

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) - Was ist das eigentlich ?

Konsequenzen aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik für die Versorgung mit Strom und Wärme
Prof. Dipl.-Ing. Volker Sperlich, Universität Duisburg-Essen, August 2006

1. Vorwort: "Energie sparen"

Die Kraft-Wärme-Kopplung ist - neben der Nutzung regenerativer Energien - die mit Blick auf sparsamen Einsatz von Brennstoffen und möglichst geringe Schadstoff-Emissionen effizienteste Form der Energieversorgung. Dass sie zu wenig genutzt wird, liegt einmal an der Form der über ein Jahrhundert gewachsenen Versorgungsstrukturen, zum anderen an anders gerichteten wirtschaftlichen Interessen der Energiewirtschaft und nicht zuletzt auch daran, dass in der breiten Öffentlichkeit die Kenntnis der Zusammenhänge nicht oder nur ungenau vorhanden ist und somit - anders als bei der Nutzung der regenerativen Energien - der Druck auf die Politiker von dieser Seite zu gering ausfällt.

Da die Zusammenhänge auch nicht unmittelbar zu verstehen sind, soll hier der Versuch unternommen werden, eine - zumindest für den naturwissenschaftlich Interessierten - verständliche Erklärung dafür zu liefern, dass der Energieeinsatz beim Heizen mit der KWK um 50% bis 80% reduziert werden kann, während mit besseren Heizungskesseln allenfalls einige Prozent (im günstigsten Falle mit Brennwertkesseln etwa 10%) möglich sind. An die Heizungskessel werden aber mittlerweile hohe, teils unsinnige Anforderungen gestellt. Dazu ein Beispiel:

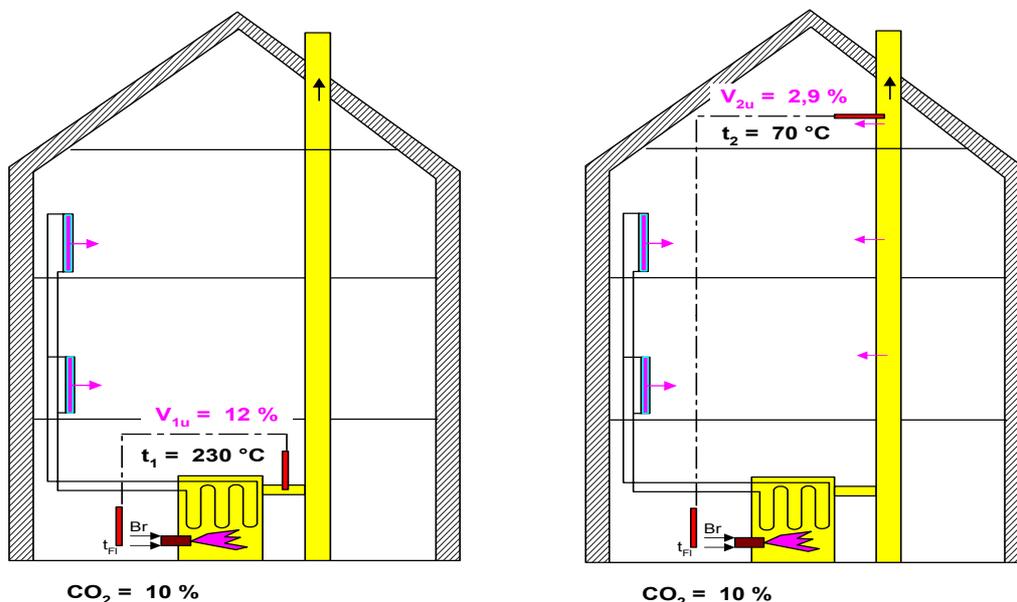


Bild 1 Ölheizung

a) Messung der Wärmeverluste
nach Kleinf Feuerungsanlagenverordnung

b) Messung der tatsächlichen Wärmeverluste

Im Keller eines Zweifamilienhauses steht ein Kleinkessel mit Ölbrenner als Wärmeerzeuger einer Zentralheizung. Der Abgasverlust wird gemäß der Kleinf Feuerungsanlagenverordnung "grundsätzlich im Verbindungsstück zwischen Wärmeerzeuger und Schornstein...." bestimmt. Der im Beispiel gemessene Verlust von 12% vom Heizwert ist um einen Prozentpunkt höher als zulässig, weshalb der Kessel ausgewechselt werden muss.

Insgesamt hat aber die Anlage nur einen Verlust von 2,9%. Im Bild 1b ist dies veranschaulicht: Die Rauchgase verlassen über den Kamin den Wohnbereich mit 70°C. Die Restwärme im Rauchgas wird nämlich über den Kamin an den Wohnbereich übertragen. Vor dem Einbau eines neuen Kessels muss der Schornstein isoliert und mit einem Innenrohr ausgestattet werden. Die Rauchgase würden sonst zu kalt und der Kamin feucht. Die Maßnahme kostet ca. 8.000 bis 10.000 EUR, sie trägt zwar zur Schaffung von Arbeitsplätzen bei, aber nicht zur Reduzierung des Energieeinsatzes. Beim Hausbrand könnte man nun den Aufwand bis ins Unendliche treiben, mehr als 100% des Brennwertes* bekommt man nicht heraus.

* Der Brennwert ist um die Kondensationswärme des in den Rauchgasen enthaltenen Wasserdampfes größer als der Heizwert

Das verbietet ganz einfach der 1. Hauptsatz der Thermodynamik, der besagt, dass Energie nicht produziert, sondern nur umgewandelt werden kann. Trotzdem kann mit KWK beim Heizen noch viel mehr gespart werden, denn Wärme ist eine Energieform, die man entweder aus der Umgebung entnehmen und mit einer Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau bringen, oder aber bei der Stromproduktion (aus Brennstoff) gar nicht erst an die Umgebung, sondern als Fernwärme an den Verbraucher weitergeben kann. Um die Abhängigkeit der Beträge von der Temperatur dabei zu verdeutlichen, bedarf es eines kleinen Ausflugs in die Thermodynamik.

