

Thermodynamisch optimiertes Heizen und Kraft-Wärme-Kopplung

Dr. Gerhard Luther, Universität des Saarlandes, Technische Physik, F.St. Zukunftsenergie,

Übersicht

Als in den 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts in Innenstädten und dicht besiedelten Stadtquartieren schmutzige dezentrale Kohleheizungen durch zentrale Heizkraftwerke (HKW) für die Fernwärme ersetzt wurden, da bedeutete dies einen doppelten Fortschritt:

- die Immission vor Ort war weg, und die Abgase der zentralen HKW konnten besser gereinigt (und verteilt) werden
- bei einem elektrischen Wirkungsgrad von Kohlekraftwerken von damals etwa 30% fanden sich neben den 10% Wärmeverlusten über den Schornstein etwa 60% des Wärmeeinsatzes in der Abwärme wieder. Für eine elektrische kWh gab es also zwei thermische kWh für den Kühlturm und die wollte man durch Kraftwärmekopplung (KWK) als Potential für die Fernwärme heranziehen. Zwar kostete das auch damals schon Einbußen beim elektrischen Wirkungsgrad, aber das „kalte Ende“ des Dampfkraftwerkes war exergetisch noch unvollkommen ausgenutzt.

In Ballungsgebieten ist inzwischen Erdgas der verbreitetste Heizenergieträger und auch bei neuen fossilen Kraftwerken scheint sich Erdgas durchzusetzen. Dies bedeutet:

- Erdgasheizungen sind auch lokal vergleichsweise sauber. Brennwertanlagen nutzen nicht nur die Heizwärme des Gases praktisch vollständig aus sondern gewinnen noch zusätzliche Wärme aus der Kondensation des Verbrennungswassers aus dem Abgas.
- Moderne Erdgaskraftwerke erreichen als Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) elektrische Wirkungsgrade von rund 60%. Zieht man von den verbleibenden 40% für den Abtransport der Abgase und sonstige schwer vermeidbare technische Betriebsverluste 10% ab, so verbleiben etwa noch 30%-Punkte Abwärme, die aus thermodynamischen Gründen auf niedrigem Temperaturniveau (z.B. 30°C) an die Umgebung abgegeben werden müssen. Auf eine elektrische kWh verbleibt also im Mittel nur noch eine halbe thermische kWh für den Kühlturm.

Um es kurz zu machen:

- Für die lokale Luftreinhaltung brauchen wir keine Fernwärme mehr.
- Auf nur noch etwa **ein Viertel** (!) hat sich die pro erzeugte elektrische kWh verbleibende Kühlturm-Abwärme bei modernen Erdgas GuD-Kraftwerken gegenüber alten Kohlekraftwerken reduziert.
- Und dazu kommt noch: Moderne dezentrale elektrische **Wärmepumpen** nehmen Umweltwärme auf und pumpen sie auf das Niveau der Heiztemperatur. Aus einer elektrischen kWh entstehen so **4 kWh** Heizwärme.

Trotz dieses technischen Fortschritts sind die öffentliche Begeisterung und die politische Unterstützung für die Kraftwärmekopplung ungebrochen und haben zu einer gesetzlich verankerten Bevorzugung und jährlichen Subvention der KWK in Milliardenhöhe geführt. Die Frage drängt sich also auf, ob das noch sinnvoll ist oder ob sich vielleicht ein verklärender „KWK –Mythos“ aufgebaut hat.

Deshalb sollen in diesem Beitrag die Kraftwärmekopplung (KWK) und hier schwerpunktmäßig die KWK mit Erdgasanlagen für den Gebäudewärmebereich mit anderen Systemen verglichen werden. Dabei ist es wichtig, zwei wesentliche und eigentlich selbstverständliche Vorgaben der für die Förderung von KWK-Anlagen zuständigen EU-Richtlinie [13] zu beachten: **neue Erdgas-KWK Anlagen** müssen mit modernen **Erdgas-Anlagen** für getrennte Erzeugung von Strom und Wärme verglichen werden und nicht etwa (direkt oder indirekt) mit alten Kohlekraftwerken und Ölkesseln. Außerdem dürfen nicht unbesehene Wärme und Strom addiert werden; diese als „Brennstoffausnutzung“ bezeichnete Summe ist als alleiniger Gütefaktor nämlich wenig aussagefähig.

Im Folgenden sollen nur die Kernpunkte einer umfassenderen Untersuchung² dargestellt werden. Die wichtigsten Ergebnisse sind dabei:

- Das überragend positive Bild, das sich Öffentlichkeit und Politik von der KWK gebildet haben, hat seine Wurzeln in unangemessenen Vergleichen, eingeschränkten energetischen Bilanzkreisen und der Benutzung der „Brennstoffausnutzung“ als Gütemaßstab und ist bei umfassender Analyse nicht vertretbar.
- Erdgas-KWK-Anlagen benötigen selbst im „Paradebetrieb“ (ohne Spitzenkessel und ohne ungekoppelten Strom aus der KWK-Anlage) tatsächlich oft nur geringfügig weniger Primärenergie (PE) als wenn man den gleichen Strom in GuD-Kraftwerken und die gleiche Wärme in Erdgas – Brennwertkesseln bereitstellt
- Vergleicht man „vollständige Alternativen“, also berücksichtigt auch den Einsatz von Spitzenkesseln und eine zeitweise ungekoppelte Stromerzeugung (also ohne Wärmenutzen), dann können – je nach Betriebsweise – Versorger mit KWK-Anlagen sogar mehr Primärenergie verbrauchen als eine getrennte Erzeugung mit GuD-Kraftwerk und Brennwertkessel benötigen würde.
- Die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme in GuD-Kraftwerken und hiermit versorgten modernen Wärmepumpen, die ein thermisch saniertes Haus mit Flächenheizung beheizen, ist durchweg - und teilweise sogar ganz wesentlich - energetisch sparsamer als die Erzeugung der gleichen Endenergie mit KWK-Anlagen.

Eine nur an die Technologie aufsetzende, herausgehobene Bevorzugung und Subventionierung der KWK ist also nicht mehr gerechtfertigt. Es ist auch nicht sinnvoll, dass in der breiten Anwendung überhaupt eine bestimmte Technologie herausgestellt wird. Vielmehr sollten Leistungsmerkmale, insbesondere die Energieeinsparung, Maßstab der Förderung sein, unabhängig von den angewandten Technologien. Diese sollten sich im freien Wettbewerb nach Maßgabe der technischen Innovation am Markt durchsetzen.

² Die Ergebnisse der Untersuchung wurden im Kapitel I.2 „Thermodynamisch optimiertes Heizen“ und insbesondere im Kapitel II.3 „KWK und Systemvergleich“ der von der DPG herausgegebenen „Elektrizitätsstudie“ [4] veröffentlicht. Darüber hinaus wurden Themen-bezogene Materialien [1] und eigene Vorträge ([2] und [3]) ins Internet [5] gestellt.

Sind geeignete Anreizsysteme politisch gewünscht, so wird vorgeschlagen, statt technologiespezifischer Subventionen einen „**linearen Einspartarif**“ einzuführen, bei dem sich die Förderung an den tatsächlichen Energieeinsparungen ausrichtet, die sich gegenüber einem anspruchsvollen Referenzfall nachweisen lassen (Kapitel 3.1).

Dabei muss als Grundfrage im Auge behalten werden, in welchem Gesamtrahmen sich Erdgas direkt oder indirekt für die Wärmeversorgung optimal einsetzen lässt. In Kapitel 3.2 wird dazu eine Skizze entworfen, die neben dem Einsatz von GuD-Kraftwerken und Wärmepumpen vor allen auf der thermischen Gebäudesanierung und der Wärmenutzung von Sonnenenergie beruht. (Kapitel 3.2) .

