

**Exzerpt:**

**Teil II: Bereitstellung von elektrischer Energie**

.....

- 3. Kraft-Wärme-Kopplung und Systemvergleich (Seite 74 ff)**
- 3.1 Die Besonderheiten der Kraft-Wärme-Kopplung
- 3.2 Vergleich: Erdgas KWK und getrennte Strom- und Wärmeerzeugung
- 3.3 Die KWK in der Energiepolitik und der öffentlichen Diskussion
- 3.4 Skizze zur Optimierung des Erdgaseinsatzes für Gebäudewärme
- 3.5 Zusammenfassung und Ausblick

**Link zur Originalstudie:**

<http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien.html>

## **Elektrizität: Schlüssel zu einem nachhaltigen und klimaverträglichen Energiesystem**

Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V.

Juni 2010

## II.3 Kraft-Wärme-Kopplung und Systemvergleich

Die gleichzeitige Erzeugung von Wärme und elektrischem Strom dient der besseren Ausnutzung des Brennstoffs. Die Technik der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gibt es in einer Vielzahl von Anwendungsformen, einmal für industrielle Eigenerzeuger, zum anderen für die öffentliche Versorgung mit Strom und Fernwärme, beide in Deutschland und Europa etwa gleich wichtig<sup>1,2</sup>.

Die mit der Wärmeerzeugung gekoppelte Stromerzeugung macht bisher nur einen kleinen, langsam ansteigenden Anteil der gesamten Stromerzeugung aus; sie betrug in Deutschland 11% im Jahre 2000 und 12% im Jahre 2007; die europäischen Zahlen sind vergleichbar<sup>3</sup>.

Die KWK wurde bereits im Kapitel I.2 als ein theoretisch eleganter und effektiver Weg erwähnt, die Exergie von Brennstoffen vollständiger auszunutzen, als dies bei der bloßen Verbrennung geschieht. Es gibt eine Vielfalt von Anwendungsfällen, Anlagen und Betriebsweisen, um in KWK Strom und Wärme gemeinsam zu produzieren [1,2,3]. Der exakte Gewinn an Brennstoff-Ausnutzung hängt bei jeder Anlage von der Betriebsweise ab, die sich zudem immer wieder ändert. Summiert über alle Anlagen und alle eingesetzten Brennstoffe wurde die integrale Brennstoff-Ausnutzung in Deutschland im Jahr 2002 auf 79% (EU-25: 70%) geschätzt<sup>4</sup>.

Unter dem Eindruck der hohen Brennstoff-Ausnutzung hat die Bundesregierung eine Zielmarke vorgegeben, nach welcher der Anteil des KWK-Stroms bis zum Jahr 2020 auf 25% verdoppelt werden soll. Unterstützende Fördermaßnahmen wurden gesetzlich verankert (KWK-Gesetz 2009 [7]).

Angesichts der Tatsache, dass ein hoher Prozentwert der Brennstoffausnutzung kein ausreichendes Qualitätsmerkmal für die bei einem bestimmten Verbrauchsprofil eingesparte Brennstoffmenge darstellt (vgl. dazu Abschnitt 3.2-c, letzter Absatz), wird in diesem Kapitel untersucht, wie das Optimum in der Zukunft gefunden werden kann. Dabei sind auch technische Entwicklungen zu berücksichtigen, die in einigen wichtigen Anwendungsfällen das pauschale Bild der KWK verändern können, nämlich

- das Erreichen sehr viel besserer Wirkungsgrade in der reinen (ungekoppelten) Elektrizitätserzeugung,
- die inzwischen verbreitete Brennwert-Technik, mit der sich bessere Wirkungsgrade in der reinen (ungekoppelten) Wärmeerzeugung in Feuerungsanlagen realisieren lassen,
- sowie das Aufkommen gut funktionierender und effizienter Wärmepumpen mit einer in der Zukunft gewiss noch weiter zu steigernden Zuverlässigkeit.

Deshalb wird im Folgenden ein neuer Blick auf die tatsächlichen oder vermeintlichen Vorzüge der Koppelproduktion im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme geworfen. Dies kann hier natürlich nicht in voller Allgemeinheit geschehen, vielmehr werden einzelne besonders wichtige Beispiele herausgegriffen; der Schwerpunkt liegt dabei auf KWK-Anlagen für den Gebäudebereich mit Erdgas als Brennstoff, deren Ausbau von der Bundesregierung im Rahmen der vorgesehenen Verdoppelung des KWK-

---

<sup>1</sup> So betrug die in KWK-Anlagen erzeugte Elektrizität im Jahre 2002 in der EU-25: 163.1 TWh (öffentlich) + 136.1 TWh (industriell), sowie in Deutschland: 33.3 TWh (öffentlich) + 22.9 TWh (industriell) [4].

<sup>2</sup> Eine ausführliche Darstellung der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland enthält die Studie des Umwelt-Bundesamtes [5]. Darin befindet sich auch ein Bericht über die statistische Datenbasis für KWK, welche nicht sehr vollständig ist.

<sup>3</sup> Quelle Eurostat [6]

<sup>4</sup> Quelle Eurostat [4]. Dort finden sich auch Anmerkungen zur Methode dieser Statistik.

Anteiles besonders gewünscht wird. Es wird sich herausstellen, dass der Ausbau der KWK in Zukunft keineswegs immer der Königsweg für die effizienteste und wirtschaftlichste Art des Brennstoff-Einsatzes ist, für den er häufig gehalten wird.

### 3.1 Die Besonderheiten der Kraft-Wärme-Kopplung

#### 3.1–a Elektrische Wirkungsgrade und Stromeinbuße bei Wärmeauskopplung

Für die energetische Bewertung der KWK ist es entscheidend, auf welchem Temperaturniveau die Abwärme der Wärmekraftmaschine zunächst anfällt. Hier sind zwei Fälle zu unterscheiden:

##### (1) Anlagen mit hohem elektrischen Wirkungsgrad, jedoch Stromeinbuße bei Wärmeauskopplung:

Hierzu gehören Dampfkraftwerke und vor allem die so genannten Gas- und Dampfkraftwerke (GuD), bei denen die noch auf sehr hohem Temperaturniveau anfallende Abwärme einer Gasturbine einem nachgeschalteten Dampfkraftwerk zugeführt wird.

Die Umwandlung der Brennstoffwärme in Strom in einem Dampfkraftwerksprozess ist heute technisch sehr weitgehend perfektioniert. Am „heißen Anfang“, bei der Übertragung der sehr heißen Verbrennungswärme auf das Arbeitsmedium, treten jedoch noch nicht vermeidbare Exergieverluste auf, da der Kessel und die Dampf führenden Rohre eine Höchsttemperatur nicht überschreiten dürfen, was die erreichbare Dampftemperatur beschränkt. Durch Verbesserung der Werkstoffe ist es jedoch gelungen, diese höchste Arbeitstemperatur immer weiter hinaufzuschieben. Heute sind 600° C erreicht, und 700°C werden in der technischen Entwicklung angestrebt (vgl. Kapitel II.1).

Am „kalten Ende“ des Prozesses entspannt die Niederdruck-Turbine den Dampf gegen einen sehr kleinen Gegendruck, der nur noch durch die Temperatur des Rückkühlmediums im Kondensator bestimmt wird. Auch beim Wiederaufheizen des Arbeitsmediums wird durch eine geschickte Prozessführung mit ausgetüftelter Vorwärmung und Zwischenüberhitzung dafür gesorgt, dass die Temperaturdifferenzen zwischen der jeweiligen Wärmequelle und dem Arbeitsmedium über den gesamten Aufheizprozess möglichst niedrig bleiben.

Wenn man nun aus diesem insbesondere auch im Niedertemperaturbereich optimierten Prozess Wärme nicht auf dem Temperaturniveau des verfügbaren Kühlwassers (z.B. 30°C) sondern auf dem schon deutlich höherem Niveau des Fernwärmeverlaufes (90 bis 150°C und höher) abzweigt, dann kann die im Fernwärmewasser noch enthaltene Exergie (vgl. Kapitel I.2) nicht mehr zur Stromerzeugung eingesetzt werden, und der elektrische Wirkungsgrad sinkt entsprechend.

Die elektrischen Wirkungsgrade moderner Kohlekraftwerke, die üblicherweise als reine Dampfkraftwerke konzipiert sind, liegen heute bei etwa 45%, und 50% werden anvisiert. Moderne Gaskraftwerke werden jedoch zunehmend als kombiniertes Gas- und Dampfkraftwerk (GuD) betrieben. Dann ergibt sich derzeit ein elektrischer Wirkungsgrad von 58% [8], und Anlagen mit geplanten 60% sind bereits im Bau [9]<sup>5</sup>.

