CO_2-Emissionsminderung durch gekoppelte Energieerzeugung – brennstoff- oder technologiebedingt?

*Von Ulrich Fahl, Thomas Pfeifer und Alfred Voß, Stuttgart *)*

Die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung gilt als eine Maßnahme zur Minderung energiebedingter CO_2-Emissionen. Will man den CO_2-Ausstoß der getrennten und gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme vergleichen, so ist zu berücksichtigen, daß die Emissionsminderung nicht nur auf verschiedenen Systemnutzungsgraden, sondern auch auf dem unterschiedlichen Kohlenstoffgehalt der eingesetzten Brennstoffe beruht. Die Autoren stellen ein Verfahren vor, wie diese beiden Minderungseffekte rechnerisch getrennt werden können, und zeigen die Anwendung anhand dreier Versorgungsaufgaben.

Summary of the report:

CO_2 Emissions from Combined Energy Generation – Conditional on Fuel or Technology?

To overcome the present and future threat of environmental and climatic problems, the increased utilization of efficient technologies is proposed in the energy sector. Combined heat and power generation (CHP) is repeatedly discussed as one of the measures coming into question.

One reason for the positive assessment of combined generation is the relatively high degree of utilization of this conversion process. If one compares the technologies for combined heat and power generation with plants for separate generation and limits oneself to a comparison of the technology conditioned utilization factors of systems in use today, primary energy savings in the region of 10 to 30% are the result. In evaluating the inherent CO_2 emissions, however, one encounters a problem typical for CHP systems: the CO_2 reduction effect in comparison to separate generation does not only stem from the differing total system degree of utilization (technology effect), but also on the use of fuels with varying carbon content (fuel effect). In order to compare and evaluate the individual options, a separation of these effects is necessary.

This article presents a method for carrying out such a separation. The result is calculation equations for the average and maximum fuel, respectively technology effect.

Afterwards three supply cases are shown in which the method to separate the reduction effects is applied as an example. The supply requirements vary with regard to power and heat demand. The heat requirement remains unchanged, whereas the power requirement doubles in each case. The energy requirement per supply case is covered by different plant combinations. In this reference case is a hardcoal-fired condensation power plant with oil central heating systems, the CHP system as a natural gas total energy unit with a natural gas peak load boiler (incl. local heat network) and a technically advanced system namely a natural gas gas and steam power plant with natural gas calorific boiler.

In the reference case a total reduction of CO_2 emissions of between 43 and 53 % is achieved. It must be pointed out that the fuel effect achieved more than the technology effect coupled with the high utilization factor of combined generation. This means, that the benefits of CHP in these specific cases result mainly from the use of low-carbon fuels. This result is also supported by the fact that advanced systems for separate generation show a similar volume of CO_2 reduction. In these supply systems the fuel effect is also greater than the technology effect due to the use of CO_2-favourable natural gas.

The supply cases discussed here were selected as being exemplary for the use of total energy units. However, no difficulties are anticipated when the method of separation of the reduction effect shall be applied to more complex supply systems. Consequently it should be employed in the evaluation of other CHP systems in future (G & S heat and power plants, hardcoal steam turbine heat and power plants etc.).

1 Problemstellung

Zur Bewältigung gegenwärtiger bzw. in naher Zukunft drohender Umwelt- und Klimaprobleme wird in der Energietechnik die verstärkte Nutzung effizienter Technologien vorgeschlagen. Die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme (Kraft-Wärme-Kopplung, KWK) wird als eine der in Frage kommenden Maßnahmen immer wieder diskutiert. So bildet der verstärkte Einsatz von KWK-Anlagen einen der Eckpfeiler im CO_2-Minderungsprogramm der Bundesregierung [1].

Ein Grund für die positive Einschätzung der Kraft-Wärme-Kopplung liegt in dem vergleichsweise hohen Nutzungsgrad dieses Umwandlungsprozesses. Stellt man die Techniken der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme den Anlagen der getrennten Erzeugung gegenüber und beschränkt sich dabei auf den Vergleich der technologisch bedingten Nutzungsgrade heute gebräuchlicher Anlagen, so ergibt sich eine Primärenergieeinsparung von über 30 % [2].

Mit der Primärenergieeinsparung geht auch eine Verminderung der CO_2-Emissionen einher. Der Vergleich des CO_2-Ausstoßes einer gekoppelten mit einer getrennten Erzeugung fällt dabei umso stärker zugunsten der KWK aus, je mehr kohlenstoffreiche Brennstoffe in getrennten Erzeugungssystemen und je mehr kohlenstoffarme Brennstoffe in gekoppelten Erzeugungssystemen eingesetzt werden. Dies wird aus einem in Abschnitt 4.1 diskutierten Vergleich zweier Versorgungssysteme (*Bild 4*, Fall Ia und

*) Dr. rer. pol. *U. Fahl* und Dipl.-Phys. *Th. Pfeifer* sind Mitarbeiter, Prof. Dr.-Ing. *A. Voß* ist Leiter des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart.