1. Ganzheitlicher Vergleich von KWK mit getrennter Erzeugung von Wärme und Strom

1.1 Randbedingungen

Die Beurteilung einer KWK-Anlage im Vergleich zu einer alternativen getrennten Erzeugung von Strom und Wärme muss vor dem Hintergrund geschehen, dass in Deutschland

- durch das **KWKG** gesetzlich festgeschrieben ist, dass sich der Anteil der KWK an der Stromerzeugung von derzeit 12 % auf 25% bis zum Jahre 2020 verdoppeln soll

und

- der Gaseinsatz bei der Stromerzeugung drastisch verstärkt werden soll (Integriertes Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung, Meseberger Beschlüsse, konkrete Zahlen hierzu in einer UBA- Studie [15])

Damit wird eine großangelegte Umrüstung der Elektrizitätserzeugung durch den Einsatz verbesserter Technik und gleichzeitig eine drastische Verschiebung im Primärenergieträger-Mix für die deutsche Stromversorgung angestrebt. Bei der Beurteilung dieser Perspektive muss, wie bereits erwähnt, vernünftigerweise und auch formal nach der EU-Richtlinie 2004/8/EG [13] so vorgegangen werden, dass (zur Förderung anstehende) KWK- Anlagen nur mit Anlagen zur getrennten Erzeugung verglichen werden, die

- den gleichen Primärenergieträger (PE) -Träger einsetzen und
- dem modernen Stand der Technik entsprechen.

1.2 Ein einfaches Modell zur Erzeugung von Strom und Wärme

Im Folgenden beschränken wir uns auf die Betrachtung von Erdgas-Anlagen zur Stromerzeugung und zur Bereitstellung von Gebäudewärme. Generell gehen wir nach einem einfachen Schema vor: Wir betrachten ein System, bei dem Erdgas eingespeist wird und Nutzwärme und Strom produziert werden.

Wir stellen uns dabei das folgende Modernisierungs-Szenario vor: Einige bestehende alte Kraftwerke sollen durch moderne Erdgas-Anlagen verdrängt werden und eine sehr große Zahl von alten Heizungsanlagen ebenfalls. Wir betrachten zwei Optionen:

1. **KWK-Untersuchungsfall:** Alte Heizungsanlagen und alte Kraftwerke werden durch die KWK-Anlagen und die im Regelfall zur vollen Wärmeversorgung zusätzlich notwendigen Spitzenlastkessel der Versorger verdrängt.

2. **Referenzfall:** Die alten Heizungskessel werden durch moderne Erdgas-Brennwertkessel ersetzt, und es findet ein zusätzlicher Bau von Erdgas-GuD-Kraftwerken statt, die dieselbe Strommenge liefern sollen wie die KWK-Anlagen des Untersuchungsfalles.

In einem weiteren Referenzfall ersetzen wir dann den Brennwertkessel durch eine elektrische Wärmepumpe für die dezentrale Wärmeerzeugung (Wärmepumpenfall).

1.2.1 Der KWK Versorger

Das Energieflussbild des KWK-Versorgers ist in **Abb. 1** dargestellt: In einem Abrechnungszeitraum (z.B. 1 Jahr) speist die Erdgaswärme Q_0^V mit den im **Abb. 1** bezeichneten Anteilen die KWK-Anlage und den Spitzenkessel. 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 allein den Wärmebedarf nicht mehr decken kann.

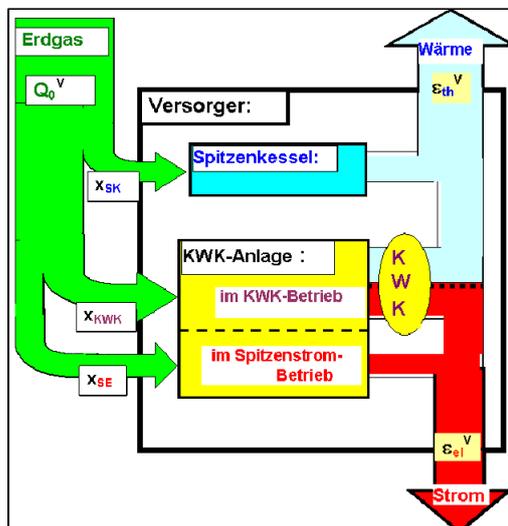


Abb. 1: Vollständige Wärme- und Stromproduktion eines Fernwärmever sorgers. Die Erdgasmenge Q_0^V speist mit den Anteilen x_{KWK} und x_{SE} die KWK- Anlage im KWK- Betrieb bzw. im ungekoppelten „Spitzenstrombetrieb“, und mit dem Anteil x_{SK} den Spitzenkessel. Die Nutzungsgrade des Erdgases betragen ϵ_{th}^V und ϵ_{el}^V für die Wärmelieferung bzw. für die Stromlieferung des Versorgers.

Die zeitweise Lieferung von Spitzenstrom und Spitzenkessel- Wärme dürfen neben dem meist herausgestellten „Paradefall“ des reinen KWK-Betriebes bei einer realistischen Energiebilanz, die „vollständige Alternativen“ untersucht, nicht vergessen werden.

Insgesamt wandelt der KWK-Versorger die eingesetzte Primärenergie Q_0^V mit einem thermischen Nutzungsgrad ϵ_{th}^V zu Fernwärme und mit einem elektrischen Nutzungsgrad ϵ_{el}^V zu Strom um. Die gesamte Brennstoffausnutzung des KWK-Versorgers, ϵ_{ges}^V , ergibt sich als

Summe:
$$\epsilon_{ges}^V = \epsilon_{el}^V + \epsilon_{th}^V \quad (1)$$

1.2.2 GuD-Anlage und Brennwertkessel

Die getrennte Erzeugung wird im ersten Referenzfall beschrieben durch den elektrischen Wirkungsgrad des GuD-Kraftwerkes, η_{GuD} , und den thermischen Wirkungsgrad des Brennwertkessels, η_{K} , für den wir 105 % einsetzen (siehe [1], Abschnitt 6.21). Als Referenz soll sie den gleichen Strom und die gleiche Nutzwärme erzeugen (Abb. 2), die der Fernwärmeproduzent 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 zusammen zählen. Das Verhältnis von Q_0 zu Q_0^{V} wird im Folgenden als Primärenergiefaktor f bezeichnet:

$$f = Q_0 / Q_0^{\text{V}} \quad (2)$$

Der **Primärenergiefaktor** f lässt sich einfach aus den oben definierten Eigenschaften berechnen und in eine für die weitere Diskussion geeignete Form bringen (Herleitung siehe [1] und [2]):

$$f = \varepsilon_{\text{ges}}^{\text{V}} / \eta_{\text{K}} + \varepsilon_{\text{el}}^{\text{V}} * \{ 1 / \eta_{\text{GuD}} - 1 / \eta_{\text{K}} \} \quad (3)$$

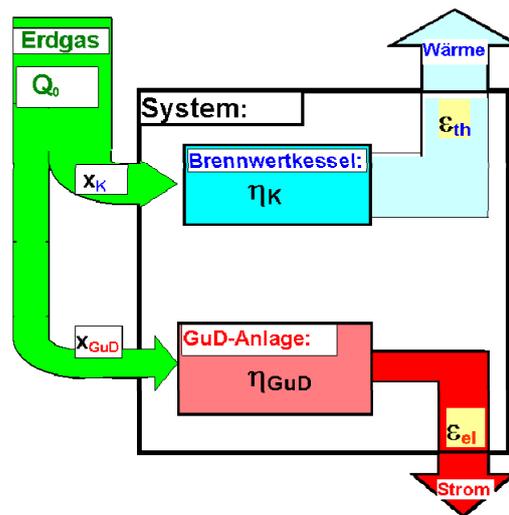


Abb. 2: Getrennte Wärme- und Stromproduktion durch Brennwertkessel und GuD-Kraftwerk. Als Referenzwerte für die Wirkungsgrade benutzen wir $\eta_{\text{K}}=105\%$ für den Brennwertkessel und $\eta_{\text{GuD}} = 58,5\%$ für das GuD-Kraftwerk.