2. Die Hauptsätze der Thermodynamik

1. Hauptsatz der Thermodynamik:

- Wärme ist eine Energieform
- Energien können zwar umgewandelt, aber nicht vernichtet werden

2. Hauptsatz der Thermodynamik:

- Wärme lässt sich nur teilweise in andere Energieformen umwandeln.
- Der umwandelbare Anteil heißt Exergie, der nicht umwandelbare Anergie
- Der Anteil der Exergie hängt ab von der Temperatur der Wärme und von der Temperatur der Umgebung

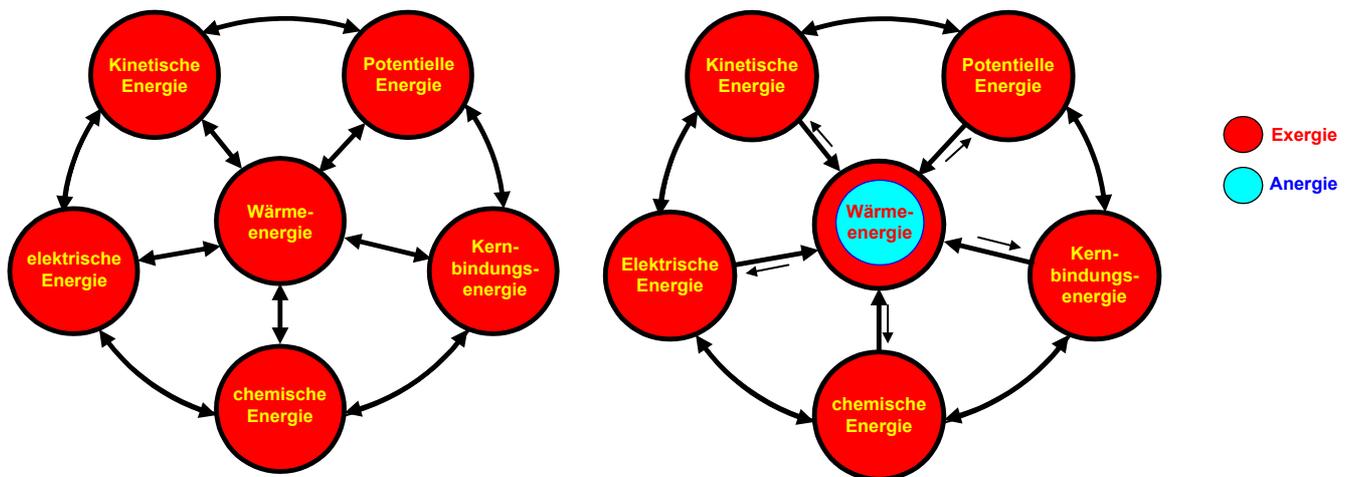


Bild 2 Verschiedene Energien

a) Gleichwertigkeit nach dem 1. Hauptsatz und

b) Einschränkung nach dem 2. Hauptsatz

Wärme ist eine Energieform, wie in Bild 2 dargestellt. Nach dem 1. Hauptsatz kann Energie weder erzeugt, noch vernichtet, sondern lediglich in andere Energieformen umgewandelt werden. So kann Wärme - und das geschieht in unseren Kraftwerken - in elektrische Energie umgewandelt werden. Während andere Energieformen - zumindest theoretisch restlos konvertierbar sind, ist das mit der Wärme nicht möglich. Dies beschreibt der zweite Hauptsatz, eine unwiderlegbare Aussage über die Höhe des konvertierbaren Anteils, den man Exergie nennt, und des nicht konvertierbaren Teils, der Anergie genannt wird. Die Aufteilung der Wärme in diese Teilmengen ist abhängig von der Temperatur, bei der die Wärme zur Verfügung steht. Dies kann in einem Diagramm dargestellt werden (Bild 3).

Die eine Achse, die Ordinate ist die absolute Temperatur T , die andere könnte z.B. die Zeitachse sein. Wenn wir Brennstoff verbrennen, wird mit der Brennstoffenergie praktisch die Frischluft, mit der wir den Sauerstoff zuführen, erwärmt, hier einmal grob angenommen von 0°C auf 2000°C (die chemische Veränderung kann dabei vernachlässigt werden). Nun tragen wir die Temperatur über einer Größe auf, die sich mit der Zeit bzw. mit der Wärmezufuhr ändert. Wir nennen sie Entropie. Diese Größe ist so definiert, dass die Fläche unter der Kurve die zugeführte Wärme Q darstellt. Damit ist die Entropieänderung bei der Erwärmung $\Delta S = Q/T_m$, wobei T_m die mittlere Temperatur des Erwärmungsprozesses ist. Die rote Fläche (Bild 3a) stellt also jetzt die Wärme dar, die z. B. bei der Verbrennung von 1 kg Brennstoff der Luft zugeführt wird. Die Luft nennen wir jetzt Rauchgas. Wir machen nun einfach aus dieser Fläche eine Rechtecksfläche mit der mittleren Temperatur T_m , hier etwa 1000°C , da uns der Prozessverlauf in diesem Zusammenhang nicht interessiert (Bild 3b).

Der 2. Hauptsatz besagt nun, dass der Teil der Wärme, dessen Fläche unterhalb der Umgebungstemperatur (hier mit 0°C angenommen) liegt, Anergie ist, also wertlos, und dass nur der oberhalb liegende Teil z. B. in elektrischen Strom verwandelt werden kann.