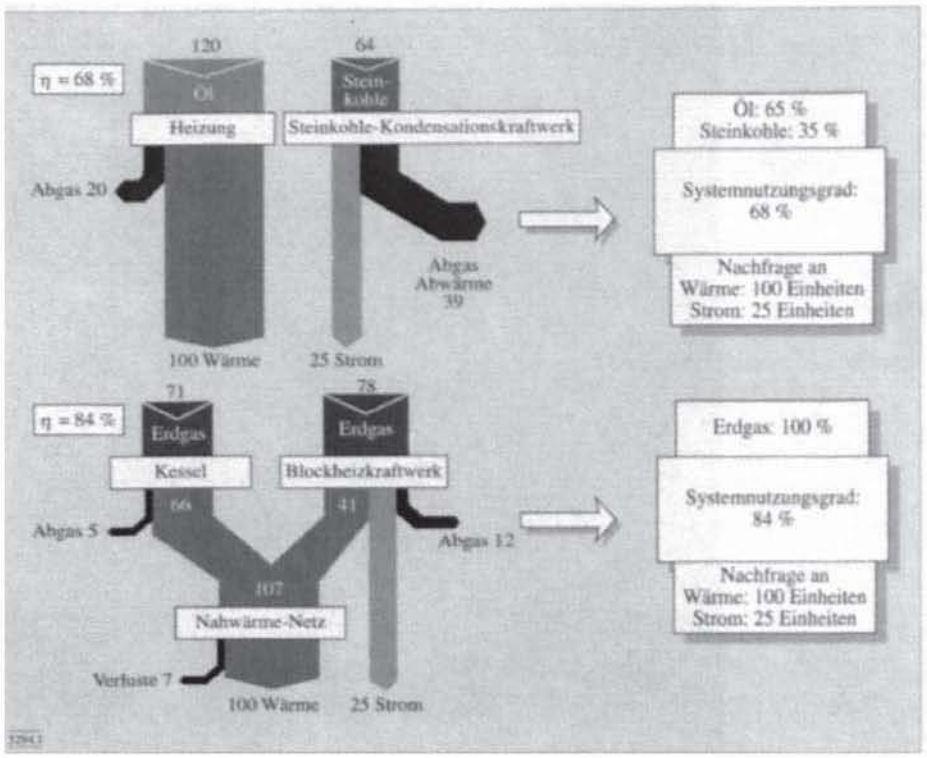

Bild 1. Schematische Darstellung von Versorgungssystemen

Figure 1. Diagramm of supply systems

lb) deutlich. Hier wird im Vergleichssystem »getrennt« mit einem kohlegefeuerten Kondensationskraftwerk zur Stromerzeugung und einer Öl-Zentralheizungsanlage zur Wärmeerzeugung und im Vergleichssystem »gekoppelt« mit einem erdgasgefeuerten Blockheizkraftwerk gerechnet. Aufgrund der CO_2-günstigeren Brennstoffzusammensetzung und des höheren Systemnutzungsgrades des gekoppelten Systems ergibt sich gegenüber der getrennten Variante eine CO_2-Einsparung von 44 %.

An diesem Beispiel wird ein grundlegendes Problem der Bewertung der CO_2-Emissionen von KWK-Systemen deutlich: Der CO_2-Minderungseffekt im Vergleich zur getrennten Erzeugung beruht nicht nur auf einem unterschiedlichen Gesamtsystemnutzungsgrad (»Technologie-Effekt«), sondern auch auf dem Einsatz von Brennstoffen mit unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt (»Brennstoff-Effekt«). Auf den ersten Blick scheint an der gesamten CO_2-Minderung von 44 % der »Technologie-Effekt« mit 19 % (Primärenergie-Mindereinsatz) und der »Brennstoff-Effekt« (als Differenz) mit 25 % beteiligt zu sein.

In der Vergangenheit ist eine Vielzahl von Vergleichen der CO_2-Emissionen einer gekoppelten und getrennten Energieerzeugung angestellt und veröffentlicht worden. Die darin betrachteten Technologien und die mit ihrer Anwendung verbundenen CO_2-Emissionen wurden zumeist gegenübergestellt, ohne die beiden Effekte zu trennen. Erst mit [3] ist eine Veröffentlichung erschienen, die die Kraft-Wärme-Kopplung unter dem Gesichtspunkt einer Trennung der CO_2-Minderungseffekte analysiert.

Ziel dieses Beitrages ist es, auf beide Minderungseffekte der Kraft-Wärme-Kopplung stärker als bisher hinzuweisen. Dazu wird eine Methodik vorgestellt, die es erlaubt, den »Brennstoff-Effekt« und den »Technologie-Effekt« zu quantifizieren. Anschließend wird dieses Verfahren auf verschiedene Versorgungsfälle angewendet, um die beiden Effekte beispielhaft zu analysieren.

2 Schematische Betrachtung eines Versorgungssystems

Die Primärenergiebilanz von Systemen der gekoppelten oder getrennten Erzeugung von Strom und Wärme wird oft anhand eines Flußdiagrammes der Energieströme dargestellt. Ganz allgemein lassen sich solche schematischen Darstellungen eines Versorgungssystems durch drei Größen beschreiben. Dabei handelt es sich um

- die Energiemengen der nachgefragten Endenergien an Strom und Wärme,
- den Gesamtsystemnutzungsgrad und
- die Anteile der eingesetzten Brennstoffe am gesamten Primärenergieeinsatz.

Für die eingangs diskutierten Versorgungsfälle ist dies in *Bild 1* schematisch dargestellt.

3 CO_2-Emissionen – Trennung der Minderungseffekte

3.1 Berechnung der CO_2-Emissionen eines Versorgungssystems

Für ein beliebiges Versorgungssystem lassen sich die CO_2-Emissionen E_{CO2} mit Hilfe

- der spezifischen Emissionsfaktoren f_i für den Brennstoff i,
- der Energiemenge N_{End} der nachgefragten Energieträger Strom und Wärme,
- des Gesamtsystemnutzungsgrades η und
- des Anteils A_i des eingesetzten Brennstoffes i am gesamten Primärenergieeinsatz berechnen:

$$E_{CO2} = \frac{N_{End}}{\eta} \cdot \sum_i f_i A_i \qquad (1)$$

Der Einfluß der Brennstoffstruktur kommt dabei durch den mittleren spezifischen Emissionsfaktor für den vorliegenden Brennstoffmix zum Ausdruck, der im folgenden in der Größe FA zusammengefaßt wird:

$$\sum_i f_i A_i = FA \qquad (2)$$

Für den Vergleich der CO_2-Emissionen zweier Versorgungssysteme muß zunächst festgelegt werden, welches Versorgungssystem den Referenzfall darstellt. Soll der CO_2-Ausstoß der beiden Systeme 1 und 2 ($E_{CO_2 1}$, $E_{CO_2 2}$) miteinander verglichen werden und bildet das System 1 den Referenzfall, so errechnet sich die durch das System 2 erzielte anteilsmäßige CO_2-Minderung M aus

$$M = \frac{E_{CO_2 1} - E_{CO_2 2}}{E_{CO_2 1}} \qquad (3)$$

3.2 Getrennte Ausweisung von »Technologie-« und »Brennstoff-Effekt«

Im folgenden wird versucht, diejenigen Anteile der CO_2-Minderung zu trennen, die einerseits auf der Verbesserung des Gesamtsystemnutzungsgrades (»Technologie-Effekt«) und andrerseits auf dem Einsatz von Brennstoffen mit unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt (»Brennstoff-Effekt«) beruhen.

Als ideales Ergebnis wünscht man sich, daß die Gleichung (3) auf die folgende Form gebracht wird:

$$M = M_{Te}(\eta) + M_{Br}(FA) \qquad (4)$$

In Gleichung (4) hängt der eine Anteil der CO_2-Minderung (M_{Te}) nur von den Systemnutzungsgraden (η) und der andere Anteil (M_{Br}) nur von den eingesetzten Brennstoffen (FA) ab. Es läßt sich zeigen, daß eine exakte Umformung dieser Art nicht möglich ist. Es kann jedoch eine Abschätzung vorgenommen werden, mit der angegeben werden kann, wie hoch der jeweilige Effekt maximal ist. Dazu wird (3) zunächst in die Form

$$M = 1 - \frac{\eta_1}{\eta_2} \cdot \frac{FA_2}{FA_1} \qquad (5)$$

gebracht.