Mit der Definition

$$\eta_{\text{ges}}^{\text{KWK}} = \eta_{\text{el}}^{\text{KWK}} + \eta_{\text{th}}^{\text{KWK}} \quad (4)$$

reduziert sich für den „Paradefall“ eines streng wärmegeführten Betriebes ($x_{\text{SE}}=0$) ohne Spitzenwärme ($x_{\text{SK}}=0$) die für die gesamte Versorgung gültige Gl. (3) auf:

$$f_0 = \eta_{\text{ges}}^{\text{KWK}} / \eta_{\text{K}} + \eta_{\text{el}}^{\text{KWK}} * \{ 1 / \eta_{\text{GuD}} - 1 / \eta_{\text{K}} \} \quad (5)$$

Im Hinblick auf staatliche Subventionen wird zur Bewertung der KWK die Primärenergieeinsparung durch die KWK, PEE, herangezogen [13]. Diese ergibt sich aus der Gl.(5) durch die Umformung

$$PEE = 1 - 1/f_0 \quad (6)$$

Trotz dieser einsichtigen gesetzlichen Definition wird in der Literatur und vor allem auch in den einschlägigen Publikumsbroschüren für die KWK meist der Primärenergiefaktor für den Parafall, f_0 , angegeben.

Es ist interessant, den Einfluss der Anteile x_{SK} und x_{SE} direkt anzugeben. Durch mathematische Umformung (siehe [1] und [2]) erhält man aus der Gl.(3) eine lineare Abhängigkeit des Primärenergiefaktors f sowohl von x_{SK} als auch von x_{SE} :

$$f(x_{SK}, x_{SE}) = f_0 - x_{SK} * [f_0 - \eta_{th}^{SK} / \eta_K] - x_{SE} * [f_0 - \eta_{el}^{SE} / \eta_{GUD}] \quad (7)$$

wobei f_0 bereits in Gl.(5) angegeben wurde, und η_{th}^{SK} den thermischen Wirkungsgrad des Spitzenkessels und η_{el}^{SE} den elektrischen Wirkungsgrad der KWK-Anlage im ungekoppelten Spitzenstrombetrieb bezeichnen.

1.2.3 GuD-Anlage und dezentrale Wärmepumpe

Thermodynamisch optimiertes Heizen kann sowohl mit KWK als auch mit 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 in der Regel energetisch konkurrenzlos bleiben.

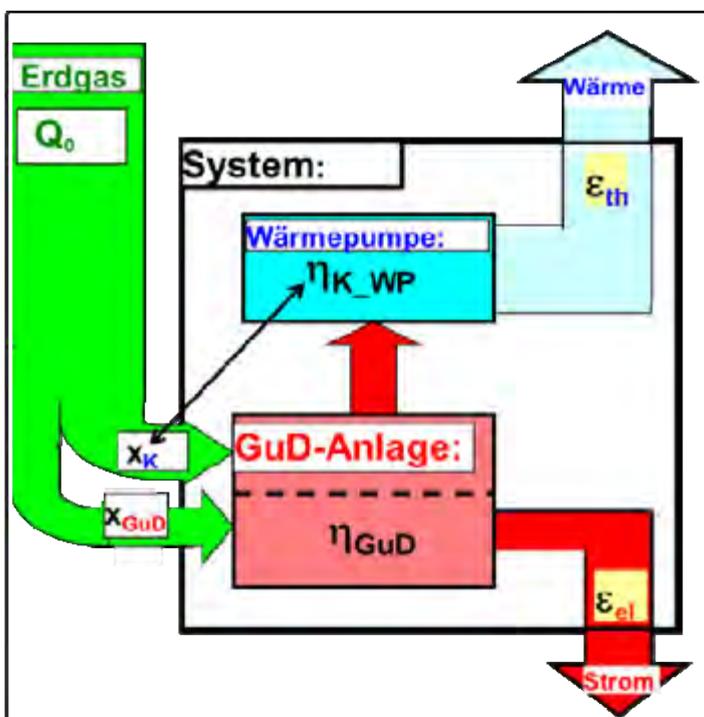


Abb. 3: Getrennte Strom- und Wärmeproduktion durch GuD-Kraftwerk und elektrische Wärmepumpe, wobei die Wärmepumpen durch die GuD-Anlage gespeist werden. Der Brennstoffwirkungsgrad η_{K_WP} bezieht die Jahresnutzwärme der Wärmepumpe auf den zu ihrem Betrieb notwendigen Brennstoffeinsatz im GuD.

Anders sieht es im Gebäudebereich aus: Bei der Fernwärme kann wegen des „Geleitzug“-Betriebes³ und anderer Einschränkungen (siehe Abschnitt 6.2 von [1]) 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 von [4]) sofort in einen besseren Wirkungsgrad umgesetzt werden.

Als Vergleich zum Erdgasbedarf Q_0^V eines KWK-Versorgers betrachten wir daher 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 (**Abb. 3**), die alle zusammen die gleiche Wärmemenge wie der Fernwärmeversorger liefern. Wir vergleichen also bei exakt gleicher Versorgungsaufgabe den betrieblichen Gaseinsatz der beiden Versorgungsvarianten.

An die im Abschnitt 1.2.2 aufgestellten Gleichungen können wir direkt anknüpfen, indem wir den dortigen thermischen Wirkungsgrad η_K eines Brennwertkessels durch η_{K_WP} , den thermischen Wirkungsgrad der Wärmepumpe in Bezug auf den Gaseinsatz im GuD-Kraftwerk, ersetzen. Aus Gl.(3) wird dann:

$$f = \varepsilon_{ges}^V / \eta_{K_WP} + \varepsilon_{el}^V * \{1/ \eta_{GUD} - 1/ \eta_{K_WP}\} \quad (8)$$

Die Größe η_{K_WP} erhält man als das Produkt aus dem Wirkungsgrad η_{GUD} des GuD-Kraftwerkes und der Jahresarbeitszahl **JAZ** der Wärmepumpe:

$$\eta_{K_WP} = \eta_{GUD} * \mathbf{JAZ} \quad (9)$$

Im Systemvergleich wirkt die Wärmepumpe also wie ein „Superkessel“ mit einem herausragenden thermischen Wirkungsgrad η_{K_WP} . In der **Tabelle 1** sind hierfür einige Zahlenwerte angegeben, die man im Vergleich zum thermischen Wirkungsgrad eines Brennwertkessels, bestenfalls $\eta_K = 1.1$, sehen muss:

JAZ	3	3,5	4	4,5	5	5,5
η_{GUD}	0,585	0,585	0,585	0,585	0,585	0,585
η_{K_WP}	1,76	2,05	2,34	2,63	2,93	3,22

Tabelle 1: Die Kombination von GuD-Kraftwerk und Wärmepumpe ergibt hohe thermische Wirkungsgrade η_{K_WP} für den zentralen Erdgaseinsatz im Kraftwerk zur dezentralen Wärmepumpen- Wärmeerzeugung.