##### (2) Anlagen mit niedrigem elektrischem Wirkungsgrad und direkter Abwärmenutzung:

Hierzu gehören motorgetriebene Heizkraftwerke, die man als Blockheizkraftwerk (BHKW) bezeichnet, und

<sup>5</sup> Die unter genormten Bedingungen gemessenen optimalen Wirkungsgrade werden jedoch in der industriellen Praxis häufig unterschritten, wobei die jahreszeitlichen Kühlbedingungen, Abweichungen vom optimalen Arbeitspunkt, häufiges An- und Abfahren der Anlage sowie Alterung eine Rolle spielen. Für die auf die Zukunft gerichteten prinzipiellen Überlegungen in diesem Kapitel gehen wir jedoch sowohl für KWK-Anlagen als auch für Kraftwerke jeweils von den optimalen Norm-Wirkungsgraden aus (u.a. auch, weil nur diese allgemein zugänglich sind).

Gasturbinenanlagen, die es wegen ihrer immer noch sehr hohen Abgastemperatur nur auf eine Stromausbeute von maximal ca. 38% bringen, was für den Edel-Energieträger Erdgas vergleichsweise wenig ist. Auch beim BHKW fallen das Abgas und die Motorabwärme der Otto- oder Dieselmotoren bereits auf einem so hohen Temperaturniveau an, dass der elektrische Wirkungsgrad schon von vornherein nur wenig mehr als die Hälfte bis bestenfalls knapp Zweidrittel eines technisch optimierten GuD-Kraftwerkes beträgt, also vergleichsweise schlecht ist. Bei diesen Anlagen hat man also von vornherein auf die thermodynamisch gebotene Ausnutzung des Niedertemperaturbereiches zur Stromerzeugung verzichtet. Dann trifft es sich natürlich gut, wenn sich für die zunächst auf verschwenderisch hohem Temperaturniveau anfallende Abwärme doch noch eine Nutzung über die Fernwärme ergibt.

Für die Beheizung einzelner Gebäude wurden in letzter Zeit kleinere, meist motorgetriebene KWK-Anlagen entwickelt. Hier wird also wie bei einer üblichen Feuerungsstätte die Wärme dezentral, direkt beim Wärmeverbraucher erzeugt. Die Bezeichnung „Strom erzeugende Heizung (SeH)“ ist deshalb von der Aufgabenstellung her durchaus angebracht, von der verwendeten Technik her kann man die SeH jedoch als kleine Blockheizkraftwerke, eben als Mini-BHKW oder auch Mikro-BHKW bezeichnen. Die kleinen Diesel- und Ottomotoren besitzen Wirkungsgrade im Bereich von etwa 20% bis 30%, wie man sie auch bei entsprechenden Fahrzeugmotoren antrifft. Es verwundert nicht, dass sie noch einmal deutlich schlechter sind als die elektrischen Wirkungsgrade der größeren stationären Anlagen in den für die Fernwärme ausgelegten BHKW (30% bis 35%).

### 3.1–b Zentrale und dezentrale Anlagen

Wir bezeichnen eine Anlage dann als „dezentral“, wenn die Wärme direkt am Erzeugungsort in die Heizungsanlage eingespeist wird, und als „zentral“, wenn die produzierte Wärme über Fernwärmeleitungen abgegeben werden muss. Dann lassen sich die folgenden Eigenschaften zuordnen:

#### *(1) Dezentrale KWK*

- Niedrige Vorlauftemperaturen erreichbar, wenn das Gebäude thermisch saniert ist und die Heizkörper großzügig ausgelegt sind (besonders günstig bei Flächenheizungen).
- Rücklauftemperaturen dann so niedrig, dass eine Abgaskondensation in der KWK-Einheit oder in einem gesonderten Abgaswärmetauscher (z.B. auch als Kaminwärme) möglich ist. Die Restwärme des Abgases kann dann weitgehend genutzt und somit eine Wärmenutzung wie bei einem Brennkessel<sup>6</sup> erreicht werden.
- Individuelle Anpassung der Vorlauftemperatur schöpft exergetisches Einsparpotenzial aus.
- Dezentrale Stromeinspeisung vermeidet Netzverluste.
- Die Strom erzeugende Heizung (SeH) ist z.B. eine wirklich dezentrale KWK [10].

#### *(2) Zentrale KWK*

- Hohe Vorlauftemperatur notwendig, die in einem Fernwärmenetz nach dem „Geleitzugprinzip“ von dem Verbraucher mit den höchsten Ansprüchen bestimmt wird. Weiterhin müssen die Temperaturdifferenzen an den Wärmetauschern und die Abkühlung bis zum letzten Verbraucher berücksichtigt werden. Da die Fernwärme zu jeder Zeit die Warmwasserversorgung sicherstellen muss, ergibt sich selbst bei der Versorgung eines reinen Wohngebietes keine Chance für niedrige Vorlauftemperaturen.
- Keine niedrige Rücklauftemperatur möglich, da alle (warmen und kalten) Rückläufe vermischt werden. Daher gilt: Bei zentraler Fernwärme ist in der Regel keine Brennwärmenutzung möglich.

---

<sup>6</sup> Die erst seit Mitte der 1990er Jahre verbreiteten „Brennwärmenessel“ nutzen im Gegensatz zu früheren Kesseln durch Absenkung der Abgastemperatur auch noch die Kondensationswärme des in den Abgasen enthaltenen Wasserdampfes aus; diese beträgt bei Erdgas 11% des Heizwertes. So entstehen Wirkungsgrade von über 100% der auf den Heizwert des Brennstoffs bezogenen Wärmemenge. (Der Brennwert von Erdgas ist 111% seines Heizwertes).

- Erhebliche Investitionen in den Bau des Fernwärmenetzes, zumal die Gebiete mit hoher Wärmebedarfsdichte meist schon angeschlossen sind.
- Zusätzlicher betrieblicher Aufwand für Pumpen und Leitungsverluste.

Fazit: Die dezentrale Strom erzeugende Heizung zeichnet sich bei allerdings niedrigen elektrischen Wirkungsgraden durch eine (zumindest mögliche) Wärmeausnutzung wie in einem Brennwertkessel aus. Eine (zentrale) Fernwärmeversorgung ist dagegen durch eine schlechte Wärmeausnutzung bei etwas günstigerem elektrischem Wirkungsgrad gekennzeichnet.

### 3.1-c Die KWK im Sommer und Winter

Das grundsätzliche Dilemma der gekoppelten Produktion liegt in der jahreszeitlichen Schwankung des Wärmebedarfs bei der Heizung der Häuser. Die industriellen Anwendungen sind davon kaum betroffen, und deshalb sind die wirksamsten Anlagen der KWK bei der Industrie zu finden. In der Zukunft könnte eine vermehrte Anwendung von Adsorptions-Kältemaschinen auch zu einer gewissen Wärmeausnutzung bei der Klimatisierung von Gebäuden im Sommer führen. Wegen der trotzdem verbleibenden starken jahreszeitlichen Schwankung der Wärmenachfrage muss die betreffende Anlage

- entweder nur einen mittleren Teil der Wärmenachfrage abdecken und einen beachtlichen Rest dem Spitzenkessel überlassen
- oder dennoch einen großen Teil der Wärmenachfrage abdecken, aber dafür wegen der geringen Zahl der Volllaststunden im KWK-Betrieb ihr Geld mit Spitzenstrom verdienen.

Beide Alternativen wirken sich bei der zentralen Fernwärmeversorgung negativ auf die Energiebilanz aus.

Bei der dezentralen Strom erzeugenden Heizung mit Brennwertnutzung, bei der als Spitzenkessel ebenfalls ein Brennwertkessel eingesetzt wird, führt die als erste Alternative genannte knappe Auslegung zu keinem Energiedefizit. Wegen ihres besonders niedrigen elektrischen Wirkungsgrades schlägt hier jedoch jede Spitzenstromerzeugung besonders negativ auf die Energiebilanz durch.

Die geringe Auslastungszeit ist für die gekoppelte Produktion ein schwer wiegender wirtschaftlicher Faktor, der aber in der vorliegenden Studie nicht näher untersucht wird.

### **3.2 Vergleich: Erdgas-KWK und getrennte Strom- und Wärmeerzeugung**

Im Folgenden wollen wir für den Primärenergieträger Erdgas unterschiedliche KWK-Anlagen mit der getrennten Erzeugung von Strom im GuD-Kraftwerk und von Wärme im Brennwertkessel oder von Wärme mit Wärmepumpen vergleichen. Wir stellen uns dabei das folgende *Modernisierungs-Szenario* vor: Einige bestehende alte Kraftwerke sollen durch moderne Erdgas-Anlagen ersetzt werden und eine sehr große Zahl von alten Heizungsanlagen ebenfalls. Wir betrachten neue KWK-Anlagen und vergleichen sie mit zwei Referenzfällen:

#### *(1) KWK-Untersuchungsfall:*

Alte Heizungsanlagen und alte Kraftwerke werden durch neue KWK-Anlagen und die im Regelfall zur vollen Wärmeversorgung zusätzlich notwendigen Spitzenlastkessel der Versorger verdrängt. Bei zentralen KWK-Anlagen bringen Fernwärmenetze die Wärme an die Orte der verdrängten Heizungsanlagen.