Die Abhängigkeit der CO_2-Minderung M von den Nutzungsgraden und der Größe FA ist in *Bild 2* grafisch dargestellt.

3.2.1 Ermittlung des maximalen »Technologie-Effektes«

Setzt man in der Gleichung (5) die Terme, die die Brennstoffauswirkungen (FA) kennzeichnen, gleich (d. h. $FA_2/FA_1 = 1$), so klammert man den Minderungseffekt aufgrund unterschiedlicher Brennstoffe aus. Damit folgt, daß man die CO_2-Minderung auf der Basis unterschiedlicher Systemnutzungsgrade (»Technologie-Effekt«) berechnen kann aus

$$\underline{M}_{Te} = 1 - \frac{\eta_1}{\eta_2} \qquad (6)$$

Der Anteil der CO_2-Minderung, der auf dem »Brennstoff-Effekt« beruht, ergibt sich in diesem Fall aus

$$\underline{M}_{Br} = M - \underline{M}_{Te} = \frac{\eta_1}{\eta_2}\left(1 - \frac{FA_2}{FA_1}\right) \qquad (7)$$

Für das oben diskutierte Beispiel erhält man damit das schon bekannte Ergebnis

$\underline{M}_{Br} = 25\ \%$

$\underline{M}_{Te} = 19\ \%$ und

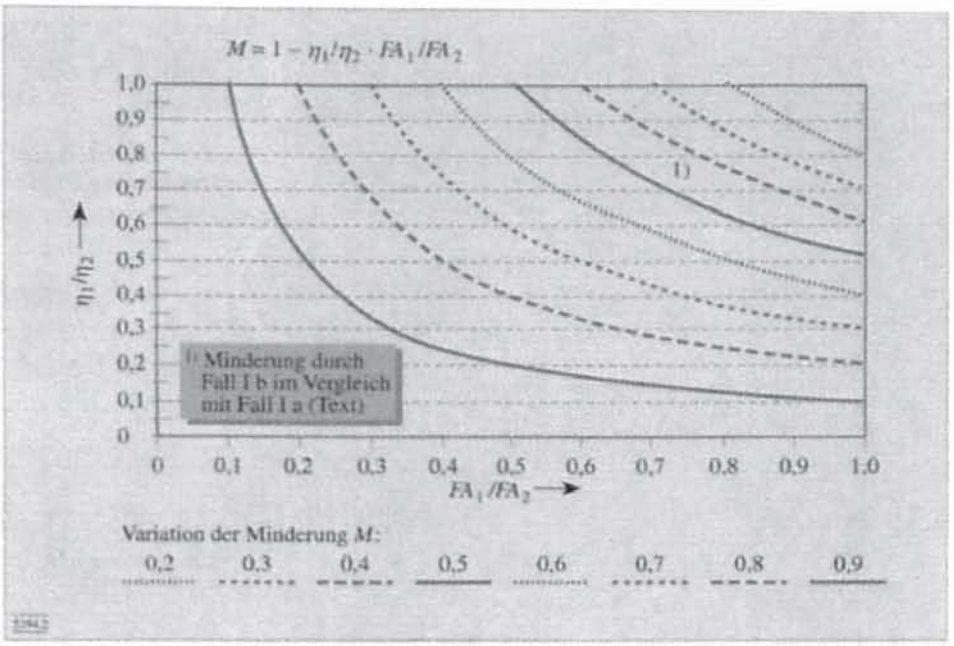

Bild 2. Grafische Darstellung der Gleichung 5

Figure 2. Graphical presentation of equation 5

$$M = \underline{M}_{Te} + \underline{M}_{Br} = 44\ \%$$

Der maximale »Technologie-Effekt« läßt sich aus *Bild 2* an den Schnittpunkten der Kurven mit dem rechten Rand der Grafik ($FA_2/FA_1 = 1$) herauslesen.

3.2.2 Ermittlung des maximalen »Brennstoff-Effektes«

Die beschriebene Trennung der beiden Minderungseffekte ist nicht eindeutig. Es gibt auch eine zweite Vorgehensweise, mit der die Trennung der beiden Effekte vollzogen werden kann. Dies führt auf den maximalen »Brennstoff-Effekt«.

Dazu sind in der Gleichung (5) die Gesamtsystemnutzungsgrade gleichzusetzen (d. h. $\eta_1/\eta_2 = 1$). Auf diese Weise klammert man den Minderungseffekt aufgrund des »Technologie-Effekts« aus. Dann folgt, daß sich die CO_2-Minderung durch den Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe (Brennstoff-Effekt) schreiben läßt als

$$M_{Br} = 1 - \frac{FA_2}{FA_1} \qquad (8)$$

Der Anteil der CO_2-Minderung, der auf dem »Technologie-Effekt« beruht, ergibt sich damit aus

$$M_{Te} = M - M_{Br} = \frac{FA_2}{FA_1}\left(1 - \frac{\eta_1}{\eta_2}\right) \qquad (9)$$

Für das in Abschnitt 1 erwähnte Beispiel erhält man

$M_{Br} = 31\ \%$

$M_{Te} = 13\ \%$ und

$M = M_{Te} + M_{Br} = 44\ \%$

Der maximale »Brennstoff-Effekt« läßt sich wieder aus *Bild 2* entnehmen. Er läßt sich an den Schnittpunkten der Kurven mit dem oberen Rand der Grafik ($\eta_1/\eta_2 = 1$) ablesen.

Das allgemeine Vorgehen bei der Berechnung und dem Vergleich von CO_2-Emissionen zweier Energieversorgungssysteme ist in *Bild 3* nochmals schematisch dargestellt. Ausgehend von der Endenergiemenge wird über den Gesamtsystemnutzungsgrad der Primärenergieeinsatz ermittelt. Im nächsten Schritt gewinnt man mit Hilfe des mittleren spezifischen CO_2-Emissionsfaktors die CO_2-Emissionen für den betrachteten Versorgungsfall. Bei der Ermittlung des maximalen »Technologie-« oder »Brennstoff-Effektes« entspricht der Berechnungsgang dem gestrichelt gezeichneten Pfad.

Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem Resultat der Rechnung im vorangegangenen Kapitel, erkennt man, daß $M_{Br} > \underline{M}_{Br}$ und $M_{Te} < \underline{M}_{Te}$. Trotz dieser

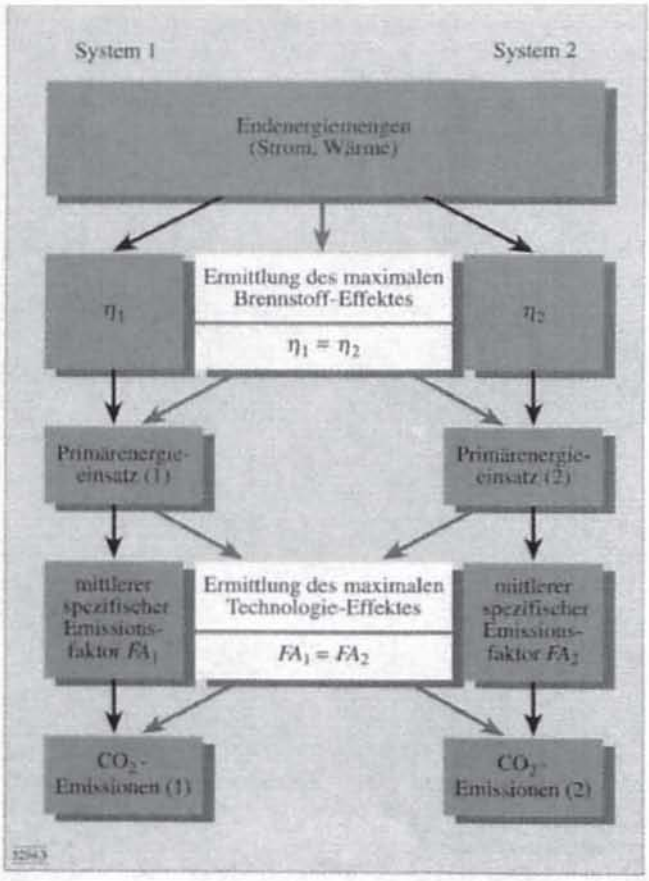

Bild 3. Allgemeiner Berechnungsgang bei der Ermittlung von CO_2-Emissionen

Figure 3. General course of calculating CO_2 emissions

Nicht-Eindeutigkeit läßt sich jedoch quantifizieren, wie groß die beiden Effekte maximal sind: Der »Brennstoff-Effekt« kann nicht größter als M_{Br} und der Technologie-Effekt« nicht größer als $\underline{M}_{Tc}$ sein.

Mit Hilfe der Größen für den maximalen »Technologie-« und »Brennstoff-Effekt« läßt sich die CO_2-Minderung durch das System 2 gegenüber System 1 auch mit

$$E_{CO_2 2} = E_{CO_2 1} \cdot (1 - M_{Tc,max})(1 - M_{Br,max}) \quad (10)$$

angeben. Diese Gleichung drückt aus, daß die zuzurechnende CO_2-Minderung von der Reihenfolge der beiden Maßnahmen (Nutzungsgradverbesserung und Veränderung des Brennstoffmixes) abhängt. Diese Maßnahmen müssen jedoch immer zugleich durchgeführt werden, da sie ihre Wirkung auch simultan erzielen. Daher ist eine eindeutige rechnerische Zuordnung der Minderung nicht möglich.

3.3 Der durchschnittliche CO_2-Minderungseffekt

Um das Problem der Nicht-Eindeutigkeit bei der getrennten Ausweisung der beiden CO_2-Minderungseffekte zu lösen, wird eine Bildung des arithmetischen Mittelwertes vorgeschlagen. Der durchschnittliche »Brennstoff-Effekt« $M_{Br,\varnothing}$ errechnet sich mit $M_{Br,\varnothing} = (M_{Br} + \underline{M}_{Br}) / 2$ und man erhält

$$M_{Br,\varnothing} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \frac{FA_2}{FA_1}) \cdot (1 + \frac{\eta_1}{\eta_2}) \quad (11)$$

Die Berechnungsgleichung für den durchschnittlichen »Technologie-Effekt« lautet entsprechend

$$M_{Tc,\varnothing} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \frac{FA_2}{FA_1}) \cdot (1 - \frac{\eta_1}{\eta_2}) \quad (12)$$

Angewendet auf das oben beschriebene Beispiel erhält man damit

$M_{Br,\varnothing} = 28$ % und

$M_{Tc,\varnothing} = 16$ %

4 Anwendung auf verschiedene Versorgungsfälle

Für die Bewertung unterschiedlicher Energieversorgungssysteme ist eine möglichst genaue Kenntnis der zeitlichen Verteilung und der sektoralen Aufgliederung der Energienachfrage, getrennt nach der jeweiligen Anwendungsart, eine wichtige Voraussetzung. Im Idealfall sollten der zeitlich hoch aufgelöste Verlauf der Wärme- und Stromnachfrage für das zu untersuchende Versorgungsgebiet bzw. -objekt bekannt sein. Auf diese Weise können Nachfrageschwankungen über einen bestimmten Zeitraum, z. B. über ein ganzes Jahr, berücksichtigt werden. Gerade für die Bewertung von Erzeugungstechnologien, die das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung ausnutzen, sollten die Verläufe sowohl der Wärme- als auch der Stromnachfrage vorliegen, um vor diesem Hintergrund abzuschätzen, ob die gleichzeitig erzeugten Energieformen Strom und Wärme sinnvoll genutzt werden können.

Der zeitliche Verlauf des Strom- und Wärmeverbrauchs ist bisher nur für wenige und meist nicht als repräsentativ einzuschätzende Versorgungsobjekte erhoben worden. Der nachfolgende Vergleich ausgewählter Energieversorgungssysteme bezieht sich wegen der lückenhaften Datengrundlage auf die Bereitstellung jeweils gleicher Wärme- und Strommengen, ohne den zeitlich gegebenenfalls unterschiedlichen Verlauf der Wärme- und Stromnachfrage explizit zu betrachten. Dies bedeutet im allgemeinen eine Bevorteilung der Technologien, die auf dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung beruhen.

Die Ausgangsbasis für den Vergleich der einzelnen Energieversorgungssysteme bilden drei verschiedene Versorgungsfälle, bei denen der Wärmebedarf gleich bleibt und der Strombedarf sich jeweils verdoppelt [4]. Der Energiebedarf jedes Versorgungsfalles wird durch verschiedene Anlagenkombinationen gedeckt. Die technischen Daten zu den verwendeten Technologien zeigt *Tafel 1*.