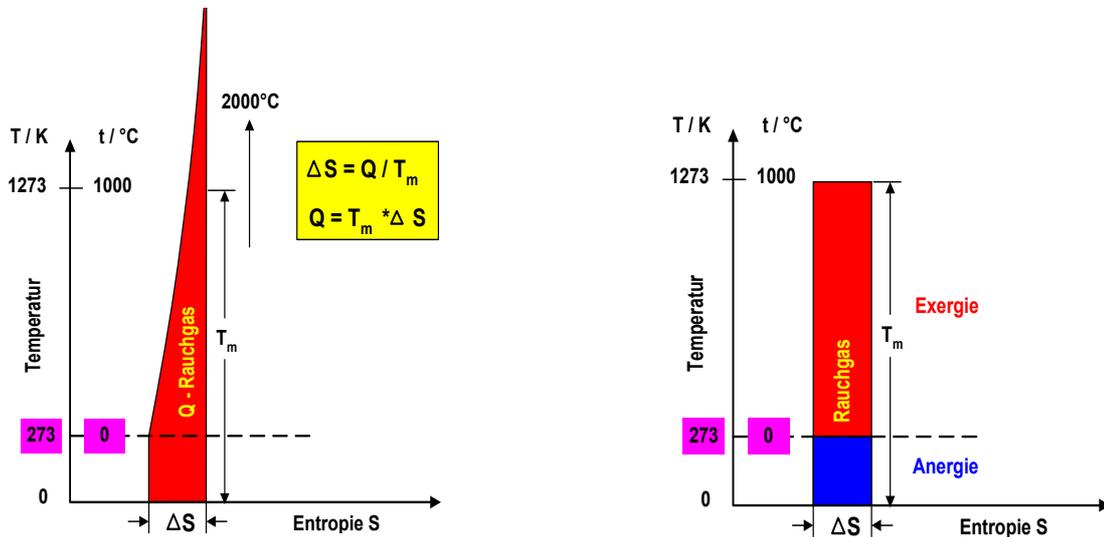


Bild 3 a) Energie des Rauchgases bei tatsächlichem Temperaturverlauf b) Exergie und Anergie bei gemittelter Temperatur der Wärmezufuhr

Unsere Energie aus dem Brennstoff erleidet also bei der Übertragung als Wärme auf das Rauchgas einen Exergieverlust von ca. 20%. Gehen wir davon aus, dass dies unvermeidbar ist, und verfolgen wir, was weiter mit der Wärme geschieht, wenn sie in einem herkömmlichen Kraftwerk ausschließlich zur Stromerzeugung genutzt wird.:

3. Energieumsetzung bei getrennter Produktion von Strom und Wärme

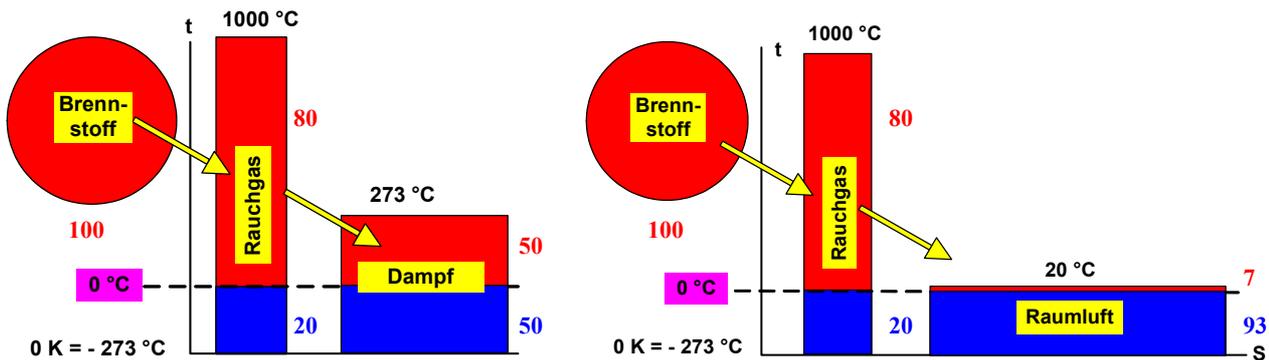


Bild 4 Exergieanteile nach der Wärmeübertragung, links beim herkömmlichen Dampfkraftwerk, rechts beim Hausbrand (ohne Schornsteinverluste)

In den herkömmlichen Kraftwerken überträgt das Rauchgas die Wärme auf den Wasserkreislauf mit einer mittleren Temperatur der Wärmezufuhr bis zum Heißdampf von mehr als dem Doppelten der Umgebungstemperatur in Kelvin. Bei 273 °C (= 546 K) bleiben von der Exergie des Brennstoffes im Dampf nur noch 50% übrig. Schaltet man eine Gasturbine vor den Dampfprozess (GuD-Prozess), sieht es günstiger aus, wie später noch gezeigt wird. Überträgt man aber die Rauchgaswärme als Heizwärme an die Raumluft, wie das beim Hausbrand üblich ist, bleiben nur noch 7% als Exergie übrig. Dies ist bedeutsam, denn theoretisch könnte man z. B. mit einer Wärmepumpe mit einer Antriebsarbeit von 7 kWh eine Wärmemenge von 100 kWh bereitstellen oder aber - unter Verzicht auf die Produktion von 7 kWh Strom - 100 kWh Wärme ins Fernwärmenetz leiten. Natürlich ist das die theoretische Obergrenze, denn man benötigt höhere Temperaturen der Wärmeauskoppelung zur Wärmeübertragung. Zunächst einmal die realen Verhältnisse bei der getrennten Strom- und Wärmebereitstellung:

In Wirklichkeit verwandelt das Kraftwerk nur 40% der Brennstoffenergie in Strom (Bild 5). Die Verluste von 10%-Punkten zwischen Dampf und Strom resultieren aus den Schornsteinverlusten, dem Kraftwerkseigenbedarf, aus Reibungsverlusten im Kraftwerksprozess und aus Verteilungsverlusten. Der Verbraucher, der mit Hausbrand heizt, benötigt gleichzeitig für 1 kWh Heizwärme 1,11 kWh Brennstoffenergie (ca. 10% der Brennstoffenergie sind Schornsteinverluste).