(2) *Erster Referenzfall (s. Abschnitt 3.2-a):*

Die alten Heizungskessel werden durch moderne Erdgas-Brennwertkessel ersetzt, und es findet ein Zubau von Erdgas-GuD-Kraftwerken statt, die dieselbe Strommenge liefern sollen wie die KWK-Anlagen des Untersuchungsfallles.

(3) *Zweiter Referenzfall (s. Abschnitt 3.2-b):*

Die alten Heizungskessel werden durch moderne Wärmepumpen ersetzt, und es findet ein Zubau von GuD-Kraftwerken statt, die die Strommenge der KWK-Anlage im Untersuchungsfall plus die für den Betrieb der Wärmepumpen nötige Strommenge liefern sollen.

Das Energieflussbild des KWK-Versorgers ist in Abb.1 dargestellt: In einem Abrechnungszeitraum (z.B. ein Jahr) speist die Erdgaswärme  $Q_0^V$  mit den in Abb.1 bezeichneten Anteilen die KWK-Anlage und den Spitzenkessel.

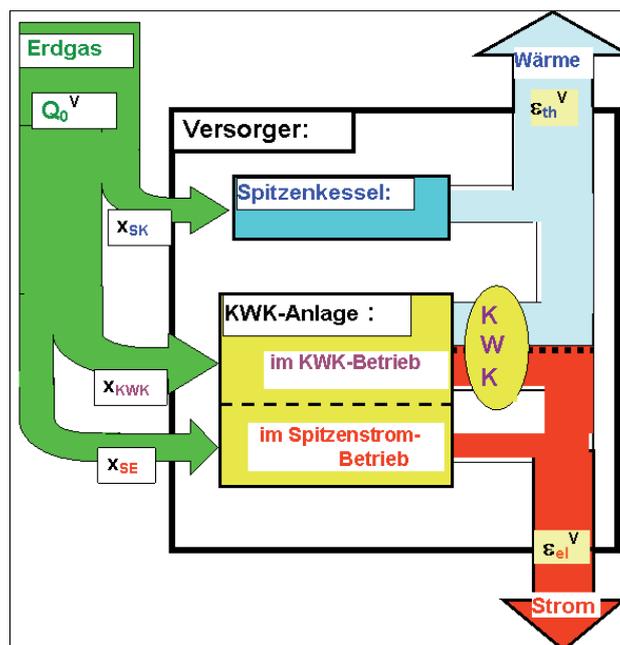


Abb. 1: Vollständige Wärme- und Stromproduktion eines Fernwärmeversorgers.

Die KWK-Anlage verbraucht im eigentlichen „KWK-Betrieb“, in dem also Strom und Nutzwärme gekoppelt produziert werden, den Anteil  $x_{KWK}$  von  $Q_0^V$  und für die zeitweise Lieferung von Spitzenstrom ohne Wärmenutzung den Anteil  $x_{SE}$ ; den restlichen Anteil  $x_{SK}$  des Erdgaseinsatzes  $Q_0^V$  benötigt der Versorger für den Betrieb des Spitzenkessels in den Zeiten, in denen die KWK-Anlage alleine den Wärmebedarf nicht mehr decken kann. Die zeitweise Lieferung von Spitzenstrom und Spitzenkessel-Wärme dürfen neben dem meist herausgestellten „Paradefall“ des reinen KWK-Betriebes bei einer vollständigen Energiebilanz nicht vergessen werden. Insgesamt wandelt der KWK-Versorger die eingesetzte Primärenergie  $Q_0^V$  mit einem thermischen Wirkungsgrad  $\varepsilon_{th}^V$  zu Wärme und mit einem elektrischen Wirkungsgrad  $\varepsilon_{el}^V$  zu Strom um. Die gesamte Brennstoffausnutzung des KWK-Versorgers ergibt sich als Summe:

$$\varepsilon_{ges}^V = \varepsilon_{el}^V + \varepsilon_{th}^V.$$

### 3.2-a Vergleich mit GuD-Anlage und Brennwertkessel

Die getrennte Erzeugung wird beschrieben durch den elektrischen Wirkungsgrad des GuD-Kraftwerkes  $\eta_{el}^{GuD}$  und den thermischen Wirkungsgrad des Brennwertkessels, für den wir 105% einsetzen (s. [1] Abschnitt 6.21).

### Einschub: Herleitung der Primärenergiefaktoren ([1], [3])

Die Abbildung 1 symbolisiert für einen KWK-Versorger den Zusammenhang zwischen den Umwandlungswirkungsgraden  $\varepsilon$  bzw.  $\eta$  und den mittleren jährlichen Anteilen  $x$  mit dem Wärme-Output  $W^V$ , dem elektrischen Output  $E^V$  und dem Primärenergie-Input  $Q_0^V$ :

$$\begin{aligned} (1) \quad W^V &= \varepsilon_{th}^V Q_0^V \quad \text{mit} \quad \varepsilon_{th}^V = (\eta_{th}^{KWK} x_{KWK} + \eta_{th}^{SK} x_{SK}) \\ (2) \quad E^V &= \varepsilon_{el}^V Q_0^V \quad \text{mit} \quad \varepsilon_{el}^V = (\eta_{el}^{KWK} x_{KWK} + \eta_{el}^{SE} x_{SE}) \\ (3) \quad \varepsilon_{ges}^V &= \varepsilon_{el}^V + \varepsilon_{th}^V \\ (4) \quad x_{KWK} + x_{SK} + x_{SE} &= 1 \end{aligned}$$

Hier beziehen sich die Indizes *KWK*, *SK* und *SE* auf die gekoppelte Produktion, die Wärmeproduktion des Spitzenkessels und die ungekoppelte Elektrizitätsspitze; der Index *V* bezeichnet den gesamten Versorger und die Indizes *th*, *el* und *ges* stehen für „thermisch“, „elektrisch“ und „gesamt“. Bei der getrennten Erzeugung werden die Primärenergie für die GuD-Anlage,  $Q_0^{(E)}$ , mit dem Wirkungsgrad  $\eta_{el}^{GuD}$  und die Primärenergie für den Brennwertkessel,  $Q_0^{(W)}$ , mit dem Wirkungsgrad  $\eta_{th}^{BK}$  ausgenutzt:

$$\begin{aligned} (5) \quad W &= \eta_{th}^{BK} Q_0^{(W)} \\ (6) \quad E &= \eta_{el}^{GuD} Q_0^{(E)} \end{aligned}$$

In einem detaillierten Vergleich werden  $W^V=W$  und  $E^V=E$  gesetzt und dann das Verhältnis  $f$  des Primärenergieverbrauches  $Q_0 = Q_0^{(W)} + Q_0^{(E)}$  der getrennten Erzeugung zu demjenigen des Versorgers,  $Q_0^V$ , gebildet. Man addiert die Gleichungen (1)=(5) und (2)=(6) und bildet unter Beachtung von Gl.(3) das Verhältnis

$$(7) \quad f = \frac{Q_0}{Q_0^V} = \frac{\varepsilon_{ges}^V}{\eta_{th}^{BK}} + \varepsilon_{el}^V \left( \frac{1}{\eta_{el}^{GuD}} - \frac{1}{\eta_{th}^{BK}} \right)$$

Der Primärenergiefaktor  $f$  charakterisiert den Mehraufwand an Primärenergie bei getrennter Produktion von Strom und Wärme. Die Wirkungsgrade  $\varepsilon^V$  des Versorgers berücksichtigen die Primärenergie-Anteile  $x_{SK}$  und  $x_{SE}$  für Spitzenkessel und ungekoppelte Stromlieferung. Betrachtet man den reinen Koppelbetrieb, also  $x_{SK} = x_{SE} = 0$ , so wird aus  $f$  der Primärenergiefaktor  $f_0$  dieses „Paradefalles“:

$$(8) \quad f_0 = \frac{\eta_{ges}^{KWK}}{\eta_{th}^{BK}} + \eta_{el}^{KWK} \left( \frac{1}{\eta_{el}^{GuD}} - \frac{1}{\eta_{th}^{BK}} \right),$$

wobei  $\eta_{ges}^{KWK} = \eta_{th}^{KWK} + \eta_{el}^{KWK}$  die gesamte „Brennstoffausnutzung“ im reinen Koppelbetrieb bezeichnet. Den Einfluss der Anteile  $x_{SK}$  und  $x_{SE}$  kann man verdeutlichen, wenn man unter Beachtung von Gl. (1) bis Gl. (3) zur Beschreibung des Versorgers die Anteile  $x_{SK}$  und  $x_{SE}$  sowie den Primärenergiefaktor  $f_0$  des „Paradefalles“ gemäß Gl. (8) verwendet. Aus Gl. (7) wird dann

$$(9) \quad f = f_0 - x_{SK} \left( f_0 - \frac{\eta_{th}^{SK}}{\eta_{th}^{BK}} \right) - x_{SE} \left( f_0 - \frac{\eta_{el}^{SE}}{\eta_{el}^{GuD}} \right).$$

Der Primärenergiefaktor  $f$  ist also eine lineare Funktion der Primärenergie-Anteile  $x_{SE}$  (Elektrizität) und  $x_{SK}$  (Wärme), um die der tatsächliche Betrieb des Versorgers vom reinen Koppelbetrieb abweicht.