Der Primärenergieeinsatz für die Deckung eines bestimmten Energiebedarfs ist durch den Gesamtnutzungsgrad der untersuchten Versorgungssysteme bestimmt. Da dem folgenden Systemvergleich nicht die tatsächlichen Betriebszustände der Anlagen mit ihrem genauen zeitlichen Verlauf zugrunde gelegt werden können, ergibt sich dieser Nutzungsgrad vereinfacht aus dem Verhältnis der End- bzw. Nutzenergie zur eingesetzten Energie. Er läßt sich auf diese Weise mit Hilfe der Wirkungsgrade der einzelnen Technologien errechnen. Das bedeutet,

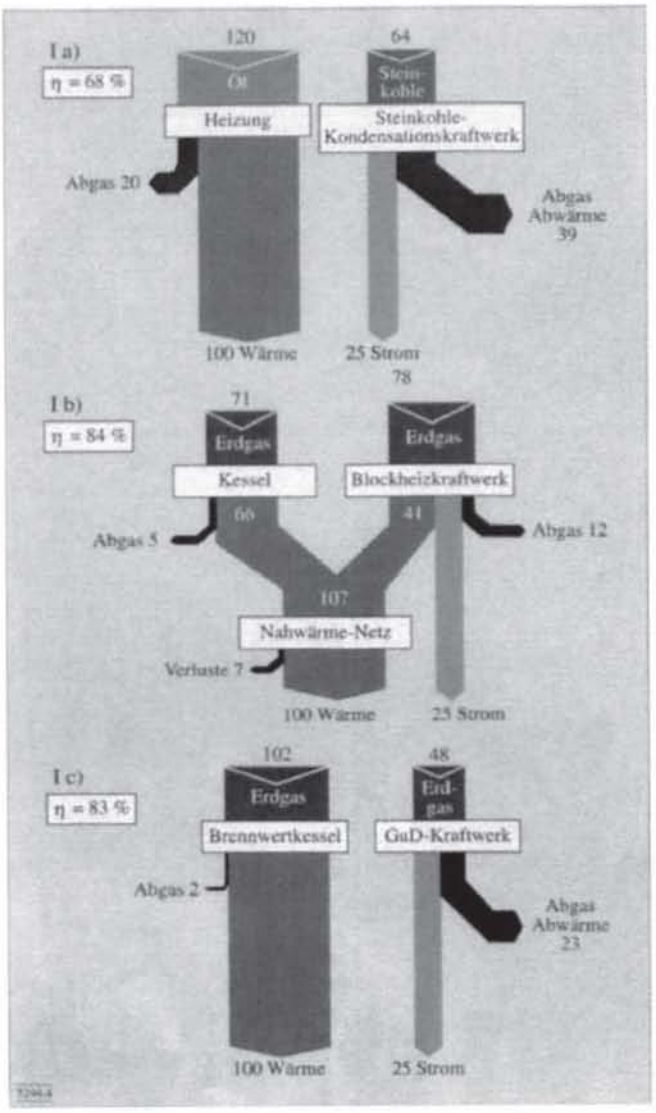

Bild 4. Energieflußdiagramme für den ersten Versorgungsfall

Figure 4. Energy flow diagram for the first supply case

Tafel 1. Technische Daten zu den betrachteten Technologien
Table 1. Technical data on the technologies considered

Technologie	Nutzungsgrad	elektrischer Nutzungsgrad	Brennstoff	Bemerkungen
Blockheizkraftwerk	85 %	32 %	Erdgas	gekoppelte Erzeugung
Heizkessel	91 %	–	Erdgas	gekoppelte Erzeugung
Kondensationskraftwerk	39 %	39 %	Steinkohle	getrennte Erzeugung
Zentralheizung mit Ölkessel	83 %[1]	–	Heizöl	getrennte Erzeugung
GuD-Kraftwerk	52 %	52 %	Erdgas	getrennte Erzeugung, fortgeschrittene Technik
Zentralheizung mit Brennwertkessel	98 %[2]	–	Erdgas	getrennte Erzeugung, fortgeschrittene Technik

[1] Anlagennutzungsgrad: 85 %, Verteilungsverluste im Gebäude: 2 %
[2] Anlagennutzungsgrad: 100 %, Verteilungsverluste im Gebäude: 2 %

daß in dem hier verwendeten Modell keine Anfahrverluste und keine Verluste durch einen Ein-/Aus-Betrieb berücksichtigt werden, sondern zur Bestimmung der Nutzungsgrade nur von dem Wirkungsgrad ausgegangen wird, der sich auf die Nennlast der Anlage bezieht.

Bei der Berechnung des CO_2-Ausstoßes der einzelnen Versorgungssysteme wurden die von *Fritsche* [5] angegebenen spezifischen CO_2-Emissionsfaktoren verwendet: Steinkohle: 93 kg CO_2/GJ_{Hu}, Heizöl leicht: 73 kg CO_2/GJ_{Hu}, Erdgas 55 kg CO_2/GJ_{Hu}. Daraus werden mit Hilfe der umgesetzten Brennstoffmengen die CO_2-Emissionen der einzelnen Versorgungsfälle berechnet und verglichen. Die Versorgungssysteme sind so gewählt, daß die erzeugten End- bzw. Nutzenergiemengen vollständig zur Deckung des Strom- und Wärmebedarfs eingesetzt werden. Somit muß kein Gutschriftverfahren für vermiedene Emissionen eines alternativ erzeugten Endenergieträgers angewendet werden. Da diese Emissionsgutschriftmethode bei entsprechender Parameterwahl negative Emissionen für das gesamte Versorgungssystem als Ergebnis hat, kann sie zu sachlich falschen Aussagen führen und sollte daher vermieden werden.

4.1 Auswahl der Versorgungsfälle

Der erste Versorgungsfall wurde schon eingangs erwähnt (Kapitel 1). Hier wird ein Wärmebedarf von 100 und ein Strombedarf von 25 Energieeinheiten angenommen (*Bild 4*). Dieses Verhältnis von Wärmeverbrauch (Nutzenergie) und Stromverbrauch ist z. B. typisch für den Durchschnitt der Haushalte in der Bundesrepublik Deutschland insgesamt. Die betrachteten Versorgungssysteme sind für die gekoppelte Erzeugung von Wärme und Strom ein Blockheizkraftwerk und ein Heizkessel (Abdeckung des restlichen Jahreswärmebedarfs) sowie für die getrennte Erzeugung Ölzentralheizungen für Haushalte zur Wärmeerzeugung und ein Kondensationskraftwerk zur Stromerzeugung. Zusätzlich werden fortgeschrittenere Energietechniken der getrennten Erzeugung betrachtet, indem die Wärme in einem Brennwertkessel und der Strom in einem GuD-Kraftwerk erzeugt wird. Für das Nahwärmenetz in Verbindung mit dem Blockheizkraftwerk werden 7 % Wärmeverteilungsverluste (Leitungsverluste und Verluste der Hausstationen in den Gebäuden) mit berücksichtigt. Die Verluste beim Stromtransport und bei der Stromverteilung werden vernachlässigt, da sie in den einzelnen Fällen nahezu identisch sind.

