F.-J. Höly, H.-H. König,  
xx Anlagen- und Betriebskosten optimal ausgelegter Heizkraftwerke, Fernwär-  
me international, 1980, Heft 4, S. 248-255
- xx H.D. Baehr,  
Zur Thermodynamik des Heizens, Teil I, BWK, Januar 1980, S. 9-15
- xx ders.,  
dto., Teil II, BWK, Februar 1980, S. 47-57
- xx G. Tsatsaronis, P. Schuster, H. Rörtgen,  
Bilanzierung des Verfahrens zur hydrierenden Vergasung von Braunkohle,  
BWK, März 1980, S. 105-111

## 1981

W. Fratzscher, J. Beyer,  
Stand und Tendenzen bei der Anwendung und Weiterentwicklung des  
Exergiebegriffs, Chemische Technik, 1981, S. 1-10

## 1982

- x A. Gerken,
- xx Thermodynamische Bewertung der Energieeinsparung der Fernwärme aus Wärme-Kraft-Kopplung, Fichtner-Papier, Stuttgart, Mai 1982
  
- x W. Enchelmaier,
- xx Vereinfachte Darstellung der thermodynamischen Zusammenhänge nach dem temperaturabhängigen Energieinhalt, Fernwärme international, 1982, Heft 5, S. 365-371
  
- x N. Gasparovic,
- xx Die Wirkungsgrade der Kraft-Wärme-Kopplung: Ein Vergleich. BWK, Februar 1982, S. 83-86
  
- x H. B. Gerz,
- xx Die Leistungszahl als thermodynamische Vergleichsgröße der Heizsysteme, BWK, Februar 1982, S. 86-90

## 1984

- x M. Pawlik,
- xx Vergleichsanalyse der Wirkungsgrade bei der Kraft-Wärme-Kopplung, BWK, Jan./Febr. 1984, S. 51-53
  
- x Th. Belting,
- xx Analyse der Bewertungsmethoden für Strom- und Nutzwärmekosten, BWK, November 1984, S. 457-462
  
- x W. Piller, M. Rudolph,
- xx Kraft-Wärme-Kopplung, VWEW Frankfurt 1984 2. Auflage 1991
  
- xx P. Grassmann,
- Die Doppeldeutigkeit des Wortes "Energie", BWK, März 1984, S. 102-105

## 1985

- xx W. Kast,
- Grenzen der Energienutzung bei der Erzeugung von Heizwärme, HLH, Dezember 1985, S. 608-612

## 1986

- x H.D. Baehr,
- Wirkungsgrad und Heizzahl zur energetischen Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung, VGB-Kongreß "Kraftwerke 1985", Essen 1986, S. 332-227
  
- W. Fratzscher, V. M. Brodjanski, K. Michalek,
- Exergie - Theorie und Anwendung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. Aufgenommen vom Springer Verlag Wien-New York 1986

## 1988

- xx G. Alefeld,  
Probleme mit der Exergie, BWK, März 1988, S. 72-80
- x G. Alefeld,  
xx Zur Bewertung von Heizkraftwerken, BWK, Juni 1988, S. 231-236
- x G. Alefeld,  
xx Vergleich von Heizkraftwerken mit konkurrierenden Systemen, BWK,  
Juli/August 1988, S. 291-298
- xx H.D. Baehr,  
Probleme mit der Energie?, BWK, November 1988, S. 450-457
- xx G. Alefeld,  
Die Exergie und der II. Hauptsatz der Thermodynamik, BWK, November  
1988, S. 458-464

## 1990

- x A. Reichl,  
xx Energetische und ökologische Bewertung der Fernwärme aus Kraft-Wärme-  
Kopplung, BWK, Juni 1990, S. 325-336

## 1991

- x R. Pruschek, J. Bock,  
xx Energieeinsparung durch Kraft-Wärme-Kopplung - Potentiale und Grenzen,  
VDI-Berichte Nr. 923, 1991, S. 23-49

Anlage 4: Wärmeversorgung und Emissionen der deutschen Haushalte 1989 1)

	Wohnungen		Endenergie		Emissionen 2)					
	Mio		Mio t SKE		CO <sub>2</sub> Mio t		SO <sub>2</sub> kt		NO <sub>x</sub> kt	
Heizöl	11,6	35 %	24	32 %	56	38 %	70	14 %	43	47 %
Erdgas	8,3	25 %	21	27 %	34	23 %	20	4 %	36	39 %
Kohle	7,3	22 %	18	24 %	57	39 %	410	82 %	13	14 %
Strom	2,5	7 %	6	8 %	(32)		(58)		(28)	
Fernwärme	3,3	11 %	7	9 %	(29)		(104)		(54)	
<b>Summe</b>	<b>33,0</b>	<b>100 %</b>	<b>76</b>	<b>100 %</b>	<b>147</b>	<b>100 %</b>	<b>500</b>	<b>100 %</b>	<b>92</b>	<b>100 %</b>

1) Incl. Warmwasserbereitung. Vorläufige Werte

2) Circa-Werte. Die Werte in Klammern sind Emissionen am Erzeugungsort des Heizstroms bzw. der Fernwärme.

Energieverbrauch und Emissionen der deutschen PKW 1989

	Anzahl Mio	Treibstoff Mio t SKE	CO <sub>2</sub> Mio t	SO <sub>2</sub> kt	NO <sub>x</sub> kt
Benzin u. Diesel-PKW	34	50	107	67	1 370

1 Mio t SKE = 29,3 PJ

## 2. Teil:                    Zur klimapolitischen Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung<sup>1</sup>

Inhalt	Seite
1. Die Grundlastprämisse des HKW-KKW-Vergleichs	43
2. Das Errechnen von „negativen CO <sub>2</sub> -Emissionen“ bei BHKW unter der Ölsubstitutionshypothese	44
3. Vom Arbeitswertverfahren zur Wärmegutschrift	47
a) Stromgutschrift-Verfahren	47
b) Wärmegutschrift-Verfahren	49
4. Raumwärme mittels KWK- und Einzelanlagen im spezifischen Vergleich	52
a) Der Standardfall	52
b) HKW als reines Heizwerk	54
5. CO <sub>2</sub> -Vermeidungspotentiale der KWK	57
a) Koppelstrom während der Heizperiode: 7 Mio t SKE (56 TWh)	57
b) Koppelwärme statt Öl und Kohle: 14 Mio t SKE	58
c) Der Einfluß von Brennstoff und Technik auf die CO <sub>2</sub> -Emission	59
Anmerkungen und Literatur	62
1 Diagramm	
5 Tabellen	

1 Dieser Bericht geht auf ein Ersuchen des Referats 311 im BMFT zurück, die in einer Studie für das Land Hessen (1989) behauptete CO<sub>2</sub>-Überlegenheit von HKW im Vergleich zu KKW zu prüfen.

## Zur klimapolitischen Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung (CO<sub>2</sub>-Vermeidung)

Im Jahre 1990 wurde in die Energie- und Klimadiskussion die Behauptung eingespeist, bestimmte gasbetriebene Kraft-Wärme-Koppelanlagen (KWK) seien zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung ein weit besseres Mittel als die fast CO<sub>2</sub>-freie Kernenergie, denn die Koppelstromerzeugung verursache negativen CO<sub>2</sub>-Ausstoß<sup>1)</sup>, wirke also wie eine CO<sub>2</sub>-Senke. Quelle dieser auffälligen Aussagen ist die sogenannte GEMIS-Studie von Mitarbeitern des Öko-Instituts und des Wissenschaftlichen Zentrums III der GH Kassel vom August 1989, in der hauptsächlich Daten- und Methodenfragen der Berechnung von Umweltauswirkungen heutiger Energietechniken und -systeme behandelt und solche Rechnungen auch durchgeführt werden. Das Kapitel „Emissionsbilanzen für Stromsysteme“ zeigt Tabellen, in denen die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro 100 Wh Strom bei einem KKW mit 5,4 t und bei einem Gas-Blockheizkraftwerk (BHKW) mit minus 2,2 t angegeben werden<sup>2)</sup>. Der Mitverfasser Fritsche hat diese Tabellen in einem Contra-KE-Artikel um ein Erdgas-Kombi-Heizkraftwerk (GuD-HKW) und ein Biogas-BHKW erweitert, denen er noch wesentlich stärkere „CO<sub>2</sub>-Negativ-Emissionen“ attestiert als dem Erdgas-BHKW<sup>3)</sup>.

In unserem Beitrag werden die gegen die Kernenergie ins Feld geführten „Negativ-Emissionen“ zum Anlaß genommen, CO<sub>2</sub>-Vermeidungsrechnungen bei Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) unter empirischen und methodischen Gesichtspunkten zu diskutieren<sup>4)</sup>, um die sachliche und analytische Grundlage für energiepolitische Überlegungen in diesem Zusammenhang zu verbessern.

### 1. Die Grundlastprämisse des HKW-KKW-Vergleichs

Tabelle 1 stellt strombezogene CO<sub>2</sub>-Emissionen von Grund- und Mittellast-Kraftwerken, von Heizkraftwerken (HKW) und von Blockheizkraftwerken (BHKW), also von Anlagen sehr unterschiedlicher Größe und Zweckbestimmung einander gegenüber<sup>5)</sup>. Auf den ersten Blick erhebt sich die Frage, ob es sinnvoll sein kann, KWK-Anlagen, die in aller Regel wärmeorientiert arbeiten, als „Stromsysteme“

mit einem zur Grundlast-Stromerzeugung konzipierten Kraftwerk zu vergleichen. Dazu heißt es in der GEMIS-Studie, daß der Vergleich nur dann sinnvoll sei, wenn das HKW im Wärme-Grundlastbetrieb arbeitet (GEMIS, S. 278)<sup>6)</sup>, so daß ganzjährig Strom erzeugt wird. Bei den BHKW, die ja wegen ihrer angeblichen „Negativ-Emission“ in der Klima-Diskussion von besonderem Interesse sind, ist das in einem energie- und umweltpolitisch beachtlichen Umfang nicht der Fall. Damit ist das auf Gas-BHKW basierende Contra-KE-Argument in der CO<sub>2</sub>-Diskussion schon aus empirischen Gründen gegenstandslos. Inwieweit sich das Argument mit der neuen Energietechnologie GuD-HKW (System f) in Tabelle 1) besser stützen läßt, braucht hier nicht geprüft zu werden<sup>7)</sup>. Das Negativargument hat sich nämlich bereits verselbständigt und entfaltet seine Publikumswirkung auch ohne Bezug zur energiewirtschaftlichen Realität. Deshalb muß sich die kritische Prüfung auch auf das Zustandekommen der spektakulären Aussagen erstrecken, d. h. auf die Frage der wissenschaftlichen Qualität der GEMIS-Analysen. Handelt es sich um klimapolitisch relevante Erkenntnisse über die KWK-Technik, oder um bloße Rechenergebnisse, die nur für einen bestimmten Annahmenkomplex Gültigkeit haben?

## **2. Das Errechnen von „negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen“ bei BHKW unter der Ölsubstitutionshypothese**

Die in Tabelle 1 für 100 MWh Strom aus einem Erdgas-BHKW angegebene CO<sub>2</sub>-Emission von minus 2,2 t erhält man formal auf die Weise, daß man von den auf 100 MWh<sub>e</sub> bezogenen Gesamtemissionen in Höhe von 66,4 t die Emission von 68,6 t CO<sub>2</sub> abzieht, die vermieden wird, falls die je 100 MWh<sub>e</sub> in Koppelproduktion erzeugte Nahwärme eine entsprechende Menge Heizwärme aus Ölkesseln ersetzt<sup>8)</sup>.

Da die zum Nachvollziehen der Werte nötigen Details aus der GEMIS-Studie nicht ersichtlich sind, wurde mit Hilfe einer einschlägigen Arbeit<sup>9)</sup> in bestmöglicher Abstimmung mit GEMIS die Übersichtstabelle 2 erstellt, mit der die anstehende Rechnung und andere Vergleichsrechnungen verdeutlicht werden können.

Das BHKW I. 3) erzeugt bei einem Wirkungsgrad von 0,76 und einer SZ von 0,56 100 MWh Strom gekoppelt mit 154 MWh Nutzwärme aus 436 MWh Primärenergie, wobei 86 t CO<sub>2</sub> entstehen<sup>10)</sup>. In einer alten Ölzentralheizung II. 2) mit Kesselwirkungsgrad 0,68 sind für 154 MWh Raumwärme 335 MWh Heizöl einzusetzen, was zu 88 t CO<sub>2</sub> führt<sup>11)</sup>.

Stellt man sich vor, Ölheizungen II. 2) werden durch Nahwärme aus I. 3) ersetzt, so entstehen pro 100 MWh Koppelstrom 86 t minus 88 t gleich 2 t CO<sub>2</sub> weniger als vorher. Sie werden quasi „per Saldo“ oder „netto“ vermieden. In der GEMIS-Studie werden die vermiedenen höheren Emissionen der ersetzten Ölheizungen unter Hinweis auf eine erfolgte „Wärmegutschrift“ (vgl. Tab. 1) von den entstehenden niedrigeren Emissionen des Gas-BHKW abgezogen. Die negative Differenz wird als stromspezifische CO<sub>2</sub> Emission des BHKW deklariert.

Zunächst sei bemerkt, daß der für Verständnis und Beurteilung der GEMIS-Methode wichtige Begriff der „Wärmegutschrift“ hier fehl am Platze und irreführend ist. Nach energetischer Subtraktion des Heizöls vom Erdgas kann über den Saldo keine CO<sub>2</sub>-Emissionsaussage mehr gemacht werden, weil Öl und Gas unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Faktoren haben. Zieht man vom Gaseinsatz des BHKW in Höhe von 436 MWh das ersetzte Heizöl von 335 MWh im Sinne einer „Wärmegutschrift“ ab, so bleibt rechnerisch ein *positiver* „Netto-Einsatz“ von 101 MWh, von dem aus kein logisch/analytischer Schritt zu der dem BHKW attestierten *negativen* CO<sub>2</sub>-Emission von 2 t führt.

Ein wichtigerer Kritikpunkt besteht darin, daß die GEMIS-Methode und -Sprechweise den Eindruck vermittelt, es sei eine technisch bedingte *Eigenschaft* des Gas-BHKW, den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft zu verringern. In Wirklichkeit ergibt sich die „negative CO<sub>2</sub>-Emission“ aus einer ganz bestimmten *Verwendung* des BHKW, nämlich Heizölsubstitution, und zwar unter ganz bestimmten technischen Substitutionsbedingungen.

In allen konkreten Fällen, in denen eine KWK-Anlage nicht Heizungen ersetzen, sondern neuen Raumwärmebedarf etwa in Folge von Zu- oder Einwanderung decken soll, ist sowohl eine Wärmegutschrift als auch eine Emissionssaldierung ohnehin gegenstandslos. Wenn allgemeine Aussagen über CO<sub>2</sub>-Emission durch Stromerzeugung in KWK gemacht werden sollen, so kann es nicht darauf ankommen, welcher Verwendung die Koppelwärme zugeführt wird, ob sie bestehende oder geplante Öl-, Gas- oder Kohleheizungen ersetzt oder nicht<sup>12)</sup>. Läßt man es aber darauf ankommen, wie GEMIS, so kann der Emissionssaldo auch positiv ausfallen. Bei gegebener KWK-Technik und definierter Substitutionsaufgabe hängt es von den technischen Eigenschaften der durch Nah- oder Fernwärme zu ersetzenden Heizungen ab, ob eine strombezogene CO<sub>2</sub>-Vermeidung gegenüber z. B. einem KKW eintritt oder nicht, wie folgendes Beispiel zeigt.

In Tabelle 2 hat die Ölheizung II. 2) einen Systemwirkungsgrad von 0,46<sup>13)</sup>. Sind Kesselwirkungsgrad und Wärmeverteilung der bestehenden Ölheizungen etwas besser, so daß der Systemwirkungsgrad um beispielsweise 10 % höher liegt, so sinkt die CO<sub>2</sub>-Emission für 154 MWh Nutzwärme von 88 t auf 79 t. Subtrahiert man sie nach der GEMIS-Methode von den 86 t CO<sub>2</sub> des BHKW, so fällt die sogenannte „Gesamtemission des Stromsystems Gas-BHKW für 100 MWh Strom“ positiv aus und ist mit 7 t höher als die des KKW in Tabelle 1<sup>14)</sup>. Die negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gas-BHKW lt. GEMIS und das darauf beruhende Argument gegen KKW entfallen also bei geringer Variation von Prämissen auf der Konsumentenseite, die mit den verglichenen Erzeugungstechniken in keinem sachlichen Zusammenhang stehen<sup>15)</sup>.

Sie entfallen aber auch bei Variation von GEMIS-Annahmen bezüglich der verglichenen Energietechniken auf der Erzeugungsseite. Das kleine BHKW I. 3) in Tabelle 2 mit 0,5 MWe hat eine Stromkennzahl von 0,56. Bei einem großen BHKW mit mehreren MWe steigt das Strom/Wärmeverhältnis auf 0,60 bis 0,80, z. B. auf 0,70, und der Erzeugungswirkungsgrad geht etwas zurück, beispielsweise von 0,76 auf 0,72. In diesem Falle sinken der Input und damit die CO<sub>2</sub>-Emission des Gas-BHKW um 7 %. Gleichzeitig geht aber wegen der geringeren Wärmeauskoppelung die substituierte Heizölmenge und damit die Emissionsgutschrift an das BHKW um 20 % zurück. Dessen „Netto-Emission“ ist dann positiv und 85 % höher als beim Kernkraftwerk.

Unter der realistischen Annahme, daß bei kleinen BHKW eher Diesel- als Gasmotoren Verwendung finden, erhöht sich die CO<sub>2</sub>-Emission des BHKW I. 3) ceteris paribus um ein Drittel und der positive Emissionssaldo mit den Ölheizungen II. 2) wird fast 5 Mal so groß wie die dem Atomstrom anzulastende CO<sub>2</sub>-Erzeugung.

Es ist schließlich auf die Unvereinbarkeit der Substitutionshypothese mit der oben behandelten Grundlastprämisse hinzuweisen. Die CO<sub>2</sub>-Gutschrift an BHKW erfolgt bei GEMIS nach Maßgabe des während der *Heizperiode* durch Nahwärme ersetzten Brennstoffs für Ölheizungen. Somit ist die für einen sinnvollen Vergleich eines KWK-Systems mit einem Grundlaststromerzeuger wie ein KKW notwendige Voraussetzung der „Wärmegutschrift tatsächlich über das ganze Jahr“ (GEMIS S. 278, Anm. 76) nicht gegeben.

Wegen dieses inneren Widerspruchs, wegen der Verquickung von technischen Eigenschaften mit empirischen Prämissen und wegen der großen Labilität des Ergebnisses bezüglich der Annahmen (Sensitivität) kann die GEMIS-Errechnung

von negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei BHKW nicht als wissenschaftliche Herleitung bezeichnet werden, sondern eher als kasuistische Arithmetik mit Informations-, nicht Erkenntniswert. Die Studie zeigt, wie und unter welchen Annahmen man bei bestimmten HKW negative strombezogene CO<sub>2</sub>-Emissionen errechnen kann. Zur Verdeutlichung der versorgungswirtschaftlichen Koppel-Problematik und zur nachvollziehbaren klimapolitischen Beurteilung der KWK tragen solche gezielten Kalküle nicht bei. Insbesondere wird die zum Verständnis und damit für die wünschenswerte Expansion der KWK wesentliche Frage der Koppelprodukt-Bewertung nicht einmal angesprochen, sondern implizit als auf bestimmte Weise gelöst oder entschieden betrachtet. Diese wissenschaftliche Insuffizienz ist auch der Grund dafür, daß Kernkraftwerke nur als CO<sub>2</sub>-Emittenten vorkommen und nicht auch als Kohle-Substituenten von großmaßstäblicher CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotenz, was nun zu erläutern sein wird. Daß die von der GEMIS-Studie ignorierte nukleare KWK sowohl Kohle als auch Öl ersetzt und die absolut effektivste CO<sub>2</sub>-Vermeidungstechnik darstellt, sei nur am Rande bemerkt.

### **3. Vom Arbeitswertverfahren zur Wärmegutschrift**

Für die Negativ-Emissionen der Gas KWK-Anlagen f), h) und i) und für die CO<sub>2</sub>-Halbierung beim Kohle-HKW d) im Vergleich zur reinen Stromerzeugung b) in Tabelle 1 ist die Subtraktion von „Emissionen, die bei der Erzeugung der aus dem KWK-System ausgekoppelten Wärme durch ein anderes Heizsystem angefallen wären“ (GEMIS, S. 110), der entscheidende Verfahrensschritt.

Im Rahmen vergleichender Analysen technischer Alternativen sind solche Saldierungen aus didaktischen Gründen nicht unüblich und bedürfen keiner methodischen Begründung. In der GEMIS dagegen ist die Emissionssaldierung bei den als „Stromsysteme“ aufgefaßten KWK-Anlagen methodisch gesehen eine Folge der sogenannten „Wärmegutschrift“, die in formaler Analogie zur „Stromgutschrift“ an stromerzeugende „Heizsysteme“, also HKW aller Art, eingeführt wurde.