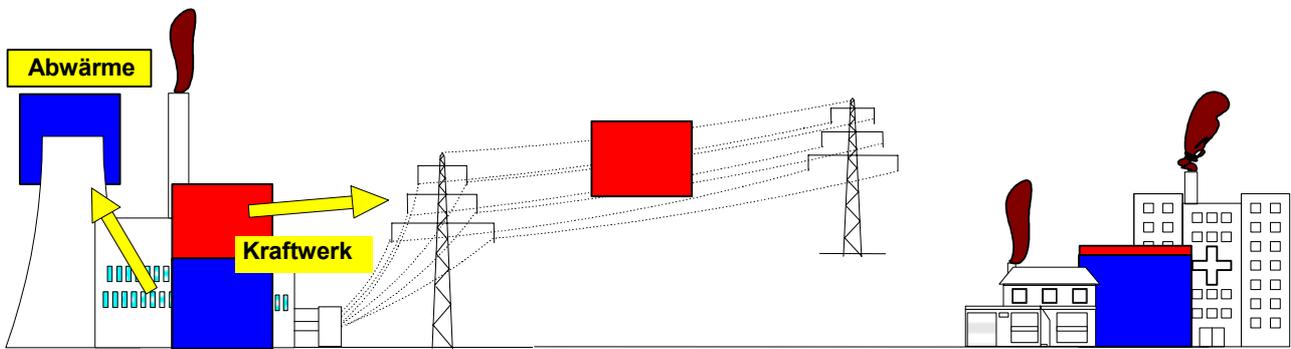


Bild 5 Versorgung bei getrennter Bereitstellung von Strom und Wärme

4. Das Heizkraftwerk

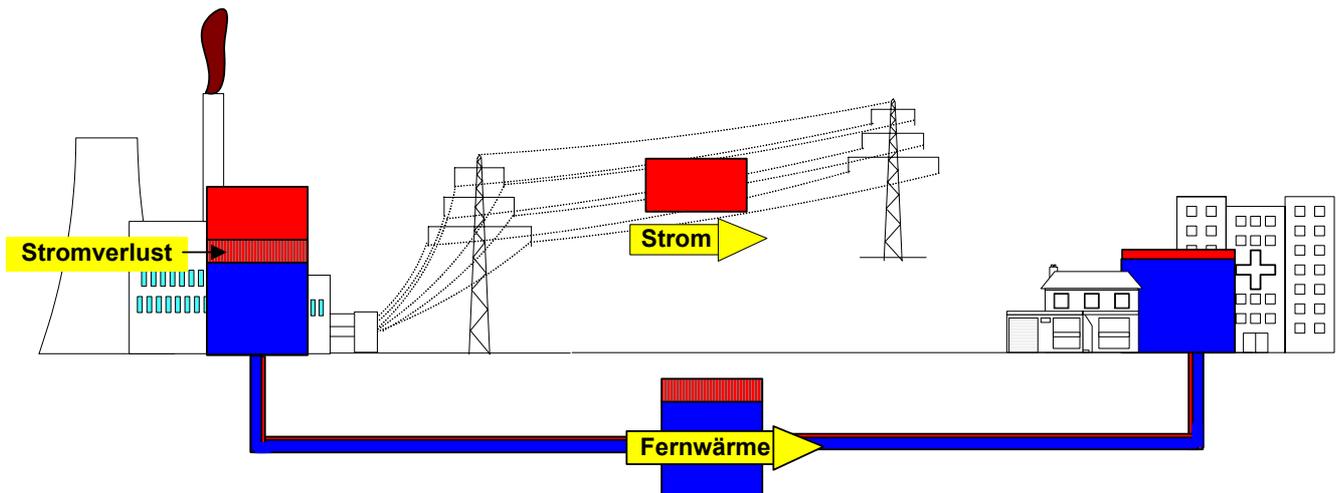


Bild 6 Energieumsetzung bei der Fernwärme mit geringerer Stromproduktion

Wir nehmen nun an, die Abwärme des Kraftwerks wird, anstatt bei Umgebungstemperatur (Bild 4) an die Umgebung, nunmehr als Fernwärme bei 100°C an die Verbraucher abgegeben (Bild 6). Das Kraftwerk macht jetzt nur noch 30 Prozentpunkte Strom. Nimmt man an, dass 10 Prozentpunkte über den Kamin und anderswo verloren gehen, können 60 Prozentpunkte als Wärme vom Verbraucher genutzt werden.

Nun lassen wir das Kraftwerk mit erhöhtem Brennstoffeinsatz (ca. 30%) den Stromverlust ausgleichen (Bild 7). Somit stehen aus 0.3 kWh Brennstoffenergie, die zusätzlich benötigt werden, jetzt 0.6 kWh Heizwärme zur Verfügung (der besseren Übersicht halber bleibt dabei die zusätzlich anfallende Wärme unberücksichtigt, Mit der Vereinfachung liegen wir auf der sicheren Seite). Anhand der Flächen, auf 1kWh Heizwärme umgerechnet, lässt sich das nachvollziehen (Bild 8a). Wir haben es hier also nicht mit einem Perpetuum mobile zu tun, vielmehr um ein System mit geringerem Exergieverlust.

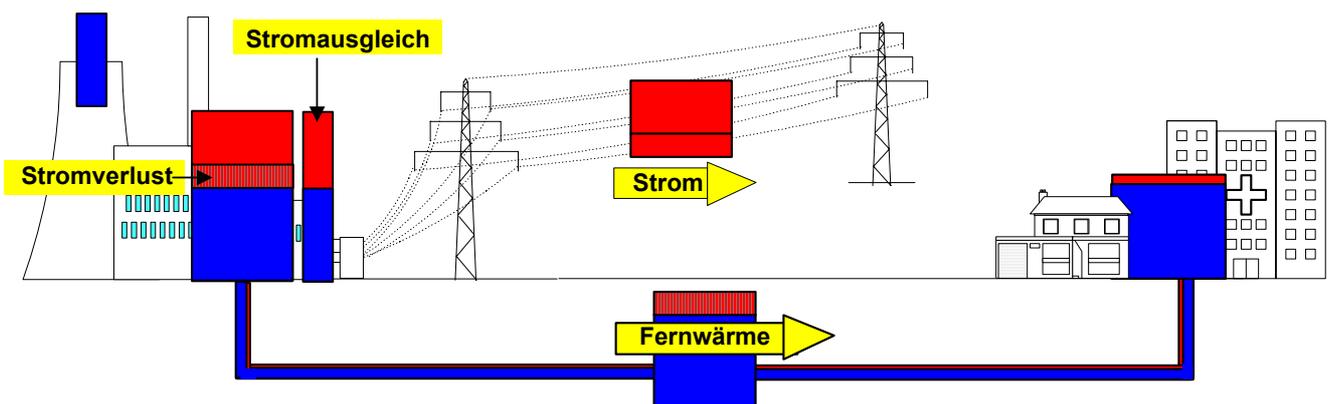


Bild 7 Energieumsetzung bei der Fernwärme mit Ausgleich des Stromverlustes

Machen wir noch den Vergleich mit dem Brennstoffeinsatz beim Hausbrand (90% Nutzungsgrad für die Brennstoffenergie, Bild 8b): Wir erkennen, dass wir bei den getroffenen Vorgaben eine Einsparung von ca. 55% erzielen.