Der zweite Versorgungsfall (*Bild 5*) unterscheidet sich von dem ersten Fall in einer Verdopplung des Strombedarfs. Diese Versorgungsaufgabe ist z. B. typisch für eine Siedlung mit rd. 300

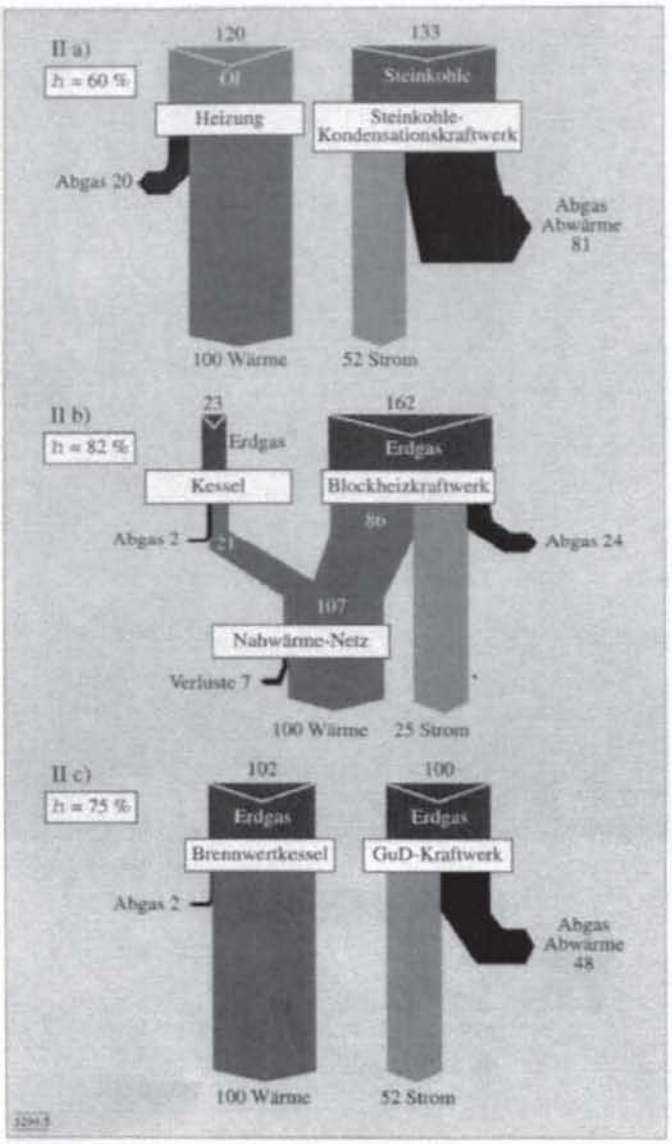

Bild 5. Energieflußdiagramme für den zweiten Versorgungsfall

Figure 5. Energy flow diagramm for the second supply case

Tafel 2. Ergebnisse des CO_2-Vergleichs und Trennung der einzelnen Minderungseffekte
Table 2. Results of the CO_2-comparison and separation of the individual reduction effects

Kenngrößen der Versorgungssysteme	Versorgungsfälle (Angaben in %)								
	I a	I b	I c	II a	II b	II c	III a	III b	III c
fossiler Systemnutzungsgrad η	68	84	83	60	82	75	53	72	68
Anteil der eingesetzten fossilen Brennstoffe:									
– Steinkohle	35	–	–	53	–	–	68	–	–
– Heizöl	65	–	–	47	–	–	32	–	–
– Erdgas	–	100	100	–	100	100	–	100	100
gesamte CO_2-Minderung M	–	44	43	–	52	48	–	53	51
»Technologie-Effekt« M_{Tech}	–	16	15	–	22	17	–	21	18
»Brennstoff-Effekt« $M_{Br.st}$	–	28	28	–	30	31	–	32	33
maximaler »Technologie-Effekt« M_{Tec}	–	19	18	–	27	20	–	26	22
maximaler »Brennstoff-Effekt« M_{Br}	–	31	31	–	35	35	–	37	37

Wohneinheiten in Wohnblocks sowie zugehörigem Kindergarten, Einkaufszentrum usw. Der erdgasgefeuerte Heizkessel in Verbindung mit dem Blockheizkraftwerk dient nun nur noch zur Deckung der Spitzenlast (20 % des Jahreswärmebedarfs). Ebenso wird weiterhin unterstellt, daß die im BHKW erzeugte Wärme stets genutzt werden kann.

Der dritte Versorgungsfall ist durch einen gleich hohen Strom- und Wärmebedarf gekennzeichnet. Dies tritt z. B. dann auf, wenn ein hoher industrieller Strombedarf (stromintensive Industrien) zu der Siedlung des zweiten Versorgungsfalles hinzukommt. Das Verhältnis von Strom- zu Wärmenachfrage für dieses Industriegebiet wird (zeitlich konstant) zu etwa 3:1 angenommen und ist z. B. typisch für die Branchen Gießerei, Chemische Industrie, Feinkeramik und Glasindustrie. Die hier betrachteten Energietechniken sind wie in den ersten beiden Versorgungsfällen ein Blockheizkraftwerk und ein Heizkessel sowie ein Steinkohlekondensationskraftwerk mit Öl-Kesseln. Bei dem gekoppelten System mit dem Blockheizkraftwerk kommt das schon in den ersten beiden Versorgungsbeispielen aufgeführte gasgefeuerte GuD-Kraftwerk hinzu, das den restlichen Strombedarf deckt. Dieses GuD-Kraftwerk für sich bildet zusammen mit einem Brennwertkessel ebenfalls wieder ein fortgeschritteneres Energieversorgungssystem. Die Wärmeverluste für das Nahwärmenetz betragen wie in den ersten beiden Fällen 7 %. Die Energieflüsse der drei verschiedenen Energieversorgungssysteme zeigt *Bild 6*.

4.2 Ergebnisse des CO_2-Vergleichs und Trennung der Minderungseffekte

Anhand der verschiedenen Versorgungsfälle soll der in Abschnitt 3 beschriebene Formalismus der Trennung der Minderungseffekte angewendet werden. Dabei ist besonders die Frage zu klären, ob die mit der Kraft-Wärme-Kopplung einhergehende CO_2-Verminderung stärker von dem Systemnutzungsgrad oder von der Brennstoffzusammensetzung bestimmt ist. Dies läßt sich aus dem Vergleich der Durchschnittswerte, die man für die beiden Minderungseffekte bestimmt, beantworten.