Als Referenz sollen sie den gleichen Strom und die gleiche Nutzwärme erzeugen, die der Fernwärme-  
produzent als Versorger für Strom und Wärme liefert. Aus dieser detaillierten Gleichheit lassen sich über die  
Wirkungsgrade die jeweiligen Brennstoffeinsätze berechnen und zum gesamten Brennstoffeinsatz  $Q_0$  der  
getrennten Erzeugung von Strom und Wärme zusammenzählen. Das Verhältnis von  $Q_0$  zu  $Q_0^V$  wird im  
Folgenden als Primärenergiefaktor  $f$  bezeichnet:

$$f = Q_0 / Q_0^V.$$

Die Primärenergie-Einsparung durch den KWK-Versorger ist also

$$(Q_0 - Q_0^V) / Q_0 = 1 - 1/f.$$

Bei der gesetzlich festgelegten Förderung von KWK-Anlagen wird nur der eigentliche KWK-Betrieb  
betrachtet. Der Primärenergiefaktor  $f$  bezieht sich dann auf den Spezialfall, dass die Primärenergie, die der  
Versorger für Spitzenstrom und Spitzenkessel einsetzt, aus der Betrachtung ausgeklammert wird. Dies ist  
gleich bedeutend damit, dass in unserer Betrachtung die Anteile  $x_{SE}$  und  $x_{SK}$  auf Null gesetzt werden. Den  
für diesen Parafall sich ergebenden Primärenergiefaktor bezeichnen wir mit  $f_0$ .

Gemäß der EU-Richtlinie 2004/74/EG [11] wird im Hinblick auf staatliche Subventionen zur Bewertung der  
KWK die Primärenergieeinsparung durch die eigentliche KWK, PEE, herangezogen. Sie ist

$$PEE = 1 - 1/f_0.$$

Bei einem Systemvergleich zwischen einer KWK und einer getrennten Versorgung mit Strom und Wärme  
muss der Spitzenkessel des KWK-Versorgers berücksichtigt werden, der bei einem Fernwärmenetz kaum  
über einen Wirkungsgrad  $\eta_{th}^{SK} = 90\%$  hinauskommt. Mit ihm konkurriert dann der dezentrale Brennwert-  
kessel mit  $\eta_{th}^{BK} = 105\%$ . Daher ist es interessant, den Einfluss der Anteile  $x_{SK}$  und  $x_{SE}$  direkt anzugeben.

Als Beispiel ist in Abb. 2 für die 1-MW-KWK-Anlage „BHKW\_1M“ aus Tabelle 1 der Faktor  $f$  für den Energie-  
aufwand bei getrennter Erzeugung in Abhängigkeit von  $x_{SK}$ , dem Anteil des Brennstoffeinsatzes für den  
Spitzenkessel, dargestellt. Die einzelnen parallelen Geraden gelten für unterschiedliche Beiträge des  
erzeugten Spitzenstromes, dessen Anteil  $x_{SE}$  aus dem hierfür erforderlichen Gaseinsatz errechnet wird.

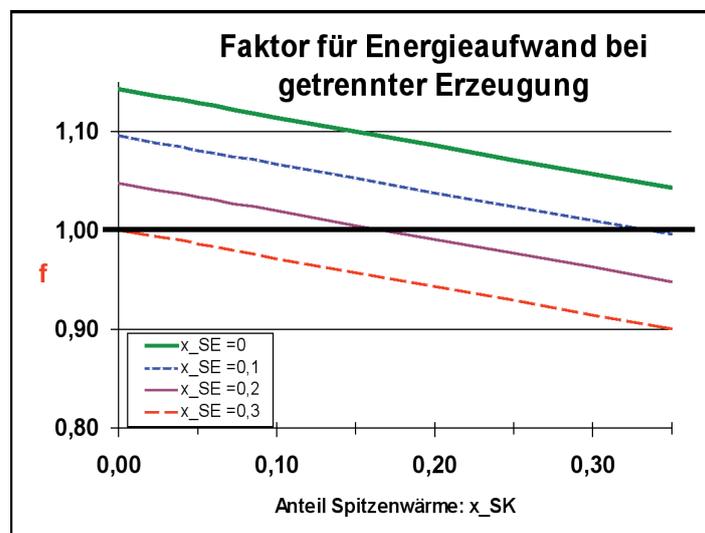


Abb. 2: Einfluss von Spitzenwärme und Spitzenstrom auf den Faktor  $f$ .  
Vergleich des „BHKW\_1M“ aus Tabelle 1 mit GuD ( $\eta_{GuD} = 0.585$ ) und Brennwertkessel ( $\eta_{BK} = 1.05$ ).

Im Paradedfall ohne Spitzenwärme ( $X_{SK} = 0$ ) und ohne Spitzenstrom ( $X_{SE} = 0$ ) ergibt sich für die getrennte Erzeugung ein Mehraufwand von 14% ( $f_0 = 1.14$ ). Dieser Mehraufwand verwandelt sich mit zunehmendem Anteil  $X_{SK}$  der Spitzenwärme in einen Minderaufwand. Obwohl es sich also bei dem in Abb. 2 dargestellten BHKW um eine sehr fortschrittliche Anlage handelt (der elektrische Wirkungsgrad des Motors liegt mit 39% sehr hoch) ergibt sich selbst im Paradedfall, dem streng wärmegeführten Betrieb ohne zusätzlichen Spitzenkessel, nur ein Mehraufwand von 14% für die getrennte Erzeugung. Da es sich um eine zentrale Fernwärmeversorgung handelt, kann die Kondensationswärme des Erdgases weder bei der KWK-Anlage noch beim Spitzenkessel genutzt werden, und die Brennstoffausnutzung erreicht daher selbst im Paradedfall nur 89% (s. Tab.1, Spalte 3).

Bei einem derart günstigen elektrischen Wirkungsgrad kann man davon ausgehen, dass das BHKW nicht nur bei Wärmebedarf seinen Strom ins Netz liefert. Bei einem angenommenen Spitzenkesselanteil von  $X_{SK} = 16\%$  und einer Spitzenstromerzeugung von  $X_{SE} = 20\%$  ergibt sich  $f = 1.0$  (Abb. 2), d.h. dann erbringt selbst diese sehr fortschrittliche KWK-Anlage keinen energetischen Vorteil mehr gegenüber dem Referenzfall.

Wir betrachten nun eine Auswahl von Erdgas-KWK-Anlagen und vergleichen sie mit dem Referenzfall der getrennten Erzeugung von Strom in einem GuD-Kraftwerk und dezentraler Wärme in einem Brennwertkessel. Hierzu übernehmen wir die in der erwähnten UBA-Studie [5] aufgeführten Beispiele<sup>7</sup> und ergänzen sie noch um eine Erdgas-Gegendruck-KWK (200 MW) [8] und ein modernes Mini BHKW mit weitgehender Brennwertnutzung (MEPHISTO, 20 kW) [10].

Strom /Wärme Erzeuger	KWK-Anlage im gekoppelten Betrieb und im Spitzenlastbetrieb								Gesamter Versorger			
	gekoppelter Betrieb				ungekoppelte Spitze mit: $X_{SE} = X_{SK} = 0.1$				(siehe Bild 1)		Brennstoffausnutzung	PE-Faktor getrennte Erzeugung
	$\eta_{el}$	$\eta_{ges}$	Input Daten-Quelle	$f_0$	$\eta_{SE}$	$x_{SE}$	$\eta_{SK}$	$x_{SK}$	$\epsilon_{el}$	$\epsilon_{th}$	$\epsilon_{ges}$	$f$
GuD	0,585	0,585	A		0,585	1	0	0	0,585	0	0,585	
GegenP200M	0,460	0,90	A	1,21	0,46	0,1	0,90	0,1	0,41	0,44	0,86	1,13
GuD Erdgas,100 MW	0,445	0,89	B	1,18	k.A.	0,1	0,90	0,1	k.A.	0,45	k.A.	k.A.
BHKW_1M	0,390	0,89	B	1,14	0,390	0,1	0,90	0,1	0,35	0,49	0,84	1,07
Mephisto_20k	0,315	1,05	C	1,24	0,32	0,1	1,05	0,1	0,28	0,69	0,98	1,14
GuD24M	0,363	0,86	B	1,09	k.A.	0,1	0,90	0,1	k.A.	0,49	k.A.	k.A.
GT_10M	0,311	0,83	B	1,03	0,311	0,1	0,90	0,1	0,28	0,51	0,79	0,96
BHKW_50k	0,293	0,88	B	1,06	0,293	0,1	0,90	0,1	0,26	0,56	0,82	0,98
Mikro_9k	0,243	0,98	B	1,12	0,243	0,1	0,98	0,1	0,22	0,69	0,91	1,03
Mikro_3k	0,157	0,94	B	1,01	0,157	0,1	0,94	0,1	0,14	0,72	0,86	0,93
Mikro_0.8k	0,104	0,90	B	0,94	0,104	0,1	0,90	0,1	0,09	0,73	0,82	0,85
BrenwertKessel	0	1,05			0	0	1,05	1	0	1,05	1,05	
StandardKessel	0	0,90			0	0	0,90	1	0	0,9	0,9	