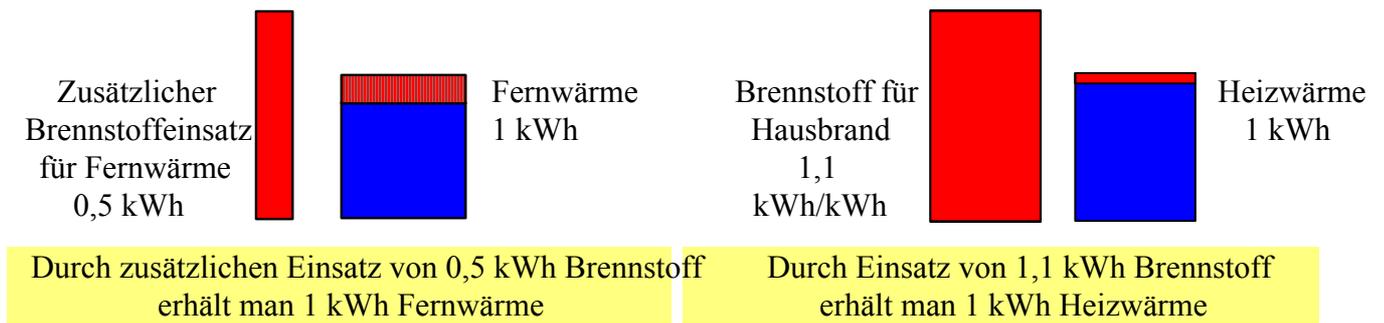


Bild 8 Energiebilanz bei der Kraft-Wärme-Koppelung
a) Brennstoffeinsatz für Fernwärme

b) Brennstoffeinsatz für Hausbrand

5. Die Wärmepumpe

Das Prinzip der Wärmepumpe ist das gleiche. Nur wird die aus dem Kraftwerk für die Wärme verwendete Exergie nicht zusammen mit der Anergie durch das Fernwärmenetz geleitet, sondern ohne diese durch das elektrische Netz. Das ist der große Vorteil der Wärmepumpe. Sie lässt sich auch dort einsetzen, wo wegen größerer Entfernungen und geringerer Wohndichte die Fernwärme indiskutabel ist. Ihr großer Nachteil ist ihr hoher technisch nicht vermeidbarer interner Exergieverlust. Statt einer Arbeitsziffer von 15 erreicht sie gerade einmal eine Ziffer von 4, wenn sie sehr gut ist. Sie kommt allerdings in die Nähe der Fernwärme, wenn diese bei 150°C ausgekoppelt wird. Die Wärmepumpe gehört also aus thermodynamischer Sicht in die Reihe der KWK-Anlagen mit hinein. Die wirtschaftliche Belohnung für diese Einsparung muss aber dann der Betreiber erhalten, der mit erhöhten Investitionen aus dem normalen Strom jetzt KWK-Strom macht.

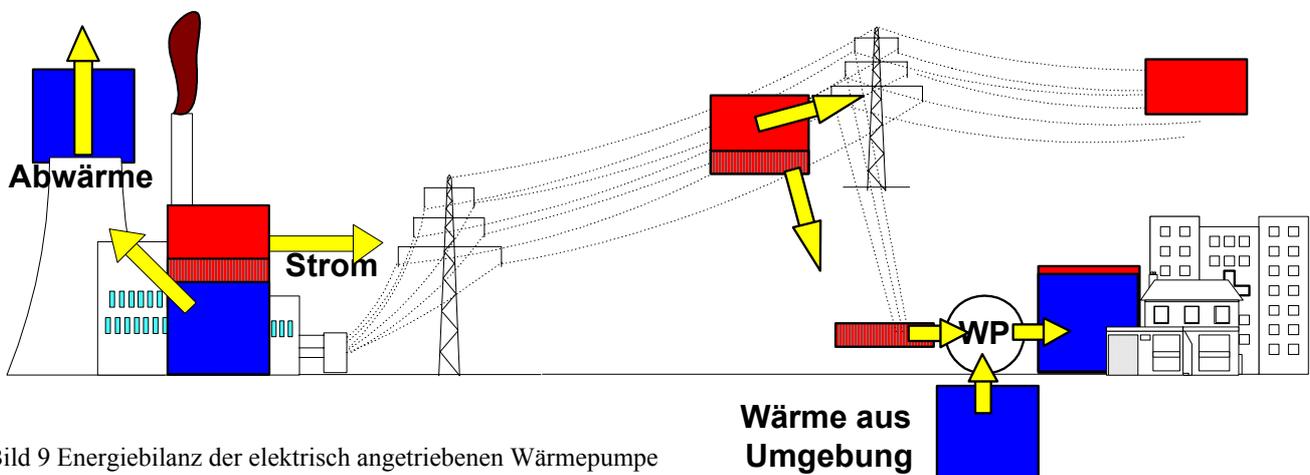


Bild 9 Energiebilanz der elektrisch angetriebenen Wärmepumpe

6. Energieeffizienz im Vergleich

Zum Schluss sollen die verschiedenen Möglichkeiten der KWK gegenübergestellt und bewertet werden, wobei natürlich auch das Blockheizkraftwerk (BHKW) nicht vergessen werden darf, dem insbesondere wegen der anzustrebenden dezentralen Stromversorgung eine große Bedeutung zukommt. Es wurde erläutert, dass für die Energieeffizienz die Temperatur der Wärmezufuhr im Kraftwerk entscheidend ist. Bei der reinen Stromproduktion wird dies durch den Netto-Wirkungsgrad (produzierter Strom dividiert durch zugeführte Brennstoffenergie) ausgedrückt. Es wurde auch gezeigt, dass die Einsparung durch KWK von der Effizienz des verwendeten Kraftwerks abhängig ist. (Kurz wiederholt: je höher die Eintrittstemperatur ist, desto geringer wird der Anteil des Stromverlustes bei Wärmeauskoppelung mit entsprechend angehobener Austrittstemperatur). Wir tragen deshalb die Ersparnisse durch die KWK über dem Netto-Wirkungsgrad (bei reiner Stromproduktion) des verwendeten Heizkraftwerks auf.