In *Tafel 2* sind die Systemnutzungsgrade, die Anteile der eingesetzten Brennstoffe und die CO_2-Minderung bezüglich

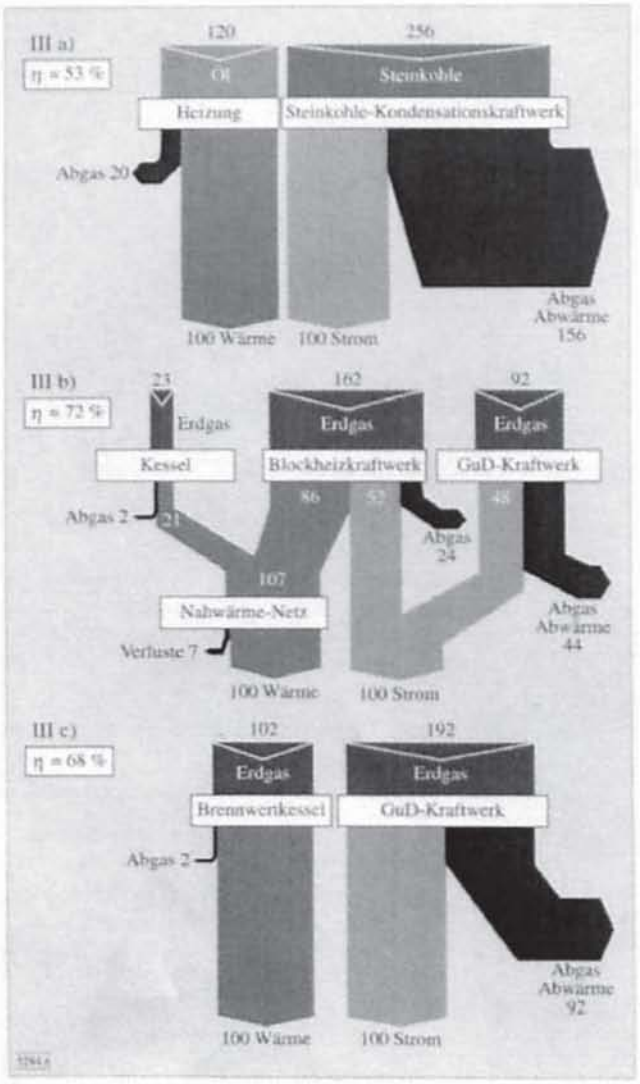

Bild 6. Energieflußdiagramm für den dritten Versorgungsfall

Figure 6. Energy flow diagram for the third supply case

der einzelnen Referenzfälle zusammengefaßt. Die Verminderung des gesamten CO_2-Ausstoßes beläuft sich je nach Versorgungsvariante zwischen 43 und 53 %. Dies liegt vor allem daran, daß bei den gekoppelten und fortgeschrittenen getrennten Vergleichsfällen ausschließlich das CO_2-günstige Erdgas zum Zug kommt. Da die Systeme der gekoppelten Erzeugung einen etwas höheren Systemnutzungsgrad aufweisen als die der fortgeschrittenen getrennten Erzeugung, ergeben sich die niedrigsten CO_2-Emissionen für die KWK-Systeme.

Darüber hinaus ist in *Tafel 2* die Trennung der Minderungseffekte nach dem in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren dargestellt. Betrachtet man die Ergebnisse der Durchschnittswerte M_{Tech} und M_{Brst}, so erkennt man, daß bei allen drei Versorgungsaufgaben der Brennstoff-Effekt den höheren Anteil an der CO_2-Reduktion besitzt als der Technologie-Effekt. Der Anteil des Brennstoff-Effekts an der gesamten CO_2-Minderung liegt zwischen 57 und 65 %.

Da in allen drei Versorgungsvarianten die gekoppelten Systeme mit dem Blockheizkraftwerk jeweils den höchsten Systemnutzungsgrad besitzen, weisen diese KWK-Systeme einen höheren Technologie-Effekt auf als die getrennten Systeme. Dieser hat bei den gekoppelten Systemen einen Anteil zwischen 36 und 43 % an der gesamten CO_2-Minderung. Dabei ergibt sich der größte Wert von 43 % in dem für das Blockheizkraftwerk optimalsten Fall II b. Der Technologie-Effekt der fortgeschrittenen getrennten Systemen liegt jedoch stets in der gleichen Größenordnung wie bei den gekoppelten Systeme. Im ersten Fall ist er nur unwesentlich geringer als im Vergleich zum Versorgungssystem mit dem Blockheizkraftwerk.

Der Vergleich der Ergebnisse z. B. für die Fälle II b und II c untereinander zeigt weiter, daß der Formalismus der Trennung der Minderungseffekte zu plausiblen Resultaten führt. Der Systemnutzungsgrad des gekoppelten Systems (Fall II b) ist höher als der des getrennten Systems (Fall II c), entsprechend ist die technologisch bedingte Emissionsminderung größer.

Ein interessantes Resultat ergibt sich bei einem Vergleich der Fälle I c, II c und III c untereinander. In diesen Fällen liegen verschiedene Versorgungsaufgaben mit einer unterschiedlichen Bedarfssituation und einem unterschiedlichen fossilen Systemnutzungsgrad vor. Trotz dieser Randbedingungen, die einen Vergleich dieser Fälle schwierig machen, ist der Anteil des Brennstoff- bzw. Technologie-Effekts an der gesamten CO_2-Minderung jeweils gleich groß und liegt bei 65 bzw. 35 %. Damit unterscheiden sich die auf den ersten Blick verschiedenen Versorgungsfälle in dieser Hinsicht nicht. Der in Kapitel 3 beschriebene Formalismus ermöglicht somit einen Vergleich dieser Versorgungssysteme.

Ausschlaggebend für die CO_2-Minderung ist in allen hier vorgestellten Fällen der Übergang zu ausschließlich gasgefeuerten und damit kohlenstoffarmen Systemen. Der Brennstoff-Effekt ist immer größer als der Technologie-Effekt. Eine Abweichung von dieser Feststellung ergibt sich in den hier diskutierten Versorgungsaufgaben nur dann, wenn man die Struktur des Brennstoffeinsatzes ändern würde. Wie sich leicht nachrechnen läßt, hat der Technologie-Effekt erst dann einen größeren Anteil an der gesamten CO_2-Minderung als der Brennstoff-Effekt, wenn man z. B. in dem Referenzfall III a eine Erdgas- anstelle einer ÖlZentralheizung einsetzen und den zusätzlichen Strombedarf im Fall III b nicht durch das gasgefeuerte GuD-Kraftwerk, sondern durch ein steinkohlegefeuertes Kondensationskraftwerk decken würde. Die gesamte CO_2-Minderung beliefe sich dann auf weniger als 30 %, daran hätte der Technologie-Effekt jedoch einen Anteil von etwa 57 %.