#### *a) Stromgutschrift-Verfahren*

Der Begriff „Stromgutschrift“ ist durch die etwa Mitte der 80er Jahre erklärte Bereitschaft der Elektrizitätswirtschaft bekannt geworden, den Betreibern von Fernwärme-KWK-Anlagen den ins öffentliche Netz eingespeisten Koppelstrom so zu vergüten, als sei er in einem definierten Referenz-Kondensationskraftwerk erzeugt worden. Dies gilt bis heute als ein energiepolitisch hochwillkommener Mo-

des, der den Ausbau der Fernwärme fördert, denn die Elektrizitätswirtschaft läßt dadurch den „Vorteil aus der Energieeinsparung der Kraft-Wärme-Kopplung vollständig der Fernwärme zugute kommen“<sup>16)</sup>. Schreibt man nämlich einer KWK-Anlage für den eingespeisten Koppelstrom soviel Energie gut, wie zur Erzeugung dieses Stroms in einem Kondensationskraftwerk nötig ist, so verbleibt für die Fernwärme ein so kleiner Rest an Energieeinsatz (sog. Restwert), daß ihr fiktiver Erzeugungswirkungsgrad größer als 1 wird, wie z. B. bei Wärmepumpen<sup>17)</sup>.

Für diesen energiepolitisch zu beurteilenden Gutschriftsmodus gibt es einen wissenschaftlichen Hintergrund in der Thermodynamik. In der jahrzehntelangen Diskussion um die „richtige“ Bewertung der Koppelprodukte aus KWK-Anlagen hat sich das sogenannte „Arbeitswertverfahren“ durchgesetzt<sup>18)</sup>. Vom Standardfall der Entnahmekondensation ausgehend, belastet oder „bewertet“ es die ausgekoppelte Fernwärme energie- und kostenmäßig mit der entgangenen „Arbeitsleistung“ oder Stromerzeugungspotenz des für die Fernwärmeerzeugung entnommenen, bereits teilentspannten Dampfes. Der restliche, dem Koppelstrom zugeordnete Input entspricht im Prinzip dem Energieaufwand für Strom aus einem Kondensationskraftwerk mit Wirkungsgrad 0,38, unabhängig davon, ob der Wirkungsgrad der KWK-Anlage 0,60 oder 0,90 beträgt<sup>19)</sup>. Die wissenschaftliche Rechtfertigung dafür lautet etwa so: Der II. Thermodynamische Hauptsatz verlangt, daß man der höchstwertigen Energie „elektrischer Strom“ (reine Exergie), wenn sie aus einem Wärmeprozess hervorgeht, stets soviel Energieaufwand zuordnet, wie es die Umwandlung von Wärme (Dampf) in Arbeit (Strom) naturgesetzmäßig erfordert, was im Wirkungsgrad eines Dampfkraftwerkes von realiter höchstens 0,45 zum Ausdruck kommt<sup>20)</sup>.

Das thermodynamisch begründete, allgemein anerkannte und praktizierte Arbeitswertverfahren dient also direkt der energetischen Bewertung von ausgekoppelter Wärme und bewirkt über den verbleibenden Restwert des Energieeinsatzes eine indirekte energetische Bewertung des Koppelstroms. Mit dieser Aufteilung des Energieeinsatzes auf die beiden Koppelprodukte hat man zugleich einen probaten Modus für die Emissionsaufteilung. In Ansehung seines fachwissenschaftlichen Hintergrundes ist seine Zweckdienlichkeit völlig unabhängig von der jeweiligen KWK-Technik, von der Frage nach Haupt- und Nebenprodukt, und davon, ob Strom oder Wärme in ein Netz eingespeist werden kann oder nicht. Das interne oder externe Gutschreiben von Koppelstrom an die Koppelwärme oder den Ein-

speiser ist nicht Bestandteil dieser Bewertungs- und Aufteilungsmethode, sondern allenfalls Bestandteil der Ergebnisse ihrer Anwendung.

In der GEMIS-Studie dagegen wird die Stromgutschrift an „wärmeseitig betrachtete KWK-Systeme“ (GEMIS, S. 110) mit einem Bewertungs- und Aufteilungsverfahren gleichgesetzt. Die oben skizzierte wissenschaftliche Argumentation, die von der Koppelwärme-Bewertungsfrage ausgeht und zu einer theoriekonformen Koppelstrom-Bewertung gelangt, wird bei der GEMIS-Methode ins Gegenteil verkehrt: Durch Gutschrift von Kondensationsstrom ergibt sich als Rest der fernwärmebezogene Energieeinsatz. Parallel zu dieser Rechnung werden die Emissionen saldiert<sup>21</sup>).

#### b) *Wärmegutschrift-Verfahren*

Aufgrund dieses methodischen Mißverständnisses mußten die GEMIS-Autoren bei der Frage nach dem koppelstrombezogenen Energieeinsatz und CO<sub>2</sub>-Ausstoß zwangsläufig eine gewisse Dualisierung des „Stromgutschriftverfahrens zwecks Koppelwärme-Emissionsberechnung“ unter Vertauschung der Begriffe Strom und Wärme vornehmen, so daß ein „Wärmegutschriftverfahren zur Koppelstrom-Emissionsberechnung“ entstand. Erneut wird die fachwissenschaftliche Frage nach dem adäquaten Bewertungsverfahren übergangen. Auch die naheliegende Frage nach dem Realitätsgehalt einer Wärmegutschrift wird nicht gestellt<sup>22</sup>).

Für dieses merkwürdig formalistische Vorgehen liefert besagte Anti-KE-Schrift eines GEMIS-Mitautors eine plausible Erklärung: Die Gutschrift von Ölwärme und entsprechend hoher CO<sub>2</sub>-Emission an das Gas-HKW bietet die einzige erkennbare Möglichkeit, die zwar äußerst geringe, aber doch positive CO<sub>2</sub>-Emission durch Atomstrom auf eine ins Auge springende Weise zu unterbieten, nämlich durch eine wissenschaftlich zwingend anmutende Errechnung einer „negativen CO<sub>2</sub>-Emission“. Dieses argumentative Unterlaufen der nuklearen Klimaschutzberuht auf der Suggestierung, ein Kraftwerk könne nur dann eine CO<sub>2</sub>-Gutschrift erhalten, wenn Fernwärme ausgekoppelt wird. Es ist nun zu zeigen, daß die GEMIS-Gutschriften nicht analytisch stringent, sondern willkürlich, und darüber hinaus empirisch unplausibel sind. Ihre Begründung enthält nichts, was dagegen spräche, einem KKW eine CO<sub>2</sub>-Gutschrift zu erteilen, wenn an seiner Stelle Braunkohle verstromt werden müßte. Entsprechende „Negativ-Emission“: minus 110 t CO<sub>2</sub>.

Nach Erteilung einer Gutschrift an ein HKW für ausgekoppelte Wärme verbleibt ein so kleiner rechnerischer Energieaufwand für den Koppelstrom, daß dessen fiktiver Wirkungsgrad in jedem realistischen Falle wesentlich höher ausfällt als beim Kondensationsstrom. Erteilt man z. B. einem BHKW eine Wärmegutschrift auf der Basis von Ölheizungen, wie es in der GEMIS-Studie geschieht, so wird der fiktive Wirkungsgrad der Koppelstromerzeugung sogar größer als 1<sup>23)</sup>. Dies widerspricht dem erläuterten thermodynamischen Hintergrund der üblichen Koppelproduktbewertung, nämlich der Arbeitswerttheorie. Einer rechnerisch hohen Effizienz der Koppelstromerzeugung entspricht zwangsläufig eine relativ ungünstige energetische Bewertung der Fernwärme. In der GEMIS-Studie bedeutet ja die Wärmegutschrift auf Ölkesselbasis eine indirekte Bewertung der Koppelwärme auf der Basis eines Heizungswirkungsgrades, der höchstens so hoch ist wie der eines HKW. Im Falle des BHKW beträgt der fiktive Koppelwärme-Wirkungsgrad nur noch 0,6<sup>24)</sup> gegenüber 2,0 bei der Stromgutschrift.

De facto wird also beim GEMIS-Verfahren zur strombezogenen Emissionsberechnung bei KWK-Anlagen der energetische Vorteil der KWK dem Strom und nicht der Fernwärme zugebilligt. Dies würde eine Propagierung und Förderung des Heizens mit Koppelstrom rechtfertigen, was sich mit der seit vielen Jahren offiziell vertretenen energiepolitischen KWK-Position nicht vereinbaren läßt. Entsprechend dieser Bewertungsumkehrung verbessert sich der CO<sub>2</sub>-Effekt des Stroms, während die Fernwärme ungünstiger abschneidet.

Es ist zu betonen, daß es für eine solche Aufteilung des HKW-Inputs auf die Koppelprodukte durchaus gute Argumente gibt, u.a. die Tatsache, daß es in der KWK-Theorie mindestens zwei Bewertungsmethoden gibt, die den Koppelstrom energetisch begünstigen (vgl. Bild 1). Das gilt insbesondere für das einfache und u. E. für den Laien auch plausible kalorische Verfahren, bei dem der Anteil eines Koppelprodukts am Brennstoffeinsatz gleich seinem Anteil an der Gesamterzeugung des HKW gesetzt wird<sup>25)</sup>.

Der methodische GEMIS-Fehler besteht also nicht in der impliziten Anwendung eines den Koppelstrom energetisch und dementsprechend emissionsmäßig begünstigenden Verfahrens, sondern darin, daß den strombezogenen Emissionsrechnungen eine andere KWK-Bewertung zugrunde liegt als den wärmebezogenen. Bei den „Emissionsbilanzen für Heizsysteme“ wird die Koppelwärme energetisch begünstigt und dementsprechend schneiden Gasturbinen- und Gasmotor-BHKW bezüglich CO<sub>2</sub> mit „Negativ-Emissionen“ am besten ab. Im Rahmen der „Stromsystem“-Analyse ist es bei denselben Anlagen der Koppelstrom, der begünstigt

wird, so daß jetzt er die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist. Der Energie- und Emissionsvorteil der KWK wird insofern doppelt vergeben, und der Leser erkennt nicht die Folge, daß nämlich im ersten Falle der Strom, im zweiten Falle die Fernwärme emissionsmäßig schlecht abschneidet. Der implizite Wechsel der KWK-Bewertungsmethode macht die GEMIS-Analyse inkonsistent, sodaß die CO<sub>2</sub>-Aussagen irreführend werden. Richtigerweise hat man sowohl die strom- als auch die wärmebezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Anlagen auf der Grundlage ein- und derselben Bewertungsverfahrens, normalerweise nach dem Arbeitswertverfahren, zu errechnen und zu vergleichen. Sollte der Einfluß des gewählten Bewertungsverfahrens interessieren, so sind die Berechnungen auf der Grundlage einer anderen Bewertung, z. B. der kalorischen, zu wiederholen.

Tabelle 4 bietet auf der Datenbasis von Tabelle 1 und Bild 1 einen Vergleich der strom- und der wärmebezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen nach der GEMIS-Methode mit Emissionsrechnungen auf der Grundlage sowohl des üblichen Arbeitswertverfahrens als auch der kalorischen Bewertung der Koppelprodukte, und zwar für ein Kohle-Gegendruck-HKW und für ein Gasmotor-BHKW. Die einzige Überschneidung der GEMIS-Emissionsrechnungen mit Berechnungen auf der Basis von KWK-Bewertungsverfahren liegt bei der Raumwärme aus einem Kohle-HKW vor, weil hier die „Stromgutschrift über Steinkohle-Kraftwerk“ gleich der sich nach dem Arbeitswertverfahren ergebenden Bewertung des Kohle-Koppelstroms ist. Ansonsten sind die methodisch bedingten spezifischen Emissionsunterschiede sehr erheblich, z. T. über 100 %. Infolgedessen kann von einer Eindeutigkeit wissenschaftlicher Aussagen bezüglich des CO<sub>2</sub>-Gehalts von Koppelstrom und -wärme nicht gesprochen werden. Die GEMIS-Berechnungen sind einerseits in den empirischen Prämissen willkürlich und andererseits analytisch inkonsistent. Die allein in Frage kommenden Berechnungen auf fachwissenschaftlicher Grundlage führen je nach Verfahrenswahl zu gegensätzlichen Aussagen und Einschätzungen. Es ist namentlich zu beachten, daß nach dem kalorischen Bewertungsverfahren und auch nach dem im Ergebnis ähnlichen „Wärmewertverfahren“ das Heizen mit Koppelstrom energie- und klimapolitisch empfehlenswerter erscheint als die Fern- und die Nahwärme, die nach allgemeiner Auffassung - infolge des üblichen Arbeitswertverfahrens - besonders vorteilhaft sind.

Für spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionsrechnungen bei KWK-Anlagen auf der fachwissenschaftlichen Grundlage der erwähnten Verfahren zur Brennstoffaufteilung sind weder Substitutionshypothesen noch Gutschriften und Saldierungen von Energien und / oder Emissionen erforderlich. Insbesondere spielt es für die spezifischen

Koppelstrom-CO<sub>2</sub>-Emissionen dabei keine Rolle, wie hoch man den Systemwirkungsgrad der bestehenden Ölheizungen einschätzt. Ölkessel, Brikketöfen, Gasheizungen etc. kommen erst ins Spiel, wenn es um die Hauptfrage geht, ob man mit Anlagen, die Fernwärme in bestimmtem Verhältnis mit Strom erzeugen, eine Raumwärmeversorgung unter geringerer CO<sub>2</sub>-Emission bewerkstelligen kann als mit Einzelanlagen. Dieser Frage wird im folgenden anhand von Beispielen nachgegangen.

#### 4. Raumwärme mittels KWK- und Einzelanlagen im spezifischen CO<sub>2</sub>-Vergleich

Die energiepolitische Rolle der KWK besteht primär in der zukunftssicheren, energiesparenden und umweltschonenden Ersetzung von Öl (ABL) und Braunkohle (NBL) in der Raumwärmeversorgung. Deswegen geht es in der diesbezüglichen Diskussion in erster Linie um Anlagen, deren Auslegung und Betriebsweise sich nach einem gegebenen Wärmebedarf richten, namentlich Gegendruckanlagen und Blockheizkraftwerke, und zwar auf Steinkohle- bzw. Erdgasbasis. Von einer solchen KWK-Strategie her gesehen, ist der einzuspeisende Koppelstrom ein Sekundäreffekt, dessen mehr oder weniger definierten energiewirtschaftlichen Nachteile in Kauf zu nehmen sind. Bezüglich der energiepolitischen Bedeutung der zwei ausgewählten KWK-Anlagentypen ist zu beachten, daß das Einsatzpotential von Gegendruck-HKW, namentlich im Rahmen kommunaler Versorgungskonzepte, um ein Vielfaches größer einzuschätzen ist als das der BHKW.

Der CO<sub>2</sub>-Beurteilung von HKW zur Raumwärmeversorgung dient Tabelle 5, ein wärmeorientiertes, duales Gegenstück zur Tabelle 2.

##### a) *Der Standardfall*

Bei der energiepolitisch als „Standardfall“ zur bezeichnenden Ersetzung von Ölheizungen durch Fernwärme aus Steinkohle steht einer Emission von 97 t CO<sub>2</sub> (Anlage I. 1), Spalte 4 a)<sup>26)</sup> eine CO<sub>2</sub>-Vermeidung von 120 t gegenüber, wenn man annimmt, daß der Koppelstrom Steinkohlen- „Monostrom“ ersetzt (II. 1, Spalte 4 a, plus II. 2, Spalte 4 d). Die CO<sub>2</sub>-Einsparung beträgt hier 19 % pro 100 MWh Raumwärme. Es ist nun zu berücksichtigen, daß diese Einsparung nur während der Heizperiode von beispielsweise 7 Monaten realisiert werden kann. Auf das gesamte Jahr bezogen, beträgt die CO<sub>2</sub>-Einsparung in unserem Standardfall also nur 14 %. Dies ist sicherlich zu wenig, um die KWK pauschal als klimapolitisch besonders attraktive Energietechnik propagieren zu können, zumal die bei HKW

üblichen „Wärmespitzen-Ölkessel“ hier nicht berücksichtigt sind. Besteht die Möglichkeit, die alten Ölkessel durch moderne Erdgasheizungen (II. 3) zu ersetzen und weiterhin Monostrom zu beziehen, so ist die Einsparung an CO<sub>2</sub> mit 17,5 % nur geringfügig kleiner als bei der KWK-Lösung mit ihrem CO<sub>2</sub>-Effekt von minus 19 %. Das gleiche gilt für den Fall, daß die Ölkessel *ceteris paribus* durch ein Gas- Heizwerk (II. 4) ersetzt werden.

Diese Beispiele deuten auf einen für die klimapolitische Beurteilung der KWK wichtigen Sachverhalt hin, der hier nicht vertiefend behandelt werden kann: Die hohe energetische Effizienz der KWK-Technik bewirkt ganz allgemein keine oder nur eine unerheblich stärkere CO<sub>2</sub>-Verringerung als es durch dezentrale (Einzelanlagen) oder zentrale (Heizwerke) Substitution von Heizöl durch das 25 % CO<sub>2</sub>-ärmere Erdgas möglich ist<sup>27)</sup> Nun ist freilich zu bedenken, daß eine mehr oder weniger vollständige Substitution des Öls im Raumwärmebereich durch Erdgas aus energiewirtschaftlichen und energiepolitischen Gründen nicht in Betracht kommt, sondern daß die heimische Steinkohle eine wesentliche Rolle bei der allmählichen Ölablösung spielen wird („Kohle per Rohr!“). Eine vernünftige Arbeitsteilung dürfte darin bestehen, daß Erdgas hauptsächlich nur zur Umstellung von Ölheizungen zu verwenden und mit Steinkohle die zukünftigen Fernwärmenetze zu betreiben, ergänzt durch Nahwärmenetze um Gas-BHKW.

Man darf also realistischerweise nicht davon ausgehen, daß sich die mit KWK mögliche Primärenergieeinsparung von bis zu 30 %<sup>28)</sup> in der Regel in eine ähnlich hohe CO<sub>2</sub>-Verringerung umsetzen läßt, denn der CO<sub>2</sub>-Faktor der Steinkohle ist schließlich 28 % größer als der des Öls und 69 % größer als der des Erdgases. Nur im Falle der Ersetzung von Braunkohle in der Raumheizung und auch in der Stromerzeugung der NBL wird der KWK-Effizienzeffekt durch einen CO<sub>2</sub>-reduzierenden Brennstoffeffekt verstärkt<sup>29)</sup>. Im ABL-Standardfall des ölsubstituierenden Steinkohle-HKW wird der günstige KWK-Effizienzeffekt durch den ungünstigen Brennstoff-Substitutionseffekt mehr oder weniger kompensiert.

In Ansehung unseres energiepolitischen Langfristproblems der versorgungssicheren und umweltschonenden Erdölabkopplung wäre es eine Fehleinschätzung, die KWK als Energiespar- und Klimaschutztechnik anzusprechen. Ihre energiepolitische Bedeutung ist primär versorgungstrategischer Art. Das CO<sub>2</sub>-Problem ist als Erschwerung der KWK-Aufgabe zu werten, nicht als Anlaß zur Neuformulierung und Erweiterung ihrer Rolle.

Man wird zufrieden sein müssen, wenn die wünschenswerte KWK-Ausbreitung auf heimischer Energiebasis eine leichte CO<sub>2</sub>-Verbesserung gegenüber dem alten Zustand bewirkt und keine erhebliche Verschlechterung gegenüber anderen, alternativen Techniken und Brennstoffen bedeutet.

b) *HKW als reines Heizwerk*

In diesem Zusammenhang ist auf die bereits erwähnte Verwendung des Koppelstroms zu Heizzwecken zurückzukommen (vgl. Abschnitt 3b).

Ausgangspunkt der Betrachtung ist der in Tabelle 4 (1c) dargestellte Sachverhalt, daß Raumwärme mittels Koppelstrom 24%, also erheblich weniger CO<sub>2</sub> verursacht als mittels Fernwärme, wenn man die einfache und für den Energie- „Normalverbraucher“ plausible Bewertung der Koppelprodukte nach ihrem Energiegehalt zugrundelegt<sup>30</sup>). Dies erklärt sich im wesentlichen aus den in jedem Fall geringeren Verteilungs- und Anwendungsverlusten des Heizstroms im Vergleich zur Fernwärme, im Beispiel 8% zu 31%. Die Erzeugung von Heizstrom in KWK-Anlagen verbessert die Systemeffizienz der unter Anwendungsgesichtspunkten ohnehin überlegenen Elektroheizung um über 100%<sup>31</sup>). Demgegenüber ist Koppel-Fernwärme nicht effizienter als ungekoppelte Wärme aus einem Heizwerk und nur etwa 10% systemeffizienter als alte Ölheizungen (vgl. Tab. 5).

Bei den in Bild 1 dargestellten Energieflüssen erzielt man mit Koppelstrom aus einem BHKW bei kalorischer Bewertung (Bild 1, Variante c)) den Spitzenwert von etwa 0,80 für den Systemwirkungsgrad der Elektroheizung.