Im Diagramm Bild 10 sind 3 Kurven für die aus dem Dampfkraftwerk ausgekoppelte Wärme (mittlere Temperaturen 50°C, 100°C und 150°C) aufgetragen. Die beiden senkrechten roten Linien kennzeichnen je einen Kraftwerkstyp, links das moderne Steinkohlekraftwerk, rechts ein GuD-Kraftwerk*. Wir können festhalten: Je besser das Kraftwerk, desto höher die Ersparnis durch KWK, bezogen auf die Nutzwärme, auch wenn die Wärmeproduktion bezogen auf die Kraftwerksleistung geringer wird. Das beste Ergebnis für 50°C wird sich allerdings kaum realisieren lassen. In der Regel werden sich die mittleren Temperaturen zwischen 100 und 150°C bewegen, da für die Wärmeübertragung an mehreren Stellen Temperaturdifferenzen benötigt werden. Auch das Ergebnis bei 150°C ist noch ganz ansehnlich.

Die Wärmepumpe wurde mit einer konstanten Leistungsziffer von 4 angenommen, was zumindest für Fußbodenheizung und Grundwasser als Wärmequelle vertretbar ist. Der Brennstoffverbrauch ist über den Stromeinsatz mit dem Netto-Wirkungsgrad des Kraftwerks und den Netzverteilungsverlusten zu berechnen. Somit steigt die Einsparung durch die Wärmepumpe ebenfalls mit der Güte des Kraftwerks, das sie mit Strom versorgt (in der Regel der Kraftwerksmix, der ins Netz einspeist). Wegen der (im Vergleich zur theoretisch maximal möglichen Ziffer von ca. 15) relativ niedrigen Arbeitsziffer ist die Wärmepumpe je nach Güte des Wärmenetzes mit einem Heizkraftwerk mit hoher Temperatur der ausgekoppelten Wärme vergleichbar.

Das BHKW, das aus einem stationären Verbrennungsmotor (auch Gasturbine) mit Wärmeübertragern zur Nutzung der Kühlwasserwärme und der Abgaswärme besteht, hat - in der Höhe abhängig von der verwendeten Maschine - ein festes Strom-Wärme-Verhältnis. Wenn auch der Wirkungsgrad bei den kleinen dezentralen BHKW (etwa 30% bis 40%) geringer ist als bei modernen Großkraftwerken, so entfallen auch hier wegen der dezentralen Standorte größere Verteilungsverluste beim Strom und bei der Wärme (für die zentralen Großkraftwerke wurden Verteilungsverluste von 5% der Stromproduktion angesetzt). Das BHKW verbraucht gegenüber dem Hausbrand, bezogen auf die Nutzwärme, natürlich mehr Brennstoff. Es verdrängt aber Strom aus dem Kraftwerk bzw. aus dem Netz, in das viele unterschiedliche Kraftwerke einspeisen. Der dort geringer gewordene Brennstoffeinsatz muss gegengerechnet werden. Die insgesamt dadurch erzielte Einsparung fällt umso größer aus, je schlechter das Kraftwerk arbeitet, das um die BHKW-Leistung heruntergefahren werden muss, und umgekehrt. Das BHKW (Wärmenutzung vorausgesetzt) erreicht eine Einsparung von 100% für die gewonnene Wärme, wenn es den Strom aus einem Kondensationskraftwerk gleichen Netto-Wirkungsgrades (vermindert um dessen größere Verteilungsverluste) verdrängt. Man erkennt hier, dass bei dem heutigen Kraftwerkspark (links von der ersten roten Linie) zumindest in der Heizperiode das BHKW, auch das mit geringem Wirkungsgrad, der Fernwärme überlegen ist, erst recht natürlich, wenn man auch an die Investitionen und die Unterhaltung des Fernwärmenetzes denkt.

Im Sommer sieht es anders aus, wenn der Wärmebedarf gering oder gar nicht vorhanden ist. Das mit Dampf betriebene Heizkraftwerk kann dann Kondensationsbetrieb mit optimalem Wirkungsgrad fahren, also ohne wesentlichen Exergieverlust in der Abwärme. Vergleichbares kann das BHKW nicht. Nur das Braunkohlenkraftwerk, das wegen der großen Entfernungen vom Verbraucher für KWK ohnehin nur bedingt nicht in Frage kommt und hier in die Betrachtung nicht einbezogen wurde, hat - wegen des hohen Anteils an Wasser, der aus dem Brennstoff verdampft werden muss - in jedem Falle noch höhere Exergieverluste und entsprechend höhere spezifische Emissionen. Mit dem GuD-Heizkraftwerk kann das Motor-BHKW in keinem Falle konkurrieren. Das kann aber vielleicht später einmal das Brennstoffzellen-BHKW, von dem höhere Wirkungsgrade zu erwarten sind und das ebenso dezentral in kleinen Einheiten eingesetzt werden kann.

* Beim GuD-Kraftwerk (Gas- und Dampfkraftwerk) wird mit Rauchgas, das bei höherem Druck durch Verbrennung des Brennstoffes (in der Regel Erdgas) in einer Brennkammer entsteht, eine Gasturbine beaufschlagt. Das Abgas aus der Gasturbine beheizt einen Dampferzeuger für den nachgeschalteten Dampfkraftprozess. Damit wird eine wesentlich höhere mittlere Temperatur der Wärmezufuhr im gesamten Prozess erreicht.