Was bedeutet dieses Ergebnis für die CO_2-Minderung durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken? Aus *Tafel 2* läßt sich ablesen, daß für die hier diskutierten

Versorgungsfälle I b, II b und III b, bei denen der Energiebedarf mithilfe eines Blockheizkraftwerkes gedeckt wird, in erster Linie der Übergang zu dem kohlenstoffarmen Energieträger Erdgas für die Abnahme der CO_2-Emissionen verantwortlich ist. Die Verminderung der CO_2-Emissionen beruht erst in zweiter Linie auf dem Einsatz der BHKW-Technologie, die als Beispiel für eine Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage mit einem hohen Wirkungsgrad gewählt wurde. Dies widerlegt eine oft vertretene Auffassung, daß sich wesentliche Fortschritte bei der Reduzierung der CO_2-Emissionen allein durch den Einsatz der KWK-Technologie und besonders durch Blockheizkraftwerke erzielen lassen. Betrachtet man jeweils auch den Vergleichsfall für das fortgeschrittene getrennte Versorgungssystem, ergibt sich wegen des hohen Gesamtsystemnutzungsgrades und wegen des Erdgaseinsatzes eine Abnahme der CO_2-Emissionen in der gleichen Größenordnung.

5 Schlußfolgerung

In der öffentlichen Diskussion über eine geeignete CO_2-Minderungsstrategie werden verschiedene Energieversorgungsoptionen gegenübergestellt, die durch eine Änderung der Brennstoffstruktur und durch den Einsatz effizienter Anlagentechniken zu einer Reduktion der energiebedingten CO_2-Emissionen führen. Die CO_2-Verminderung beruht damit auf einem Brennstoff- und einem Technologie-Effekt. Um die einzelnen Optionen miteinander vergleichen und bewerten zu können, ist eine Trennung dieser Effekte notwendig. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zeigt auf, wie eine solche Trennung formal durchgeführt werden kann.

Die zu Beginn gestellte Frage, wie die Kraft-Wärme-Kopplung hinsichtlich ihrer Möglichkeiten zur CO_2-Minderung zu bewerten sei, kann auf diese Weise beantwortet werden. Für die in dieser Untersuchung ausgewählten Versorgungsfälle, bei denen bezüglich des Referenzfalles eine CO_2-Gesamtminderung zwischen 43 und 53 % erreicht wird, ist festzustellen, daß der Brennstoff-Effekt mehr bewirkt als der mit dem hohen Nutzungsgrad der Kraft-Wärme-Kopplung verbundene Technologie-Effekt. Das bedeutet, daß sich die Vorteile der KWK (vor allem im Fall von Blockheizkraftwerken) zum überwiegenden Teil aus dem Einsatz kohlenstoffarmer Brennstoffe ergeben. Damit wird bestätigt, was bereits im Rahmen eines Rückblicks auf die Arbeiten der Enquete-Kommission zum CO_2-Minderungspotential der Kraft-Wärme-Kopplung an Erkenntnissen gewonnen werden konnte [6].

Das Ergebnis wird durch die Feststellung gestützt, daß fortgeschrittene Systeme der getrennten Erzeugung zu einer CO_2-Minderung in ähnlichem Umfang führen. Auch bei diesen Versorgungssystemen ist der Brennstoff-Effekt infolge des CO_2-günstigen Erdgaseinsatzes höher als der Technologie-Effekt. Der CO_2-Vergleich verschiedener Systeme der gekoppelten und getrennten Erzeugung macht damit deutlich, wie problematisch es ist, eine Bewertung zum CO_2-Reduktionsvermögen der Kraft-Wärme-Kopplung vorzunehmen, wenn die KWK-Techniken aufgrund der eingesetzten Brennstoffe »automatisch« bevorteilt werden. Derartige Gegenüberstellungen sind mit dem alleinigen Verweis auf die Kraft-Wärme-Kopplung nicht zulässig.

Aus diesem Grund ist es wichtig, daß man sich, wie es oft der Fall ist, bei der Berechnung der CO_2-Minderungseffekte nicht auf den Formalismus beschränkt, der auf den ersten Blick einleuchtet und der auf die Größen $\underline{M}_{Br}$ und $\underline{M}_{Te}$ führt (Abschnitt 1), sondern daß man auf der oben beschriebenen Weise die Durchschnittswerte $M_{Br,0}$ und $M_{Te,0}$ berechnet. Erst damit wird man beiden Effekten gerecht.

Die in dieser Arbeit diskutierten Versorgungsfälle wurden exemplarisch für den Einsatz von Blockheizkraftwerken gewählt. Es lassen sich jedoch keine Schwierigkeiten erwarten, wenn man die Methode der Trennung der Minderungseffekte auf komplexere Versorgungssysteme anwenden möchte. Sie sollte daher in Zukunft auch bei die Bewertung anderer KWK-Systeme (GuD-Heizkraftwerke, steinkohlegefeuerte Dampfturbinen-Heizkraftwerke usw.) verwendet werden.

6 Schrifttum

[1] Bundeskabinett beschließt nationales CO_2-Minderungsprogramm zum Klimaschutz, Pressemitteilung, Bonn, 7.11.1990.

[2] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): Kommunale Energieversorgung, Energiekonzepte, Nah- und Fernwärme, energetische Nutzung von Abfall: ein Informationspaket, Verlag TÜV Rheinland, Köln 1990, S. 49.

[3] *Conrad, F.*: Zur CO_2-Vermeidung durch Kraft-Wärme-Kopplung, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 42 (1992), S. 816ff.

[4] *Fahl, U.; Pfeifer, T.; Voß, A.*: Systematische Analyse des derzeitigen Kenntnisstandes zum Themenbereich »Dezentrale Energieversorgung«, Untersuchung des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung im Auftrag des Deutschen Atomforums, Stuttgart, 1993.

[5] *Fritsche, U.*: Zusammenstellung von klimarelevanten Emissionsdaten für Energiesysteme in der BR Deutschland, Studienschwerpunkt A.1.1 des Studienprogramms Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre sowie Vermeidung und Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase für die Enquete-Kommission Vorsorge zum Schutz der Erdatmospähre des Deutschen Bundestages, Endbericht, Öko-Institut, Darmstadt, August 1989.

[6] *Fahl, U.; Pfeifer, T.; Voß, A.*: CO_2-Minderungspotential der Kraft-Wärme-Kopplung – Ein Rückblick auf die Arbeiten der Enquete-Kommission, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 42 (1992), Heft 4, S. 229-237.