Tabelle 1: Vergleich von KWK-Anlagen unterschiedlicher Größe von 200 MW<sub>el</sub> bis 0,8 kW<sub>el</sub> mit der getrennten Erzeugung von Strom in einem GuD-Kraftwerk und Wärme in einem Brennwertkessel (Details zur Berechnung siehe [1]). Input Datenquellen: A= [8]; B= [5]; C= [10]

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der für unsere Betrachtung wesentlichen Grundeigenschaften dieser Anlagen. Der PE-Faktor für die getrennte Strom- und Wärmeerzeugung wird zunächst für den Paradedfall des gekoppelten Betriebes als  $f_0$  (Spalte 5) errechnet, und der Einfluss der Erzeugung von Spitzenstrom und Spitzenwärme auf den PE-Faktor  $f$  (letzte Spalte) des Gesamt-Versorgers für ein festes Beispiel,  $X_{SK} = X_{SE} = 0.1$ , dargestellt. (Der allgemeine Fall wird in [1] behandelt.)

<sup>7</sup> A.a.O., hier S.158, Tab.5.1

Aus Tabelle 1 kann man folgendes entnehmen:

- Selbst im Parade Fall des reinen KWK-Betriebes der Anlage liegt der Mehraufwand an Primärenergie bei getrennter Erzeugung von Strom in einem modernen GuD- Kraftwerk und Wärme in einem ordnungsgemäß eingestellten Brennkessel selten über 20%, in einigen Fällen werden jedoch nicht einmal 10% erreicht.
- Bei korrekter Einbeziehung des vom KWK-Versorger bei vernünftiger Auslegung seiner Anlage benötigten Spitzenkessels und bei Berücksichtigung von Spitzenstrom ohne Wärmenutzung ergibt sich eine deutliche Verschlechterung für die KWK-Seite. Im angeführten Beispiel eines jeweils 10-prozentigen Brennstoffeinsatzes für Spitzenwärme und Spitzenstrom ist praktisch nur noch in Einzelfällen ein deutlicher Vorteil der KWK zu erkennen.

*Zur Wahl der Werte für  $X_{SE}$  und  $X_{SK}$ :* Für die vollständige Erfassung der in der Praxis vorkommenden Brennstoffanteile für ungekoppelte reine Strom- ( $X_{SE}$ ) und reine Wärmeerzeugung ( $X_{SK}$ ) fehlt die statistische Grundlage. Das hier gewählte Beispiel  $X_{SE} = X_{SK} = 0,1$  beschreibt eine geringfügige Abweichung vom Fall der reinen Koppelproduktion. Selbst diese kleine Abweichung führt zu der beschriebenen Verschlechterung der KWK-Position im Vergleich zur getrennten Erzeugung.

Fazit: Die Versorgung mit Strom und Wärme unter Einsatz von KWK-Anlagen ist der getrennten Versorgung keineswegs immer überlegen. Es kommt dabei nicht nur auf die Anlagen sondern in einem erheblichen Ausmaße auch auf die Betriebsweise an.

### 3.2–b Vergleich mit GuD-Anlage und elektrischer Wärmepumpe

Thermodynamisch optimiertes Heizen kann sowohl durch KWK als auch durch Wärmepumpen realisiert werden. Bei thermodynamischen Prozessen nahe dem Optimum wäre eine KWK mit der gezielten Abwärmenutzung auf dem Temperaturniveau der Wärmeanwendung kaum noch zu verbessern. In der industriellen Praxis mit wohl definiertem Dampfbedarf wird eine streng wärmegeführte (!) KWK auch in der Regel energetisch konkurrenzlos bleiben.

Anders sieht es im Gebäudebereich aus: Bei der Fernwärme kann wegen des Geleitzugbetriebes und anderer Einschränkungen (siehe [1] Abschnitt 6.2) kein qualitativer Nutzen aus den Bemühungen zur Verminderung der exergetischen Anforderungen eines einzelnen Gebäudes gezogen werden. Bei der Wärmepumpe kann hingegen jeder Fortschritt bei der Verminderung der Exergieanforderung an die Heizwärme (also niedrige Vorlauftemperatur, niedrige Rücklauftemperatur, Ausnutzung von Aufwärmprozessen, kleine Temperaturdifferenzen an den Wärmetauschern (siehe Kapitel I.2) sofort in einen besseren Wirkungsgrad der Wärmepumpe umgesetzt werden.

Als Vergleich zum Erdgasbedarf  $Q_0^V$  eines KWK-Versorgers betrachten wir nun als Referenzfall den Erdgaseinsatz  $Q_0$  in einem GuD-Kraftwerk, das dieselbe Strommenge wie die KWK-Anlage (KWK-Betrieb und Spitzenstrom) ins Netz liefert und zusätzlich den Strombedarf für die dezentralen Wärmepumpen deckt, die alle zusammen die gleiche Wärmemenge wie der Fernwärmeversorger liefern. Wir vergleichen also bei exakt gleicher Versorgungsaufgabe den betrieblichen Gaseinsatz der beiden Versorgungssysteme.

An die weiter oben aufgestellten Gleichungen können wir direkt anknüpfen, indem wir den dortigen thermischen Wirkungsgrad eines Brennkessels,  $\eta_{th}^{BK}$ , durch  $\eta_{th}^{WP}$ , den thermischen Wirkungsgrad der Wärmepumpe in Bezug auf den Gaseinsatz im GuD-Kraftwerk, ersetzen. Die Größe  $\eta_{th}^{WP}$  ist das Produkt aus dem Wirkungsgrad  $\eta_{el}^{GuD}$  des GuD-Kraftwerkes und der Jahresarbeitszahl JAZ der Wärmepumpe:

$$\eta_{th}^{WP} = \eta_{el}^{GuD} \cdot JAZ$$

Im Systemvergleich wirkt die Wärmepumpe also wie ein „Superkessel“ mit einem herausragenden thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{th}^{WP}$ . In Tabelle 2 sind hierfür einige Zahlenwerte angegeben, die man im Vergleich zum thermischen Wirkungsgrad eines Brennwertkessels, bestenfalls  $\eta_{th}^{BK} = 1.1$ , sehen muss. Die Kombination von GuD-Kraftwerk und Wärmepumpe ergibt für den zentralen Erdgaseinsatz im Kraftwerk zur dezentralen Wärmeerzeugung hohe thermische Wirkungsgrade.

JAZ	3	3,5	4	4,5	5	5,5
$\eta_{el}^{GuD}$	0,585	0,585	0,585	0,585	0,585	0,585
$\eta_{th}^{WP}$	1,76	2,05	2,34	2,63	2,93	3,22

Tab. 2: Effektiver thermischer Wirkungsgrad von Wärmepumpen, bezogen auf den Erdgasverbrauch des modernen Stromerzeugers (GuD) als Funktion ihrer Jahresarbeitszahl.

Nun vergleichen wir die KWK-Anlagen aus Tabelle 1 mit einer getrennten Erzeugung von Strom aus einem GuD-Kraftwerk und von Wärme aus Wärmepumpen, die ihren Strom aus dem betrachteten GuD-Kraftwerk beziehen. Wir legen dabei eine derzeit gute, aber in Zukunft vermutlich nur noch mittelmäßige Jahresarbeitszahl (JAZ) von 4 und dementsprechend ein  $\eta_{th}^{WP} = 2.34$  zugrunde. In Tabelle 3 wird der PE-Faktor für die getrennte Strom- und Wärmeerzeugung zunächst für den Paradeffall des gekoppelten Betriebes als  $f_0$  errechnet und dann der Einfluss der Erzeugung von Spitzenwärme und Spitzenstrom auf den PE-Faktor  $f$  des Gesamt-Versorgers wieder für das Beispiel  $x_{SK} = x_{SE} = 0.1$  dargestellt.

Tabelle 3 zeigt, dass alle betrachteten KWK-Anlagen sogar im Paradeffall (ohne Spitzenwärme und -strom) der Kombination aus GuD-Kraftwerk und Wärmepumpe unterlegen sind. Bei einigen kleineren Anlagen fällt dieses Defizit sogar recht drastisch aus. Die KWK-Anlagen mit hohem elektrischem Wirkungsgrad, z.B. die 200-MW-Gegendruckanlage „GegenP\_200M“, können zwar mit  $f_0 = 0.97$  im Paradeffall noch fast mit der getrennten Erzeugung mithalten, aber die Wärmeeinspeisung aus dem Spitzenkessel und der Spitzenstrom verschlechtern die PE-Bilanz weiter.