Einsparung für Wärme aus KWK in Abhängigkeit vom Kraftwerkstyp und von der Temperatur t_H der Wärmeauskoppelung

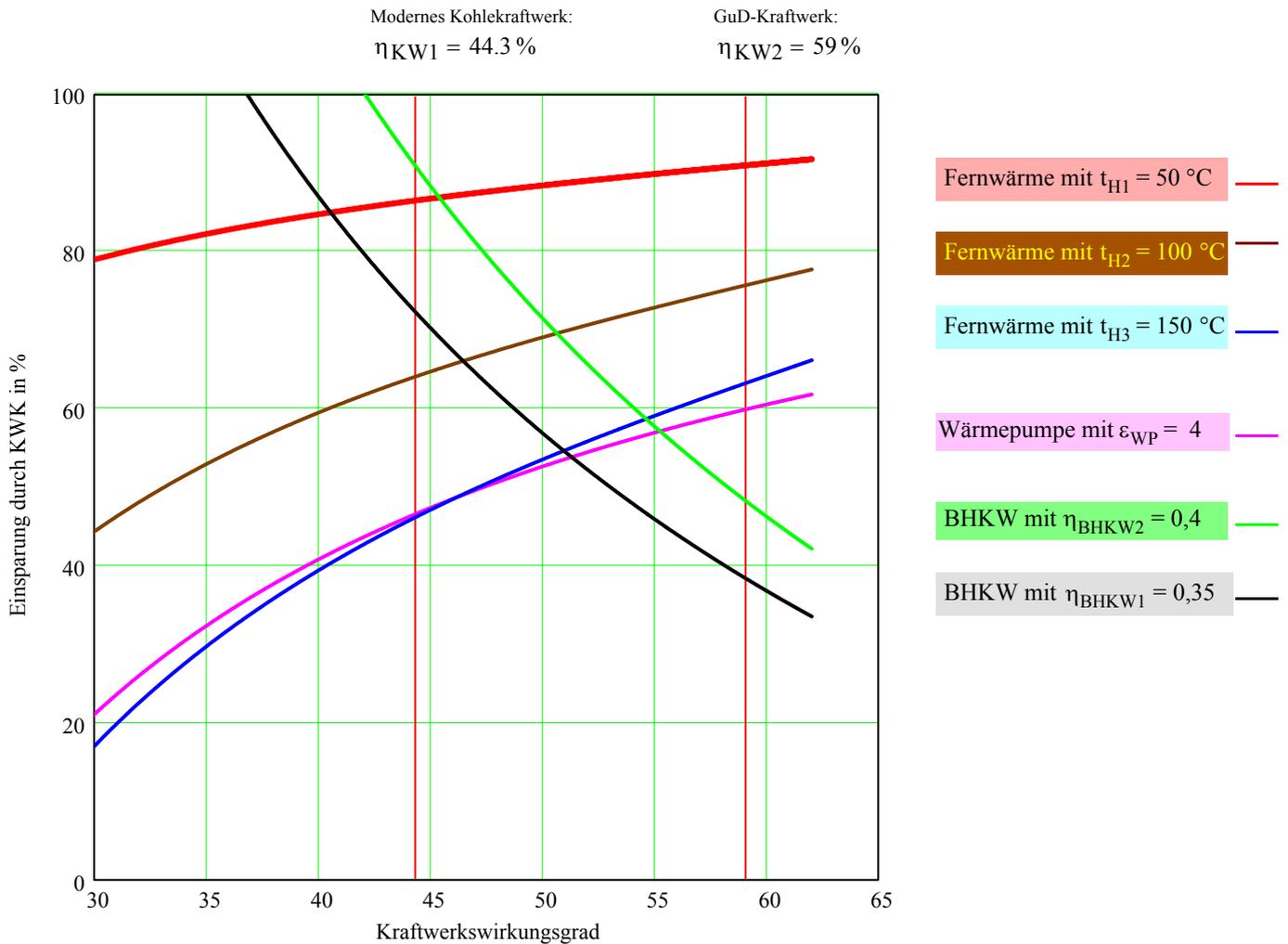


Bild 10 Einsparung für Wärme aus KWK in % im Vergleich zu getrennter Wärme- und Stromerzeugung.

Zum besseren Verständnis seien einige Punkte herausgegriffen. Im Vergleich mit dem modernen Steinkohlekraftwerk (Wirkungsgrad = 43% bei reiner Stromerzeugung und Bereitstellung der Wärme aus Hausbrand oder Heizwerk, Schnittpunkte mit der linken senkrechten roten Linie) wird bei Auskoppelung von Wärme bei 100 °C aus diesem Kraftwerk eine Einsparung für die Wärme in Höhe von ca. 64% erzielt, die Wärmepumpe mit $\epsilon = 4$, die mit Strom aus diesem Kraftwerk versorgt wird, erzielt ca. 46 %, das BHKW mit $\eta = 40\%$ erzielt gegenüber der getrennten Versorgung mit dem Steinkohlekraftwerk 91%. Im Vergleich mit einem Kohlekraftwerk mit $\eta = 40\%$ würde dieses BHKW sogar mehr als 100% einsparen, da es ohne zusätzlichen Brennstoffeinsatz mehr Wärme liefert, als es bei der getrennten Bereitstellung der Fall wäre. Das GuD- Heizkraftwerk erzielt gegenüber der getrennten Versorgung mit dem GuD-Kondensationskraftwerk zur Stromerzeugung bei Fernwärmeauskoppelung mit 100°C eine Einsparung von 76% (Schnittpunkt der 100°C- Linie mit der rechten senkrechten roten Linie)