So gesehen, verkehrt die KWK den hinlänglich bekannten energetischen Nachteil der Elektroheizung ins krasse Gegenteil. Uns stellt sich hier aber die Frage, was daraus für die CO<sub>2</sub>-Beurteilung des KWK folgt.

Zunächst sei festgestellt, daß das Koppelstromverheizen eine leichte Senkung der auf Wärme-Dienstleistung bezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen des HKW im Vergleich zum Normalfall „Fernwärmelieferung unter Stromeinspeisung ins allgemeine Netz“ bewirkt. In diesem Normalfall verursachen 100 MWh Raumwärme aus 145 MWh Fernwärme des HKW I. 1) in Tabelle 5 anteilig 69 % von 97 t CO<sub>2</sub> gleich 67 t. Werden die 60 MWh Strom verheizt, so hat man den 97 t CO<sub>2</sub> des HKW insgesamt 160 MWh Dienstleistungen gegenüberzustellen und man erhält 61 t CO<sub>2</sub> pro 100 MWh, d.h. 9 % weniger als bei Koppelstromeinspeisung<sup>32</sup>). Beide wärmespezifischen Emissionen des HKW, sowohl die 67 als auch die 61 t, sind erheblich höher

als bei Gas- und Ölheizungen (36 bis 57 t). Dies spricht allerdings nicht unbedingt gegen Heizenergie aus Kohle-HKW wenn man berücksichtigt,

- daß die *Energiepolitik* auf die allmähliche Ölablösung hinwirken muß, und
- daß Heizenergie aus HKW und das Erdgas nicht miteinander konkurrieren, sondern sich arbeitsteilig „aus dem Wege gehen“ sollen.

Wird aber die umweltpolitische Frage in den Vordergrund gestellt, wie KWK-Anlagen am effektivsten zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung eingesetzt werden können, so fällt die Antwort beim gegenwärtigen Stand von Diskussion und Analyse eindeutig zugunsten der Stromeinspeisung aus. Es wird ja davon ausgegangen, daß der eingespeiste Koppelstrom die Verfeuerung einer entsprechenden Menge Kohle in Kondensationskraftwerken erübrigt, wodurch sich offensichtlich beträchtlich mehr CO<sub>2</sub> vermeiden läßt, wie wenn der Koppelstrom leichtes Heizöl vor der Verfeuerung in Haus-Ölkesseln bewahrt, und zwar 105 t (Tab. 2, II. 1, Sp. 4a) zu 57 t (Tab. 5, II. 2, Sp. 4d), also 84 % mehr pro 100 MWh Dienstleistung. In der Gesamtbeachtung steht den 97 t, die das HKW I. 1) in Tabelle 5 ermittelt, im üblichen „orthodoxen“ Fall der Einspeisung des Koppelstroms ins öffentliche Netz eine CO<sub>2</sub>-Vermeidung von 120 t, im „unorthodoxen“ Fall des Koppelstromverheizens von lediglich 91 t gegenüber, also 24 % weniger<sup>33</sup>). Im letzteren Falle vermeidet das HKW I. 1) 6 % weniger CO<sub>2</sub> als es ausstößt, d.h. heimische Kohle „per Rohr und Draht“ zur Ölsubstitution würde bei den angegebenen energietechnischen Daten die CO<sub>2</sub>-Belastung leicht *erhöhen*, während bei Koppelstromeinspeisung zur Substitution von Steinkohle-Kondensationsstrom eine Entlastung um 19 % eintritt.

Unterstellt man aber der Koppelstrom würde nicht Heizöl, sondern Braunkohlenbriketts ersetzen, so vermeidet das „KWK-Heizwerk“ nicht 91 sondern 150 t CO<sub>2</sub>, d.h. 55 % mehr als es emittiert. In diesem Falle wäre es dem HKW mit Stromeinspeisung und Ölersetzung bezüglich der CO<sub>2</sub>-Vermeidung um 25% überlegen (150 zu 120 t CO<sub>2</sub>). Wenn jedoch das Einspeis-HKW nicht Steinkohlenstrom und Heizöl, sondern Strom *und* Briketts aus Braunkohle substituiert, so vermeidet es freilich wiederum 13% mehr CO<sub>2</sub> als das ausschließlich Briketts ersetzende KWK-Heizwerk (169 zu 150 t CO<sub>2</sub>).

Immerhin lassen diese Rechnungen vermuten, daß das Koppelstromverheizen in der Praxis auch hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Problems von Vorteil sein kann. Sie werfen andererseits die Frage auf, ob das Substituieren von Braunkohle und BK-Briketts durch HKW auf Steinkohlenbasis realistisch ist. In den östlichen Bundesländern

wird man versuchen, die energetisch und ökologisch sehr ungünstige dominierende Brikettsheizung durch KWK auf „heimischer“ Braunkohlenbasis zu ersetzen, anstatt Steinkohle z.B. aus Nordrhein-Westfalen herbeizuschaffen. Daraus folgt eine quasi historisch bedingte regionale Zweiteilung der KWK-Analyse (HKW I.1) unter CO<sub>2</sub>-Aspekten:

- a) In den ABL besteht der Standardfall in der Substitution von Heizöl und von Steinkohle für Kondensationsstrom durch Fernwärme bzw. Koppelstrom aus Steinkohle-HKW. In diesem Fall erzielt man eine spezifische CO<sub>2</sub>-Verminderung um 19% (97 anstatt 120 t CO<sub>2</sub>). Bei Koppelstromverheizung tritt eine leichte Verschlechterung um 7% ein (97 anstatt 91 t CO<sub>2</sub>).
- b) In den NBL besteht der Standardfall in der Substitution von Braunkohlenbriketts und von Braunkohle für Kondensationsstrom durch Fernwärme bzw. Koppelstrom aus Braunkohle-HKW. In diesem Fall erzielt man eine spezifische CO<sub>2</sub>-Verminderung um 31% (117 anstatt 169 t CO<sub>2</sub>).

Bei Koppelstromverheizung erhält man das überraschende Ergebnis, daß im Unterschied zum Parallelbeispiel in den ABL keine Emissionserhöhung, sondern ebenfalls eine Verringerung eintritt, und zwar um 22% (117 anstatt 150 t CO<sub>2</sub>). Diese unorthodox erzielbare Verbesserung in den NBL ist sogar noch etwas höher als die orthodoxe Verbesserung in den ABL. Das Verheizen des Koppelstroms in den NBL ist demnach CO<sub>2</sub>-effektiver als die übliche Koppelstromeinspeisung in den ABL.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, daß der hinsichtlich Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzierungen bei HKW ungünstige Einfluß des Öl- oder Gas-Kessels zur Abdeckung von Wärmebedarfsspitzen im unorthodoxen Fall tendenziell zurückgeht. Dies hängt damit zusammen, daß Beeinflussungen der wärmeorientierten HKW-Betriebsweise durch elektrizitätswirtschaftliche Erfordernisse (Lastverteilung) im Prinzip entfallen, wenn der Koppelstrom nicht allgemeinen Stromverwendungszwecken zugeführt, sondern nur zu Heizzwecken im Netz „durchgeleitet“ wird. Es kann also durchaus sein, daß im NBL-typischen Fall des Braunkohle-HKW I.1) bei Koppelstromverheizen praktisch ebenso viel CO<sub>2</sub> vermieden wird, wie bei Einspeisung.

Die bisherigen Betrachtungen sind spezifischer Art, d.h. die CO<sub>2</sub>-Aussagen sind auf 100 MWh Energiedienstleistungen bezogen, d.h. nominiert. Spezifische Aussagen bilden eine analytische Vorstufe für die Behandlung der energie- und umweltpolitischen Hauptfrage nach der potentiellen *absoluten* CO<sub>2</sub>-Vermeidungswirkung der KWK:

Wieviel CO<sub>2</sub> läßt sich mit Hilfe von KWK-Anlagen der verschiedenen Typen auf verschiedener Brennstoffbasis und bei verschiedener Betriebsweise in Deutschland pro Jahr vermeiden?

## 5. CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotentiale der KWK

Das theoretische Einsatzpotential der KKW ist einerseits von der Stromseite, andererseits von der Wärmeseite her abzuschätzen. Legt man eine bestimmte durchschnittliche Strom-/Wärmekennziffer der gesamten KKW-Kapazität zugrunde, so wird das theoretische Einsatzpotential

- von der Stromseite limitiert, falls das Verhältnis der Potentiale auf der Strom- und auf der Wärmeseite kleiner ist als die Stromkennziffer,
- von der Wärmeseite limitiert, falls das Verhältnis der Potentiale auf den beiden Produktebenen größer ist als die Stromkennziffer.

Im ersten Fall kann das Fernwärmepotential nicht voll durch Koppelwärme ausgeschöpft werden. Im zweiten Fall kann die vom Mittellastbereich definierte Aufnahmefähigkeit für Koppelstrom nur teilweise ausgenutzt werden.

Die Fernwärme wird heute überwiegend in flexiblen Entnahmeanlagen der EVU erzeugt. Wenn man von einer energiepolitisch forcierten KWK-Expansion spricht, so liegt der Akzent auf kommunalen Versorgungskonzepten mit starren, wärmeorientierten Gegendruckanlagen mit relativ niedriger Stromkennziffer (0,45). Laut Energiebilanz von 1990 beträgt die Stromkennziffer in den ABL nur 0,30.

Es sei nun ein KWK-Mix mit Stromkennziffer 0,50 und Wirkungsgrad 0,76 zugrundegelegt. Dies entspricht einem Gegendruck-/Entnahme-Mix auf MW-Basis von 2 zu 1, der im Hinblick auf Wunschvorstellungen zur kommunalen Selbstversorgung als optimistisch gelten muß.

### a) *Koppelstrom während der Heizperiode: 7 Mio t SKE (56 TWh)*

In der alten Bundesrepublik stammen etwa 72 % der Stromerzeugung der öffentlichen Versorgung in Höhe von 380 TWh aus Grundlastkraftwerken (Kernenergie, Braunkohle, Laufwasser, teilweise Steinkohle), 6 % aus Spitzenlastkraftwerken (Speicherwasser, Gasturbinen, teilweise Öl). Die restlichen 22 %, gleich 84 TWh, sind als Mittellaststrom anzusprechen (teilweise Steinkohle und Gas), davon ca. 2/3 oder 56 TWh gleich rd. 7 Mio t SKE während der Heizperiode. Dies ist in etwa die maximal im Netz unterzubringende Menge Koppelstrom. Dieser hat ausgesprochenen Mittellastcharakter, d.h. er ist tageszeitlichen und wochentäglichen Schwankungen unterworfen, entsprechend seiner Kopplung an den Raumwärmebedarf.

b) *Koppelwärme statt Öl und Kohle: 14 Mio t SKE*

Zur Zeit werden in den ABL gut 13 Millionen Wohnungen mit Öl und Kohle beheizt, wofür ca. 28 Mio t SKE Endenergie benötigt werden. Betrachtet man diesen Bedarf als theoretisch maximales Fernwärmepotential, so hat man ein reales Strom/Wärmepotential-Verhältnis von 1:4 oder 0,25. Es ist 50 % kleiner als die angenommene KWK-Stromkennziffer 0,50 und demgemäß (s. oben!) wird das KWK-Einsatzpotential von der Stromseite her limitiert.

Der Bedarf von Mittellaststrom während der Heizperiode, der dem maximal einspeisbaren Koppelstrom entspricht, wurde mit 7 Mio t SKE abgeschätzt. Bei einer Stromkennzahl von 0,50 entspricht diesen 7 Mio t SKE Koppelstrom eine Energiemenge Fernwärme von 14 Mio t SKE, gleich der Hälfte des Maximalpotentials. Unabhängig von der ökonomischen Frage der „Fernwärmewürdigkeit“ der bestehenden Raumwärmeversorgung auf Öl- und Kohlebasis könnte so gesehen maximal nur die Hälfte der Öl- und Kohleheizungen auf Koppelwärme umgestellt werden, was als zu wenig erscheinen dürfte.

Es liegt nun der Gedanke nahe, die Stromkennzahl des HKW-Mix sozusagen fernwärmeorientiert anzupassen, d.h. zu senken. Betrüge sie 0,30, so würden den 7 Mio t SKE Koppelstrom 23 Mio t SKE Fernwärme entsprechen, gleich 82 % des Maximalpotentials. Gleichzeitig wäre der durchschnittliche Anlagenwirkungsgrad höher als 0,76, der Primärenergieaufwand und im Zweifel auch die CO<sub>2</sub>-Emission entsprechend geringer. Dieser Gedanke läßt aber außer acht, daß es ja gerade der Koppelstrom ist, der die KWK attraktiv macht, nicht die Fernwärme. Letztere kann man in reinen Heizwerken mindestens so effizient erzeugen wie in HKW. Demgegenüber gibt es außer der KWK keine andere großmaßstäbliche Möglichkeit, Strom mit so hohen Wirkungsgraden zu erzeugen, wie es in HKW der Fall ist. Der Verkauf des Koppelstroms - sei es in eigener Regie an die Verbraucher, sei es an ein EVU - ist für die Rentabilität von KWK-Anlagen, namentlich im Rahmen kommunaler Versorgungskonzepte, von entscheidender Bedeutung. Deswegen sind kommunale HKW-Betreiber grundsätzlich an einer möglichst hohen Stromkennziffer interessiert. Wäre die Interessenlage anders, dann könnten es die Kommunen ja bei einem reinen Heizwerk bewenden lassen, anstatt ein HKW zu bauen.

c) *Der Einfluß von Brennstoff und Technik auf die CO<sub>2</sub>-Emission*

Bei einem durchschnittlichen HKW-Systemwirkungsgrad vom Energieeinsatz bis zur -dienstleistung von 0,60 werden für 7 Mio t SKE Koppelstrom- und 14 Mio t SKE Fernwärme-Dienstleistungen insgesamt 35 Mio t SKE an Primärenergie benötigt. Bei dieser Rechnung werden die nicht erheblichen brennstoffbedingten Wirkungsgradunterschiede von HKW der analytischen Transparenz wegen vernachlässigt<sup>34</sup>).

Je nachdem, ob diese 35 Mio t SKE HKW-Einsatz aus Erdgas, Schweröl oder Steinkohle bestehen, entstehen 56 Mio t, 81 Mio t bzw. 94 Mio t CO<sub>2</sub> (vgl. Anm. 11).

Diesen HKW-Maximalemissionen sind 2 Kategorien von CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüberzustellen:

- Tatsächliche CO<sub>2</sub>-Emissionen von bestehenden Kraftwerken und Öl- bzw. Kohleheizungen, die durch HKW-Neubau vermieden werden könnten: Substitution.
- Hypothetische CO<sub>2</sub>-Emissionen von modernen Einzelanlagen, die dann entstünden, wenn bestehende Kraftwerke und Heizungen nicht durch HKW, sondern durch hocheffiziente Kraftwerke und Haus-Heizkessel ersetzt würden: Innovation.

Sowohl im Substitutions- als auch im Innovationsfall sind verschiedene Brennstoff-Annahmen bezüglich der Koppel- und der Einzelanlagen zu machen.

● *Substitutionsfall: HKW ersetzen alte Einzelanlagen*

Im klimapolitischen Idealfall ersetzen Koppelstrom und Fernwärme aus Erdgas Kondensationsstrom aus Kohle und Raumwärme aus Ölkesseln und Kohleöfen. In diesem Falle stehen den 56 Mio t CO<sub>2</sub> aus HKW gegenüber:

- 60 Mio t CO<sub>2</sub> aus Kohlekraftwerken, die zur Stromerzeugung von besagten 7 Mio t SKE Stromdienstleistungen 22 Mio t SKE Steinkohle einsetzen.
- 40 Mio t CO<sub>2</sub> aus rd. 1 Mio t SKE Kohle- und 16 Mio t SKE Öl-Primärenergie, die für 6 Mio Ölkessel und 0,5 Mio Kohleöfen benötigt werden.

Die maximale CO<sub>2</sub>-Vermeidung im Idealfall beträgt demnach (60 Mio t + 40 Mio t) - 56 Mio t = 44 Mio t pro Heizperiode, oder 44 %. Auf die Gesamtemission der ABL bezogen macht diese maximale CO<sub>2</sub>-Vermeidung mittels öffentlicher HKW 6 % aus. Zum Vergleich: Diese theoretische Maximalvermeidung, deren

Realisation sich Jahrzehnte hinziehen würde, kann durch vier 1300 MW-KKW erreicht werden, die Braunkohle ersetzen.

In den Fernwärme-Strategien aus der Zeit nach der 1. Ölkrise 1973 spielte die heimische Steinkohle als versorgungssicherer Brennstoff eine zentrale Rolle. Wenn man bedenkt, daß die allmähliche Ölabkopplung nichts von ihrer Unvermeidlichkeit verloren hat, und daß die Verfügbarkeit über den z. Zt. beliebtesten Energieträger Erdgas ihre Grenzen hat, so sind Steinkohle-HKW energiepolitisch in einer aussichtsreicheren Position als HKW auf der Basis von Erdgas aus der Nordsee und aus Sibirien.

In diesem „deutschen Normalfall“ verursachen die maximalen HKW-Dienstleistungen von 21 Mio t SKE rd. 94 Mio t CO<sub>2</sub>, d.h. nur 6 % weniger als die ersetzbaren Ölkessel und die im anliegenden Vergleich zugehörigen Kohlekraftwerke emittieren, und zwar nur während der Heizperiode. Der technische KWK-Vorteil reicht also unter ABL-Bedingungen zur Klimaschonung nicht aus.

● *Innovationsfall: Moderne Einzelanlagen statt HKW ersetzen alte Einzelanlagen*

Die Fernwärme steht in scharfer Konkurrenz zum Erdgas, das mit Brennkesseln zu 98 % in Nutzwärme umgewandelt werden kann. Systemwirkungsgrade von über 70 % sind erreichbar, d.h. eine wesentlich höhere Systemeffizienz als bei HKW.

Andererseits darf nicht nur bei den Heizkesseln, sondern auch bei den Kraftwerken technischer Fortschritt in Form der Kombi-Technik unterstellt werden. Durch Kombination von Erdgasturbine und Kohle-Dampferzeuger läßt sich der Stromerzeugungswirkungsgrad auf 0,45 steigern (GuD-Technik).

Für die CO<sub>2</sub>-Vermeidung bedeuten diese beiden technischen Fortschritte in unserem Zusammenhang folgende Verbesserungen:

- Die spezifische CO<sub>2</sub>-Entstehung (z.B. pro 100 MWh Raumwärme) ist beim Gas-Brennkessel 52 % niedriger als beim alten Ölkessel II.2).
- Bei einem Gas-/Kohle-Einsatzverhältnis von 1:3 entstehen pro 100 MWh Stromdienstleistung bei einem Kombi-Kraftwerk 25 % weniger CO<sub>2</sub> als beim Kohlekraftwerk II.1).

Für 100 MWh Strom und 167 bzw. 128 MWh Raumwärme emittiert die Einzelanlagen-Kombination „Brennkessel plus GuD-Kraftwerk“ 124 t bzw. 114 t CO<sub>2</sub><sup>35</sup>). Die Gegendruckanlage I.1) verursacht für 100 MWh Strom und 167 MWh

Raumwärme 163 t CO<sub>2</sub> auf Kohle- und 96 t CO<sub>2</sub> auf Gasbasis (vgl. Tab. 1). Sie ist also im „deutschen Normalfall“ CO<sub>2</sub>-mäßig 31 % schlechter, auf Gasbasis nur noch 23 % besser als die Einzelanlagenkombination mit Brennstoff-Mix Gas/Kohle.

Die Entnahmekondensationsanlage I.2) ist auf Kohlebasis 37 % schlechter, auf Gasbasis nur 19 % besser als Brennwertkessel plus GuD-Kraftwerk.

Aus diesen Zahlen folgt, daß der dienstleistungsbezogene CO<sub>2</sub>-Vorteil des Erdgases bei modernen Einzelanlagen größer ist als in Koppelanlagen<sup>36)</sup>. Mit anderen Worten: In Einzelanlagen läßt sich Erdgas klimapolitisch besser nutzen als in HKW.

Der technische Fortschritt bei den Einzelanlagen führt also zu einer Kompensation des technischen Vorteils der Koppelproduktion, so daß nur noch der C-Gehalt des jeweils verwendeten Brennstoff darüber entscheidet, ob Koppelanlagen oder Einzelanlagen klimapolitisch günstiger sind.

Es sei nun angenommen, das oben abgeschätzte maximale KWK-Potential von 7 Mio t Mittellaststrom während der Heizperiode zuzüglich 14 Mio t Fernwärme werde von GuD-Strom und Raumwärme aus Brennwertkesseln abgedeckt.