Strom /Wärme Erzeuger	KWK-Anlage im gekoppelten Betrieb und im Spitzenlastbetrieb								Gesamter Versorger			
	gekoppelter Betrieb				ungekoppelte Spitze mit: $x_{SE} = x_{SK} = 0.1$				(siehe Bild 1)		Brennstoffausnutzung	PE-Faktor getrennte Erzeugung
	$\eta_{el}$	$\eta_{ges}$	Input Daten-Quelle	$f_0$	$\eta_{SE}$	$x_{SE}$	$\eta_{SK}$	$x_{SK}$	$\epsilon_{el}$	$\epsilon_{th}$	$\epsilon_{ges}$	$f$
GuD	0,585	0,585	A		0,585	1	0	0	0,585	0	0,585	
GegenP200M	0,460	0,90	A	0,97	0,46	0,1	0,90	0,1	0,414	0,44	0,86	0,90
GuD Erdgas,100 MW	0,445	0,89	B	0,95	k.A.	0,1	0,90	0,1	k.A.	0,45	k.A.	k.A.
BHKW_1M	0,390	0,89	B	0,88	0,390	0,1	0,90	0,1	0,351	0,49	0,84	0,81
Mephisto_20k	0,315	1,05	C	0,85	0,315	0,1	1,05	0,1	0,284	0,69	0,98	0,78
GuD24M	0,363	0,86	B	0,83	k.A.	0,1	0,90	0,1	k.A.	0,49	k.A.	k.A.
GT_10M	0,311	0,83	B	0,75	0,311	0,1	0,90	0,1	0,280	0,51	0,79	0,69
BHKW_50k	0,293	0,88	B	0,75	0,293	0,1	0,90	0,1	0,264	0,56	0,82	0,69
Mikro_9k	0,243	0,98	B	0,73	0,243	0,1	0,98	0,1	0,219	0,69	0,91	0,67
Mikro_3k	0,157	0,94	B	0,60	0,157	0,1	0,94	0,1	0,141	0,72	0,86	0,55
Mikro_0.8k	0,104	0,90	B	0,52	0,104	0,1	0,90	0,1	0,093	0,73	0,82	0,47
Brennwertkessel	0	1,05					1,05	1				
Wärmepumpe	0	2,34										

Tab. 3:

Vergleich der KWK-Anlagen aus Tab. 1 mit der getrennten Stromerzeugung aus zentralen GuD-Kraftwerken und daraus gespeisten Wärmepumpen. (Details siehe [1]). Input-Datenquellen wie in Tabelle 1.

Fazit: Geht man davon aus, dass bauseits und gerätetmäßig noch ein beträchtliches Entwicklungspotenzial für das thermodynamisch optimierte Heizen mit Wärmepumpen besteht, kann man festhalten: Die KWK unterliegt im energetischen Wettbewerb mit GuD-Kraftwerk und Wärmepumpe und wird wohl in Zukunft eher noch weiter zurückfallen.

### 3.2-c Zusammenfassung des Abschnitts 3.2:

Ein genauer Vergleich verschiedener Erdgas-KWK-Anlagen (sowohl Anlagen zur zentralen Versorgung mit Fernwärme als auch solche zur dezentralen Wärmeversorgung) mit der getrennten Strom- und Wärmeversorgung aus Erdgas hat ergeben:

- Die getrennte Erzeugung mit GuD-Kraftwerk und Brennwärtekessel ist im Allgemeinen nur wenig schlechter als die KWK und kann je nach Betriebsweise der KWK in einigen praktischen Fällen sogar etwas besser sein.
- Bei Anwendung von aus GuD-Kraftwerken gespeisten effizienten Wärmepumpen besteht jedoch in der Regel ein deutlicher energetischer Vorteil gegenüber der KWK.

Dieser Vergleich ist ein grundsätzliches physikalisches Argument. Es sieht von Nebeneffekten wie dem Wärmeverlust in Fernwärmenetzen, Stillstandzeiten, elektrischen Verlusten, Mehraufwand für die dezentrale Gasversorgung, benötigtem Pumpstrom und ähnlichem ab, die in der Praxis durchaus ins Gewicht fallen können. Es wird allerdings vorausgesetzt, dass die äußerst effizienten erdgasbefeuerten GuD-Kraftwerke und „Brennwert“-Heizkessel bzw. Wärmepumpen eingesetzt werden.

Der Kernpunkt des physikalischen Arguments ist folgender: Bei der Erzeugung von Strom und von Wärme für eine bestimmte Anwendung (d.h. eine bestimmte Wärmemenge auf ein bestimmtes Temperaturniveau bringen) kommt es nicht nur auf den Grad der Brennstoffausnutzung an. Vielmehr gibt es Systeme, die insgesamt weniger Brennstoff verbrauchen, weil sie bei hohem Wirkungsgrad der Stromerzeugung gleichzeitig das Anforderungsprofil für die Wärme passgenauer erfüllen.

### **3.3 Die KWK in der Energiepolitik und der öffentlichen Diskussion**

Die KWK wird staatlich gefördert, da man davon ausgeht, dass sich mit ihr gegenüber einer getrennten Erzeugung von Wärme und Strom eine deutliche Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung ergibt (siehe z.B. [12]), was in diesem Kapitel kritisch hinterfragt wird.

Eine zur Förderung anstehende KWK-Anlage kann formal rechnerisch mit einer Vielfalt von Wärme- und Strom-Erzeugern verglichen werden. Bei Ausnutzung dieses Spielraums ist es möglich, sehr günstige CO<sub>2</sub>-Einsparungswerte von 25-40%, manchmal sogar noch mehr, für die KWK zu errechnen<sup>8</sup>. Dies ergibt für den (meistens dargestellten) Mehraufwand für die getrennte Erzeugung gegenüber der KWK einen Faktor von 1,3 bis 1,6 und mehr<sup>9</sup>. Politik und Öffentlichkeit haben große Erwartungen hinsichtlich der Einsparpotenziale durch KWK entwickelt. Entsprechend hat die Bundesregierung beschlossen, den KWK-Anteil an der Stromerzeugung von heute 12% auf 25% im Jahre 2020 zu verdoppeln. Sie fördert die Investition und den Betrieb von KWK-Anlagen durch das KWK-Gesetz [7] und durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG [13]. Da-

<sup>8</sup> Vgl. etwa die Werbeschrift des Bundes-Umweltministeriums [12]

<sup>9</sup> Die in den Tabellen 1 und 3 angegebenen Primärenergiefaktoren  $f_0$  und  $f$  beziehen sich ebenfalls auf den Mehraufwand der getrennten Erzeugung gegenüber der KWK.

durch wird die KWK vor anderen Formen der Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung in besonderer Weise bevorzugt. Wir haben im Abschnitt 3.2 die Energieversorgung durch neue KWK-Anlagen mit derjenigen durch alternative neue Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme verglichen. Bei dieser realistischen Betrachtung ergaben sich für die KWK deutlich niedrigere Energieeinsparungen als bisher veröffentlicht.

Was wurde hier anders gemacht?

Die meisten konventionellen Betrachtungen unterscheiden sich von unserer Darstellung in einem oder mehreren der folgenden Punkte:

(1) Es werden oft Vergleiche zwischen nicht äquivalenten Größen angestellt:

- Wärme (geringer Exergiegehalt) und Strom (reine Exergie) werden einfach addiert, und diese „Brennstoffausnutzung“ wird dann als alleiniger Gütefaktor herangezogen,
- KWK-Strom aus Erdgas wird mit Strom aus Kohlekraftwerken verglichen,
- neue KWK-Anlagen werden alten Kraftwerken und Heizkesseln gegenüber gestellt,
- man erfreut sich an der „Abwärmenutzung“ und übersieht dabei, dass diese durch eine gravierende Einbuße am elektrischen Wirkungsgrad erkaufte ist.

(2) Es wird nur die Wärme aus der KWK-Anlage betrachtet und nicht die gesamte Fernwärmelieferung. – Der Beitrag des Spitzenkessels wird also aus der Bewertung ausgeklammert, obwohl er sehr wohl Teil der Energiebilanz sein muss (auch wenn er die Effizienz der Fernwärme verschlechtert).

(3) Es wird nicht die gesamte Stromerzeugung in der KWK-Anlage, sondern nur die Stromerzeugung im idealen wärmegeführten Betrieb mit gekoppelter Strom- und Wärmeproduktion, bewertet. Die auch mit einer KWK-Anlage mögliche, herkömmliche Stromerzeugung ohne Wärmenutzung wird ausgeklammert. – Ein GuD-Kraftwerk punktet gegenüber einem BHKW vor allem bei der reinen Stromerzeugung. Wenn aber die deutsche Stromversorgung statt auf zusätzliche GuD-Anlagen vermehrt auf neue KWK-Anlagen setzt, dann übernehmen überalterte Kraftwerke oder eigentliche KWK-Anlagen die Rolle der nicht gebauten GuD-Kraftwerke und erzeugen zeitweilig Strom ohne Wärmenutzung. Daher darf dieser Bereich in der Bilanz nicht ausgeklammert werden.