³ Der Bedarf auf dem höchsten Temperaturniveau bestimmt die Temperatur des Gesamtfernwärmesystems

1.2.4 Das Strom- Endenergie - Diagramm

Eine einfache Überlegung zeigt, dass in einem Strom-Wärme-Diagramm alle möglichen Kombinationen des GuD und der Brennwertkessel auf einer Geraden liegen. Für Strom und Wärme aus getrennter Erzeugung gilt nämlich für alle $0 \leq x_K \leq 1$:

$$1 = x_K + x_{\text{GuD}} \quad (10)$$

$$\text{Wärme} = Q_0 \cdot \epsilon_{\text{th}} = Q_0 \cdot (\eta_K \cdot x_K) \quad (11)$$

$$\text{Strom} = Q_0 \cdot \epsilon_{\text{el}} = Q_0 \cdot (\eta_{\text{GuD}} \cdot x_{\text{GuD}}) \quad (12)$$

Mit (10) und (11) kann man x_K eliminieren und einen Ausdruck für x_{GuD} gewinnen, den man in (12) einsetzt, und erhält:

$\text{Strom} = Q_0 \cdot \eta_{\text{GuD}} - \text{Wärme} \cdot \eta_{\text{GuD}} / \eta_K \quad (13)$

Dies stellt aber eine **Gerade** von $Q_0 \cdot \eta_{\text{GuD}}$ auf der Stromachse nach $Q_0 \cdot \eta_K$ auf der Wärmeachse dar. Sinnvollerweise normiert man den Gaseinsatz auf

$$Q_0 = 1 \quad ; \quad (14)$$

denn dann kann man die Stromachse mit dem elektrischen Nutzungsgrad ϵ_{el} und die Wärmeachse mit dem thermischen Nutzungsgrad ϵ_{th} identifizieren.

In **Abb. 4** sind die Strom-Wärme-Geraden für 3 verschiedenen Fälle eingezeichnet:

- **E_GuD** = GuD und Brennwertkessel nach dem Stand der Technik in Deutschland, mit den Wirkungsgraden $\eta_{\text{GuD}} = 0,585$ und $\eta_K = 1,05$
- **E_heff** = Erdgaskraftwerk und Kessel mit den „europäischen“ Vergleichswerten nach der EU-Entscheidung 2007/74/EG ([14]). Dies gilt als „Hocheffizienzkriterium“ für kleine KWK.
- **E_10** = „Hocheffizienzkriterium“ für große ($\geq 1\text{MW}_{\text{el}}$) KWK-Anlagen. Dieses ergibt sich aus einem 10% Zuschlag zu dem Hocheffizienzkriterium für kleine KWK-Anlagen [14].

Man beachte, dass die Hocheffizienzkriterien für den „Paradefall“ einer Versorgungsanlage in der „KWK-Scheibe“, also im gekoppelten Betrieb, definiert wurden.

Die Jahresproduktion an Strom und Wärme eines KWK- Versorgers lässt sich nun in dieses Diagramm einfügen. Durch die Normierung (14) kann man dann für Strom und Wärme direkt den Punkt $\{\epsilon_{\text{th}}^V, \epsilon_{\text{el}}^V\}$ einzeichnen. Alle derartigen Punkte, die oberhalb der Referenzgeraden liegen, sind effizienter als die Referenz. Die Kurve „**E_GuD**“ verläuft aber bereits oberhalb der „Hocheffizienz“ – Referenzgeraden „**E_10**“ für große KWK-Anlagen; die Anforderungen an „Hocheffizienz“ sind also sehr gering und die Verwendung dieses Begriffes ist nicht angemessen.

Im Strom-Wärme Diagramm ergäbe sich für die Kombination GuD und Wärmepumpe wiederum eine Gerade, die man aus Gl.(13) erhält, in dem man η_K durch η_{K_WP} ersetzt. Es ist jedoch aussagekräftiger, als Abszisse statt der Wärme die Endenergie, also die Summe von

Strom und Wärme, zu verwenden. Strom und Wärme kann man nämlich nicht unabhängig voneinander optimieren: bei höherem Stromanteil geht zwangsläufig der Wärmeanteil zurück. Die Endenergie wird hingegen durch eine größere Stromausbeute nicht direkt beeinträchtigt.

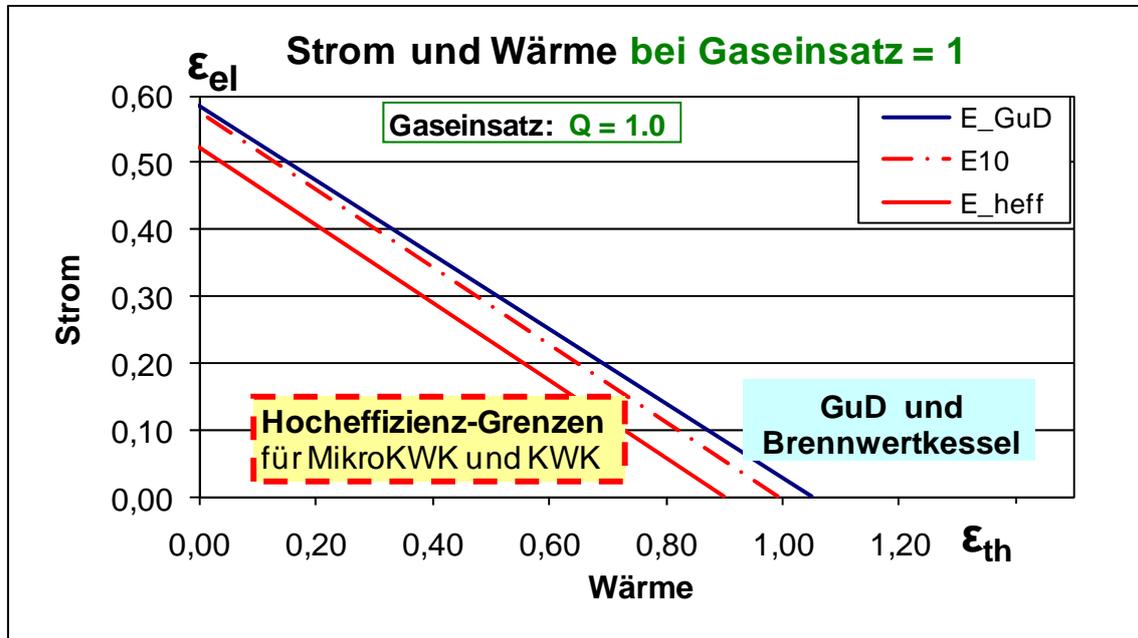


Abb. 4: Strom-Wärme Diagramm für die getrennte Erzeugung. (Weitere Erläuterung siehe Text)

Außerdem gibt es für die Endenergie naheliegende Zielmarken: Bei einer zentralen KWK mit Fernwärmeleitung kann man darauf abzielen, die gesamte nicht für den Abtransport des Abgases notwendige Energie - aber ohne Ausnutzung des Brennwerteffektes - als Endenergie zu nutzen. Als Endenergieausbeute lässt sich daher nur wenig mehr als 90% erreichen. 91% wäre beispielsweise schon ein guter Wert.

Anders liegen die Verhältnisse bei einer dezentralen KWK-Anlage, bei der die Wärme direkt vor Ort in die Heizung eingespeist werden kann. Hier kann man im Prinzip wie bei einem Brennwertkessel im Abgas auch die Kondensationswärme des Wassers noch zu Heizzwecken heranziehen. Als Endenergieausbeute kann man daher etwa 105% (oder sogar etwas mehr) anstreben.

Im nächsten Abschnitt wird in **Abb. 5** das **Strom-Endenergie-Diagramm** für die behandelten KWK-Anlagen und Referenzfälle behandelt.

1.3 Vergleich von KWK und Anlagen mit getrennter Erzeugung

Zum Vergleich von KWK-Anlagen mit Referenzfällen der getrennten Erzeugung gibt es zwei grundsätzliche Methoden:

- 1. Fester Output:** Man hält die Strom- und die Wärmeproduktion des Systems fest und vergleicht den dafür notwendigen Erdgaseinsatz bei Versorgung mit einer KWK-Anlage und Spitzenkessel einerseits und bei dem gewählten Referenzfall der

getrennten Strom- und Wärmeerzeugung andererseits; dies führt zu dem oben behandelten PE-Faktor f .

2. Fester Input: Man hält den Erdgaseinsatz fest und vergleicht die Strom- und die Wärmeproduktion für beide Fälle.

Beide Methoden sind äquivalent und lassen sich ineinander überführen.