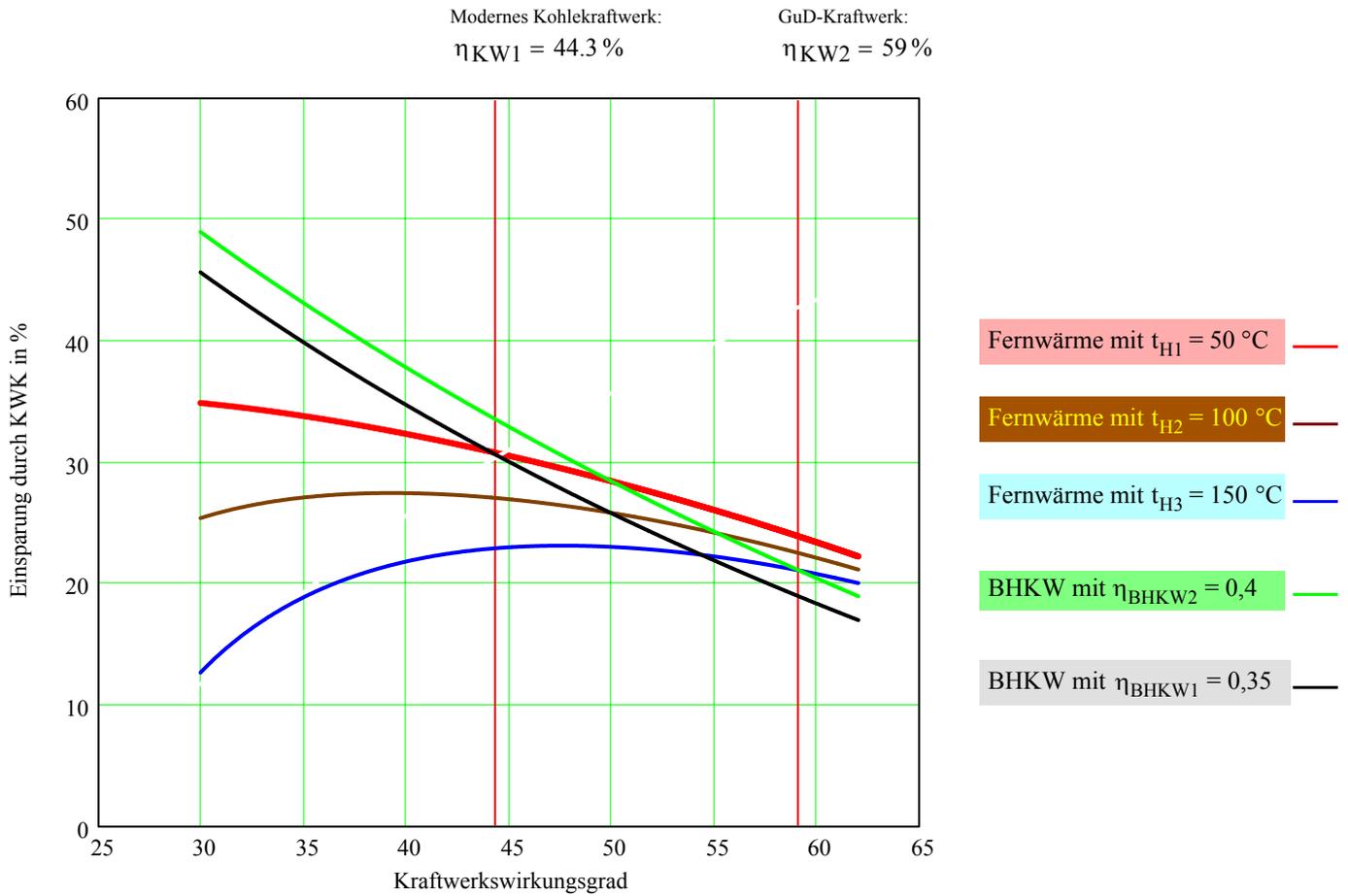


Bild 11 Einsparung durch KWK bezogen auf die gesamte von der KWK-Anlage bereitgestellte Energie im Vergleich zur getrennten Bereitstellung. Die Wärmepumpe kann hier nicht mit aufgeführt werden, da sie keine elektrische Energie liefert.

Die Einsparungen werden mit dieser Bezugsgröße bei höheren Kraftwerkswirkungsgraden geringer, weil die ausgekoppelte Wärme im Verhältnis zur Stromproduktion geringer wird und somit auch die Einsparungen bei der Auskoppelung.

7. Konsequenzen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Prinzip überall, wo Wärme bereitgestellt werden soll, eine der Formen der Kraft-Wärme-Kopplung zum Einsatz gelangen könnte, mit entsprechend reduziertem Primärenergieeinsatz und reduzierten Emissionen (Stromüberschuss lässt sich ins Netz einspeisen). Wichtig ist auch festzuhalten, dass die KWK mit der geringsten Energieeffizienz (BHKW mit $\eta_{\text{BHKW1}} = 35\%$) gegenüber getrennter Stromerzeugung mit dem besten Kraftwerk (GuD-Kondensationskraftwerk mit $\eta_{\text{GuD}} = 60\%$) immer noch eine Ersparnis von fast 40%, bezogen auf die gelieferte Wärme erbringt.

Die hier genannten Zahlen sind natürlich nur Anhaltswerte. Im Einzelfalle können je nach Anlagen- und Verteilungsnetz-Konfiguration auch größere Abweichungen auftreten. Wegen der großen Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen ist eine Bewertung der Effizienz der jeweils vorgesehenen oder betriebenen Anlage wichtig, wenn KWK - wie auch immer - sachgerecht bewertet werden soll.

Das Potenzial für die KWK ist insbesondere in Deutschland nur zu einem geringen Teil ausgeschöpft. Dies hat mehrere Gründe. Erstens waren bei den niedrigen Energiepreisen der früheren Jahre KWK-Anlagen wegen ihrer höheren Anlagenkosten betriebswirtschaftlich unrentabel. Zweitens liegt das an den vorhandenen Versorgungsstrukturen mit zentralen Einspeisungen und im Wesentlichen nur vier einflussreichen Netzbetreibern (Oligopol), die mit ihrer Preisgestaltung dezentrale Einspeisungen sehr erschweren.

Dennoch muss aus Gründen des notwendigen Klimaschutzes und der ebenso notwendigen Schonung der Ressourcen die KWK stärker zum Zuge kommen, d.h. es müssen gesetzliche Steuerinstrumente geschaffen werden, die durch Veränderung der marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen die für den jeweiligen Zweck volkswirtschaftlich günstigste Anlage auch betriebswirtschaftlich rentabel machen. Das KWK-Gesetz aus dem Jahre 2002 wird dieser Notwendigkeit hauptsächlich deswegen nicht gerecht, weil es die Eigenstromerzeugung ausklammert. (=> <http://www.bkww.de/>)