In diesem Falle entstehen im GuD-Kraftwerk aus 19 Mio t Gas- und Kohleeinsatz 45 Mio t CO<sub>2</sub>, während die Brennwertkessel für die den 14 Mio t SKE Fernwärme entsprechende Raumwärme 19 Mio t CO<sub>2</sub> aus 12 Mio t Gas erzeugen. Zusammen emittieren die Einzelanlagen auf Gas/Kohle-Basis 64 Mio t CO<sub>2</sub>, und diese Emission ist im Vergleich zu den oben errechneten 56 Mio t CO<sub>2</sub> aus reinen Gas-HKW nur 14 % höher. Moderne Einzelanlagen könnten also im Substitutionsfall 36 Mio t CO<sub>2</sub> vermeiden, gegenüber 44 Mio t CO<sub>2</sub> bei KWK auf Gasbasis.

Viel realistischer als die Basis Erdgas für HKW erscheint uns das Steinkohle-HKW, für das die angeschnittenen energie- und strukturpolitischen Argumente sprechen. In diesem Fall emittieren die HKW 94 Mio t CO<sub>2</sub> oder 47 % mehr als die modernen Einzelanlagen.

Bei differenzierender Betrachtung wird die KWK ihrem derzeitigen Ruf als vorrangige CO<sub>2</sub>-Vermeidungstechnik nicht gerecht. Unter realistischen Prämissen ist sie mehr eine günstige Kohleverwendung als ein klimapolitischer Trumpf.

## Anmerkungen und Literatur

- 1) Vgl. W. Fritsche, CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich: Wie klimafreundlich ist Atomstrom? Öko-Institut Darmstadt, April 1990.  
W. Fritsche; St. Kohler, CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategien: Atomkraft versus Effizienz, Öko-Institut Freiburg / Darmstadt, Frühjahr 1990.  
Die Hauptaussage von Fritsche wurde von Hennicke, Müller, Bach et al. in einem kernenergiekritischen Zusatzvotum zum Schlußbericht der Klima-Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages vom Mai 1990 fehlerhaft übernommen (BT-Drucksache 11/8030, S. 741 - 742).  
Auf der Pressekonferenz der Niedersächsischen Umweltministerin in Griefahn zum Thema „Klimaschutz und Atomausstieg“ am 16.01.1991 wurde behauptet, Atomstrom verursache dreimal mehr CO<sub>2</sub> als Strom aus Gas-KWK.
- 2) W. Fritsche; L. Rausch; K.-H. Simon, Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), August 1989, im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft und Technik, veröffentlicht im Mai 1990, Nachdruck im September 1990. Tabelle S. 278 und 279. In der GEMIS-Studie geht es nicht primär um CO<sub>2</sub>, sondern um SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und Staub als umweltbelastende Stoffe.
- 3) W. Fritsche, a.a.O., S. 10 und 11.
- 4) Das sprachliche Kuriosum „negativer CO<sub>2</sub>-Ausstoß“, das an die den Pflanzen eigentümliche Assimilation und an andere CO<sub>2</sub>-Senken erinnert, sei von der kritischen Prüfung ausgenommen, zumal es bei GEMIS und Fritsche expressis verbis nicht vorkommt. Es verdeutlicht genau den entscheidenden Punkt des neuen Contra-Arguments: „So klein die der KE zuzuschreibende CO<sub>2</sub>-Emission auch sein mag - so gut wie Gas-BHKW können KKW nicht sein, denn BHKW *verringern* den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft“.
- 5) Es handelt sich dabei um eine Anlagenauswahl aus den Tabellen bei GEMIS und Fritsche.
- 6) Bei Fritsche findet sich diese wesentliche Einschränkung nicht.
- 7) Die von Fritsche errechnete „CO<sub>2</sub>-Negativ-Emission“ eines Gas-GuD-HKW (- 18,8 t. vgl. Tab. 1) dürfte im wesentlichen auf der Annahme eines Erzeugungswirkungsgrades von über 90 % beruhen.
- 8) Die GEMIS-Studie spricht von Emissionen, die bei Erzeugung der Koppelwärme durch eine Öl-Zentralheizung (Regelfall) „angefallen wären“. Es wird also *faktische* Ölsubstitution und entsprechende CO<sub>2</sub>-*Vermeidung* unterstellt. Die zu entscheidende Ausgangsfrage lautet also nicht „Nahwärme oder Ölheizung?“, sondern „Nahwärme *an Stelle* von Ölheizung?“.
- 9) A. Reichl, Energetische und ökologische Bewertung der Fernwärme aus Kraft- Wärme-Kopplung, BWK 6/1990, S. 325 - 336.
- 10) Wirkungsgrad hier gleich energetischer Output an beiden Produkten pro Einheit Brennstoffeinsatz. SZ (Stromkennzahl) gleich energetisches Strom-Wärme-Verhältnis des Outputs. Die Primärenergie bezieht sich auf die gesamte Prozeßkette von der Förderung über Transport und Verteilung bis zur Energiedienstleistung. Raumwärme bzw. „Elektrizität frei Haus“.

- 11) Der Erdgas-CO<sub>2</sub>-Faktor beträgt 198 kg / MWh (1,6 t / t SKE). Der Heizöl-CO<sub>2</sub>-Faktor 261 kg /MWh (2,12 t / t SKE). Der Vollständigkeit halber: Steinkohle 335 kg/MWh (2,7 t/t), Braunkohle 403 kg/MWh (MWh (3,3 t/t), Schweröl 281 kg/MWh (2,3 t/t).
- 12) Die bei Ableitung allgemeiner Eigenschaften einer Technik aus bestimmten Verwendungen mögliche Irreführung, verdeutlicht folgendes Beispiel: Ein PKW-Besitzer behauptet, sein Auto verbrauche bei den Fahrten zur Arbeit nur 2 l Benzin pro 100 km. Er verschweigt dabei, daß ihm seine 3 ständigen Mitfahrer 6 l pro 100 km vergüten.
- 13) Vom BHKW ersetzte Raumwärme 154 MWh im Verhältnis zum Primärenergieaufwand 335 MWh.
- 14) Andererseits ist es freilich auch möglich, die Negativ-Emissionen größer ausfallen zu lassen. Wird z. B. die „Wärmegutschrift“ auf der Basis von Brikettsöfen in den NBL erteilt, so erhöht sich die „strombezogene Negativ-Emission“ von minus 2 t auf minus 44 t.
- 15) Aufgrund dieses Beispiels könnte man die der KWK-Technik zugutegehaltene CO<sub>2</sub>-Verringerung ebenso gut der Mangelhaftigkeit der zu ersetzenden Ölheizungen zuschreiben.
- 16) Energiebericht der Bundesregierung vom September 86, BMWI, TZ. 88, S. 47.
- 17) In Tabelle 2 werden für 108 MWh Strom aus dem Kraftwerk II. 1) 312 MWh Primärenergie benötigt. Schreibt man sie einer KWK-Anlage I. 1), 2) oder 3) für die gleiche Menge Koppelstrom gut, so verbleibt für die Koppelwärme ein rechnerischer Energieeinsatz, der 28 % bzw. 14 % bzw. 35 % *kleiner* ist als der Energiegehalt der ausgekoppelten Wärme. Die zugehörigen fiktiven Wirkungsgrade für Wärme betragen rd. 1,4 bzw. 1,2 bzw. 1,5. Diese Werte werden noch erheblich höher, wenn man von den angegebenen Primärenergie-Inputs (Spalte 3) den Aufwand für Förderung, Transport und Lagerung abzieht ( ca. 10 %), sodaß der reine Brennstoffeinsatz verbleibt.
- 18) Vgl. W. Weingärtner, Exergiebetrachtung des Dampfkraftprozesses. Zur Kostenaufteilung bei der KWK, BWK 7/1965, S. 330 - 337, und  
G. Reichl, energetische und ökologische Bewertung der Fernwärme aus KWK, BWK 6/1990, S. 325 - 336.  
Eine umfassende Darstellung und Diskussion der physikalischen und ökonomischen Koppelprodukt-Bewertungen findet man bei W. Piller, M. Rudolph, Kraft-Wärme-Kopplung - zur Theorie und Praxis der Kostenrechnung, 2. Aufl., Frankfurt a.M., 1991. Die Autoren betonen, daß es für diese Bewertung keinen allgemein verbindlichen Maßstab gilt.
- 19) In Bild 1 ist der Energiefluß bei den 4 wichtigsten KWK-Bewertungsverfahren dargestellt. Die Variante (a) bezieht sich auf das Arbeitswertverfahren: Bei allen 3 KWK-Typen ist der Stromerzeugungswirkungsgrad als Verhältnis der erzeugten „Elektrowärme“ (Sankey-Diagramme unten) zum Brennstoff-Einsatz für Strom (Block-Diagramme oben) gleich 0,38. Der zugehörige Fernwärmewirkungsgrad beträgt bei den zwei HKW 2,1, beim BHKW 3,2.
- 20) Dem Koppelstrom den hohen KWK-Wirkungsgrad zuzubilligen ist naturwissenschaftlich nicht falsch, aber sozusagen „thermodynamisch unbefriedigend“. Vgl. W. Burkhardt, Wirtschaftliche Energienutzung durch Fernwärme, HLH, 10/1977, S. 353 -358.
- 21) Es ist zu beachten, daß man bei Saldierung der Energieeinsätze, wie es der Ausdruck „Wärmegutschrift“ impliziert, nur dann eine Netto-CO<sub>2</sub>-Emission errechnen kann, wenn die

Energieeinsätze aus dem gleichen Brennstoff bestehen. Andernfalls kann es sich nur um „Emissionssaldierungen aufgrund von Energiegutschriften“ handeln. Der Begriff der Energiegutschrift ist in der GEMIS-Studie in allen Fällen deplaziert in denen die verglichenen Systeme auf verschiedenen Brennstoffen basieren.

- 22) Ein HKW speist nicht Wärme in das Netz eines Dritten ein, sondern liefert Wärme „per Rohr“ gegen profitables Entgelt, nicht gegen Gutschrift der vermiedenen realen oder monetären Kosten einer früheren oder einer alternativen Heizung.
- 23) Vom Input des BHKW I. 3) in Tabelle 2 von 436 MWh ist für 154 MWh Raumwärme der Energieeinsatz von Ölheizungen II. 2) in Höhe von 335 MWh abzuziehen, sodaß 101 MWh Input für 108 MWh Koppelstrom verbleiben. Der fiktive Wirkungsgrad des Koppelstroms beträgt entsprechend rund 1,1. Er erhöht sich auf 1,2 wenn man vom Input Spalte 3 den Förderungs-, Transport- und Lagerungsaufwand von ca. 10 % abzieht. Er sinkt (steigt), wenn die der Wärme-gutschrift zugrunde gelegten Heizsysteme effizienter (ineffizienter) sind als die Ölheizungen in unserem Beispiel.
- 24) Den 192 MWh Fern-, bzw. Nahwärme des BHKW I. 3) in Tabelle 2 ist die 335 MWh-Wärme-gutschrift auf Ölkesselbasis II. 2) als rechnerischer Input gegenüberzustellen.
- 25) In Bild 1 ist das die Zuordnungsvariante (c). Der Anteil des Stroms an der Erzeugung (Energieflußdiagramme) beträgt bei der Gegendruck- und bei der Dampf-Entnahme-Anlage 33 % bzw. 49 %. Diese Prozentsätze sind gleich dem Anteil des Stroms am Brennstoff-Gesamteinsatz (Brennstoffzuordnungsdiagramme). Beim Sonderfall BHKW stimmt diese Formel wegen einer Teilnutzung der „Abwärme“ nicht ganz. Grundsätzlich ist beim energetischen Bewertungsverfahren das Output/Input-Verhältnis (Wirkungsgrad) jedes Koppelprodukts gleich dem Anlagenwirkungsgrad.  
Die Bewertungsvariante (b) entspricht dem Modell der „Auskopplung“ von Strom aus einer Wärme-Erzeugung und ist insoweit eine Umkehrung des der Arbeitswertmethode zugrunde liegenden Modellfalls: Wärmewertmethode. Der Stromwirkungsgrad ist hier etwas niedriger als beim kalorischen Verfahren, aber in jedem Falle erheblich höher als die normalen 38 %.
- 26) Ohne Berücksichtigung der üblichen Wärmespitzen-Kessel auf Öl- oder Gasbasis. Diese Zusatz-Anlagen zur Abdeckung von Wärmebedarfsspitzen bringen die „Negativemissionen“ von KWK-Anlagen laut GEMIS-Studie praktisch zum Verschwinden. Vgl. Tabelle 3.
- 27) Es sei hier nur erwähnt, daß ein GuD-KW an Stelle des Kondensations-KW II. 1) den KWK-CO<sub>2</sub>-Vorteil in unseren Beispielen aufhebt. Selbstverständlich verbessert sich die KWK-Position wieder, wenn man aus GuD-Kraftwerken Wärme auskoppelt, was thermodynamisch aber nicht uneingeschränkt sinnvoll wäre.
- 28) Der Input der KWK-Anlage I. 1) ist mit 486 MWh um 28 % niedriger als der energetisch korrespondierende Einsatz im Kraftwerk II. 1) und in den Ölheizungen II. 2) von insgesamt 675 MWh.
- 29) Wenn ein Steinkohle-HKW I. 1) Brikettsheizungen II. 5) und Braunkohlenstrom aus dem KW II. 1) ersetzt, so beträgt die CO<sub>2</sub>-Einsparung annähernd 50 %. Im Falle des Gas-BHKW I. 2) steigt die CO<sub>2</sub>-Verringerung auf 70 %. Mit beiden Fällen ist in den NBL zu rechnen. Allerdings ist dieses KWK-Potential weit kleiner als das KWK-Potential zur Ölsubstitution in den ABL.

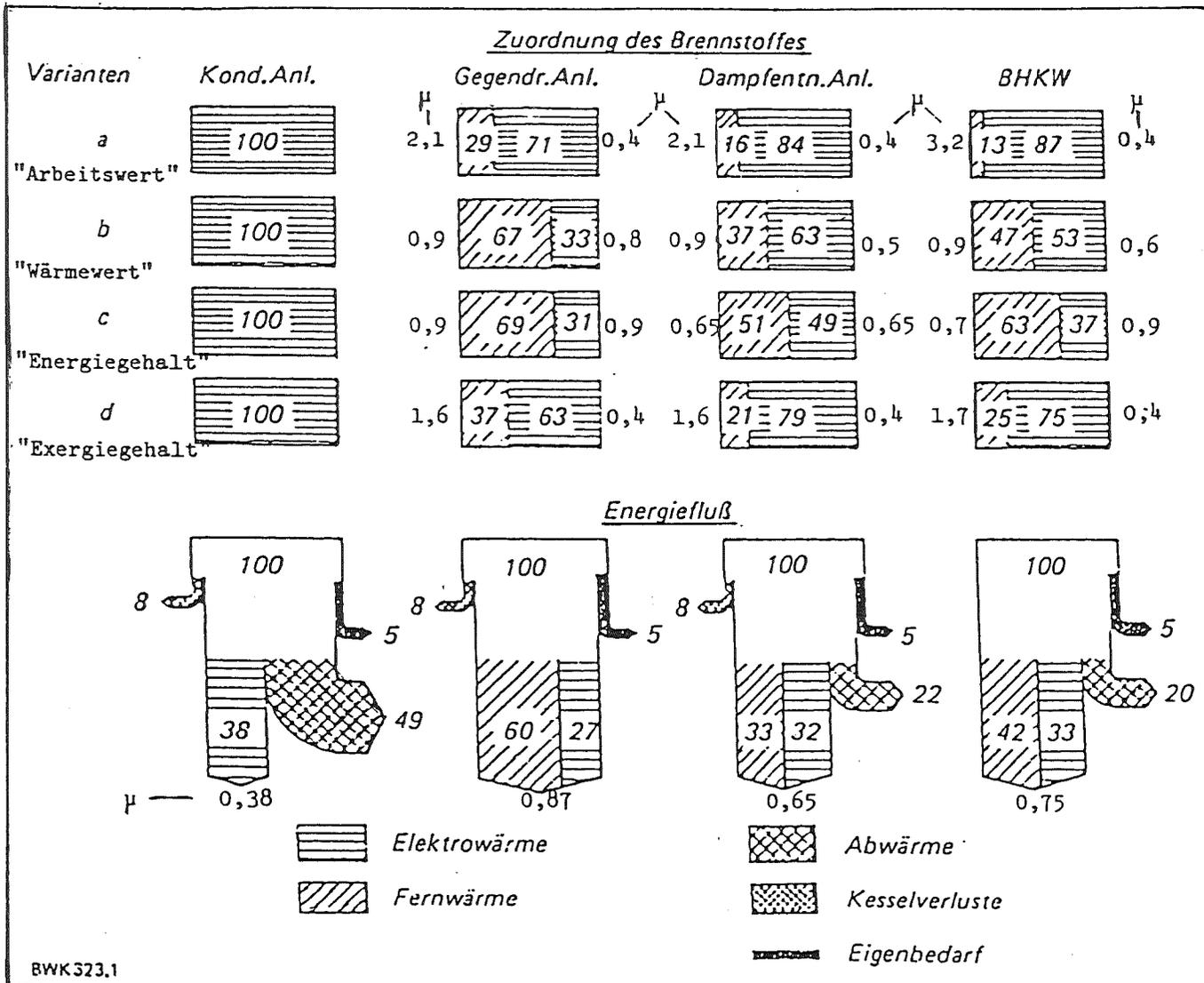
In der Bundesrepublik werden etwa 11,6 der 33 Mio. Wohnungen mit Öl und 4,4 Mio mit Braunkohlenbriketts beheizt. Energiebedarf 35-40 Mio t SKE.

- 30) Wer das Arbeitswertverfahren und eine daran anknüpfende Energie- und Preispolitik begreifen will, muß den Exergie-Begriff verstehen. Wenn der Bürger für Strom den höchsten Wärmepreis zahlt, so honoriert er indirekt und unbewußt die hohe Wertigkeit der Elektrizität im thermodynamischen Sinne. Er zahlt bewußt einen Mehrpreis für die *Anwendungsvorzüge* der Elektro-Energie, gleichgültig, ob der Strom einem thermodynamischen Prozeß entstammt oder nicht.
- 31) Zu den Anwendungsvorzügen der Elektroheizung:  
„Kein Rohr, kein Kessel, kein Tank.  
Kein Geräusch, kein Leck, kein Gestank.  
Wenig Wartung, wenig Platz, wenig Verschleiß.  
Ein einziges Kabel für hell, kühl und heiß.“  
Der Systemwirkungsgrad der Kondensationsstromheizung beträgt gemäß Tab. 2, II. 1) rd. 0,33 (100 MWh Dienstleistung aus 312 MWh Primärenergie). Bei der Koppelstromheizung ist die Dienstleistung von 100 MWh zum anteiligen Input von 31% der 486 MWh Primärenergie ins Verhältnis zu setzen, sodaß man 0,66 erhält.  
Das Fernheizwerk II. 4) in Tab. 5 hat einen Systemwirkungsgrad von 0,51. Das Gegendruck-HKW I. 1) liefert 100 MWh Raumwärme aus 69% des 291 MWh-Inputs, was eine Systemeffizienz von 0,50 ergibt. Bei der Ölheizung II. 2) erhält man 0,46.
- 32) Diese Verbesserung beträgt beim BHKW I. 2) in Tabelle 5 6 %, beim Entnahme-HKW I. 2) in Tabelle 2 rd. 11 %.
- 33) Die gesamte CO<sub>2</sub>-Vermeidung des HKW I. 1) in Tabelle 5 in Höhe von 120 t ergibt sich als Summe der vermiedenen 63 t des KW II. 1) (Spalte 4a) und der 57 t der Ölheizungen II. 2) (Spalte 4d).  
Bei Koppelstrom-Verheizung sind diese pro 100 MWh vermiedenen 57 t CO<sub>2</sub> auf 160 MWh Raumwärme aus Fernwärme und Heizstrom hochzurechnen (91 t)..
- 34) Bezogen auf Steinkohle ist die Energieumwandlung in Öl-HKW 2 %, in Gas-HKW 6 % effizienter.
- 35) Bei einem Erzeugungswirkungsgrad von 0,98 und dem zugehörigen Systemwirkungsgrad von 0,74 benötigt der Brennwertkessel für 167 MWh (128 MWh) Wärmedienstleistungen 226 MWh (173 MWh) Primärenergie Erdgas, woraus 45 t (35 t) CO<sub>2</sub> resultieren.  
Bei einem Erzeugungswirkungsgrad von 0,45 und dem zugehörigen Systemwirkungsgrad von 0,38 benötigt das Kombikraftwerk für 100 MWh Stromdienstleistungen 263 MWh Primärenergie. Diese besteht bei einem Einsatzverhältnis von 1:3 aus 65 MWh Gas und 198 MWh Kohle, woraus 66 t + 13 t = 79 t CO<sub>2</sub> resultieren.  
Die Kombination emittiert also 124 t (114 t) CO<sub>2</sub> für 100 MWh Strom und 167 MWh Wärme.
- 36) Das HKW I.1) an Stelle von Kohle-Kraftwerk II.1) und Ölheizungen II.2) vermeidet auf Gasbasis  $(105 + 95) - 96 = 104 \text{ t CO}_2$  für 100 MWh Strom und 167 MWh Wärme, also  $\frac{104 \text{ t CO}_2}{267 \text{ MWh}}$   
= 0,4 t CO<sub>2</sub> pro MWh Dienstleistungen aus Gas (s. Tab. 2). Die Gasturbine des GuD-Kraftwerks erzeugt aus 65 MWh Gas 33 MWh Stromdienstleistungen, wobei 13 t CO<sub>2</sub> entstehen, während die Brennwertkessel 45 t CO<sub>2</sub> für 167 MWh Wärme emittieren (s. Anm. 35). Zusammen entstehen also 58 t CO<sub>2</sub> für 200 MWh Dienstleistungen, oder  $\frac{58 \text{ t CO}_2}{200 \text{ MWh}}$   
= 0,3 t CO<sub>2</sub> pro MWh Dienstleistung aus Gas. Das sind 25 % weniger als bei Gaseinsatz im HKW I.1).