(4) Als Vergleichswerte für die getrennte Erzeugung werden nicht die in Deutschland tatsächlich erreichten Wirkungsgrade moderner GuD-Kraftwerke und Brennwertkessel benutzt, sondern es werden die deutlich (etwa 10%) geringeren „europäischen“ Zahlenwerte der EU Entscheidung 2007/74/EG [14] übernommen.

(5) Bei Wärmepumpen wird mit dem Strombezug aus dem deutschen Strommix gerechnet. Wir legen stattdessen im Systemvergleich den Strombezug aus einem GuD-Kraftwerk zugrunde. – Bei einer neuen Erdgas-KWK-Anlage wird sowohl der Strom als auch die Wärme aus einer **neu** errichteten Anlage und aus Erdgas erzeugt. Zu einem korrekten Systemvergleich mit einer getrennten Erzeugung muss daher ebenfalls von modernen Erdgasanlagen ausgegangen werden. Diese bereits in der EU-Richtlinie 2004/8/EG [11] für den Fall von Kraftwerk und dezentralem Kessel festgelegte Vorgehensweise muss sinngemäß auch auf die Stromversorgung von dezentralen Wärmepumpen angewendet werden. Würde man die dezentralen Wärmepumpen im Systemvergleich mit dem Strom-Mix speisen, so würde man für die Energieversorgung der Wärmepumpen ja letztendlich nicht Erdgas sondern den Brennstoff-Mix der deutschen Stromerzeugung einsetzen. Im Übrigen werden bei der beabsichtigten Verlagerung von Erdgas aus der dezentralen Wärmeerzeugung in die Stromerzeugung ja auch tatsächlich neue GuD-Anlagen gebaut werden, falls KWK-Anlagen in geringerem Umfang zum Zuge kommen.

(6) Es werden die bereits in Abschnitt 3.2-c erwähnten Nebeneffekte berücksichtigt. – Dagegen ist grundsätzlich nichts einzuwenden. Da aber diese Nebeneffekte zum Teil entgegen gesetzt gerichtete Auswirkungen auf die Energiebilanz haben und zumeist doch nur pauschaliert angegeben werden, bleiben sie bei der auf die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge ausgerichteten Betrachtung der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt. Dies erlaubt eine einfachere Darstellung, aus der der Einfluss der wesentlichen Parameter klarer hervorgeht.

### 3.3-a Staatliche Förderung

Die staatliche Förderung einer KWK-Anlage setzt eine Vergleichsrechnung voraus, in der Energieeinsparungen nachgewiesen werden müssen. Im Hinblick auf nationale Festlegungen zur KWK-Förderung hat die EU in der Richtlinie EU 2004/8/EG [11] zwei wichtige und eigentlich selbstverständliche Grundsätze verankert (s. [1] Abschnitt 5, Bild 7):

- es dürfen nur Anlagen mit gleichem Primärenergieträger verglichen werden;
- zum Vergleich mit der getrennten Erzeugung von Wärme und Strom ist die beste verfügbare und wirtschaftlich vertretbare Technologie heranzuziehen.

Der zweite Grundsatz wurde bei seiner Umsetzung in konkrete Zahlenwerte für die „beste Technologie“ in der EU-Entscheidung 2007/74/EG [14] wieder etwas verwässert. Eine Abschätzung ergibt, dass die formal angegebenen Vergleichswirkungsgrade für das Gaskraftwerk und den Gasheizkessel rund 10% schlechter sind, als es der derzeit verfügbaren Standardtechnologie entspricht. Eine nach der Richtlinie förderungswürdige „hocheffiziente“ Erdgas-KWK, die 10% Primärenergieeinsparung gegenüber den nach ihren Zahlenwerten bereits technisch überholten formalen Vergleichsanlagen erbringen muss, muss also tatsächlich nur noch etwa genauso effizient sein wie die getrennte Erzeugung von Strom in einem zentralen GuD-Kraftwerk und von Wärme in einem in Deutschland üblichen Brennwertkessel. Die Bezeichnung „hocheffizient“ ist also unangebracht und verwirrend, die Förderung setzt tatsächlich bereits beim status quo ein (Details siehe [1] Abschnitt 6).

KWK-Kleinanlagen werden nach der Richtlinie EU 2004/8/EG [11] bereits als „hocheffizient“ und dadurch förderungswürdig akzeptiert, wenn sie überhaupt zu einer rechnerischen Energieeinsparung führen. Berücksichtigt man die – wie oben erwähnt – zu niedrig angesetzten Vergleichswerte, so können KWK-Kleinanlagen bereits dann gefördert werden, wenn sie noch deutlich mehr Primärenergie benötigen als die getrennte Erzeugung.

### 3.3-b KWK-Betrieb und weiterführende Einsparungen

Eine bereits getätigte hohe Investition in die Wärmebereitstellung behindert die Motivation und die Wirtschaftlichkeit von weiteren Maßnahmen zur Energieeinsparung.

In einem Siedlungsgebiet erfolgt der Anschluss an eine Fernwärme sinnvoller Weise in koordinierter und gebündelter Form, auch wenn kein direkter Anschluss- und Benutzungszwang besteht. Es werden daher viele Haushalte die Maßnahmen zur thermischen Gebäudesanierung, die bei der Umstellung auf ein neues Heizsystem mit seinen hohen Kosten für die Leistungsbereitstellung eigentlich sinnvoll sind, nicht zeitgerecht durchführen. Eine nachträgliche Sanierung vermindert aber die Auslastung und damit die Wirtschaftlichkeit der Fernwärmeversorgung.

Bei einer dezentralen KWK werden die Investitionskosten in einem erheblichen Ausmaß durch die Stromerlöse abgedeckt. Bei einer nachträglichen thermischen Sanierung wird eine zunächst optimal ausgelegte KWK-Anlage weniger „wärmegeführten“ Strom liefern. Den erwünschten geringeren Wärmekosten stünden also geringere Stromerlöse gegenüber. Besonders hoch sind die Erlöse bei einer Eigennutzung des Stromes: hier kann sich der kleine Stromproduzent den teuren Haushaltstarif und die zusätzliche KWK-Subvention gutschreiben; schon bei einem mäßigen elektrischem Wirkungsgrad verdient seine Anlage ihre Arbeitskosten auch ohne Wärmenutzung. Der Betreiber ist daher vor allem an einer hohen Auslastung seiner KWK-Anlage interessiert, eine thermische Sanierung ist für ihn ökonomisch nicht sinnvoll. Es besteht also die Gefahr, dass die KWK zur ökologischen Sackgasse wird.

Bei einer viel individueller zu konzipierenden Wärmepumpe wird der Hausbesitzer dagegen schon bei der Planung und Auslegung darauf gestoßen, durch vorherige thermische Sanierung seine Anlagenkosten zu reduzieren. Und auch bei einer nachträglichen Sanierung stehen der Einsparung an Betriebskosten wenigstens keine die Motivation behindernden Erlöseinbußen wie im Falle der KWK gegenüber.

### **3.4 Skizze zur Optimierung des Erdgaseinsatzes für Gebäudewärme**

Kraft-Wärme-Kopplung ist eine moderne und thermodynamisch anspruchsvolle Form zur Gewinnung von Endenergie aus Brennstoffen. Eine allgemeine und alleine im Verfahren gründende Subventionswürdigkeit ist jedoch aus Gründen der Energieeinsparung nicht gegeben. Die KWK-Anlagen sollten sich dem ganz normalen Wettbewerb zur Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung stellen. Daher sollte man die Optimierungsfrage in der gebührenden Allgemeinheit stellen: Wie und in welchem Gesamtrahmen lässt sich Erdgas für die Wärmeversorgung im Gebäudebereich direkt oder indirekt am günstigsten einsetzen? Hierzu müssen auch für eine Förderung und Beschleunigung der notwendigen Optimierung die richtigen Signale ausgegeben werden.

#### 3.4–a Vorschlag: Eingesparte Vergleichsenergie als Maß für den Zuschuss

Die KWK-Subventionierung erfolgt in Deutschland nach dem Prinzip „entweder voll oder gar nicht“: entweder liegen die Voraussetzungen des KWK-Gesetzes vor, dann erfolgt eine volle Förderung für jede Kilowattstunde, die in diesem Betriebszustand als „KWK-Strom“ erzeugt wird, oder aber es gibt überhaupt keine Förderung. Da die Anforderungen des KWK-Gesetzes wie gesagt sehr niedrig sind, kann es sogar vorkommen, dass eine Anlage, die mehr Erdgas verbraucht als eine äquivalente getrennte Erzeugung, trotzdem voll gefördert wird.