Wir betrachten nun eine Auswahl von Erdgas- KWK-Anlagen und vergleichen sie mit den beiden dargelegten Referenzfällen der getrennten Erzeugung von Strom in einem GuD-Kraftwerk und dezentraler Wärme in einem Brennwertkessel (**Tabelle 2**) bzw. in einer mit GuD-Strom gespeisten Wärmepumpe (**Tabelle 3**). Hierzu übernehmen wir u.a. die in [6] benutzten Anlagenbeispiele.

Der PE-Faktor für die getrennte Strom- und Wärmeerzeugung wird zunächst für den „Paradefall“ des gekoppelten Betriebes als f_0 nach Gl.(5) errechnet.

Strom /Wärme Erzeuger	KWK-Anlage im gekoppelten Betrieb								Gesamter Versorger			
	gekoppelter Betrieb				ungekoppelte Spitze mit: $x_{SE} = x_{SK} = 0.1$				(siehe Bild 1)		Brennstoffausnutzung	PE-Faktor getrennte Erzeugung
	η_{el}	η_{ges}	Input Daten-Quelle	f_0	η_{SE}	x_{SE}	η_{SK}	x_{SK}	ϵ_{el}	ϵ_{th}	ϵ_{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	B1	1,18	<i>k.A.</i>	0,1	0,90	0,1	<i>k.A.</i>	0,45	<i>k.A.</i>	<i>k.A.</i>
BHKW_1M	0,390	0,89	B2	1,14	<i>0,390</i>	0,1	0,90	0,1	0,35	0,49	0,84	1,07
Mephisto_20k	0,315	1,05	C	1,24	<i>0,32</i>	0,1	1,05	0,1	0,28	0,69	0,98	1,14
GuD24M	0,363	0,86	B3	1,09	<i>k.A.</i>	0,1	0,90	0,1	<i>k.A.</i>	0,49	<i>k.A.</i>	<i>k.A.</i>
GT_10M	0,311	0,83	B4	1,03	<i>0,311</i>	0,1	0,90	0,1	0,28	0,51	0,79	0,96
BHKW_50k	0,293	0,88	B5	1,06	<i>0,293</i>	0,1	0,90	0,1	0,26	0,56	0,82	0,98
Mikro_9k	0,243	0,98	B6	1,12	<i>0,243</i>	0,1	0,98	0,1	0,22	0,69	0,91	1,03
Mikro_3k	0,157	0,94	B7	1,01	<i>0,157</i>	0,1	0,94	0,1	0,14	0,72	0,86	0,93
Mikro_0.8k	0,104	0,90	B8	0,94	<i>0,104</i>	0,1	0,90	0,1	0,09	0,73	0,82	0,85
Brennwertkessel	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 2: PE - Mehrverbrauchs faktor f von { Brennwertkessel und GuD } im Vergleich zur KWK-Versorgung. Die Datenbasis der KWK-Anlagen aus [6] (mit „B“ bezeichnet) wurde übernommen und durch eine Angabe von A = [8] (Voss) und C=[10] (Mephisto) ergänzt. (Aus Platzgründen wurden die Bezeichnungen etwas abgekürzt: so wurden bei η_{ges} und η_{el} der obere Index „KWK“, und bei ϵ_{el} , ϵ_{th} und ϵ_{ges} der obere Index „V“ für „Versorger“ weggelassen, weiterhin wurden η_{SE} aus η_{el}^{SE} und η_{SK} aus η_{th}^{SK} herausgeschnitten.)

Der Einfluss der Erzeugung von Spitzenstrom und Spitzenwärme auf den PE-Faktor f des Gesamt-Versorgers wurde beispielhaft für einen Anteil von je 10% an der gesamten Brennstoffzufuhr, also für $x_{SK} = x_{SE} = 0.1$, dargestellt. Der allgemeine Fall kann leicht mittels Gl.(7) ausgerechnet werden. Der thermische Wirkungsgrad der ungekoppelten Wärmeerzeugung, η_{th}^{SK} , wurde für die Fernwärmeanlagen auf 0.90 gesetzt, bei den Mikro-

KWK-Anlagen wurde hierzu die angegebene Brennstoffausnutzung, $\eta_{\text{ges}}^{\text{KWK}}$, übernommen. Für den elektrische Wirkungsgrad der Spitzenstromerzeugung, $\eta_{\text{el}}^{\text{SE}}$, wurde- sofern nicht anders angegeben- der elektrische Wirkungsgrad des KWK- Betriebes übernommen; bei GuD Anlagen, bei denen diese Verfahren nicht zutreffend wäre, wurden mangels verfügbarer Daten keine Angaben (k.A.) gemacht.

In den ersten 4 Spalten der **Tabellen 2 und 3** sind die Grunddaten der unterschiedlichen KWK-Anlagen angegeben. Aus dem Namen (Spalte 1) ist auch die elektrische Leistung (z.B. BHKW_1M = Blockheizkraftwerk mit 1 MW elektrischer Leistung) abzulesen, genauere Daten können der zitierten Quelle entnommen werden. In Spalte 5 ist der PE-Faktor für den Paradefall, **f₀**, ausgerechnet. In den Spalten 6 bis 9 sind die Wirkungsgrade und Anteile des Spitzenbetriebes angegeben. In den Spalten 10 bis 13 werden die Kenngrößen des gesamten Versorgers dargestellt. Als einzelne Vergleichszahl lässt sich der PE-Faktor für die getrennte Erzeugung, **f**, in der letzten Spalte heranziehen.

Strom /Wärme Erzeuger	KWK-Anlage im gekoppelten Betrieb und im Spitzenlastbetrieb								Gesamter Versorger			
	gekoppelter Betrieb				ungekoppelte Spitze mit: $x_{\text{SE}} = x_{\text{SK}} = 0.1$				(siehe Bild 1)		Brennstoffausnutzung	PE-Faktor getrennte Erzeugung
	η_{el}	η_{ges}	Input Daten-Quelle	f₀	η_{SE}	x_{SE}	η_{SK}	x_{SK}	ϵ_{el}	ϵ_{th}	ϵ_{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	B1	0,95	k.A.	0,1	0,90	0,1	k.A.	0,45	k.A.	k.A.
BHKW_1M	0,390	0,89	B2	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	B3	0,83	k.A.	0,1	0,90	0,1	k.A.	0,49	k.A.	k.A.
GT_10M	0,311	0,83	B4	0,75	0,311	0,1	0,90	0,1	0,280	0,51	0,79	0,69
BHKW_50k	0,293	0,88	B5	0,75	0,293	0,1	0,90	0,1	0,264	0,56	0,82	0,69
Mikro_9k	0,243	0,98	B6	0,73	0,243	0,1	0,98	0,1	0,219	0,69	0,91	0,67
Mikro_3k	0,157	0,94	B7	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	B8	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										

Tabelle 3: Primärenergie- (PE-) Mehrverbrauchsfaktor **f** von {GuD und WP} im Vergleich zur KWK- Versorgung . (weiter Angaben siehe Legende zu Tabelle 2).

Aus den **Tabellen 2 und 3** kann man folgendes entnehmen:

- Selbst im „Paradefall“ 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 eingestelltem Brennwertkessel (also **f₀** in **Tabelle 2**) selten über 20%, in einigen Fällen werden jedoch nicht einmal 10% erreicht. Der Mehraufwand ist also weitaus geringer als die in der Öffentlichkeit gehandelten 30 bis 60% des „KWK-Mythos“.
- Bei der Untersuchung „vollständiger Alternativen“, also der korrekten Einbeziehung des vom KWK-Versorger bei vernünftiger Auslegung 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 (siehe PE- Faktor f in Spalte 13 von **Tabelle 2**).

- **Tabelle 3** zeigt, dass alle betrachteten KWK-Anlagen sogar im „Paradefall“ (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 „Paradefall“ noch fast mit der getrennten Erzeugung mithalten, aber die Wärmeeinspeisung aus dem Spitzenkessel und der Spitzenstrom verschlechtern die PE-Bilanz weiter (siehe PE-Faktor f).