**Bild 1: Energiefluß und Zuordnung des Brennstoffbedarfs für die hauptsächlich verwendeten Kraft-Wärme-Kopplungs-Prozesse**

Kond.-Anl.  
 Kondensationskraftwerk  
 Gegendr.-Anl.  
 KWK-Anlage mit Gegendruckturbine  
 Dampfentn.-Anl.  
 KWK-Anlage mit Entnahmekondensationsturbine  
 BHKW  
 Blockheizkraftwerk mit Verbrennungskraftmaschine  
 Bewertungs-Varianten:

- „a“ Fernwärme als Zusatzprodukt der Elektrizitätserzeugung
  - „b“ Elektrizität als Zusatzprodukt der Prozeßwärmeerzeugung
  - „c“ Elektrizität und Wärme als gleichwertige Produkte betrachtet
  - „d“ Elektrizität und Wärme nach ihrem Exergieinhalt bewertet
- „μ“ Erzeugungswirkungsgrad



**Tabelle 1: Spezifische CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen von Stromsystemen  
(t je 100 MWh Strom frei Netz)**

a) Braunkohle-Kraftwerk	116,1 t
b) Steinkohle-Kraftwerk	92,9 t
c) Atom-Kraftwerk	5,4 t <sup>**)</sup>
d) Kohle-HKW (Entnahmekondensation) <sup>*)</sup>	43,8 t
e) Gas-GuD-Kraftwerk	43,3 t
f) Gas-GuD-HKW <sup>*)</sup>	- 18,8 t
g) Gasturbinen-HKW <sup>*)</sup>	3,3 t
h) Gasmotor-BHKW <sup>*)</sup>	- 2,2 t
i) Biogas-BHKW <sup>*)</sup>	- 112,1 t

*\*) Strombezogene Netto-Emission nach Wärmegutschrift über Öl-Heizung.*

*\*\*\*) Berechnet auf der Grundlage der für die Brennstoff-Prozesskette (90 %) und den KKW-Bau (10 %) benötigten fossilen Energie.*

---

**Quellen:** GEMIS-Studie 1990, S. 278 (Systeme a – d, g, h)  
Fritsche 1990, S. 10 (Systeme b – i)

Tabelle 2: CO<sub>2</sub>-Emissionen von KWK-Anlagen bei vorgegebener Strom-Dienstleistung im Vergleich zu Einzelanlagen

	1 Energiedienstleistung (MWh)		2 Sekundärenergie (MWh)		3 Primärenergie (MWh)	4 t CO <sub>2</sub> aus				
	a „Elektrizität“	b Raumwärme	a Strom	b Fernwärme	Gesamtinput 1)	a Steinkohle	b Braunkohle	c Gas	d Öl	
<b>I. Koppelanlagen 2)</b>										
1) Gegendruckanlage (100 MW <sub>e</sub> ) (SZ = 0,45; μ = 0,80)	100	167	108 31 %	242 69 %	486	163	196	96	136	
2) Entnahmekondensation (500 MW <sub>e</sub> ) (SZ = 0,60; μ = 0,70)	100	128	108 37,5 %	180 62,5 %	467	156	188	92	131	
3) Blockheizkraftwerk (0,5 MW <sub>e</sub> ) (SZ = 0,56; μ = 0,76)	100	154	108 36 %	192 64 %	436	—	—	86	114	
<b>II. Einzelanlagen</b>										
1) Kondensationskraftwerk (> 100 MW <sub>e</sub> ) (μ = 0,38)	100	—	108	—	312	105	126	62	88	
2) Ölzentralheizung (alt) (μ = 0,68)	—	167 128 154	—	— — —	363 278 335	— — —	— — —	— — —	95 73 88	

SZ = Strom/Wärme-Verhältnis

μ = Anlagenwirkungsgrad

1) Kohle, Gas oder Öl bei Annahme gleicher Umwandlungseffizienz, incl. Förderung, Transport, Lagerung.

2) Ohne Wärmespitzen-Kessel.

Quellen: Reichl (BWK 6/90); GEMIS (1990), eigene Berechnungen.

**Tabelle 3: Spezifische CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen von Heizsystemen  
(t je 100 MWh Nutzwärme)**

a) Heizöl-Heizung	37,0 t
b) Erdgas-Heizung	27,2 t
c) Elektro-Heizung (Brennstoffmix)	80,4 t
d) Braunkohlenbrikett-Heizung	65,1 t
e) Kohle-HKW (Entnahmekondensation) <sup>*)</sup> <sup>**)</sup>	4,7 t
f) Gasturbinen-HKW <sup>*)</sup>	- 19,6 t
g) Gasmotor-BHKW <sup>*)</sup> <sup>***)</sup>	- 12,9 t

*\*) Wärmebezogene Netto-Emission nach Stromgutschrift über Steinkohle-Kraftwerk.*

*\*\*\*) Fernwärme aus HKW mit Öl-Spitzenkessel: 11,5 t*

*\*\*\*) Nahwärme aus BHKW mit Gas-Spitzenkessel: - 4,9 t*

---

Quelle: GEMIS-Studie 1990, S. 269.

**Tabelle 4: Strom- und wärmebezogene CO<sub>2</sub>-Emissionen von KWK-Anlagen im Methodenvergleich**

	t CO <sub>2</sub> pro 100 MWh	
	Stromdienstleistung	Raumwärme
<b>1) Gegendruckanlage auf Steinkohlenbasis</b> (100 MW <sub>e</sub> ; SZ = 0,45; μ = 0,80)		
a) GEMIS-Berechnung	68 t <sup>1)</sup>	35 t <sup>2)</sup>
Berechnung auf Basis		
b) Arbeitswertmethode <sup>3)</sup>	105 t	35 t
c) kalorische Bewertung <sup>4)</sup>	51 t	67 t
<b>2) Erdgas-Motor-BHKW</b> (0,5 MW <sub>e</sub> ; SZ = 0,56; μ = 0,76)		
a) GEMIS-Berechnung	-2 t <sup>1)</sup>	-12 t <sup>2)</sup>
Berechnung auf Basis		
b) Arbeitswertmethode <sup>3)</sup>	62 t	16 t
c) kalorische Bewertung <sup>4)</sup>	31 t	36 t

1) Nach „Wärmegutschrift über Ölheizung“

2) Nach „Stromgutschrift über Steinkohle-Kraftwerk“

3) Fernwärme als Zusatzprodukt der Stromerzeugung betrachtet.

4) Brennstoffaufteilung entsprechend den energetischen Outputanteilen der Produkte. Entspricht in etwa dem „Wärmewertverfahren“: Strom als Zusatzprodukt der Wärmeerzeugung betrachtet.

3) 4) Die Summe der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro 100 MWh ist bei den Verfahren b) und c) gleich, wenn das Strom-Wärmeverhältnis 1 : 1 beträgt (SZ = 1). Im Unterschied zur GEMIS-Berechnung sind bei den Berechnungen auf der Basis der Bewertungsverfahren b) und c) keine Brennstoffsubstitutionen und Gutschriften zu unterstellen sowie keine Saldierungen vorzunehmen, so daß es nicht zu „negativen Emissionen“ kommen kann.

Quellen: Reichl (BWK 6/90), GEMIS (1990), eigene Berechnungen.

Tabelle 5: CO<sub>2</sub>-Emissionen von KWK-Anlagen bei vorgegebener Wärme-Dienstleistung im Vergleich zu Einzelanlagen

	1 Energiedienstleistung (MWh)		2 Sekundär-energie (MWh)		3 Primärenergie <sup>1)</sup> (MWh)	4 t CO <sub>2</sub> aus				
	a „Elektrizität“	b Raumwärme	a Strom	b Fernwärme	Gesamtinput <sup>1)</sup>	a Steinkohle	b Braunkohle	c Gas	d Öl	
<b>I. Koppelanlagen <sup>2)</sup></b>										
1) Gegendruckanlage (100 MW <sub>e</sub> ) (SZ = 0,45; μ = 0,80)	60	100	65 31 %	145 69 %	291	97	117	58	82	
2) Blockheizkraftwerk (0,5 MW <sub>e</sub> ) (SZ = 0,56; μ = 0,76)	65	100	70 36 %	125 64 %	283	–	–	56	79	
<b>II. Einzelanlagen</b>										
1) Kondensationskraftwerk (> 100 MW <sub>e</sub> ) (μ = 0,38)	60 65	–	65 70	–	187 203	63 68	75 82	37 40	52 57	
2) Ölzentralheizung (alt) (μ = 0,68)	–	100	–	–	217	–	–	–	57	
3) Gaszentralheizung (neu) (μ = 0,82)	–	100	–	–	182	–	–	36	–	
4) Fernheizwerk (100 MW <sub>th</sub> ) (μ = 0,80)	–	100	–	143	198	66	80	39	55	
5) Braunkohlenbrikett-Heizung (μ = 0,55)	–	100	–	–	269	–	94	–	–	

SZ = Strom/Wärme-Verhältnis

μ = Anlagenwirkungsgrad

1) Für Kohle, Gas oder Öl gleich angenommen, incl. Förderung, Transport, Lagerung.

2) Ohne Wärmespitzen-Kessel.

Quellen: Reichl (BWK 6/90); GEMIS (1990), eigene Berechnungen.

Mai 1991

### 3. Teil: Kraft-Wärme-Kopplung als Ausstiegshilfe?\*

In Szenarien für den „Ausstieg aus der Kernenergie“ wird die Kraft-Wärme-Kopplung zur zentralen alternativen Energietechnik. Im „Energiewende-Szenario“ des Öko-Instituts vom Juli 1988 stammen in 2000 92 TWh oder 28 %, in 2010 151 TWh oder 57 % unserer gesamten Stromerzeugung aus HKW<sup>1)</sup>, gegenüber etwa 13 TWh oder 3 % in 1988 (vgl. Tab. 1). Inwieweit öffentliche und industrielle, teils wärme-, teils stromorientierte Gegendruck- und Entnahmeanlagen die bestehenden Kernkraftwerke mit ihrer Jahreserzeugung von rund 150 TWh in 1989 ersetzen können ist eine elektrizitätswirtschaftliche Spezialfrage, die an dieser Stelle nur andiskutiert werden kann. Technisch gesehen können industrielle HKW, die Grundlast-Wärmebedarf zu decken haben, auch zur Stromversorgung in der Grundlast beitragen. Es ist auch denkbar, daß fernwärmeorientierte Gegendruckanlagen und stromorientierte Entnahmeanlagen in Verbindung mit entsprechenden Hilfs- und Reservemaßnahmen von der Lastverteilung während der Heizperiode in gewissem Umfang bei der Grundlastdeckung berücksichtigt werden können. Der unter heutigen Bedingungen prohibitiv hoch erscheinende technisch-organisatorische Aufwand mit seinen Auswirkungen auf den Strompreis erscheint Vertretern einer alternativen Energiepolitik in Ansehung des Ausstiegsziels als gerechtfertigt<sup>2)</sup>. Der Zubau von 26 000 MW<sub>e</sub> in Form von Heizkraftwerken bis 2010 ist für sie weniger eine Frage der technischen Machbarkeit und der ökonomischen Zumutbarkeit, als vielmehr eine Frage der energie- und gesellschaftspolitischen Prioritätensetzung.

Das gleiche gilt in verstärktem Maße bezüglich der von diesem HKW-Zubau implizierten starken Fernwärmeausbreitung. Im Haushaltsbereich z. B. soll sich der Fernwärmebedarf bis 2010 vervierfachen, was eine enorm hohe Anschlußrate von etwa 300 000 Wohnungen pro Jahr erfordern würde.

Die versorgungswirtschaftliche Fachwelt beurteilt eine solche Expansion der Kraft-Wärme-Kopplung sowohl auf der Strom- als auch auf der Wärme-Seite als unrealistisch<sup>3)</sup>. Diese Beurteilung beruht aber auf betriebs- und volkswirtschaftlichen Bewertungskriterien, die von den Anhängern einer alternativen Energie-

\*. Kurzfassung eines auf der Jahrestagung Kerntechnik in Bonn im Mai 1991 gehaltenen Vortrages

**Tabelle 1: Kraft-Wärme-Kopplung im „Energiewende-Szenario“ des Öko-Instituts (Juli 1988)**

	1982 1)		1989 2)		2000		2010	
					Trend	Ausstieg	Trend	Ausstieg <sup>5)</sup>
<b>Stromerzeugung (in TWh)</b>								
<b>Insgesamt</b>	370	100 %	441	100 %	458	100 %	467	100 %
<b>davon:</b>								
• Kernenergie	63	17 %	149	34 %	165	36 %	181	39 %
• HKW	13 <sup>3)</sup>	4 %	14 <sup>3)</sup>	3 %	15 <sup>3)</sup>	3 %	16	3 %
• Regenerativ	17	4 %	17	4 %	18	4 %	18	4 %
							266	100 %

1) *Bezugsjahr der Studie „Das Grüne Energiewende-Szenario 2010“ des Öko-Instituts vom Juli 1988*

2) *Tatsächliche Werte zum Vergleich aus „Elektrizitätswirtschaft“ 21/1990*

3) *Nur öffentliche HKW*

4) *Öffentlich 66, Industrie 85*

5) *In der überarbeiteten Fassung „CO<sub>2</sub>-optimierte Energiewende“ vom August 1990 ist die Stromerzeugung 2010 mit 254 TWh noch niedriger. Auf HKW entfallen 158 TWh (62 %), auf Regenerative 77 TWh (30 %).*

politik nicht anerkannt werden. Das Öko-Institut behauptet zwar sein Wende-Szenario sei mit offiziellen Wachstums- und Wohlstandsprojektionen vereinbar<sup>4)</sup>, erklärt aber gleichzeitig, daß man eine solche Weiterentwicklung wegen der negativen ökologischen Begleiterscheinungen ablehne und den „Umbau der Industriegesellschaft“ anstrebe, möglicherweise beginnend mit dem Ausstieg aus der Kerntechnik. Eine mit herkömmlichen Maßstäben operierende Kritik an der KWK als Ausstiegshilfe geht hier ins Leere, weil diese Maßstäbe abgelehnt werden. Die enormen Kosten der KWK-Expansion gemäß Energiewende-Szenario verlieren in dem Maße an argumentativem Gegengewicht, wie man negative externe Effekte der bestehenden Energieversorgung, insbesondere der Kernenergienutzung, in eine ökologisch orientierte volkswirtschaftliche oder gesellschaftliche Kostenbetrachtung einbezieht, wie es neuerdings versucht wird<sup>5)</sup>.

Soweit in der Öffentlichkeit die Schlagworte „Umbau, Neuorientierung, ökologische Sicht, gesellschaftliche oder soziale Kostenbetrachtung, sanfte Energieversorgung“ etc. auf fruchtbaren Boden fallen kann die contra-KE-Wirkung der Ausstiegshilfen Sparen, Regenerativen und eben KWK auf sachlicher Ebene nicht entscheidend abgeschwächt werden.

In dieser Situation ist es u. E. angezeigt die Glaubwürdigkeit der Ausstiegsautoren durch Aufzeigen von Inkonsistenzen und Plausibilitätsmängeln in ihren Szenarien etc. in Frage stellen. Davon ist eine Verunsicherung des „ausstiegsgläubigen“ Publikums zu erwarten, und damit eröffnet sich die Chance einer nach traditionellem Verständnis sachlich-informativen Argumentation wieder Gehör zu verschaffen.

Einen Ansatzpunkt in diesem Sinne bietet die Öko-Studie insbesondere in ihren Aussagen zur Stromversorgung. Wesentliche Randbedingung der Ausstiegsstudien ist die Reduzierung der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Sie kann bei Wegfall der umweltentlastenden KKW trotz erheblicher Einsparungen von Öl und Gas im Endverbrauch und trotz des starken Zubaus energiesparender HKW nur durch entsprechende absolute Verringerung der Stromerzeugung entgegen dem derzeitigen Trend eingehalten werden. So wird im Öko-Szenario die Stromerzeugung bis 2010 gegenüber dem Referenzjahr 1982 um 28 %, gegenüber dem Trend um 43 % verringert (vgl. Tab. 1). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen gehen bis 2000 um 20 %, bis 2010 um 40 % zurück, so daß die „Toronto-Forderungen“ erfüllbar erscheinen<sup>6)</sup>. Wie in alternativen Energieszenarien üblich so versucht man auch in der „Energiewende 2010“ den Strombedarf auf stromspezifische Zwecke zu beschränken, d. h. auf Kraft und Licht. Der Stromeinsatz für Wärmezwecke soll weitestgehend reduziert werden, und dafür ist die Substitution von Elektroheizsystemen, überwiegend Nachtspeicherheizungen, durch Fernwärme eine der charakteristischen energiepolitischen „Umkehrmaßnahmen“: Bis 2010 sinkt der Heizstromverbrauch der Haushalte um 75 % bezogen auf 1985, und beträgt nur 12 % des trendmäßig zu erwartenden Bedarfs (Differenz 39 TWh). Die zahlreichen Anwendungsvorzüge der E-Heizung wie Geräusch- und Geruchlosigkeit, Zuverlässigkeit, allgemeine Zugänglichkeit, relativ geringer Endenergieverbrauch und Platzbedarf, niedriger Investitions- und Wartungsaufwand, Langlebigkeit, Schadstofflosigkeit, Ungefährlichkeit etc. zählen nicht gegenüber dem publikumswirksamen Argument des niedrigen Wirkungsgrads der konventionellen Stromerzeugung und der daraus ableitbaren Umweltbelastungen<sup>7)</sup>. Dieses stereotype Argument erscheint allerdings nur als ein Vorwand der Szenarienschreiber wenn man bedenkt, daß diese mit der Ächtung der Elektroheizung im Hinblick auf ihr Ausstiegsanliegen zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen: Einerseits wird der Strombedarf reduziert, wodurch sich die bei Ausstieg zu schließende Lücke in der Stromversorgung verkleinert. Andererseits wird das Absatzpotential für die überreichlich anfallende Koppel-Fernwärme vergrößert.

Für unser Anliegen sei festgehalten: Die Abschaffung der Elektroheizung ist wesentlicher Bestandteil einer Strategie des wald- und klimaschonenden Kernergie-Ausstiegs mit der KWK als zentraler alternativer Energietechnik.

Was die Plausibilität dieser Strategie praktisch annulliert ist der Sachverhalt, daß die Elektroheizung unter energetischen und ökologischen Aspekten zu den besten aller verfügbaren konventionellen Heizsysteme zählt, falls sie mit Strom aus HKW, also mit Koppelstrom, betrieben wird. Die übliche Ächtung des Stromheizens in Alternativ-Szenarien erscheint als widersinnig, wenn man der KWK wegen ihrer energetischen und damit ökologischen Vorzüge eine energiepolitische Hauptrolle in der Elektrizitätswirtschaft zuweist, z. B. zu Ausstiegswegen. Die energiepolitisch strategische Bedeutung der KWK liegt nämlich in der Wärmeversorgung, zu der sie sowohl mit Fernwärme als auch mit Heizstrom beitragen sollte. Wird aber der Koppelstrom vorzugsweise und zeitgleich mit der Fernwärme zu Heizzwecken verwendet, so steht er als Atomstromersatz nicht zur Verfügung. Damit entfällt die KWK als wichtigste energietechnische Ausstiegshilfe, und kernenergiefreie Wende-Szenarien müssen anders konstruiert werden

In Abbildung 1 ist die Herleitung des Systemwirkungsgrads einiger Heizmethoden dargestellt. Die angegebenen Erzeugungs- und Verwendungswirkungsgrade sollten nicht als bundesdeutsche Durchschnittswerte, sondern als typische Beispiele verstanden werden. Bei der ganzen Bandbreite realer Einzelwerte bleibt die hier herauszustellende Aussage gleich: Wird eine Elektroheizung mit Koppelstrom aus einem HKW mit einem typischen Erzeugungswirkungsgrad von z. B. 82 % betrieben, so wird ihr Systemwirkungsgrad (Verhältnis Nutzwärme zu Primärenergieaufwand) im Vergleich zur Verwendung von Kondensationsstrom mindestens verdoppelt, und liegt mit etwa 75 % über der Fernwärme und über den vorhandenen Ölheizungen. Sicherlich läßt sich mit modernsten Ölkesseln eine solche Effizienz auch erreichen. Da jedoch allgemeiner Konsens bezüglich der energiepolitischen Notwendigkeit der allmählichen Abkopplung vom Öl als Heizenergie besteht, ist dies für strategische Überlegungen, zu denen unsere Analyse beitragen soll, nicht relevant. Unsere Frage ist die, wie man Fernwärme und Strom als Heizöl-Substitute energetisch und ökologisch einzuschätzen hat. Das dritte Öl-Substitut, das Erdgas, kann als allgemein anerkannter energie- und umweltpolitischer Musterknabe (keine Erzeugungs- und Umwandlungsverluste, Brennwertkessel, geringer SO<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Anfall etc.) hier außer Betracht bleiben.