Dieses „Entweder-voll-oder-gar-nicht“-Prinzip wird übrigens auch bei den Einspeisetarifen für Erneuerbare Energien nach dem EEG angewendet und ist dort auch sinnvoll. Bei den Erneuerbaren Energien ist es nämlich gleichgültig, wie effizient die Anlage ist: Jede CO<sub>2</sub>-frei produzierte Kilowattstunde ersetzt eine solche mit CO<sub>2</sub>-Emission, und die Ressource ist nicht knapp.

Bei der KWK ist dies jedoch völlig anders: Hier werden knappe Energieträger eingesetzt, und der Einspareffekt lässt sich nicht an der produzierten Strommenge erkennen, sondern muss als Differenz zu den Referenzanlagen der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme berechnet werden.

Was liegt also näher, als diese nachgewiesene Einsparenergie als Maß für den Zuschuss zugrunde zu legen? Falls überhaupt subventioniert werden soll, plädieren wir gegen die bisherige Pauschalierung und für einen in der Energieeinsparung „linearen Tarif“. Dieser lineare Einspartarif lässt sich bei Bedarf je nach eingesetztem Energieträger differenzieren und auf alle Arten der thermodynamisch optimierten Wärmeerzeugung in gleicher Weise anwenden. Dies ermöglicht einen fairen Wettbewerb.

### 3.4–b Skizze zu einem Gesamtkonzept des Einsatzes von Erdgas mit folgenden Zielen

- (1) Direkten Erdgaseinsatz im Gebäudebereich zurückdrängen durch
  - thermische Sanierung der Gebäudehülle und Wärmerückgewinnung,
  - Auslegung der Wärmeübertrager (Heizkörper, Flächenheizung) auf kleine Temperaturdifferenzen zur Raumtemperatur,
  - Einsatz von Wärmepumpen,
  - Einsatz von Sonnenenergie zur Warmwassererzeugung im Sommer und zur Unterstützung des Niedertemperaturheizsystems im Winter.
  
- (2) Erdgaseinsatz im Strombereich ausweiten durch den Neubau von zentralen höchsteffizienten GuD-Anlagen, welche
  - indirekt durch den Antrieb von dezentralen Wärmepumpen auch einen großen Teil der Wärmeversorgung übernehmen,
  - durch bedarfsgerechte Wärmeauskopplung auch Fernwärme bereitstellen können,
  - alte Kraftwerke mit hohen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Mittel- und Grundlast verdrängen.
  
- (3) Erdgas zur dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung einsetzen, aber nur bei Ausnutzung des Brennwerteffektes und bei garantierter Beschränkung auf streng wärmegeführten Betrieb. Dann kann die dezentrale KWK einen auch elektrizitätswirtschaftlich sinnvollen Beitrag zur Abdeckung der saisonalen Leistungsspitze durch den vermehrten Einsatz von Wärmepumpen leisten.

### **3.5 Zusammenfassung und Ausblick**

In der Vergangenheit haben Politik und öffentliche Meinung die Vorzüge der KWK stark überhöht und ihre Nachteile offensichtlich nicht hinreichend einbezogen. Die vorliegende Untersuchung hat sich zur Aufgabe gestellt, die Messlatte am Beispiel der mit Erdgas betriebenen Anlagen an die modernen Gegebenheiten anzupassen.

Die KWK spart selbst im „Paradefall“ eines streng wärmegeführten Betriebes ohne zentralen Spitzenkessel in der Regel nur geringe Prozentsätze an Primärenergie gegenüber einer getrennten Erzeugung von Strom (GuD-Kraftwerk) und Wärme (Brennwertkessel) ein. Bei Berücksichtigung der bei vernünftiger Planung ökonomisch angezeigten Spitzenwärme und wegen der Versuchung zur Lieferung von Spitzenstrom ohne Wärmenutzung tendiert der Einspareffekt jedoch gegen Null oder wird sogar negativ.

Bei einem Vergleich mit einer dezentralen Wärmeerzeugung aus elektrischen Wärmepumpen, deren Strom von einem GuD-Kraftwerk geliefert wird, ist die KWK sogar deutlich unterlegen.

Um die Klimaziele besser erreichen zu können, ist daher ein umfassendes Gesamtkonzept der thermodynamisch optimierten Bereitstellung der Energiedienstleistung „behaftliches Raumklima und Warmwasser“ erforderlich. Der Staat sollte diese Entwicklung durch Forschung und Entwicklung, Modellvorhaben und Hilfen zur Markteinführung fördern. Bei einer breit angelegten Subventionierung sollte er sich jedoch nicht auf einzelne Technologien festlegen, sondern durch einen „linearen Einspartarif“ die Vergütung an den gegenüber einem anspruchsvollen Referenzfall tatsächlich nachweisbaren Energieeinsparungen ausrichten.

## Materialien

Dem Kapitel liegen eine ausführlichere Darstellung als „Materialiensammlung“ und zwei Powerpoint-Vorträge zugrunde, in denen weitere Einzelheiten und Quellen angegeben sind.

- [1] Gerhard Luther Materialien: *KWK und Systemvergleich*  
[http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/DPG2010\\_E-Studie/](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010_E-Studie/)
- [2] Gerhard Luther: *Kraftwärmekopplung (KWK) – Hoffnungsträger oder Subventionsloch?*, 2008  
[http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/AKE2008H/Links\\_AKE2008H.htm](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/AKE2008H/Links_AKE2008H.htm)
- [3] Gerhard Luther: *Thermodynamisch optimiertes Heizen: KWK, Wärmepumpe und Systemvergleich*, 2009 und 2010  
[http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/AKE2009H/Links\\_AKE2009H.htm](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/AKE2009H/Links_AKE2009H.htm) und  
[http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/DPG2010-AKE\\_Bonn/Links\\_DPG2010.htm](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm)

## Anmerkungen und Literatur

- [4] Eurostat, Schriftenreihe *Umwelt und Energie*, Heft 3/2006 ISSN 1562-3092, Europäische Gemeinschaften (2006).  
[http://www.eds-destatis.de/de/downloads/sif/nq\\_06\\_03.pdf](http://www.eds-destatis.de/de/downloads/sif/nq_06_03.pdf) (2002)
- [5] M. Horn u.a.: *Ermittlung der Potenziale für die Anwendung der KWK und der erzielbaren Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen einschließlich Bewertung der Kosten*, 318 S. (2007), Band 10/07 der UBA-Reihe Climate Change, ISSN 1862-4359. Kann unter dem Stichwort „Publikationen“ heruntergeladen werden bei: <http://www.umweltbundesamt.de>
- [6] Eurostat, *Combined Heat and Power (CHP) in the EU, 2007 data*, Schriftenreihe *Data in Focus*, 28/2009, European Commission (2009). [http://www.eds-destatis.de/de/downloads/sif/qa\\_09\\_028.pdf](http://www.eds-destatis.de/de/downloads/sif/qa_09_028.pdf) (2007).  
  
Eurostat, *Statistik über Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) in der EU im Jahre 2000*, Schriftenreihe *Statistik kurz gefasst*, Thema 8-12/2003, ISSN 1562-3092, Europ. Gemeinschaften 2003.  
[http://www.eds-destatis.de/de/downloads/sif/nq\\_03\\_12.pdf](http://www.eds-destatis.de/de/downloads/sif/nq_03_12.pdf) (2000)
- [7] KWKG: *Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 2009*, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I ,S. 2870 ff.  
[http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/kwkg\\_2002/gesamt.pdf](http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/kwkg_2002/gesamt.pdf)
- [8] Voss 2009: *Referenzdatensatz für Kraftwerke*, Stand 31.07.09, private Mitteilung
- [9] E.ON Kraftwerke GmbH 2009: Homepage zum Neubau des Kraftwerkes Irsching  
[http://www.kraftwerk-irsching.com/pages/ekw\\_de/Neubau/Bauvorhaben/index.htm](http://www.kraftwerk-irsching.com/pages/ekw_de/Neubau/Bauvorhaben/index.htm)
- [10] Gasbefeuerter Kompakt-Brennwert-BHKW MEPHISTO G20+  
<http://www.kraftwerk-bhkw.de/MEPHISTO/technik01.htm>
- [11] EU-Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG:  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1992L0042:20040221:DE:PDF>
- [12] BMU 2008: *Energie dreifach nutzen: Strom, Wärme und Klimaschutz: Ein Leitfaden für.... Mini-KWK*;  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitfaden\\_mini\\_kwk.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitfaden_mini_kwk.pdf)
- [13] EEG: *Erneuerbare-Energien-Gesetz 2009*, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2008 Teil I Nr. 49, S. 2074 ff.  
<http://www.bgblportal.de/BGBl/bgbl1f/bgbl108s2074.pdf>
- [14] EU *Entscheidung 2007/74/EG zur Festlegung harmonisierter Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme in Anwendung der Richtlinie 2004/8/EG*;  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:032:0183:0188:DE:PDF>