1.4 Vergleich über Strom-Endenergie Diagramm

Die Leistungsfähigkeit eines KWK Versorgers im Vergleich zu verschiedenen Referenzfällen der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme kann aus einem **Strom-Endenergie Diagramm**, **Abb. 5**, beurteilt werden. Hier sind 6 KWK-Anlagen durch jeweils ein Symbol dargestellt, wobei die kleinen Symbole für den Paradefall, also ohne Spitzenwärme und Spitzenstrom, gelten und die dazugehörigen großen Symbole beispielhaft für den Fall eines jeweils 10%-igen Einsatzes des Erdgases für Spitzenkessel und Spitzenstrom (also: für $x_{SK} = x_{SE} = 0.1$) eingezeichnet sind. Damit lässt sich der Einfluss der Betriebsweise erkennen. Die Linien markieren die Ortskurven für die als Referenz herangezogen getrennte Erzeugung. Zusätzlich zu den Angaben in **Abb. 4**, mit den „europäischen Hocheffizienzlinien“ nach [14] und der Referenzlinie „GuD + Brennwertkessel“, ist hier noch die Kurve „GuD versorgt auch WP“, E_{GuD1} , für die getrennte Erzeugung von Strom in einem modernen GuD und Wärme aus einer Wärmepumpe mit der Jahresarbeitszahl JAZ= 4 eingezeichnet.

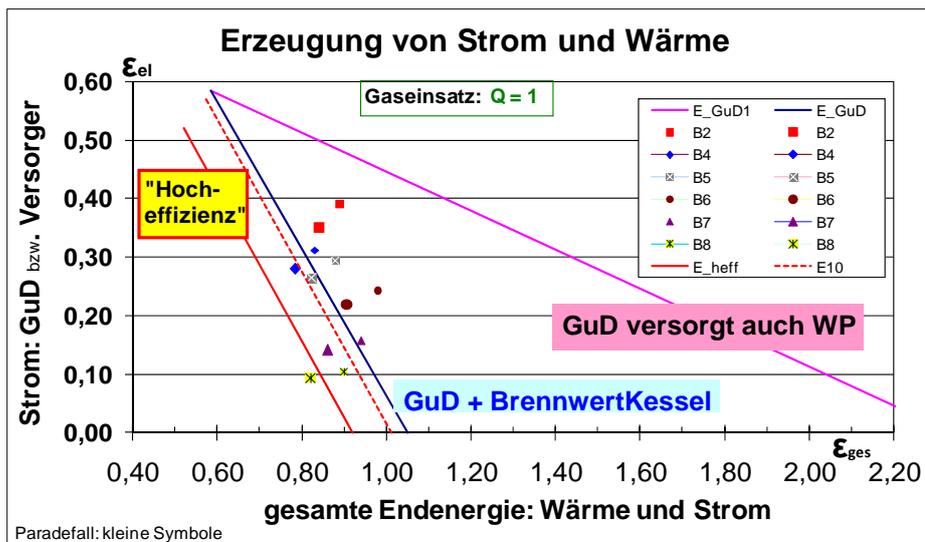


Abb. 5: Strom Endenergie Diagramm für 6 KWK- Anlagen aus den Tabellen 2 und 3. (Erläuterung siehe Text)

Durch die Normierung des Gaseinsatzes auf $Q=1$ kann man die Stromachse mit dem elektrischen Nutzungsgrad ϵ_{el} und die Abszisse mit dem Gesamt-Nutzungsgrad ϵ_{ges} identifizieren.

Man beachte, dass die Dominanz des Referenzfalles „GuD versorgt auch WP“ überragend ist und keinesfalls kritisch von dem gewählten anspruchsvollem aber dennoch realistischen Wert der Jahresarbeitszahl (JAZ=4) der WP abhängt. Weiterhin ist deutlich sichtbar, dass viele KWK-Anlagen bereits durch eine Betriebsweise mit $x_{SK} = x_{SE} = 0.1$ schlechtere Werte erreichen als der Referenzfall „GuD + Brennwertkessel“.

Fazit:

1. Eine Versorgung mit Strom und Wärme unter Einsatz von KWK-Anlagen ist selbst bei einer getrennten Versorgung mit GuD und Brennwertkessel keineswegs grundsätzlich überlegen. Es kommt nicht nur auf die Anlagen sondern in einem erheblichen Ausmaße auch auf die Betriebsweise an.
2. Die KWK unterliegt im technischen Wettbewerb mit GuD-Kraftwerk und Wärmepumpe.
3. Schlussfolgerung:
Eine herausragende Subventionierung der KWK verzerrt den Wettbewerb unter den verfügbaren technischen Optionen und kann daher letztendlich nur zu einem suboptimalen Ergebnis bei der integralen Energie-Effizienz führen.

2. Warum die KWK weniger gut ist als sie meist dargestellt wird

Wir haben im Abschnitt 1 auch im Sinne der EU-Richtlinie 2004/8/EG/ ([13]) die Energieversorgung durch neue KWK-Anlagen mit derjenigen durch alternative neue Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme verglichen. Bei dieser realistischen Betrachtung kamen deutlich niedrigere Energieeinsparungen als bisher veröffentlicht heraus.
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, allerdings nicht in EU Gesetzestexten und daraus abgeleiteten nationalen Gesetzen, die groben **Fehler des „KWK-Mythos“** begangen:

- Wärme (geringer Exergiegehalt) und Strom (reine Exergie) werden einfach addiert, und diese „Brennstoffausnutzung“ wird dann als **alleiniger** Gütefaktor herangezogen,
- KWK aus **Erdgas** wird mit Strom aus **Kohlekraftwerken** verglichen,
- **neue** KWK-Anlagen werden **alten** Kraftwerken und Heizkesseln gegenüber gestellt,
- man betont die „Abwärmennutzung“ und übersieht, dass diese durch eine Einbuße am elektrischen Wirkungsgrad oft sehr teuer erkaufte ist.

Kommentar: Dies ist physikalisch-technisch nicht zu rechtfertigen und läuft auf eine Missachtung der EU-Richtlinie 2004/8/EG hinaus.

(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.

Kommentar: Der Spitzenkessel ist Teil der Energiebilanz - auch wenn er die Effizienz der Fernwärme verschlechtert, muss er mit betrachtet werden.

(3) Es wird nicht die gesamte Stromerzeugung in der KWK-Anlage, sondern **nur die Stromerzeugung im KWK-Betrieb**, also im idealen wärmegeführten „Paradebetrieb“ mit gekoppelter Strom- und Wärmeproduktion, bewertet. Die mit einer KWK-Anlage mögliche herkömmliche Stromerzeugung ohne Wärmenutzung wird ausgeklammert.

Kommentar: Damit verzerrt sich aber der Vergleich: 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 diese Anlagen oder überalterte Kraftwerke die Rolle der nicht gebauten GuD-Kraftwerke. Daher darf dieser Bereich in der Bilanz nicht ausgeklammert werden.

4) Die vernünftigen allgemeinen Anforderungen der EU-Richtlinie 2004/8/EG ([13]) werden, wie bereits in Abb. 4 verdeutlicht, durch die nicht mehr zeitgemäßen und damit abwegigen Vergleichswirkungsgrade in der EU Entscheidung 2007/74/EG ([14]) konterkariert.

Kommentar: Damit werden überhöhte Einsparungen gegenüber fiktiven Anlagen errechnet, die den in Deutschland eingesetzten modernen GuD-Kraftwerken und Brennwärtekesseln deutlich unterlegen sind.

(5) Bei Wärmepumpen wird mit einem Strombezug aus dem **deutschen Strommix** gerechnet. Wir legen stattdessen im Systemvergleich den Strombezug aus einem GuD-Kraftwerk zugrunde.