Das Problematische an unseren Darlegungen besteht darin, daß es in der Energiewirtschaft nicht üblich ist dem Koppelstrom den hohen Erzeugungswirkungsgrad des HKW zuzubilligen. Auf der Grundlage einer bestimmten thermodynamischen Argumentation, die sich auf den II. Hauptsatz und den Exergiebegriff bezieht, wird dem Koppelstrom regelmäßig soviel Einsatzenergie zugeordnet, wie man zu seiner Erzeugung in einem Kondensationskraftwerk mit Wirkungsgrad 0,38 benötigen würde<sup>8)</sup>, d. h. nicht 26 Einheiten wie in unserer Abbildung E 1, sondern 55, wie in E 2, für 21 Einheiten Strom. Dementsprechend wird der Fernwärme der restliche, nicht dem Strom belastete Energieeinsatz zugeordnet. Da dieser Resteinsatz normalerweise kleiner ist als der Energieinhalt der im HKW erzeugten Fernwärme, ergibt sich für die Koppelwärme rein rechnerisch ein Erzeugungswirkungsgrad größer als 1. In Abbildung 1 sind also den 61 Einheiten Fernwärme  $100 - 55 = 45$  Einheiten Primärenergie zuzuordnen, was einen Wirkungsgrad von 1,36 ergibt. Bei diesem Bewertungsverfahren (Arbeitswertmethode) erscheint die Koppelproduktion von Fernwärme als eine Energiespartechnik wie die Wärmepumpe<sup>9)</sup>. In dieser Bewertung liegt ein wesentlicher Grund für die starke Propagierung der Fernwärme nach der 1. Ölkrise 1973, und für ihren hohen Stellenwert in energie- und umweltpolitischen Berichten, Positionspapieren, Gutachten und Szenarien aller Schattierungen<sup>10)</sup>. Die problematische Kehrseite der Fixierung auf die Wärmeseite der KWK gerät dabei allerdings ins Hintertreffen, nämlich die Unterbringung des zeitgleich und mehr oder weniger unabhängig von der jeweiligen Bedarfslage erzeugten Koppelstroms im Netz. Es ist hier daran zu erinnern, daß der Strombedarf im Vergleich zum Heizwärmebedarf nur geringen tages-, wochen- und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist. Darauf können die wärmeorientierten, mit starren Gegendruckturbinen ausgerüsteten HKW keine Rücksicht nehmen, d. h. ihr Strom-Zwangsangebot hat ganz und gar keine Grundlastcharakteristik und kommt zum KKW-Ersatz kaum in Betracht. Bei der Entnahmekondensation ist zwar das Wärme-Auskopplungsverhältnis in technisch vorgegebenen Grenzen flexibel, aber damit wird auch der Fernwärme-Erzeugungswirkungsgrad flexibel (variierende Stromkennzahl). Von einer durchschnittlichen Höhe größer 1 kann keine Rede sein, und damit verliert die energiepolitische Ausgangsüberlegung, man müsse wegen des hohen Energiespareffekts wesentlich mehr KWK betreiben, entscheidend an Plausibilität. Die Entnahmeanlagen sind zwar stromorientiert und können zur Grundlastdeckung und damit zum KKW-Ersatz grundsätzlich herangezogen werden, wie es im Energiewende-Szenario ja auch geschieht. Allerdings läßt sich mit solchen KWK-Anlagen bei

weitem nicht die Ausnutzung erzielen, die erforderlich ist, um von einer effizienten Grundlastdeckung sprechen zu können<sup>11)</sup>, wie im Falle unserer KKW.

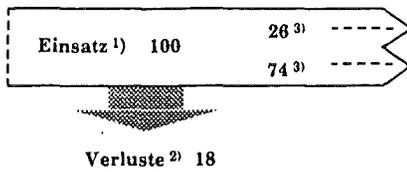
Die in Ausstiegsszenarien wie namentlich dem Energiewende-Szenario des Öko-Instituts vom Juli 1988 wesentliche Maßnahme des Ersetzens von KKW durch fossile HKW ergibt also in beiden Fällen wenig Sinn. Bei kalorischer (energetischer) Bewertung der Koppelprodukte wird diese Ausstiegshilfe widersinnig, weil die energetisch effizienteste Koppelstromverwendung im Verheizen besteht. Bei exergetischer Betrachtung ergeben sich derartige Probleme, Einschränkungen und Nachteile bezüglich der Lastverteilung, bzw. der Primärenergie-Einsparung und der Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkbetriebs, daß man diese Ausstiegshilfe auch aus der Sicht einer alternativen Energiepolitik nicht als zweckdienliche und energiewirtschaftlich sinnvolle Maßnahme bezeichnen kann.

Diese Ausführungen sind als Beispiel für Akzeptanzverbesserung durch Decouplierung energiewirtschaftswissenschaftlicher Fehlleistung bei der Kernkraft-Bekämpfung gedacht. Wie die regenerativen Energiequellen und das Energiesparen so wird nunmehr auch die KWK gegen die Kernenergie ausgespielt. In der Öffentlichkeit wird der Eindruck erweckt, die Verantwortlichen in Energiewirtschaft und Politik behinderten mit ihrem harten KE-Kurs die Verbreitung der ressourcen- und umweltschonenden sozialverträglichen Energietechnik KWK<sup>12)</sup>. Daß die nukleare KWK praktiziert wird und sie auf Grund energie- und umweltpolitischer Zwänge eine sehr gute Perspektive hat, (nukleare KWK-Moduln) gelangt nicht ins Bewußtsein des Publikums.

Geht man von der Prämisse aus, daß die Akzeptanzkrise nicht durch Zusatzinformationen zu Kerntechnik, Brennstoffkreislauf und Reaktorsicherheit überwunden werden kann, dann kommt es bei anhaltender Ausstiegssdiskussion vor allem darauf an, der Öffentlichkeit klar zu machen, daß sie in Bezug auf die KE-Alternativen teils bewußt, teils unbewußt getäuscht wird, und zwar hinsichtlich der technischen Zweckdienlichkeit, des Potentials und der ökonomischen und ökologischen Implikationen. Dabei besteht eine Schwierigkeit darin, die Glaubwürdigkeit der Ausstiegsbetreiber in Frage zu stellen, ohne dem Publikum den Glauben an Sonne, Wind, KWK-Effizienz etc. zu nehmen. Auch wir glauben an Alternativen, allerdings nicht zur Kernenergienutzung, sondern zur massiven Verbrennung von Rohstoffen zum Schaden unserer Gesundheit und Lebenssphäre.

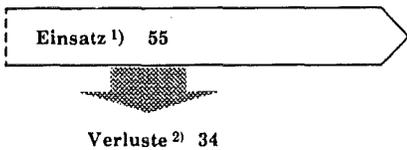
## E: Endenergie-Erzeugung

### 1. Heizkraftwerk (HK)



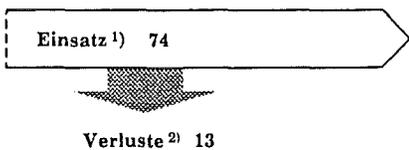
Koppelstrom	21	$\eta_{HKSt}^E$	=	$\frac{21}{26}$	=	0,82
Fernwärme	61	$\eta_{FW}^E$	=	$\frac{61}{74}$	=	0,82
<hr/>						
E - Wirkungsgrad:		$\eta_{HK}^E$	=	$\frac{82}{100}$	=	0,82

### 2. Kondensationskraftwerk (K)



Strom	21					
E - Wirkungsgrad		$\eta_K^E$	=	$\frac{21}{55}$	=	0,38

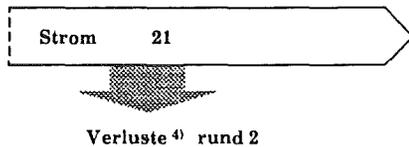
### 3. Heizwerk (H)



Fernwärme	61					
E - Wirkungsgrad		$\eta_H^E$	=	$\frac{61}{74}$	=	0,82

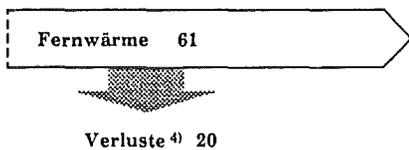
## V: Verteilung und Verwendung zu Heizzwecken

### 1. Strom aus Kraftwerk oder Heizkraftwerk für Direktheizung



Nutzwärme	19					
V - Wirkungsgrad		$\eta_{St}^V$	=	$\frac{19}{21}$	=	0,92

### 2. Fernwärme aus Heizwerk oder Heizkraftwerk



Nutzwärme	41					
V - Wirkungsgrad		$\eta_{FW}^V$	=	$\frac{41}{61}$	=	0,67

## S: Systemwirkungsgrade (E x V)

### 1. Heizen mit Kondensationsstrom (KSt)

$$\eta_{KSt}^S = \eta_K^E \times \eta_{St}^V = 0,38 \times 0,92 = 0,35$$

### 2. Heizen mit Fernwärme (FW)

$$\eta_{FW}^S = \eta_{HK(H)}^E \times \eta_{FW}^V = 0,82 \times 0,67 = 0,55$$

### 3. Heizen mit Koppelstrom (HKSt)

$$\eta_{HKSt}^S = \eta_{HK}^E \times \eta_{St}^V = 0,82 \times 0,92 = 0,75$$

- 1) Primärenergie, wie Kohle, Erdgas; oder Sekundärenergie, wie Öl, Biogas; z. B. in t SKE
- 2) Kesselverluste, Prozeßverluste, Eigenbedarf
- 3) Anteil entsprechend dem Erzeugungsanteil (kalorische Bewertung der Koppelprodukte)
- 4) Verteilungs- und Anwendungsverluste (Orientierungswerte)

Abb. 1: Energiefluß und Wirkungsgrade von Heizsystemen

## Anmerkungen:

- 1) Im Auftrag der GRÜNEN im Bundestag, S. 50. Überarbeitet als "CO<sub>2</sub>-optimiertes Energiewende-Szenario", August 1990
- 2) Für W. Fritsche vom Öko-Institut Darmstadt ist der teure Strom aus Kohle-HKW deswegen unproblematisch, weil sich beim KE-Ausstieg das Strompreisniveau erhöht, so daß die Kohle mit Öl und Gas besser konkurrieren kann. Man hat also die kuriose Zirkel-Argumentation, daß die KWK den Ausstieg technisch ermöglicht, und dieser umgekehrt die KWK rentabel macht, d. h. ökonomisch ermöglicht. Vgl. W. Fritsche, Potentiale zur Kraft-Wärme-Kopplung und Stromeinsparung in der Bundesrepublik Deutschland, Juni 1987, S. 16.
- 3) Vg. J. Grawe (VDEW), Wunschtechnik Kraft-Wärme-Kopplung: Chancen und Grenzen, Vortragsmanuskript September 1988.
- 4) Das Öko-Institut leitet sein Trend-Szenario aus einer Prognos-Studie von 1984 für die Bundesregierung ab (vgl. Energiebericht der Bundesregierung vom September 1986), und übernimmt eine BSP-Wachstumsrate von 2,4 % als „politische Wunschvorstellung der Bundesregierung“. Diese Rate soll auch bei der „Energiewende“ realisiert werden können.
- 5) Vgl. O. Hohmeyer, Soziale Kosten des Energieverbrauchs, Berlin-Heidelberg 1989. Der Autor bewertet z. B. die vermutlichen Schäden eines eventuellen Unfalls à la Tschernobyl in der Bundesrepublik Deutschland, obwohl bei unseren LWR eine explosionsartige nukleare Exkursion wie bei einem RBMK ausgeschlossen ist. Er errechnet und internalisiert einen „Knappheitszuschlag“ für Uran von 6 Pf./kWh, obwohl die fortgeschrittene Kerntechnik eine Übertragung des von der Analyse und Bewertung fossiler Vorräte her gewohnten Verknappungsbegriffs zumindest als fragwürdig erscheinen läßt.
- 6) In der Prognos-Studie „Rationelle Energieverwendung und -erzeugung ohne Kernenergienutzung“ (Dezember 1987, im Auftrag des Landes NRW) wird die KWK bis 2000 sogar noch stärker ausgebaut als in der Öko-Studie. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen steigen aber weiter an, weil Prognos im Gegensatz zum Öko-Institut den Trend des steigenden Strombedarfs nicht dem Ausstiegsziel opfert.
- 7) In der Publikation „Die Zukunft der Bundesrepublik-Szenarien und Prognosen“ des Öko-Instituts 1988 heißt es, die Stromheizung habe den geringsten Wirkungsgrad und müsse daher als „schmutzigstes Heizsystem“ gelten (S. 51).
- 8) Zu der Frage der Bewertung der Koppelprodukte gibt es eine seit Jahrzehnten andauernde wissenschaftliche Diskussion, in der immer wieder die Notwendigkeit belegt wird den Koppelstrom wie Kondensationsstrom zu bewerten. Was auf ein Scheinproblem hindeutet ist der Umstand, daß im Ergebnis wesentlich anders lautende Behauptungen von wissenschaftlicher Seite gar nicht existieren. Vgl. W. Weingärtner, Exergiebetachtung des Dampfkraftprozesses – Zur Kostenaufteilung bei der Wärme-Kraft-Kopplung, Brennstoff-Wärme-Kraft 7/1965, S. 330 - 337. A. Reichl, Energetische und ökologische Bewertung der Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung, Brennstoff-Wärme-Kraft 6/1990, S. 325 - 336.
- 9) Vgl. z. B. G. Alefeld, Zur Bewertung von Heizkraftwerken, Brennstoff-Wärme-Kraft 6/1988, S. 231 - 236. Die Fernwärme wird nur mit dem der Stromerzeugung entgangenen "Arbeitswert" des zur Fernwärme-Bereitung ausgekoppelten Dampfes belastet.

- 10) Vgl. z. B. Energiebericht der Bundesregierung 1986, S. 47 (Tz. 88); Umweltgutachten 1987 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen, S. 532 (Tz. 1997 - 2001); Prognos-Studie Dezember 1987, Rationelle Energieverwendung und -erzeugung ohne Kernenergienutzung, S. 217 - 366; Öko-Institut Freiburg 1988, Die Zukunft der Bundesrepublik: Szenarien und Prognosen, S. 32, 57, 51.
- 11) Im Energiewende-Szenario 2010 erreichen die zur Grundlastdeckung eingesetzten öffentlichen Entnahmekondensationsanlagen nur eine Ausnutzung von 3500 h (vgl. Tab. III-2 b und 3 b, S. 50 bzw. 52).
- 12) In seiner Argumentation gegen die Bedeutung der KE für die CO<sub>2</sub>-Verringerung, die auf dem Öko-Energiewende-Szenario 2010 basiert, behauptet Professor P. Hennicke, im „Atomenergie-System“ sei die „Effizienzrevolution“ (Lovins) mit ihrem wesentlichen Element KWK unmöglich. In seinem Aufsatz „CO<sub>2</sub>-Reduzierung durch Kernenergie?“ (et 1-2/1989, S. 71 - 77) kommt der Begriff KWK auf 3 Seiten des 6-seitigen Textes 15 mal vor. In der Prognos-Ausstiegstudie vom Dezember 1987 befassen sich 150 von 550 Seiten mit der KWK.

Juli 1992

#### 4. Teil: Zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung durch Kraft - Wärme - Kopplung\*

##### *Energiepolitische Metamorphose: Von der Ölablösung zur Klimaschutz*

Seit fast 20 Jahren gehört die Kraft - Wärme - Kopplung (KWK) zu den meistgebrauchten Begriffen in der energiepolitischen Diskussion. Ihre Popularität begann mit der 1. Ölkrise 1973, als man sich von Fernwärme aus ruhr- und saarkohlebefeuerten Heizkraftwerken einen wesentlichen Beitrag zur versorgungssicheren allmählichen Ablösung des Heizöls im Raumwärmebereich erhoffte.

Die Fernwärmeausbreitung ist zwar weit hinter den Erwartungen der 70 er Jahre zurückgeblieben, aber der Ruf der KWK als besonders energiesparende und umweltschonende Umwandlungstechnik hat eher noch zugenommen. Dies ist nicht verwunderlich, wenn man an die Verbreitung der Behauptung denkt, KWK-Anlagen nützen die eingesetzte Primärenergie mehr als doppelt so gut aus wie normale Kraftwerke. Mit dieser zwar richtigen, aber irreführenden Aussage<sup>1)</sup> nistete sich in der breiten Öffentlichkeit zugleich der Vorwurf ein, die Versorger würden Energie vergeuden, indem sie an ihren großen Kondensationskraftwerken festhielten anstatt auf Wärmeauskopplung umzustellen.

Im Rahmen der Ausstiegssdiskussion nach dem Tschernobyl-Unglück 1986 hat die KWK eine neue energiepolitische Beurteilung erfahren, die man stichwortartig am besten als „Stromorientierung“ bezeichnet. Das bisherige Fern- und Prozeßwärme- Nebenprodukt, nämlich der im öffentlichen Netz fallweise unterzubringende Koppelstrom, soll bestimmten Ausstiegsszenarien zufolge in großem Maßstab gezielt als Atomstrom-Ersatz erzeugt werden.<sup>2)</sup> Inwieweit es möglich wäre, in der Grundlast arbeitende KKW durch öffentliche und industrielle HKW und sonstige KWK-Anlagen zu ersetzen, soll hier nicht geprüft werden. Wichtig erscheint der Hinweis, daß die große Beachtung, die der KWK im Hinblick auf kli-

---

\* Diesem Beitrag liegt eine Untersuchung zugrunde, die der Autor für das Grundsatzreferat 311 des BMFT durchgeführt hat. Veröffentlicht in „Energiewirtschaftliche Tagesfragen“ 12/92.

maschonende CO<sub>2</sub>-Vermeidung z. Zt. geschenkt wird, mit der unorthodoxen Beurteilung der HKW als Stromsysteme zusammenhängt.<sup>3)</sup> Dies ist kein Zufall, denn gut ein Drittel unserer gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen entstammt ja der Stromerzeugung, soviel wie im Industrie- und im Verkehrsbereich zusammen entstehen.

Was bei der Hochkonjunktur der KWK im Rahmen der Klimadiskussion besonders auffällt, ist eine weitere Umorientierung der HKW, und zwar in Bezug auf den Brennstoff. Bis vor wenigen Jahren bedeutete Fernwärme „heimische Kohle per Rohr“ statt Heizöl: eine hochgelobte Synthese von rationeller Energienutzung und Versorgungssicherheit. Demgegenüber basiert die KWK, wie sie heute als Eckpfeiler des deutschen Klimaschutzprogramms diskutiert wird, auf ausländischem Gas. Der energiepolitische Akzent der KWK hat sich von der Ölablösung im Raumwärmebereich mit Hilfe heimischer Kohle zur klimaschonenden Stromerzeugung aus importiertem Erdgas verschoben. Die Frage, ob dies als Wandel der energiepolitischen Prioritätensetzung in dem Sinne gedeutet werden darf, daß das Primat der Zielsetzungen von der Versorgungssicherheit zur Umweltschonung verlagert wurde, sei hier nur angeschnitten. Von größerem Interesse ist die Frage, ob es der neuen HKW-Konzeption gelingen kann, den der KWK allgemein attestierten erheblichen Primärenergievorteil in eine strategisch bedeutsame reale CO<sub>2</sub>-Vermeidung umzusetzen. Zu ihrer Beantwortung wird im folgenden etwas analytische Hilfestellung angeboten, indem typische Anlagen zur gekoppelten und zur ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung hinsichtlich ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen auf unterschiedlicher Brennstoffbasis vergleichbar dargestellt und diskutiert werden.

*Effektverquickung: Energieeinsparung und kohlenstoffarmer Brennstoff*

Das Blockheizkraftwerk I 3) in der „Arbeitstabelle“ 14) sei mit Gasmotoren ausgestattet. In diesem Falle emittiert es für 100 MWh elektrische Dienstleistungen und 154 MWh Raumwärme 88 t CO<sub>2</sub>. Werden diese energetischen Dienste mittels Strom aus einem Kondensationskraftwerk II 1) auf Steinkohlebasis und Wärme aus alten Ölzentralheizungen II 4) geleistet, so entstehen 105 t + 89 t = 194 t CO<sub>2</sub>. Die KWK-Anlage verursacht also unter den angegebenen Bedingungen 55 % weniger CO<sub>2</sub>, was man als eine klimapolitisch sehr attraktive CO<sub>2</sub>-Vermeidung bewerten wird.

In derartigen Aussagen sind zwei Effekte miteinander verquickt. Zum einen der KWK-Energiespareffekt im Vergleich zur ungekoppelten Strom- und Wärmeer-

zeugung. Er wird dadurch verstärkt, daß moderne KWK-Anlagen mit alten, relativ ineffizienten Heizungen verglichen werden. Der zweite, als solcher vielfach nicht erkannte Vermeidungseffekt besteht darin, daß für die KWK-Anlagen als Brennstoff regelmäßig Erdgas angenommen wird, das einen erheblich günstigeren CO<sub>2</sub>-Faktor aufweist, als die in den üblichen Vergleichsanlagen „Kondensations-Kohlekraftwerk“ einerseits und „Ölkessel“ andererseits verwendeten Brennstoffe.

Ein unbekannter Teil der den HKW und BHKW allgemein nachgesagten erheblichen CO<sub>2</sub>-Vermeidungswirkung beruht auf Annahmen, die mit dem KWK-Charakteristikum der energiesparenden Koppelproduktion nichts zu tun haben, zumindest nicht direkt. Im folgenden wird versucht, diese Einflußfaktoren zu verdeutlichen und zu quantifizieren. Dabei wird von 3 KWK-Anlagen ausgegangen, die sich in Bezug auf die technischen Charakteristika und die energiewirtschaftliche Zweckbestimmung sehr deutlich unterscheiden (vgl. Tabelle 1, Teil I.):

- 1) Gegendruckanlage von 100 MWe mit starrem Strom/Wärmeverhältnis von 31 zu 69 % (Stromkennziffer SZ = 0,45) und einem Erzeugungswirkungsgrad von 0,80. Sie ist im Rahmen von „alternativen“ kommunalen Versorgungskonzepten von besonderem Interesse. Der Wirkungsgrad des Versorgungssystems als Verhältnis der Energiedienstleistungen zum gesamten Energieaufwand beträgt 0,55 (Spalte 1a + b zu Spalte 3 in Tab. 1).
- 2) Entnahmekondensationsturbine von 500 MWe mit flexibler Strom/Wärme-Relation von durchschnittlich 37,5 zu 62,5 % und 0,70 Wirkungsgrad. Sie repräsentiert die von den EVU hauptsächlich praktizierte KWK. Der Systemwirkungsgrad beträgt 0,49.
- 3) Blockheizkraftwerk von 0,5 MWe mit quasistarrem Strom/Wärme - Verhältnis von 36 zu 64 % und 0,76 Wirkungsgrad. Es wird von Gemeinden zur Versorgung bestimmter Objekte mit ständigem Wärmebedarf, namentlich Hallenbäder, Sportzentren und Kliniken, in Betracht gezogen. Bei diesem Versorgungssystem wird die insgesamt aufgewendete Energie zu 58 % in Dienstleistungen umgewandelt.

Mit diesen 3 Anlagentypen wird hinsichtlich Energieeinsparung, technik- und brennstoffbedingter CO<sub>2</sub>-Vermeidung jeweils ein 3-facher Vergleich vorgenommen:

- a) KWK im Vergleich zu ungekoppelter Strom- und Fern- bzw. Nahwärme-Erzeugung.

- b) KWK im Vergleich zu altem Kondensationskraftwerk und alten Ölheizungen.
- c) KWK im Vergleich zu altem bzw. fortschrittlichem Kraftwerk sowie Gas-Brennwertkesseln.

*Der gute Ruf der KWK: Vergleichsweise energiesparend*

Kern der allgemeinen Wertschätzung der KWK als CO<sub>2</sub>-Vermeidungstechnik ist die Brennstoffeinsparung der Koppelproduktion im Vergleich zur Strom- und Wärmeerzeugung in Einzelanlagen.

- a) Bei der Gegendruckanlage I 1) sind für 100 MWh Stromdienstleistungen und 167 MWh Raumwärme 486 MWh Energieeinsatz erforderlich. Wenn man wissen möchte, wieviel Energie man durch Koppelproduktion von Strom und Fernwärme sparen kann, so ist es plausibel, mit Strom und Fernwärme aus ungekoppelten Anlagen zu vergleichen, also aus dem Kondensationskraftwerk II 1), bzw. dem Fernheizwerk II 3). Diese benötigen zusammen 312 MWh + 318 MWh = 630 MWh, und somit beträgt der technische Energiespareffekt der KWK-Anlage I 1) 23 %.

Für die Entnahmeanlage I 2) ergeben sich 17 % Einsparung, allerdings nur während der Heizperiode. In der warmen Jahreszeit muß der Koppelstrom zumindest teilweise durch Kondensationsstrom ersetzt werden, und der Wirkungsgradvorteil der KWK entfällt. Deswegen ist der auf das ganze Jahre bezogene Energienutzungsgrad des Versorgungssystems "HKW im Winter - Kondensationsstrom im Sommer" niedriger als der üblicherweise nur auf die 7- bis 8-monatige Heizperiode bezogene Nutzungsgrad des HKW. Entsprechend kleiner ist die jahresbezogene Energieeinsparung des Systems mit KWK im Vergleich zur Strom- und Wärmeversorgung aus Einzelanlagen. Im Fall der Gegendruckanlage ist der jahresbezogene Energiespareffekt 5 Punkte kleiner als bei Beschränkung der Analyse auf eine 8-monatige Heizperiode, d.h. also 18 %, nicht 23 % Energieeinsparung.<sup>5)</sup>

Der höhere Einspareffekt des BHKW von 28 % erklärt sich aus den wesentlich geringeren Verteilungsverlusten der Nahwärmeversorgung.

Das Entnahme-HKW ist durch ein variables Strom/Wärmeverhältnis gekennzeichnet. Dabei ist gerade im Hinblick auf die derzeitige Betonung der KWK-Stromseite zu beachten, daß der Wirkungsgrad der Anlage bei steigendem Stromanteil grundsätzlich sinkt, woraus eine Verringerung des Energiesparef-

fekts folgt. Die hier angegebene Stromkennzahl 0,60 soll ein Durchschnittswert sein. Sie ist größer als bei der Gegendruckanlage und entsprechend kleiner sind Wirkungsgrad und Energieeinsparung. Dieses HKW kann, wie alle KWK-Anlagen, Fernwärme höchstens so günstig erzeugen wie ein Heizwerk, was häufig nicht bedacht wird. Es kann aber auch den Strom mindestens so ungünstig erzeugen, wie ein reines Kondensationskraftwerk.

Man kommt bei solchen vergleichenden Betrachtungen zu der Einsicht, daß der entscheidende Vorteil der KWK in der Möglichkeit besteht, Strom mit einem sonst nicht erreichbaren hohen Wirkungsgrad großmaßstäblich zu erzeugen.<sup>6)</sup> Nicht von ungefähr ist, historisch gesehen, die Koppelstromproduktion als technischer Fortschritt an die industrielle Wärmeerzeugung angehängt worden, und nicht umgekehrt. Energietechnisch macht die derzeitige Stromorientierung der KWK durchaus Sinn, bei versorgungswirtschaftlicher Berücksichtigung der stark divergierenden Strom/Wärme-Bedarfscharakteristiken allerdings nicht. Das ökonomische KWK-Problem besteht in der Verwertung der Koppelprodukte, nicht in der Erzeugung.

- b) Eigenartigerweise operiert man in der öffentlichen Diskussion bei der Veranschaulichung des KWK-Energievorteils nicht mit Fernwärme-Einzelanlagen, also Fernheizwerken, sondern mit alten Ölheizungen. Dabei wird der technische KWK-Effekt in anscheinend ergebnisorientierter Weise mit dem Innovationsmotiv „aus veraltet (ineffizienter Ofen) mach' modern (Fernwärme)“ gekoppelt. Je älter die durch Fernwärme hypothetisch ersetzten Ölkessel sind, desto energiesparender erscheint die KWK. In Tabelle 1 wird für alte Zentralheizungen II 4) ein Wirkungsgrad von 0,68 angenommen. Beim Systemvergleich mit den HKW ist die dem Koppelstrom entsprechende Menge an Kondensationsstrom zu berücksichtigen, und zwar aus dem alten Kraftwerk II 1). Obwohl die beim Fernheizwerk II 3) ungünstig zu Buche schlagenden Verteilungsverluste entfallen, ist der Energieeinsatz im Kraftwerk und in den Heizungen höher, und dementsprechend größer fällt dieser gemischte KWK-Energiespareffekt aus, nämlich 28 % bei HKW I 1), 21 % bei HKW I 2), und 33 % beim BHKW. Im Falle der Gegendruckanlage z. B. steht dem Energieeinsatz von 486 MWh ein Einzelanlagen-Einsatz von 312 MWh + 363 MWh = 675 MWh gegenüber.
- c) Dieser Vergleich informiert natürlich nicht über die spezifisch energietechnischen KWK-Vorteile, sondern über den Energie-Vorteil von HKW als Option zur Ablösung der heute noch immer dominierenden Ölheizung. Für diese Ablö-

sung gibt es bekanntlich noch andere rationelle Optionen, und die Frage nach einem Quervergleich mit der HKW-Option liegt nahe. Nimmt man z. B. an, die alten Zentralheizungen II 4) würden durch Gas-Brennwertkessel II 5) ersetzt, so spart man 38 % Energie. Der Energie-Gesamtaufwand dieser „Brennwertkessel-Option“ ist nur 11 %, 5 % bzw. 19 % höher als bei der „HWK-Option.“ Letztere erspart also je nach KWK-Typ lediglich 10 %, 5 % bzw. 16 % Energie, und zwar bei den HKW I 1) und 2) nur während der Heizperiode. Beim Beispiel der Gegendruckanlage hat man 486 MWh mit 312 MWh + 226 MWh = 538 MWh für das Kondensationskraftwerk und die Brennwertkessel zu vergleichen.

Wie bei der Zentralheizung, so darf man natürlich auch beim Kraftwerk technischen Fortschritt unterstellen, namentlich in Form der Gas/Kohle-Kombi-technik. Durch Kombination von kohlebefeuertem Dampferzeuger mit erdgasbefeuerter Gasturbine erreicht das Kraftwerk II 2) einen Anlagenwirkungsgrad von 0,45, was gegenüber dem herkömmlichen Kraftwerk II 1) eine Energieeinsparung von 16 % bedeutet. Im Vergleich zur modernen Einzelanlagen-Option „Brennwertkessel plus GuD-Kraftwerk“ beträgt die Energieeinsparung bei den Koppelanlagen 1) und 3) lediglich 1 % bzw. 7 %, während das Entnahme-HKW 2) sogar 6 % mehr Primärenergie benötigt. Die Jahresnutzungsgrade sind also zumindest bei den großen HKW 1) und 2) niedriger als bei der hocheffizienten Einzelanlagen-Option.

Aus diesen Erörterungen folgt, daß man mit modernen Einzelanlagen die Heizölablösung energetisch mindestens ebenso günstig realisieren kann wie mit KWK-Anlagen.

#### *Energetechnischer CO<sub>2</sub>-Effekt: Geringerer Verbrauch vom gleichen Brennstoff*

Der energetisch bedingte CO<sub>2</sub>-Vermeidungseffekt der KWK läßt sich nur für den Fall exakt ermitteln, daß alle in den Systemvergleich einbezogenen Anlagen den gleichen Brennstoff, genauer gesagt Brennstoff mit dem gleichen Kohlenstoffgehalt, verfeuern. Er entspricht dann dem Energiespareffekt.

- a) Wenn man annimmt, daß die KWK-Anlagen einerseits, das Kraftwerk und das Fernheizwerk andererseits entweder alle mit der gleichen Kohle, oder mit Gas, oder mit schwerem Heizöl befeuert werden, so ist der CO<sub>2</sub>-Vermeidungseffekt während der Heizperiode gleich dem technischen Energiespareffekt,<sup>7)</sup> in unse-

rem Falle 23 % (Gegendruck), 17 % (Entnahme), bzw. 28 % (Gas-BHKW). Im Prinzip handelt es sich hier um die einzige methodisch korrekte Aussage zur spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidung mittels Koppeltechnik.

Das Gegendruck-HKW I 1) z.B. emittiert auf Steinkohlebasis 163 t, auf Gasbasis 98 t CO<sub>2</sub>. Die Emission des Systems "Kraftwerk II 1) plus Heizwerk II 3)" beträgt 105 t + 107 t = 212 t CO<sub>2</sub> bzw. 63 t + 64 t = 127 t CO<sub>2</sub>. Das HKW ist also jeweils 23 % günstiger.

- b) Werden alte Einzelanlagen durch HKW ersetzt, so ist die CO<sub>2</sub>-Auswirkung ein Mischeffekt aus KWK-Technik und technischer Modernisierung und hängt wesentlich vom Zustand der ersetzten Anlagen ab.

Betrachtet man die Koppel-Fernwärme als eine energiepolitische Option zum Ersatz bestehender Ölheizungen II 4), so wären die oben angegebenen technischen Einspareffekte i.w.S. von 28 %, 21 %, bzw. 33 % nur dann gleichzeitig CO<sub>2</sub>-Vermeidungseffekte, wenn alle involvierten Kraft- und Heizkraftwerke mit leichtem Heizöl befeuert würden - eine unrealistische Annahme. Werden sie mit Schweröl betrieben, so beträgt die CO<sub>2</sub>-Vermeidung 25 % bzw. 19 %<sup>8)</sup>.

Der Übergang zur KWK geht allermeistens mit einer Brennstoff-Substitution einher, namentlich mit der Verwendung von Gas oder Kohle an Stelle von leichtem Heizöl, das mehr bzw. weniger "CO<sub>2</sub>-trächtig" ist. Deswegen ist die in der öffentlichen Diskussion den Koppelanlagen zugeschriebene CO<sub>2</sub>-Vermeidung in der Realität nur zum Teil das Verdienst energieversorgungstechnischen Fortschritts.

- c) Als energiepolitische Option zur Heizölsubstitution steht die KWK-Fernwärme in Konkurrenz zu hocheffizienten Gas-Zentralheizungen. Werden die Koppelanlagen ebenfalls mit Gas betrieben, so ist ihr CO<sub>2</sub>-Vermeidungseffekt im Vergleich zur Option „Brennwertkessel plus Gas-Kondensationskraftwerk“ gleich ihrem Energiespareffekt, nämlich 10 % (Gegendruck), 5 % (Entnahme) und 16 % (BHKW). Geht man wieder von jahresbezogenen Energienutzungsgraden der großen HKW aus, so wird hier der technisch bedingte CO<sub>2</sub>-Vermeidungseffekt der KWK im Vergleich zu modernen Einzelanlagen praktisch bedeutungslos.

Dem System "Brennwertkessel plus GuD-Kraftwerk" sind KWK-Anlagen energetisch höchstens ebenbürtig. Diese Aussage gilt aber deswegen nicht auch für den CO<sub>2</sub>-Vergleich, weil das GuD-Kraftwerk von der Konzeption her

eine gemischte Brennstoffbasis aus Erdgas und Steinkohle aufweist. Bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist dieses Einzelanlagen-System den Kohle-HKW in etwa gleichem Maße überlegen wie es beim Vergleich mit Gas-HKW schlechter abschneidet.

Selbstverständlich können mit guter Begründung einzelne technische Parameter der Tabelle 1 so variiert werden, daß der CO<sub>2</sub>-Vermeidungseffekt der Koppeltechnik insgesamt nicht so desillusionierend niedrig ausfällt. Andererseits kann man aber auch guten Gewissens bestimmte anlagen- und versorgungstechnische Annahmen so wählen, daß die KWK-Anlagen hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emission schlechter abschneiden als moderne Einzelanlagen.

*Energiopolitischer CO<sub>2</sub>-Effekt: Mehreinsatz des kohlenstoffarmen Brennstoffs Erdgas*

Die CO<sub>2</sub>-Faktoren der hier relevanten Brennstoffe reichen von 201 kg CO<sub>2</sub>/ MWh beim Erdgas bis zu 397 kg bei der Braunkohle, variieren also um fast 100 % (vgl. Tab. 1). Man vermeidet beispielsweise mit Erdgas statt Leichtöl ceteris paribus 24 %, mit Gas statt Steinkohle 40 % und an Stelle von Braunkohlenbriketts, die ja in den NBL eine große Rolle spielen, sogar 44 % CO<sub>2</sub>. Vergleicht man diese brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Effekte mit der dargelegten energietechnischen CO<sub>2</sub>-Vermeidung, so kann man ermessen, daß die der KWK in der heutigen Energie- und Klima-Diskussion attestierte CO<sub>2</sub>-Vermeidung mehr auf der Erdgas-Prämisse als auf dem Energiespareffekt der Koppeltechnik beruht. Daraus folgt andererseits, daß der von höherer Effizienz herrührende CO<sub>2</sub>-Effekt der KWK mehr oder weniger kompensiert wird, wenn sich die energipolitische Brennstoffpräferenz vom Gas wieder zur heimischen Kohle zurückverlagert.

- a) Der technische CO<sub>2</sub>-Vermeidungseffekt der KWK im Vergleich zur ungekoppelten Strom- und Fernwärmeerzeugung wurde oben je nach KWK-Anlage mit 23 %, 17 % bzw. 28 % (bei gleichem Brennstoff) angegeben. Nimmt man als Brennstoff für das Kondensationskraftwerk II 1) und das Heizwerk II 3) Steinkohle, für die KWK-Anlagen I 1) - 3) Erdgas an, so emittieren die HKW für die in Tabelle 1 vorgegebenen Dienstleistungen 54 %, 50 % bzw. 57 % weniger CO<sub>2</sub> als die Einzelanlagen. Im Beispielsfall Gegendruckanlage hat man 98 t CO<sub>2</sub> aus Erdgas mit 105 t + 107 t = 212 t CO<sub>2</sub> aus Kohle zu vergleichen. Die Brennstoffprämissen zugunsten der KWK steigert also deren CO<sub>2</sub>-Vermeidung auf mehr als das Doppelte des technisch bedingten Effektes. Leider ist es logi-

scherweise unmöglich, diesen „Doppeleffekt“ verursachungsgerecht auf seine zwei Einflußfaktoren „Technik“ und „Brennstoff“ aufzuteilen, denn die Bezugsbasis dieser zwei Faktoren ist ja verschieden. Die hier maßgebliche Aussage ist die, daß durch Einsatz von Erdgas in einem HKW an Stelle von Steinkohle wesentlich mehr CO<sub>2</sub> vermieden wird, als das HKW gegenüber der Kombination „Kraftwerk plus Fernheizwerk“ bei gleicher Einsatzenergie dank der KWK-Technik zu vermeiden vermag.

In den früheren Fernwärme-Strategien der Nach-Ölkrisezeit spielte die heimische Steinkohle eine entscheidende Rolle als HKW-Brennstoff. Wenn man bedenkt, daß der Einsatz in HKW eine besonders rationelle, umweltfreundliche Kohleverwendung zum energiepolitisch nach wie vor akuten Zweck der versorgungssicheren Ölablösung darstellt, so sind Kohle-HKW im Rahmen rationaler Energiepolitik u. E. in einer besseren Position als Gas-HKW.

Läßt man die Erdgas-Prämisse einmal zugunsten der Einzelanlagen gelten und betreibt die Koppelanlagen I 1) und I 2) nach der alten Devise „Kohle per Rohr“ mit Steinkohle, so wird deren energietechnischer Vermeidungseffekt neutralisiert und die Koppelproduktion verursacht 28 % bzw. 39 % mehr CO<sub>2</sub> als die Einzelerzeugung im Kraft- und im Heizwerk aus Gas. Nimmt man der Vollständigkeit halber beim BHKW Dieselkraftstoff an, so behält es gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung auf Gasbasis einen CO<sub>2</sub>-Vorteil von lediglich 5 %.

- b) Von dieser mehr theoretischen Erörterung ist wiederum zur Beurteilung der KWK als energiepolitische Option der Raumheizungs-Modernisierung und Heizölablösung überzugehen. Bei dieser Option werden die beiden kombinierten allgemeinen Einflußfaktoren der CO<sub>2</sub>-Vermeidung, also KWK-Technik und C-Gehalt des Brennstoffs, durch die spezielle empirische Annahme überlagert, daß bestehende, im Durchschnitt vergleichsweise unrationelle Hausheizungen durch Koppel-Fernwärme ersetzt werden, während der Koppelstrom wie üblich zum Ersetzen von Kondensationsstrom während der Heizperiode gedacht ist. Unter der Hypothese eines einheitlichen Brennstoffs würden, wie oben erläutert, aus energietechnischen Gründen ca. 20 - 30 % CO<sub>2</sub> vermieden. Geht man nun bei den Heizungen von leichtem Heizöl, bei den Mittellastkraftwerken von Steinkohle aus und befeuert die zu errichtenden HKW mit Erdgas, so vermeidet die KWK-Option je nach Anlage 51 %, 48 % bzw. 55 % CO<sub>2</sub>. Dies entspricht sozusagen dem „KWK-Wunschmodell“ der heutigen energie- und klimapolitischen Diskussion. Überträgt man es auf die Verhältnisse in den

NBL, wo bei den Kraftwerken und den Heizungen Braunkohle bzw. Braunkohlenbriketts dominieren, so gelangt man zu hypothetischen CO<sub>2</sub>-Reduktionen von sogar 62 %, 58 % bzw. 64 %. Im Falle des HKW I 1) stehen den 124 t + 131 t = 255 t CO<sub>2</sub> aus Braunkohle lediglich 98 t CO<sub>2</sub> aus Erdgas gegenüber.