Kommentar: Der Grund ist offensichtlich: 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 ([13]) für den Fall von Kraftwerk und dezentralem Kessel festgelegte Vorgehensweise muss sinngemäß auch auf die Stromversorgung von dezentralen Wärmepumpen angewendet werden. Würde man nämlich 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 (siehe Integriertes Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung [15]) ja auch tatsächlich neue GuD-Anlagen gebaut werden, falls KWK-Anlagen in geringerem Umfang zum Zuge kommen.

(6) Es werden **umfangreiche Nebeneffekte** berücksichtigt, z.B. Verluste im Stromnetz, Pumpstrom und Wärmeverluste in der Fernwärmeleitung, Bonus für verbrauchernahe Stromerzeugung, unterschiedlicher Energieaufwand für den Gastransport zu einem Großabnehmer oder zu dezentralen Verbrauchern etc.

Kommentar: Dagegen ist grundsätzlich nichts einzuwenden, sofern keine einseitige Auswahl erfolgt. In unserer Betrachtung, die auf die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge ausgerichtet ist, sind diese Nebeneffekte unberücksichtigt geblieben, um eine einfache Darstellung zu erlauben, aus der der Einfluss der wesentlichen Parameter klarer hervorgeht. Da die Nebeneffekte zum Teil entgegen gesetzte Auswirkungen auf die Energiebilanz haben und zumeist doch nur pauschaliert angegeben werden, haben sie insgesamt i.d.R. keinen grundsätzlichen Einfluss auf die genannten Ergebnisse.

Zusätzlich sollen noch die folgenden Probleme der KWK aufgelistet werden (Details hierzu in ([1] bis [4])

- Das **Sommer-Winter**-Dilemma: Geheizt wird normalerweise vor allem in Winter. Da ist es schwierig im Gebäudewärmebereich auf eine hohe Auslastung ohne viel Spitzenwärme zu kommen
- Die **ökologische Sackgasse** der KWK: Wer eine dezentrale KWK- Anlage zuhause installiert hat, besitzt kaum noch finanzielle Anreize zur weiteren Reduzierung seines Wärmebedarfes.

3. Skizze zur Optimierung des Erdgaseinsatzes für Gebäudewärme

Man darf jedoch nicht das Kind mit dem Bade ausschütten. Kraftwärmekopplung 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 CO₂-Einsparung stellen. Daher sollte man die Optimierungsfrage in der gebührenden Allgemeinheit stellen: wie und in welchem Gesamtrahmen lässt sich **Erdgas möglichst effektiv für die Wärmeversorgung im Gebäudebereich direkt oder indirekt** einsetzen? Hierzu müssen auch für eine Förderung und Beschleunigung der notwendigen Optimierung die richtigen Signale gegeben werden.

3.1 Vorschlag: Eingesparte Vergleichsenergie als Maß für Zuschüsse

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 kWh die in diesem Betriebszustand als „KWK-Strom“ erzeugt wird, oder aber es erfolgt überhaupt keine Förderung. Da die Anforderungen des KWK-Gesetzes sehr niedrig sind, kann es sogar vorkommen, dass eine Anlage die mehr Erdgas verbraucht, als eine äquivalente getrennte Erzeugung erfordern würde, 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, bei Wind und Solarenergie, auch sehr sinnvoll. Bei den Erneuerbaren Energien ist es nämlich gleichgültig wie effizient die Anlage ist: jede CO₂-frei produzierte kWh ersetzt eine CO₂-Emission und die Ressource ist (außer bei Biomasse!) nicht knapp.

Bei der KWK ist dies jedoch völlig anders: hier werden knappe Energieträger eingesetzt und der Einspareffekt lässt sich nicht an der überhaupt produzierten Strommenge erkennen, sondern muss als Differenz zu den Referenzanlagen der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme berechnet werden. Was liegt näher als diese nachgewiesene Einsparenergie als Maß für den Zuschuss zugrunde zu legen. Falls überhaupt subventioniert werden soll, plädieren wir also 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 und ermöglicht so einen fairen Wettbewerb.

3.2 Skizze zu einem Gesamtkonzept des Einsatzes von Erdgas mit den Zielen:

1. Direkten Erdgaseinsatz im Gebäudebereich zurückdrängen durch
 - a. Thermische Sanierung der Gebäudehülle und Wärmerückgewinnung
 - b. Auslegung der Wärmeübertrager (Heizkörper) auf kleine Temperaturdifferenzen zur Raumtemperatur (dies ergibt sich zu einem Teil schon durch die meistens vorhandene Überdimensionierung der Heizkörper in Verbindung mit der Senkung des Heizwärmebedarfes, zusätzlich können Flächenheizsysteme eingesetzt werden),
 - c. Einsatz von Wärmepumpen
 - d. 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:
 - a. indirekt durch den Antrieb von dezentralen Wärmepumpen auch einen großen Teil der Wärmeversorgung übernehmen.
 - b. durch bedarfsgerechte Wärmeauskopplung auch Fernwärme bereitstellen können.
 - c. alte Kraftwerke mit hohen spezifischen CO₂-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.

3.3 Zur Bewertungsmethode für KWK Anlagen:

Zum Vergleich zwischen den Auswirkungen des Einsatzes von neuen KWK-Anlagen gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme müssen:

1. „vollständige Alternativen“ untersucht werden, also ein **abgeschlossener Bilanzkreis** gebildet werden, der die gesamte Strom und Wärmeproduktion der alternativen Anlagen und Hilfsanlagen umfasst und sich auf ein gesamtes Betriebsjahr erstreckt. Dies umfasst
 - a. beim *Referenzfall getrennte Endenergieerzeugung*: neues GuD- Kraftwerk im Jahresbetrieb, Brennwertkessel,
 - b. beim *Untersuchungsfall Fernwärme*: neue KWK-Anlage im KWK- Betrieb und im Spitzenstrombetrieb, Zusatzwärmelieferung über Spitzenkessel, Einsatz von Bestandskraftwerken zum Ausgleich der (vermutlich) höheren Stromproduktion durch das GuD- Kraftwerk des Referenzfalles
2. auch **weitere Alternativen** der Strom und Wärmeproduktion untersucht werden, z.B. GuD-Kraftwerk und elektrische Wärmepumpe, GuD-Kraftwerk und Gaswärmepumpe
3. der Einfluss der zu erwartenden **thermischen Sanierung** (Wärmedämmung, Fenster, Lüftung) auf den Wärmebedarf berücksichtigt werden

4. der Einfluss der zu erwartenden **niedrigeren Vorlauftemperatur** für Heizkörper oder Flächenheizsysteme beachtet werden
5. die Auswirkungen auf den Einsatz von **Solarwärme** zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung beachtet werden
6. der Einfluss der Wärmebereitstellung auf die Motivation und Wirtschaftlichkeit von weitergehenden Energie-Einsparmaßnahmen beachtet werden (Gefahr der **ökologischen Sackgasse**).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Politik und öffentliche Meinung überschätzen in der Regel die Vorteile der KWK und übersehen ihre negativen Auswirkungen in Hinblick auf eine Gesamtoptimierung der Wärme- und Strombereitstellung.

1. Die KWK spart bei nüchterner und fairer Betrachtung selbst im für ihre Bewertung günstigsten „Paradefall“ eines streng wärmegeführten Betriebes ohne zentralen Spitzenkessel in der Regel nur geringe Prozentsätze an Primärenergie gegenüber einer getrennten Erzeugung von Strom mit einem modernen GUD-Kraftwerk und Wärme mit einem richtig ausgelegten Brennwertkessel ein. Bei Berücksichtigung der Betriebsweise, d.h. der bei vernünftiger Planung ökonomisch angezeigten Spitzenwärme und wegen der Versuchung zur Lieferung von Spitzenstrom ohne Wärmenutzung, tendiert der Einspareffekt jedoch oft gegen Null oder kann sogar negativ werden.

2. Bei einem Vergleich mit einer dezentralen Wärmeerzeugung aus Wärmepumpen, deren Strom von einem GUD-Kraftwerk geliefert wird, ist die KWK hingegen schon im streng wärmegeführten „Paradefall“ deutlich unterlegen.