Stellt man das Erdgas-Wunschmodell sozusagen auf den "deutschen Normalfall" Steinkohle-HKW um, so geht der CO<sub>2</sub>-Vermeidungseffekt auf 19 % bei der Gegendruckanlage und auf 14 % bei der Entnahmekondensation zurück, d.h. auf durchschnittlich 1/3. Dies verdeutlicht nochmals den wesentlichen Einfluß der Brennstoffprämisse.

- c) Im Vergleich zur Alternative "Brennwertkessel und Kohlekraftwerk" sind die KWK-Anlagen I 1-3) auf Erdgasbasis 35 %, 34 % bzw. 40 % "klimafreundlicher". Jedoch im besagten "deutschen Normalfall" der HKW-Expansion auf heimischer Energiebasis schlägt dieser Vorteil in einen CO<sub>2</sub>-Nachteil von 8 % bzw. 10 % um. Dieser wächst auf 30 % bzw. 35 % an, wenn die ungekoppelte Stromerzeugung nicht im alten Kraftwerk II 1), sondern in dem fortschrittlichen GuD-Kraftwerk II 2) auf gemischter Gas/Kohle-Basis (1:3) stattfindet. Das System "Brennwertkessel und GuD-Kraftwerk" emittiert lt. Tabelle 1 für 100 MWh Strom- und 167 MWh Wärmedienstleistungen 46 t + (66 t + 13 t) = 125 t CO<sub>2</sub>, während das Gegendruck-HWK I 1) bei Kohle-Input 163 t CO<sub>2</sub> erzeugt, also 30 % mehr.

In der "Ergebnistabelle" 2 sind die wichtigsten Aussagen des Vergleichs der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Koppelanlagen mit Einzelanlagen zusammengestellt. Der Einfluß der Energie-Einsparung kommt bei den mit der hochgestellten Ziffer 2 gekennzeichneten 5 Positionen zum Ausdruck. Bei den übrigen 31 Angaben handelt es sich um eine Mischung aus energietechnischen und brennstoffbedingten Effekten. Der Einfluß der Brennstoffbasis auf die CO<sub>2</sub>-Vermeidung mittels KWK ergibt sich aus einem Vergleich benachbarter Spaltenelemente. Das Gegendruck HWK auf Kohlebasis vermeidet gegenüber Ölkesseln und Kohlestrom 19 % CO<sub>2</sub>. Wird es auf Erdgas umgestellt, so erhöht sich sein CO<sub>2</sub>-Vorteil auf 51 %, d.h. auf das 2,7-fache.

Beim Fernheizwerk wird der Brennstoff-Effekt durch Vergleich benachbarter Zeilelemente deutlich. Stellt man z.B. das Fernheizwerk nebst Kraftwerk von Steinkohle auf Erdgas um, so schlägt der CO<sub>2</sub>-Vorteil des Entnahme-HKW von 17 % in eine Mehremission von 39 % um.

Dieser und manch' anderer hier angestellte Vergleich relativiert die pauschal behauptete CO<sub>2</sub>-Überlegenheit der KWK, ändert aber selbstverständlich nichts an der Tatsache, daß mit Erdgas betriebene KWK-Anlagen die CO<sub>2</sub>-ärmsten Strom- und Wärmedienstleistungen ermöglichen, was aus den "Erdgas-Zeilen" der Tabelle 2 hervorgeht.

*Arbeitsteilung: HKW für unsere Kohle, Gas-Einzelanlagen für das Klima*

Wie die Beispiele zeigen, ist die KWK eine nicht unter allen Umständen, sondern unter bestimmten Bedingungen klimaschonende Energietechnik. Das Spektrum der plausiblen oder realistischen Annahmen im Rahmen von Systemvergleichen ist derart groß, daß energiepolitisch verwertbare Aussagen zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung mittels KWK eigentlich nur in Bezug auf definierte Referenzfälle möglich sind.

In Tabelle 2 sind einige realistische, energie- und klimapolitisch interessant erscheinende Systemvergleiche durch Einrahmung hervorgehoben.

Die herausragende CO<sub>2</sub>-Vermeidung der Motor - BHKW von 55 % in den ABL und von 64 % in den NBL beruht auf der Verwendung von Erdgas als Treibstoff und auf den relativ geringen Verteilungsverlusten. Dem steht die hier nicht näher zu erläuternde enge Limitierung des Einsatzpotentials gegenüber.

Nun sollte man nicht davon ausgehen, daß sich eine KWK-Expansion in Deutschland hauptsächlich auf Erdgas-Basis vollzieht, was klimapolitisch natürlich ideal wäre. Gewichtige energie- und strukturpolitische Gründe sprechen für die heimische Steinkohle als HKW-Input zur Ölsubstitution. In diesem „deutschen Standardfall“ beträgt die CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei den für kommunale Versorgungskonzepte prädestinierten Gegendruckanlagen nur 19 %. Kohle-Fernwärme kann als versorgungssicherer Ölersatz demnach nicht zugleich als scharfe Waffe gegen den Treibhauseffekt dienen.

Letzterem Zweck erheblich besser dienlich ist die in Gang kommende Umstellung vom Öl- zum Gaskessel in Verbindung mit hocheffizienter Brennwerttechnik. Will man sie mit der KWK-Option vergleichen, so ist den Heizungsemissionen das CO<sub>2</sub> hinzuzurechnen, das bei der Erzeugung einer dem Koppelstrom gleichen Menge Kondensationsstrom aus Kohle entsteht. Das a priori nicht erwartete Ergebnis lautet: Bei der HKW-Option auf Kohlebasis entsteht mehr CO<sub>2</sub> als bei der Einzelanlagen-Option mit gemischter Brennstoffbasis und zwar 8 bis 10 %.

Ferner darf man nicht nur bei der Heizung, sondern auch beim Kraftwerk technischen Fortschritt unterstellen. Durch Kombination von kohlebefeuertem Dampferzeuger mit erdgasbefeuerter Gasturbine lasse sich der Anlagenwirkungsgrad z.B. auf 0,45 erhöhen. Das Einsatzverhältnis von Gas und Kohle betrage 1 zu 3 (Anlage II 2). In diesem Falle emittieren die HKW 30 bis 35 % mehr CO<sub>2</sub> als die moderne Einzelanlagen-Kombination.

Es drängt sich hier freilich der Einwand auf, daß diese CO<sub>2</sub>-Überlegenheit der Einzelanlagen im Vergleich zu den HKW größtenteils auf dem „CO<sub>2</sub>-Bonus“ des Erdgases beruht. Dieser kritische Hinweis ist berechtigt und für das in diesem Beitrag geäußerte Anliegen des Autors auch hilfreich, denn er unterstreicht implizit, daß die KWK-Technik allein für eine CO<sub>2</sub>-verringende Strom- und Wärmeerzeugung nicht hinreicht.

Darüberhinaus hat eine moderne Einzelanlagen-Option auf Kohle- und Gasbasis den Vorzug der deutlich besseren Ausnutzung des viel begehrten Kohlenwasserstoffs Erdgas im Vergleich zu dessen Einsatz in KWK-Anlagen. Der Gesamtnutzungsgrad des Erdgases als Verhältnis der Energiedienstleistungen (Tab. 1, Spalte 1) zum Energieeinsatz (Spalte 3) beträgt bei den 3 KWK-Anlagentypen I 1) - 3) 0,55, 0,49 bzw. 0,58. Bei einem modernen Versorgungssystem, bestehend aus Brennwertkesseln II 5) und einem GuD-Kraftwerk II 2) steigt der Erdgasnutzungsgrad auf 0,70. Das erklärt sich im wesentlichen daraus, daß der größte Teil des insgesamt eingesetzten Gases in einem Brennwertkessel mit erheblich höherer Effizienz umgewandelt wird als das in den KWK-Anlagen möglich ist.<sup>9)</sup> Auf die CO<sub>2</sub>-Vermeidung übertragen läßt sich daraus der meines Erachtens bemerkenswerte Schluß ziehen, daß die spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidung des Erdgases (pro Energieeinheit) in modernen Einzelanlagen-Systemen größer ist als in KWK-Anlagen. Mit anderen Worten: In Einzelanlagen läßt sich das energiepolitisch immer bedeutsamer werdende Erdgas klimapolitisch besser nutzen als in KWK-Anlagen. Daraus ergibt sich ein Hilfsargument für den Einsatz deutscher Steinkohle in HKW: Er verstärkt die klimaschonende Wirkung des Erdgases. Dieses Rollenspiel von Erdgas und Kohle führt allerdings nur dann zu einer CO<sub>2</sub>-Verringerung per saldo, wenn die HKW-Kohle aus der reinen Stromerzeugung abgezogen wird. Bei HKW-Einsatz verursacht Steinkohle pro Energiedienstleistung 30 - 40 % weniger CO<sub>2</sub> als bei ihrer Verstromung.

*Fazit:*

KWK-Anlagen auf Erdgasbasis ermöglichen die CO<sub>2</sub>-ärmsten konventionell erzeugten Strom- und Wärme-Dienstleistungen. Diese Tatsache ist allerdings für die Energie- und Umweltpolitik keine allein maßgebliche Entscheidungshilfe. Es kommt darauf an, ob Erdgas-HKW energiewirtschaftlich vernünftig, energiepolitisch realistisch und klimapolitisch ergiebig (Potential) sind.

Bei Beurteilungen der KWK als CO<sub>2</sub>-Vermeidungstechnik sollten unbedingt einerseits die nationalen Ressourcenbedingungen und andererseits die Fortschritte der Heizungs- und Kraftwerkstechnik berücksichtigt werden. Für die derzeit zu beobachtende pauschale klimapolitische Lobpreisung der KWK besteht bei differenzierender Betrachtung wenig Anlaß. Unter den energie- und wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen der Bundesrepublik besteht der klimapolitische Nutzen der KWK darin, daß sie die klimaschonendste Verwendung unserer Kohle ermöglicht. Das klimafreundliche Erdgas ist in modernen Einzelanlagen nützlicher.

## Anmerkungen:

- 1) Die Irreführung ist vor allem darin zu sehen, daß die bessere Brennstoffausnutzung der KWK hauptsächlich der niederwertigen Fern- oder Nahwärme zugute kommt. Bei gleichem Input erzeugt ein Kraftwerk mindestens 50 % mehr hochwertigen Strom als ein HKW.
- 2) Vgl. die Studie „Rationelle Energieverwendung und -erzeugung ohne Kernenergienutzung“ des Prognos-Instituts vom Dezember 1987 (im Auftrag des Landes NRW), sowie das „Grüne Energiewende Szenario 2010“ vom Juli 1988 und das darauf beruhende „CO<sub>2</sub>-optimierte“ Wende-Szenario vom August 1990 des Öko-Instituts.
- 3) Im Schlußbericht der 1. Klima-Enquete-Kommission vom Oktober 1990 werden im Zusatzvotum der Mitglieder Hennicke, Müller, Bach et al. HKW als „Stromsysteme“ aufgefaßt und hinsichtlich ihrer spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen (pro kWh) mit einem Atom- und einem Steinkohle-Kraftwerk verglichen. BT-Drucksache 11/8030, S. 741. Die Berechnungen entstammen der für das Land Hessen erstellten Studie „Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)“ des Öko-Instituts Darmstadt und der GH Kassel vom August 1989. Vgl. hier S. 278.  
Zu den Arbeiten der Enquete-Kommission zum „CO<sub>2</sub>-Minderungspotential der KWK“ vgl. Fahl, Pfeifer, Voß in et 4/92, S. 229-237. Die Autoren sprechen von einer „enormen Steigerung der Stromkennzahl“ (Strom/Wärme-Verhältnis) in den Potentialabschätzungen (S. 231). Bei „optimaler Entwicklung“ stammt in 2005 über 1/4 der ges. Stromerzeugung aus KWK-Anlagen gegenüber 8-9% heute.
- 4) Die energetischen Daten der Tabelle 1 stammen im wesentlichen aus der Arbeit „Energetische und ökologische Bewertung der Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung“ von A. Reichl in BWK, Juni 1990, S. 325-336.  
Den CO<sub>2</sub>-Berechnungen liegen die von K. W. Birnbaum und H.-J. Wagner in dem Aufsatz „Einheitliche Berechnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen“ (et 1/2 1991, S. 78-80) angegebenen, auf den Brennstoffeinsatz bezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren zugrunde.
- 5) Zur Berechnung werden für die beiden Systeme mit relevanten Betriebsmonaten gewichtete Energie-Intensitäten (Umkehrungen von Systemwirkungsgraden) ermittelt. Dabei fungieren die Angaben in den Spalten 1 und 3 der Tabelle 1 als Monatswerte. Zur Verdeutlichung: Das System „Fernheizwerk II 3) im Winter plus Kraftwerk I 1) ganzjährig“ benötigt  $8 \times 318 \text{ MWh} + 12 \times 312 \text{ MWh} = 6288 \text{ MWh}$  Input. Das System „HKW I 1) im Winter plus Kraftwerk I 1) im Sommer“ verbraucht  $8 \times 486 \text{ MWh} + 4 \times 312 \text{ MWh} = 5136 \text{ MWh}$ , also 18 % weniger. Bei 6-monatiger Heizperiode sinkt der HKW-Vorteil auf 15 % pro Jahr. Es sei angemerkt, daß es bei solchen jahresbilanzierenden Analysen und Vergleichen keine Rolle spielt, ob der KWK-Vorteil dem Strom oder der Fernwärme gutgeschrieben wird.
- 6) Diese Einsicht impliziert eine kalorische, vom Energiegehalt der Koppelprodukte bestimmte Aufteilung des Energieeinsatzes auf Strom und Fernwärme, sodaß beide mit der gleichen Effizienz erzeugt werden. Ihr steht die verbreitete Praxis entgegen, den energetischen KWK-Vorteil vollständig der Wärme zugute kommen zu lassen: Arbeitswert-Bewertungsverfahren, Stromgutschrift.  
Die Koppelproduktbewertung richtet sich grundsätzlich nach dem betrieblichen Zweck.
- 7) Es ist zu beachten, daß wir vereinfachend annehmen Kohlen, Gas und Öl könnten von einer bestimmten Anlage mit dem gleichen Wirkungsgrad umgewandelt werden: Vernachlässigung brennstoffbedingter Wirkungsgradunterschiede, vgl. Tab. 1, Anm. 1). Es werden z. B. in HKW mit Erdgas 5 - 6 % höhere Wirkungsgrade erzielt als mit Kohle.

- 8) In diesem Falle wird darüber hinweggesehen, daß Schweröl einen 7 % höheren CO<sub>2</sub>-Faktor hat als leichtes Heizöl (Näherungslösung).
- 9) Zu dieser energiepolitisch interessanten Spezialfrage der besseren Erdgasnutzung vgl. U. Beckhaus, Vorteile von Blockheizkraftwerken, et 8/1988, S. 606-610.  
Die Nutzungsgradsteigerung auf 0,70 in unserem Beispiel ergibt sich wie folgt: Das Kombikraftwerk II 2) benötigt für 100 MWh elektrische Dienstleistung 263 MWh Energieeinsatz, davon 197 Kohle für den Dampferzeuger, 66 Gas für die Gasturbine. Unterstellt man für den Dampfprozeß einen Gesamtnutzungsgrad von 0,32 wie beim Kraftwerk II 1), so liefert er 63 MWh Dienstleistungen. Der Gasprozeß steuert dann den Rest von 37 MWh Stromdiensten bei, der zur Raumwärme von 167 bzw. 124 MWh aus Brennwertkesseln II 5) zu addieren ist. Dem Gesamtoutput von 204 bzw. 161 MWh steht ein Gasinput von  $66 + 226 = 292$ , bzw.  $66 + 168 = 234$  MWh gegenüber. Die beiden Output/Input-Relationen sind gleich 0,70 bzw. 0,69.

Tabelle 1: CO<sub>2</sub>-Emissionen von Koppel- und Einzelanlagen auf verschiedener Brennstoffbasis bei vorgegebener Strom-Dienstleistung

	1 Energiedienst- <sup>3)</sup> leistung (MWh)		2 Sekundär- <sup>2)</sup> energie (MWh)		3 Primärenergie <sup>1)</sup> (MWh)	4 t CO <sub>2</sub> aus <sup>5)</sup>				
	a „Elektri- zität“	b Raum- wärme	a Strom	b Fern- wärme	Gesamtaufwand	a Stein- kohle	b Braun- kohle	c Gas	d Öl	
<b>I. Koppelanlagen <sup>4)</sup></b>										
1) Gegendruckanlage (100 MW <sub>e</sub> ) (SZ = 0,45; μ = 0,80)	100	167	108 31 %	242 69 %	486	163	193	98	138	
2) Entnahmekondensation (500 MW <sub>e</sub> ) (SZ = 0,60; μ = 0,70)	100	124	108 37,5 %	180 62,5 %	457	153	181	92	129	
3) Blockheizkraftwerk (0,5 MW <sub>e</sub> ) (SZ = 0,56; μ = 0,76)	100	154	108 36 %	192 64 %	436	—	—	88	116 <sup>6)</sup>	
<b>II. Einzelanlagen</b>										
1) Kondensationskraftwerk (> 100 MW <sub>e</sub> ) (μ = 0,38)	100	—	108	—	312	105	124	63	88	
2) GuD-Kraftwerk (> 100 MW <sub>e</sub> ) (μ = 0,45. Gas/Kohle = 1/3)	100	—	108	—	263	66	+	13	—	
3) Fernheizwerk (50 MW <sub>th</sub> ) (μ = 0,80)	—	167	—	232	318	107	126	64	90	
		124	—	172	236	79	94	47	67	
		154	—	214	293	98	116	59	83	
4) Zentralheizung (alt) (μ = 0,68)	—	167	—	—	363	122	131 <sup>7)</sup>	73	96 <sup>6)</sup>	
		124	—	—	270	90	97	54	72	
		154	—	—	335	112	121	67	89	
5) Brennwertkesselheizung (μ = 0,98)	—	167	—	—	226	—	—	46	—	
		124	—	—	168	—	—	34	—	
		154	—	—	208	—	—	42	—	

-95-

SZ = Strom/Wärme-Verhältnis

μ = Anlagenwirkungsgrad

- 1) Kohle, Gas oder Öl bei Annahme gleicher Umwandlungseffizienz, incl. Förderung, Transport, Lagerung, Verarbeitung (z. B. Raffinerie).
- 2) Umwandlungsausstoß.
- 3) Sekundärenergie abzüglich Verteilungs-, Umwandlungs-, Speicherverluste etc.
- 4) Ohne Wärmespitzen-Kessel.
- 5) CO<sub>2</sub>-Faktoren (kg CO<sub>2</sub>/MWh Einsatz): Steinkohle 335, Braunkohle 397, Briketts 360, Erdgas 201, Leichtöl 265, Schweröl 283.
- 6) Diesel, bzw. leichtes Heizöl.
- 7) Braunkohlebriketts.

Quellen: Reichl (BWK 6/90); GEMIS (1990), Birnbaum/Wagner (et 1-2/91).

Tabelle 2: CO<sub>2</sub>-Emission von KWK-Anlagen im Vergleich zu ausgewählten Einzelanlagen (1)

Einzelanlagen KWK-Anlagen	Fernheizwerk II3) plus Kraftwerk III1)		Ölkessel II4) plus	Brikettheizung II4) plus	Gas-Brennwertkessel II5) plus	
	Steinkohle	Erdgas	Kohle- Kraftwerk III1)	Braunkohlen- Kraftwerk III1)	Kohle-KW III1)	GuD-KW II2)
1) Gegendruck-HKW I1)						
Steinkohle	- 23% (2)	+ 28 %	- 19 %	- 36 %	+ 8 %	+ 30 %
Erdgas	- 54 %	- 23 % (2)	- 51 %	- 62 %	- 35 %	- 22 %
2) Entnahmekondensations- HKW I2)						
Steinkohle	- 17 % (2)	+ 39 %	- 14 %	- 31 %	+ 10 %	+ 35 %
Erdgas	- 50 %	- 17 % (2)	- 48 %	- 58 %	- 34 %	- 19 %
3) Blockheizkraftwerk I3)						
Dieselöl	- 43 %	- 5 %	- 40 %	- 53 %	- 21 %	- 4 %
Erdgas	- 57 %	- 28 % (2)	- 55 %	- 64 %	- 40 %	- 27 %

(1) Zu den technischen Daten, Input- und Output-Werten und CO<sub>2</sub>-Faktoren siehe Tabelle 1. Alle Werte beziehen sich nur auf die Heizperiode.

(2) Reiner Energiespar-Effekt. Der reine Brennstoff-Effekt kann bei den KWK-Anlagen durch Vergleich benachbarter Spaltenelemente bestimmt werden.