3. Zur Erreichung der Klimaziele ist ein umfassendes Gesamtkonzept der thermodynamisch optimierten Bereitstellung der Energiedienstleistung „behagliches Raumklima und Warmwasser“ erforderlich. Der Staat sollte diese Entwicklung durch Forschung und Entwicklung, Modellvorhaben und Hilfen zur Markteinführung fördern. Sofern eine breit angelegte Subventionierung zur Beschleunigung der Marktdurchdringung gewünscht wird, sollte sie sich jedoch **nicht auf einzelne Technologien beziehen**, sondern die Vergütungen durch einen **“linearen Einsparungstarif“** an den tatsächlichen nachweisbaren Energieeinsparungen ausrichten, die sich gegenüber einem zeitgemäß anspruchsvollen Referenzfall nachweisen lassen.

Anmerkungen, Materialien und Literatur

Dem Kapitel liegen eine ausführlichere Darstellung als „Materialiensammlung“ und drei 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/ThOptHz/Materialien_3-c_Luther_KWK-undSystemvergleich.doc
- [2] G. Luther: Kraftwärmekopplung (KWK) – Hoffnungsträger oder Subventionsloch?, (2008) http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/AKE2008H/Links_AKE2008H.htm
- [3] G. Luther: Thermodynamisch optimiertes Heizen: KWK, Wärmepumpe und Systemvergleich, (2009 und 2010)

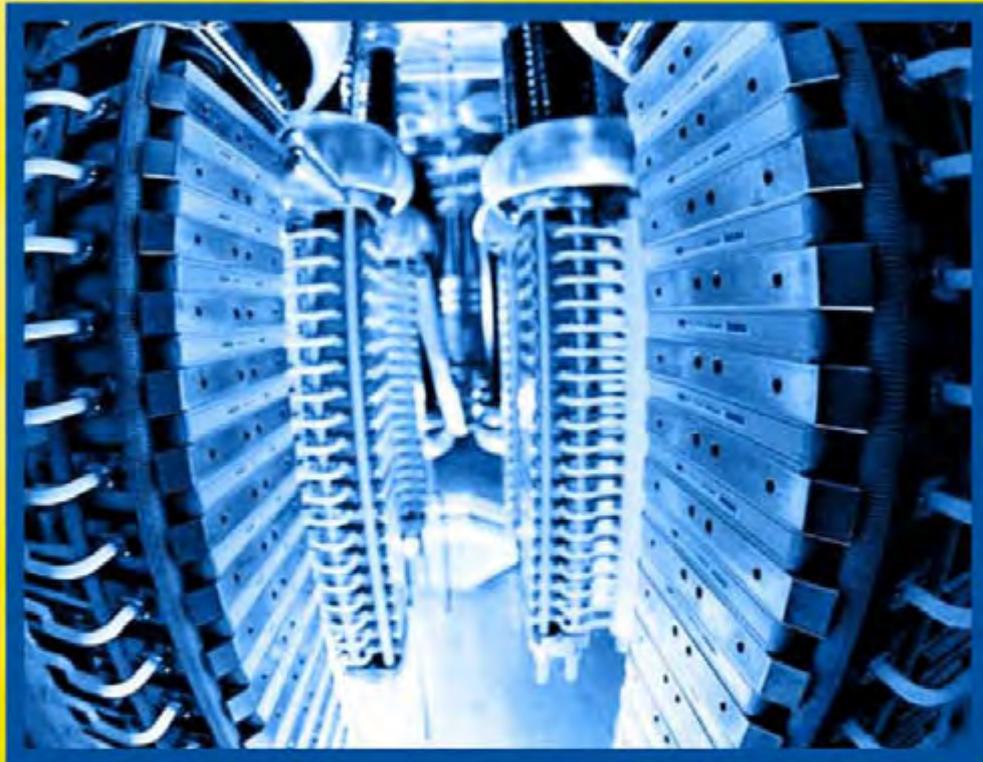
- http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/AKE2009H/Links_AKE2009H.htm und
http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm
- [4] /DPG-E-Studie 2010/: Deutsche Physikalische Gesellschaft: „Elektrizität - Schlüssel zu einem nachhaltigen und klimaverträglichen Energiesystem“, (2010)
http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien/energie_2010.pdf
- [5] G. Luther: Internet Themenseite „Thermodynamisch optimiertes Heizen“,
<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/ThOptHeizen.htm>
- [6] M. Horn et al.: Ermittlung der Potenziale für die Anwendung der KWK und der erzielbaren Minderung der CO₂-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>
- [7] KWKG: Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 2009 , Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I, S. 2870 ff. Download: http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/kwkg_2002/gesamt.pdf
- [8] A. Voss (IER Stuttgart) 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
- [10] Gasbefeuertes Kompakt-Brennwert-BHKW MEPHISTO G20+:
<http://www.kraftwerk-bhkw.de/MEPHISTO/technik01.htm>
- [11] 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
- [12] EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz 2009, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2008 Teil I Nr. 49, S. 2074 ff. Download: <http://www.bgblportal.de/BGBL/bgbl1f/bgbl108s2074.pdf>
- [13] 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=OJ:L:2004:052:0050:0050:DE:PDF>
- [14] EU Entscheidung 2007/74/EG, 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>
- [15] UBA 2007: Climate Change 05/07 (2007): ”Klimaschutz in Deutschland: 40%-Senkung der CO₂-Emissionen bis 2020 gegenüber 1990”, insbesondere Anhang 3, Seite 70.
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3235.pdf>

Dr. Gerhard Luther
 Forschungsstelle Zukunftsenergie
 c/o Technische Physik - Bau E26
 Universität des Saarlandes
 D-66041 Saarbrücken
 Luther.gerhard@vdi.de

Exzerpt aus Tagungsband des AKE, DPG-Tagung 2010 Bonn

home:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm



Energie

Technologien für die Zukunft

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Bonn 2010

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Energie

Technologien für die Zukunft

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Bonn 2010

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, April 2011

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Bonn, 15. und 16. März 2010

Hauptvorträge

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	5
Übersicht über die Fachsitzungen.....	7
Abstracts	8
Energieeffizienz in der Informationstechnologie (vorgetragen von W. Gnettner).....	18
ITER, the Decisive Step towards Fusion Energy (vorgetragen von G. Janeschitz)	29
The Physics Base for ITER and DEMO (vorgetragen von H. Zohm).....	44
Neue Reaktorenkonzepte für die Kernspaltung, Entwicklungen von AREVA (vorgetragen von W. Dams).....	55
Brennstoffzellen für mobile Anwendungen – Wo stehen wir auf diesem Weg? (vorgetragen von D. Stolten)	67
Elektrische Energiespeicher (vorgetragen von M. Rzepka)	77
Strom aus solarthermischen Kraftwerken im Sonnengürtel (vorgetragen von R. Pitz-Paal)	90
Stromtransport: Erfordernisse und Lösungen für ein europäisches Verbundnetz unter Nutzung solaren Stroms aus Nordafrika (vorgetragen von T. Benz)	97
Intelligente Stromnetze - Perspektiven und Potenziale (vorgetragen von F. Schulte)	108
Geothermische Stromerzeugung - Vom Reservoir bis zur Turbine (vorgetragen von E. Huenges).....	114
Energie aus Biomasse – Perspektiven für Europa (vorgetragen von D. Thrän).....	126
Thermodynamisch optimiertes Heizen und Kraft-Wärme-Kopplung (vorgetragen von G. Luther).....	137

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen der Hauptvorträge der AKE Tagung des Jahres 2010 in Bonn zusammen. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien aller Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort zu dem Archiv des AKE weiterklicken) eingesehen werden. Allen, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Düsseldorf, im Dezember 2010

Hardo Bruhns

Direkter Link zum AKE - Archiv:

<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/index.htm>

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2010 -Bonn:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm