

Kenngrößen zur optimalen Auslegung großer KWK-Anlagen

Prof. Dr.-Ing. **Christoph Kail**, Meschede; Dipl.-Ing. **Georg Haberberger**, Erlangen

Zusammenfassung

Durch die gekoppelte Erzeugung von Strom und Heizwärme in fortschrittlichen GUD- und Dampfkraftwerken kann gegenüber einer getrennten Erzeugung in Anlagen des gleichen Typs in den hier betrachteten Fällen bis zu 21 % an Primärenergie eingespart werden. Die spezifischen Kohlendioxid-Emissionen der in KWK-Anlagen erzeugten Heizwärme nehmen bei Einsatz des gleichen Brennstoffes im günstigsten Fall um 67 % gegenüber einer getrennten Erzeugung ab. Die Kosten der KWK-Heizwärme betragen im Kraftwerk bei einer hinsichtlich der Erzeugungskosten optimierten Anlage rund 20 % der Stromerzeugungskosten eines vergleichbaren Kondensationskraftwerkes. Sie sind damit rund halb so hoch wie die Brennstoffkosten des Erdgases.

Zur Beurteilung der Qualität von KWK-Anlagen wird vorgeschlagen, sie mit einem fortschrittlichen System zur getrennten Erzeugung von Strom und Heizwärme zu vergleichen. Dieser Vergleich sollte unter Verwendung des gleichen Brennstoffes für die Stromerzeugung durchgeführt werden. Nur wenn der Brennstoffausnutzungsgrad der KWK-Anlage um einen gewissen Prozentsatz, z.B. 10 %, höher ist als der des Systems zur getrennten Erzeugung, ist sie förderungswürdig. Als Kriterium wird hier also ein Mindestbrennstoffausnutzungsgrad vorgeschlagen, der vom Verhältnis von Strom zu Heizwärme und von der Art des zur Stromproduktion eingesetzten Brennstoffes abhängig ist.

Allgemeines

Die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme, die sogenannte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), ist eine sehr effiziente Art der Energiewandlung und kann daher einen bedeutenden Beitrag zur Reduzierung des Primärenergieverbrauchs und der Emissionen leisten.

Seit der Liberalisierung der Strommärkte ist die KWK durch gesunkene Strompreise stark in Bedrängnis gekommen. In den Jahren 1999/2000 führte dies zu Stilllegungen von KWK-Anlagen in einer Größenordnung von rund 200 MW_{el}/Monat [4]. Um weitere umfangreiche Abschaltungen von KWK-Anlagen zu vermeiden, wurden entsprechende gesetzliche Regelungen getroffen, die eine erhöhte Vergütung des KWK-Stromes sicherstellen. Darüber hinaus ist von der Bundesregierung im Rahmen des Klimaschutzprogrammes geplant, den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung durch eine Quotenregelung mit handelbaren Zertifikaten und steuerliche Erleichterungen zu fördern. Dieser Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung hat eine zusätzliche Minderung der Kohlendioxid-Emissionen in Deutschland von 10 Mio. t/a bis zum Jahr 2005 und 23 Mio. t/a bis zum Jahr 2010 zum Ziel. Gegenwärtig werden durch die Kraft-Wärme-Kopplung bereits rund 30 Mio. t/a vermieden [4]. Insgesamt sollen die Kohlendioxid-Emissionen in Deutschland, wie auf dem Klimagipfel in Berlin 1995 vereinbart wurde, bis zum Jahr 2005 gegenüber 1990 um 25 % (250 Mio t/a) gesenkt werden.

Vor diesem Hintergrund wird in dem Beitrag, der als Fortsetzung eines bereits veröffentlichten Artikels [6] angesehen werden kann, die thermodynamisch und wirtschaftlich optimale Auslegung großer KWK-Anlagen untersucht. Dabei werden GUD- und Dampfkraftwerke als Entnahme-Kondensations- sowie als Gegendruck-Kraftwerke betrachtet. Es werden die Potentiale dieser Anlagen zur Reduzierung des Primärenergieverbrauchs und der Emissionen aufgezeigt. Weiterhin wird auf Qualitätskriterien der KWK eingegangen. Es wird ein Ansatz zur Beurteilung der Qualität von KWK-Anlagen vorgeschlagen und mit dem im Mineralölsteuergesetz vereinbarten Kriterium eines minimalen Brennstoffausnutzungsgrades von 70 % verglichen.

Die Untersuchungen werden an fortschrittlichen Kraftwerken gemacht. Das Dampfkraftwerk (DKW) hat Dampfzustände von 285 bar / 600 °C / 620 °C und erreicht bei Einsatz von Steinkohle im Vollastbetrieb ohne Wärmeauskopplung (Kondensationsbetrieb) einen Nettowirkungsgrad von rund 46 %. Die Turbineneintrittstemperatur der Gasturbine des GUD-Kraftwerkes wurde für diese Studie mit 1230 °C (ISO) angenommen und die Dampfzustände betragen 130 bar / 565 °C / 565 °C. Der Nettowirkungsgrad des GUD-Kraftwerkes liegt bei Einsatz von Erdgas als Brennstoff im Kondensationsbetrieb bei rund 58 %. Weiterführende Darstellungen zu fortschrittlichen GUD-Kraftwerken sind z. B. in [5] zu finden. Für die Entnahme-Kondensations- und Gegendruck-Kraftwerke wurden hier die gleichen Dampfzustände gewählt, um die unterschiedlichen Betriebscharakteristiken hinsichtlich der Kraft-Wärme-Kopplung ohne Störeinflüsse von geänderten Dampfparametern bestimmen zu können. Gegendruck-Kraftwerke werden üblicherweise

mit niedrigeren Dampfzuständen ausgeführt.

Für die Wärmeauskopplung wurde eine dreistufige Heizdampfentnahme gewählt. In Abb. 1 ist diese Schaltung exemplarisch für das Entnahme-Kondensations-Kraftwerk dargestellt. Im Unterschied zum Gegendruck-Kraftwerk, bei dem sämtlicher Abdampf der Dampfturbine auf den untersten Heizwärmeübertrager geleitet werden muss, weist das Entnahme-Kondensations-Kraftwerk, welches einen Kondensator hat, durch die Möglichkeit zur Regelung der zu entnehmenden Heizdampfmenge eine größere Flexibilität in Hinsicht auf die Erzeugung von Strom und Heizwärme auf. Eine Beschreibung von anderen Schaltungsvarianten sowie ihrer Vor- und Nachteile ist z.B. in [7] enthalten. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse gelten für eine Vorlauftemperatur des Heizwassers von 110 °C und eine Rücklauftemperatur von 55 °C.

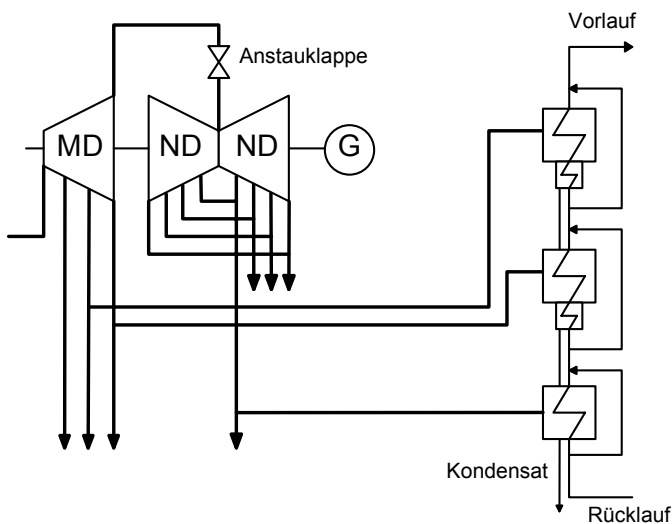


Abb. 1: Heizschaltung des Entnahme-Kondensations-Kraftwerkes

In den Abbildungen 2 und 3 sind einige wichtige thermodynamische Kenngrößen der Kraft-Wärme-Kopplung bei GUD- und Dampfkraftwerken dargestellt. Es sind dies der Brennstoffausnutzungsgrad ω , der angibt, welcher Anteil der Brennstoffenergie $\dot{m}_B H_u$ in Strom P und Heizwärme Q umgewandelt wird (Gl. 1), die Stromausbeute β , welche aus dem Verhältnis des erzeugten Stromes zur Brennstoffenergie gebildet wird (Gl. 2), und die Stromverlustkennziffer S , die ein Maß für den Rückgang der Stromerzeugung durch Auskopplung von Heizwärme gegenüber dem Kondensationsbetrieb (elektrische Leistung P_0) ist (Gl. 3).

$$\omega = \frac{\dot{Q} + P}{\dot{m}_B H_u} \quad (1) \qquad \beta = \frac{P}{\dot{m}_B H_u} \quad (2) \qquad S = \frac{P_0 - P}{\dot{Q}} \quad (3)$$

Die Verläufe des Brennstoffausnutzungsgrades und der Stromausbeute bei GUD- und Dampfkraftwerken im Entnahme-Kondensations-Betrieb sind in Abb. 2 in

Abhängigkeit vom Verhältnis von Heizwärmeleistung zu elektrischer Leistung bei Brennstoffvolllast dargestellt. Ausgehend von den Wirkungsgraden im Kondensationsbetrieb ohne Heizwärmeauskopplung laufen die Linien des Brennstoffausnutzungsgrades und der Stromausbeute des GUDs und des DKWs nahezu parallel mit zunehmender Heizwärmeauskopplung. Der Brennstoffausnutzungsgrad des Dampfkraftwerkes steigt bis auf rund 94 % und der des GUD-Kraftwerkes auf gut 92 %. Dieser Unterschied lässt sich auf den im Vergleich zum Dampfkraftwerk höheren Luftüberschuss bei der Verbrennung in der Gasturbine und den dadurch höheren Abgaswärmeverlusten zurückführen. Um einen bestimmten Brennstoffausnutzungsgrad, z.B. den im Mineralölsteuergesetz zur Steuerbefreiung vereinbarten Wert von 70 %, zu erreichen, müssen GUD-Kraftwerke aufgrund ihres hohen elektrischen Wirkungsgrades wesentlich weniger Wärme auskoppeln als Dampfkraftwerke. Die hier dargestellten Brennstoffausnutzungsgrade enthalten nicht die Verluste durch die Verteilung von Strom und Heizwärme bis zum Verbraucher.

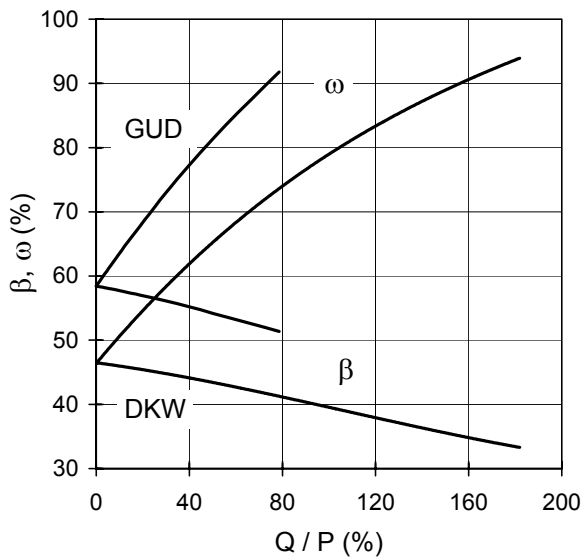


Abb. 2: Brennstoffausnutzungsgrad ω und Stromausbeute β

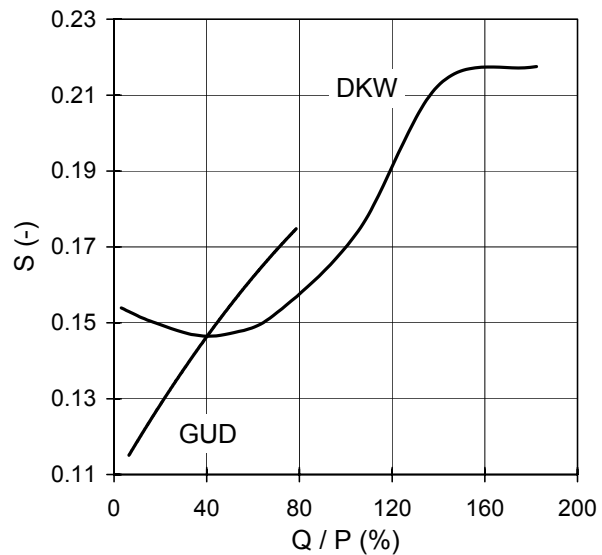


Abb. 3: Stromverlustkennziffer S

Die maximal mögliche Wärmeauskopplung ist beim GUD-Kraftwerk niedriger als beim Dampfkraftwerk, da beim GUD-Kraftwerk der Dampfprozess, welcher im Wesentlichen die Heizwärme liefert, nur rund ein Drittel der elektrischen Gesamtleistung erzeugt und damit im Vergleich zum Dampfkraftwerk entsprechend kleiner ist. Das maximale Verhältnis von Heizwärme zu Strom beträgt deshalb beim GUD rund 80 % gegenüber 180 % beim DKW. Die Stromkennzahl, welche aus dem Verhältnis von Strom zu Heizwärme bei maximaler Wärmeauskopplung und Brennstoffvolllast besteht, ist daher bei GUD-Kraftwerken mit Werten von rund 1.25 höher als bei Dampfkraftwerken mit Werten von rund 0.55.

Die Stromverlustkennziffer S , welche ein Maß für die Qualität der Wärmeauskopplung ist, weist bei GUD- und Dampfkraftwerken unterschiedliche Verläufe auf (Abb. 3). Verschiebungen innerhalb der Vorwärmstrecke des Dampfkraftwerkes sind

dafür verantwortlich, dass die Stromverlustkennziffer des DKWs gegenüber der des GUDs bei hohen Heizwärmeleistungen größere Werte annimmt. Die Auskopplung von Heizwärme ist daher beim Dampfkraftwerk im Mittel mit einem höheren Rückgang der Stromproduktion verbunden. Ausführliche Erläuterungen zum Verlauf dieser Kenngrößen sind in [6] zu finden.

Auslegung und Betriebsweise der KWK-Anlage

Anhand der geordneten Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs (Abb. 4) erfolgt die Auslegung der KWK-Anlage. Je höher das Verhältnis der maximal auskoppelbaren Heizwärme $Q_{KWK, \max}$ zum maximal erforderlichen Heizwärmebedarf $Q_{H, \max}$ ist, desto höher ist der Deckungsgrad der KWK-Heizwärme am gesamten Wärmebedarf (Abb. 5). In dem hier untersuchten Bereich, in dem die maximale KWK-Heizwärmeleistung zwischen 30 % und 50 % des maximalen Wärmebedarfes liegt, ergeben sich Deckungsgrade zwischen 56 % und 82 %.

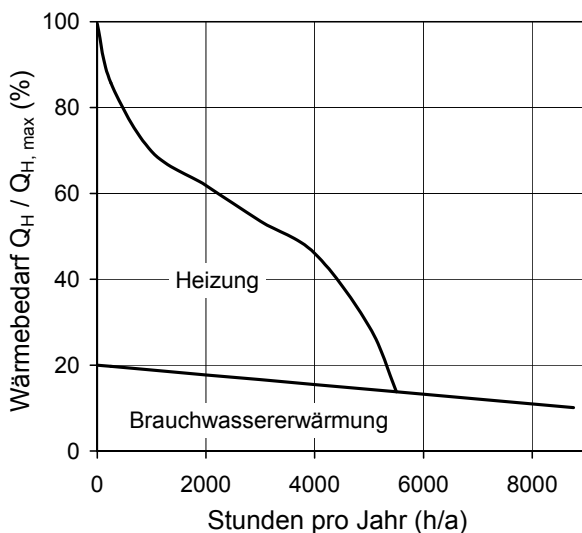


Abb. 4: Geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs

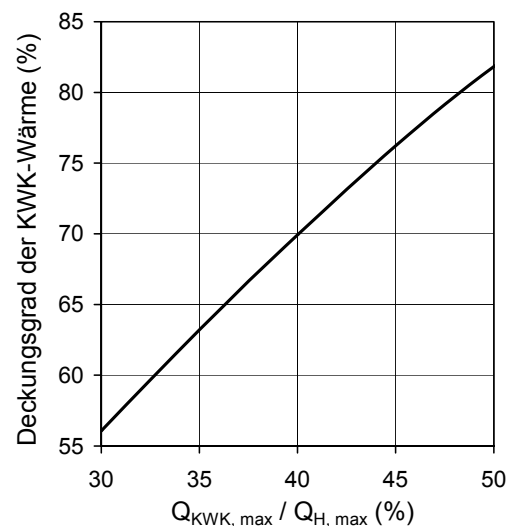


Abb. 5: Deckungsgrad der KWK-Heizwärme

Der Punkt mit maximaler Wärmeauskopplung ist dadurch gekennzeichnet, dass bei Brennstoffvollast sämtlicher Dampf aus der Dampfturbine zu Heizzwecken entnommen wird. Nur beim Entnahme-Kondensations-Kraftwerk verbleibt eine geringe Dampfmenge in der Niederdruckturbine, um die ventilierende Beschaufelung zu kühlen. Im Unterschied zum Dampfkraftwerk wird beim GUD-Kraftwerk auch Restabgaswärme als Heizwärme aus dem Dampferzeuger genutzt. Hierdurch können die Abgase auf ein Temperaturniveau von rund 75 °C abgekühlt werden.

Für die Betriebsweise der Kraftwerke wurden in Abhängigkeit von der Art der Wärmeauskopplung, Gegendruck- bzw. Entnahme-Kondensations-Kraftwerk, unterschiedliche Fahrweisen gewählt. Während das Gegendruck-Kraftwerk wärmegeführt mit variabler Brennstofflast gefahren wird (Abb. 6), wurde für das Entnahme-Kondensations-Kraftwerk ein Betrieb bei Brennstoffgrundlast gewählt. Zusätzlich zu

diesen beiden extrem unterschiedlichen Betriebsweisen sind natürlich auch andere Varianten denkbar, wie z.B. ein Mittellast-Kraftwerk im Entnahme-Kondensations-Betrieb, die jedoch im Allgemeinen eine Mischform der hier gewählten Betriebsarten sind und daher vom Ergebnis her zwischen diesen beiden liegen sollten.

In Abb. 6 sind die äquivalenten Volllastbetriebsstunden der Erzeugung von Strom und Heizwärme sowie des Brennstoffes für das Dampfkraftwerk in Abhängigkeit von der Auslegung und der Betriebsweise dargestellt und in Abb. 7 für das GUD-Kraftwerk. Mit zunehmendem Verhältnis von maximaler KWK-Heizwärmeleistung zu maximalem Wärmebedarf sinken die äquivalenten Volllastbetriebsstunden der KWK-Heizwärme. In dem hier betrachteten Bereich nehmen sie von 6400 h/a auf 5600 h/a ab. Beim Gegendruck-Kraftwerk liegen die Volllastbetriebsstunden der Brennstoffleistung und der Stromproduktion leicht unter denen der Heizwärme. Diese relativ niedrigen Volllastbetriebsstunden der Gegendruck-Kraftwerke führen teilweise zu derartig geringen Lastanforderungen (Teillasten), dass diese nur durch Abschalten eines Kraftwerksblockes einer Doppelblockanlage zu realisieren sind. Da sich niedrige Volllaststunden ungünstig auf die Erzeugungskosten auswirken, ist bei dem wärmegeführten Gegendruck-Kraftwerk daher tendenziell mit höheren Kosten für die Erzeugung von Strom und Heizwärme zu rechnen als bei dem in Brennstoffgrundlast betriebenen Entnahme-Kondensations-Kraftwerk.

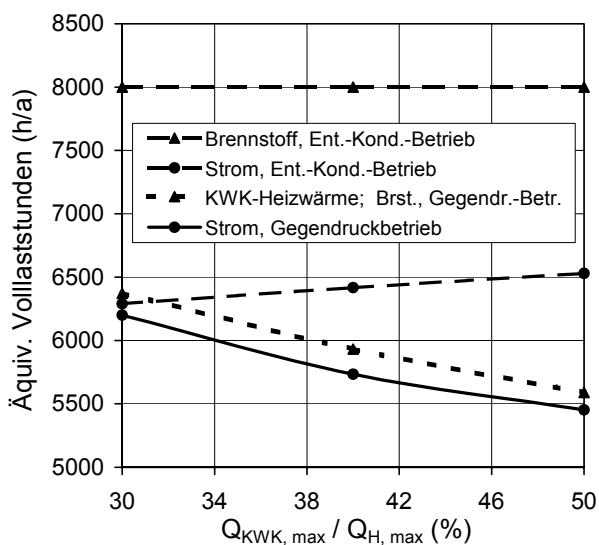


Abb. 6: Äquivalente Volllastbetriebsstunden des Dampfkraftwerkes bei Entnahme-Kondensations- und Gegendruckbetrieb

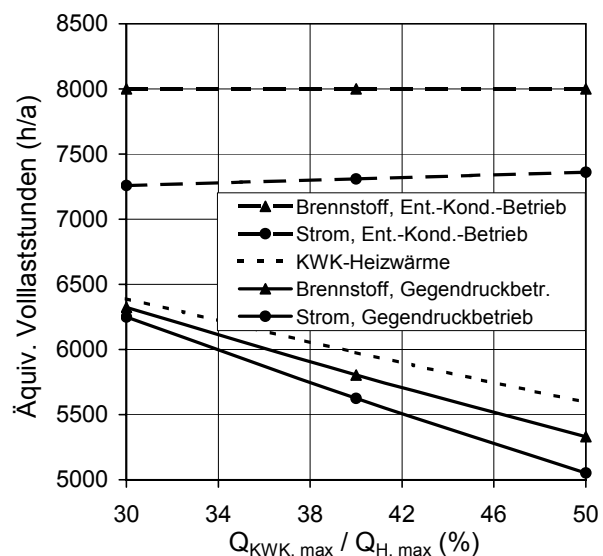


Abb. 7: Äquivalente Volllastbetriebsstunden des GUD-Kraftwerkes bei Entnahme-Kondensations- und Gegendruckbetrieb

Brennstoffbedarf und Emissionen der gekoppelten und getrennten Erzeugung von Strom und Heizwärme

Im Folgenden wird zuerst der Brennstoffbedarf der gekoppelten Erzeugung von Strom und Heizwärme mit dem der getrennten Erzeugung verglichen, um die Potentiale zur Brennstoffeinsparung zu ermitteln. Anschließend werden die

spezifischen Kohlendioxid-Emissionen der Erzeugung von Heizwärme untersucht.

In den Abbildungen 8 und 9 sind Jahresmittelwerte der Brennstoffausnutzungsgrade ω_{KWK} und der Verhältnisse von Strom P zu KWK-Heizwärme Q_{KWK} in Abhängigkeit von der Art des Kraftwerkes und der Auslegung dargestellt. Die Werte enthalten nicht die vom Spitzenlastheizkessel erzeugte Heizwärme und auch nicht die Verluste der Verteilung zum Verbraucher. Im Vergleich zu den Entnahme-Kondensations-Kraftwerken, deren Brennstoffausnutzungsgrade mit zunehmendem Verhältnis von maximaler KWK-Heizwärme zu maximalem Heizwärmebedarf in dem hier untersuchten Bereich von 85 % auf 81 % bis 82 % fallen, erreichen die Gegendruck-Kraftwerke Werte zwischen 91 % und 93.5 %, die nahezu unabhängig von der Auslegung der KWK-Anlage sind. Die Verhältnisse von Strom zu Heizwärme sind bei den Entnahme-Kondensations-Kraftwerken im Mittel rund 50 % höher als bei den Gegendruck-Kraftwerken.

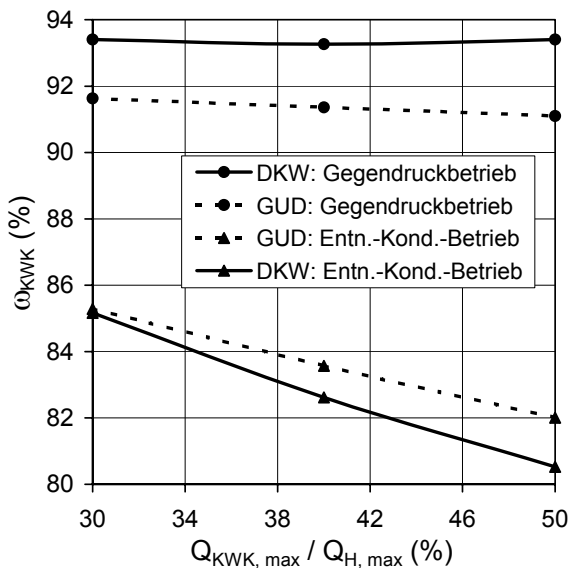


Abb. 8: Brennstoffausnutzungsgrad im Kraftwerk (exkl. Netzverluste)

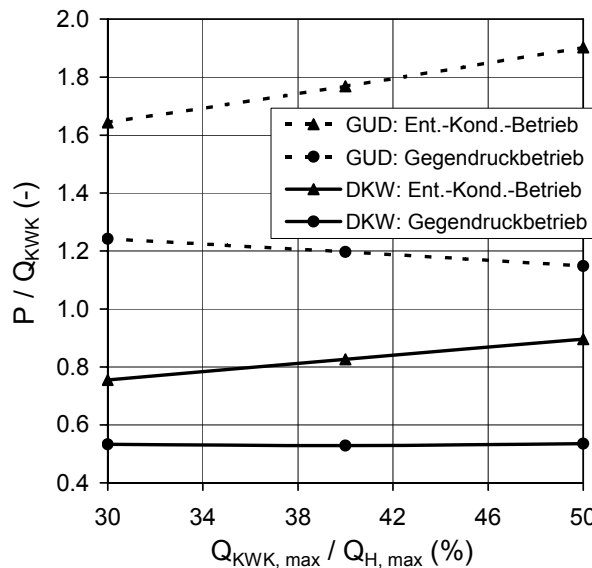


Abb. 9: Verhältnis von Strom zu Heizwärme im Kraftwerk (exkl. Netzverluste)

Zur Berücksichtigung von Netzverlusten wurden für die Verteilung des Stromes vom Kraftwerk bis zum Endverbraucher Verluste in Höhe von 5 % angenommen und für die Verteilung der Heizwärme 10 % Wärmeverluste und 1 % Pumpleistung. Unter Berücksichtigung dieser Netzverluste und der durch einen zentralen Spitzenlastheizkessel mit einem Wirkungsgrad von $\eta = 95\%$ erzeugten Heizwärme, deren Anteil durch den Deckungsgrad der KWK-Heizwärme (Abb. 5) bestimmt ist, ergeben sich die in den Abbildungen 10 und 11 dargestellten Brennstoffausnutzungsgrade ω_{KWK+HK} und Verhältnisse von Strom P zu Heizwärme Q_{KWK+HK} des Gesamtsystems. Die Brennstoffausnutzungsgrade der Gegendruck-Kraftwerke liegen nun bei rund 85 % und die der Entnahme-Kondensations-Kraftwerke zwischen 75 % und 80 %. Das Verhältnis von Strom zu Heizwärme steigt mit zunehmendem Verhältnis von maximaler KWK-Heizwärme zu maximalem Wärmebedarf, da zum einen aufgrund

des höheren Deckungsgrades der KWK-Heizwärme immer weniger Wärme vom Spitzenlastkessel erzeugt werden muss und zum anderen die relative Größe des Kraftwerkes in Bezug auf das Wärmenetz zunimmt.

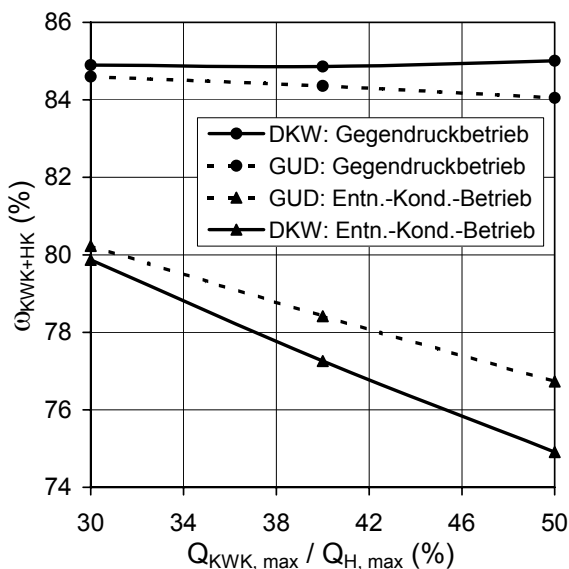


Abb. 10: Brennstoffausnutzungsgrad des Systems Kraftwerk und zentraler Heizkessel (inkl. Netzverluste)

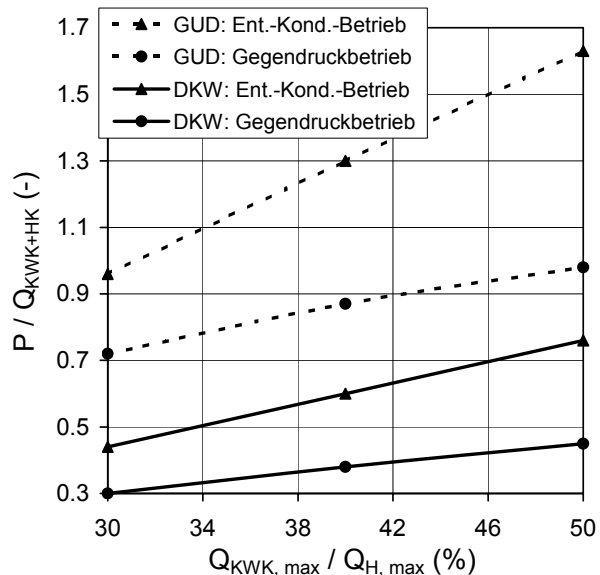


Abb. 11: Verhältnis von Strom zu Heizwärme des Systems Kraftwerk und zentraler Heizkessel (inkl. Netzverluste)

Um den Effekt der Kraft-Wärme-Kopplung bei GUD- und Dampfkraftwerken hinsichtlich Primärenergieeinsparung und damit auch Emissionsminderung zu untersuchen, wurde sowohl für das GUD- als auch für das Dampfkraftwerk jeweils ein System bestehend aus zentralem Kondensations-Kraftwerk im Grundlastbetrieb und dezentralem Heizkessel ($\eta = 95\%$) mit einem System bestehend aus zentralem KWK-Kraftwerk und zentralem Spitzenlastheizkessel miteinander verglichen.

Die Brennstoffausnutzungsgrade $\eta_{Kond-KW+HK}$ der Systeme mit getrennter Erzeugung von Strom P und Heizwärme Q_H wurden unter Berücksichtigung der Netzverluste des Stromes bestimmt und sind in Abb. 12 dargestellt. Aufgrund des niedrigeren elektrischen Wirkungsgrades des Dampfkraftwerkes erreicht das System mit dem GUD-Kraftwerk höhere Brennstoffausnutzungsgrade. Der Brennstoffausnutzungsgrad des Systems, bestehend aus GUD-Kraftwerk und dezentralem Heizkessel, liegt bis zu einem Verhältnis von Strom zu Heizwärme von 1.0 sogar über dem im Mineralölsteuergesetz zur Steuerbefreiung geforderten Mindestwert für KWK-Anlagen von 70%. Es ist also denkbar, dass KWK-Anlagen bei Verhältnissen von Strom zu Heizwärme, die kleiner als 1.0 sind, einen niedrigeren Brennstoffausnutzungsgrad haben als die getrennte Erzeugung von Strom im zentralen GUD-Kraftwerk und Heizwärme im dezentralen Heizkessel und trotzdem von der Erdgassteuer befreit werden. Hierbei würde einer „schlechten“ KWK-Anlage gegenüber der besseren getrennten Erzeugung von Strom und Heizwärme ein Wettbewerbsvorteil eingeräumt, da im Mineralölsteuergesetz keine Steuerbefreiung für

eine getrennte Erzeugung von Strom und Heizwärme vorgesehen ist. Zum anderen ist es auch denkbar, dass eine KWK-Anlage bei einem Verhältnis von Strom zu Heizwärme, welches größer als 1.0 ist, einen Brennstoffausnutzungsgrad hat, der niedriger als 70 % aber gleichzeitig höher als bei der getrennten Erzeugung ist. Diese Anlage käme nicht in den Genuss der Steuerbefreiung, obwohl sie qualitativ besser als die getrennte Erzeugung von Strom und Heizwärme ist.

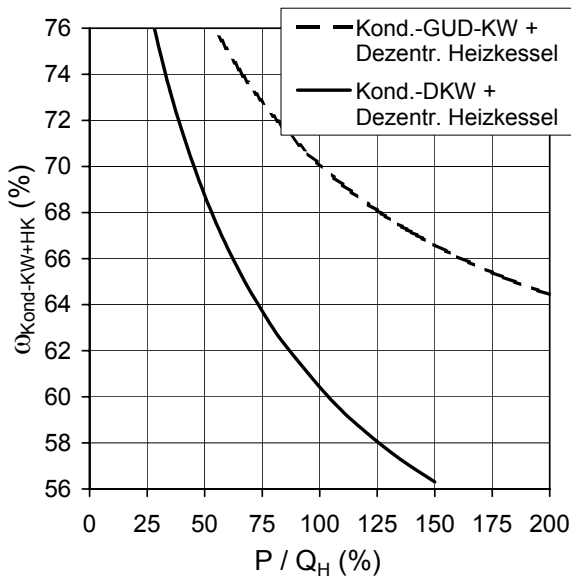


Abb. 12: Brennstoffausnutzungsgrad der getrennten Erzeugung von Strom und Heizwärme (inkl. Netzverluste)

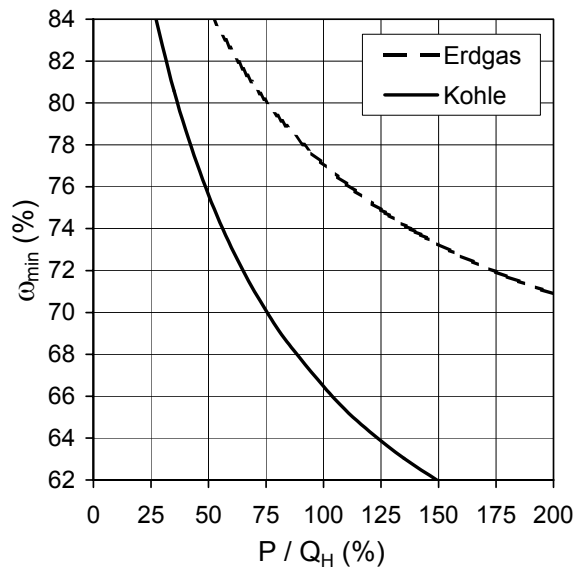


Abb. 13: Mindestbrennstoffausnutzungsgrad von förderungswürdigen KWK-Anlagen (inkl. Netzverluste)

Um bei dem geplanten Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung derartige Fälle zu vermeiden, in denen „schlechte“ KWK-Anlagen gefördert und „gute“ KWK-Anlagen nicht gefördert werden, muss durch ein geeignetes Effizienzkriterium sichergestellt werden, dass nur solche KWK-Anlagen gefördert werden, deren Brennstoffausnutzungsgrad höher ist als der eines fortschrittlichen Systems zur getrennten Erzeugung von Strom und Heizwärme. Um hierbei die Benachteiligung einer Brennstoffart zu vermeiden, sollte der Vergleich bei Einsatz des gleichen Brennstoffes für die Stromerzeugung in beiden Anlagen erfolgen. Für die Brennstoffe Erdgas und Kohle können z.B. ausgehend von den in Abb. 12 dargestellten Kurven Mindestbrennstoffausnutzungsgrade für KWK-Anlagen bestimmt werden, die um einen bestimmten Prozentsatz höher sein sollten als die der getrennten Erzeugung. Setzt man hier z.B. eine Erhöhung von 10 % an, so ergeben sich die in Abb. 13 dargestellten Kurven für Mindestbrennstoffausnutzungsgrade ω_{min} . Der Bereich rechts oberhalb der jeweiligen Kurve ist dann der Bereich einer Förderung. Anstatt eines festen Wertes für den Brennstoffausnutzungsgrad bekommt man hier eine Funktion, die einen Mindestbrennstoffausnutzungsgrad in Abhängigkeit vom Verhältnis von Strom zu Heizwärme und von der Art des zur Stromerzeugung eingesetzten Brennstoffes enthält. Die brennstoffspezifische Vorgabe eines Mindest-

brennstoffausnutzungsgrades erscheint sinnvoll, da ansonsten der Einsatz von Erdgas aufgrund der vorteilhaften Charakteristik der GUD-Kraftwerke (Abb. 2) zu Lasten der Kohle zunehmen würde. In Anbetracht der Tatsache, dass jedoch in Deutschland große Kohlevorräte aber nur geringe Erdgasvorräte vorhanden sind [3], würde ein vermehrter Einsatz von Erdgas zu einer zunehmenden Abhängigkeit von Erdgasimporten führen. Des weiteren ist zu bedenken, dass auch die Weltvorräte an Kohle sehr viel größer sind als die von Erdgas [3].

Um zentrale und dezentrale Anlagen miteinander vergleichen zu können, ist es erforderlich, die Verluste der Verteilung von Strom und Heizwärme bis zum Verbraucher (Netzverluste), wie hier geschehen, in dem Effizienzkriterium zu berücksichtigen.

Damit der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung auch zu den geforderten Reduzierungen an Kohlendioxid-Emissionen führt, muss ein bestimmter Anteil (Quote) der zur Stromerzeugung eingesetzten Brennstoffenergie mit dem entsprechenden Mindestbrennstoffausnutzungsgrad in Strom und Heizwärme umgewandelt werden. Der erforderliche Anteil lässt sich aus einem Vergleich der Mindestbrennstoffausnutzungsgrade mit der gegenwärtigen Situation bei der Erzeugung von Strom und Heizwärme ermitteln.

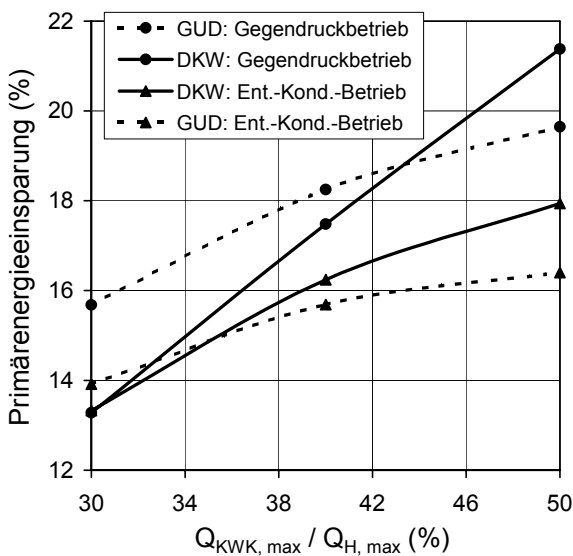


Abb. 14: Primärenergieeinsparung / Emissionsminderung durch gekoppelte Erzeugung von Strom und Heizwärme gegenüber einer getrennten Erzeugung

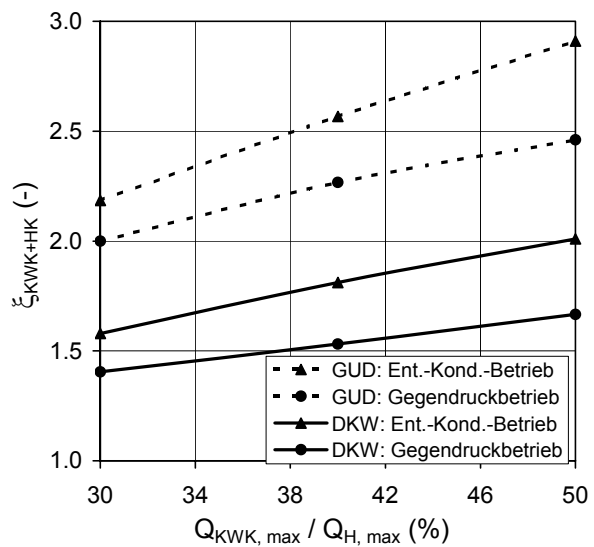


Abb. 15: Heizzahl des Systems Kraftwerk und zentraler Heizkessel (inkl. Netzverluste)

Die Primärenergieeinsparungen (Brennstoffeinsparungen), die sich zugunsten der Kraft-Wärme-Kopplung ergeben, sind in Abb. 14 dargestellt und sind aus einem Vergleich der Daten aus den Abbildungen 10 und 12 berechnet worden. Die Primärenergieeinsparungen liegen je nach Auslegung und Typ der KWK-Anlage zwischen 13 % und 21 %. Die hier untersuchten KWK-Anlagen erfüllen also alle das vorgeschlagene Effizienzkriterium (Abb. 13), da ihre Brennstoffausnutzungsgrade

mehr als 10 % über denen der Referenzsysteme zur getrennten Erzeugung von Strom und Heizwärme (Abb. 12) liegen. Tendenziell steigt die Primärenergieeinsparung mit zunehmendem Verhältnis von maximaler KWK-Heizwärme zu maximalem Wärmebedarf. Die Gegendruck-Kraftwerke erreichen höhere Einsparungen als die Entnahme-Kondensations-Kraftwerke. In Hinsicht auf die Primärenergieeinsparungen gibt es im Mittel keine großen Unterschiede zwischen GUD- und Dampfkraftwerken. Die hier dargestellten Werte der Primärenergieeinsparung werden durch einen Vergleich von getrennter mit gekoppelter Erzeugung von Strom und Heizwärme bei gleichem fortschrittlichen Technologieniveau ermittelt. Würde man die hier betrachteten KWK-Anlagen mit dem in Deutschland bestehenden Kraftwerkspark vergleichen, so würden als Ergebnis deutlich höhere Primärenergieeinsparungen heraus kommen, da die bestehenden Kraftwerke niedrigere Wirkungsgrade haben als die hier untersuchten.

Um der KWK-Heizwärme ihren Anteil an der zugeführten Brennstoffleistung zuweisen zu können, müssen Annahmen getroffen werden, da es keine allgemeingültigen Vorschriften zur Aufteilung der Brennstoffleistung auf die Produkte Strom und Heizwärme gibt. Eine geeignete Variante ist hier z.B. die Wahl eines Referenz-Kondensations-Kraftwerkes zur Bestimmung des Brennstoffanteils, der dem Strom zugewiesen wird [1]. Der verbleibende Rest der zugeführten Brennstoffleistung wird dann der Heizwärme zugeschlagen und ermöglicht so eine Berechnung der Heizzahl ξ , die aus dem Verhältnis von Heizwärmeleistung Q zu Restbrennstoffleistung $(\dot{m}_B H_u)_Q$ gebildet wird (Gl. 4), [1]. Zur Anwendung dieser Methode (Restwertmethode) werden hier die Wirkungsgrade der GUD- und Dampfkraftwerke im Kondensationsbetrieb bei Vollast gewählt.

$$\xi = \frac{\dot{Q}}{(\dot{m}_B H_u)_Q} \quad (4)$$

In Abbildung 15 sind die Heizzahlen ξ_{KWK+HK} der Systeme, bestehend aus Kraftwerk und zentralem Spitzenlastheizkessel, unter Berücksichtigung der Netzverluste dargestellt. Im Zähler der Heizzahl steht in diesem Fall also die beim Verbraucher angekommene Heizwärmeleistung und im Nenner die Summe aus Restbrennstoffleistung des Kraftwerkes, inklusive eines Zuschlages für die Pumpverluste, und Brennstoffleistung des Spitzenlastheizkessels. Die Heizzahlen liegen je nach Auslegung und Kraftwerkstyp zwischen 1.4 und 2.9 und sind damit deutlich höher als die Heizzahl eines dezentralen Heizkessels, die ungefähr bei 0.95 liegt, dies entspricht einem Wirkungsgrad von 95 %.

Obwohl die Gegendruck-Kraftwerke letztendlich höhere Primärenergieeinsparungen erreichen (Abb. 14), sind ihre Heizzahlen niedriger als die der Entnahme-Kondensations-Kraftwerke. Dies kann zum einen auf den Verlauf der Stromverlustkennziffer zurückgeführt werden. Die Gegendruck-Kraftwerke werden bei höchsten Heizwärmeentnahmen und damit bei höchsten Stromverlustkennziffern betrieben, während die Entnahme-Kondensations-Kraftwerke bei mittleren Heizwärmeentnahmen und damit mittleren Stromverlustkennziffern betrieben werden (Abb. 3).

Zum anderen werden die Prozessverschlechterungen des wegen der wärmegeführten Fahrweise der Gegendruck-Kraftwerke notwendigen Betriebes bei Brennstoffteillast bei dem hier gewählten Ansatz der Heizwärme angelastet und senken dadurch die Heizzahl. Entnahme-Kondensations-Kraftwerke koppeln also im Vergleich zu Gegendruck-Kraftwerken relativ weniger Heizwärme aus, dafür aber mit geringeren Verschlechterungen des Stromerzeugungsprozesses.

Unter Verwendung der Heizzahlen, die bei einem Verhältnis von maximaler KWK-Heizwärme zu maximalem Wärmebedarf von 50 % vorliegen, werden in einem weiteren Schritt die Kohlendioxid-Emissionen der gekoppelten Erzeugung von Heizwärme unter Annahme einer Erdgasfeuerung des Spitzenlastkessels mit der getrennten Erzeugung von Heizwärme verglichen (Abb. 16). Für die getrennte Erzeugung der Heizwärme in einem dezentralen Heizkessel werden die Brennstoffe Steinkohle, leichtes Heizöl und Erdgas betrachtet.

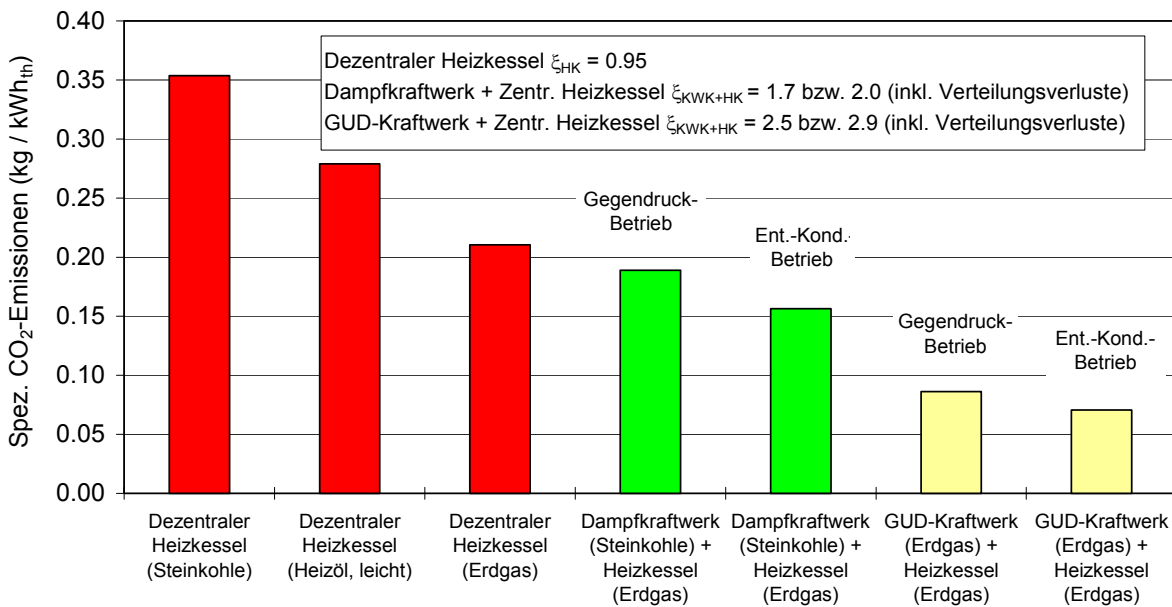


Abb. 16: Kohlendioxid-Emissionen der getrennten und gekoppelten Erzeugung von Heizwärme

Die in dezentralen Heizkesseln getrennt erzeugte Heizwärme weist in allen Fällen höhere spezifische Kohlendioxid-Emissionen auf als die gekoppelt erzeugte Heizwärme. Ihre Werte liegen je nach Brennstoffart zwischen 0.21 kg/kWh_{th} und 0.35 kg/kWh_{th} und sind bei Einsatz des gleichen Brennstoffes wie in der KWK-Anlage damit bis zu dreimal so hoch wie die in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Heizwärme. Die Unterschiede hinsichtlich der Emissionen zwischen der in Dampfkraftwerken und der in GUD-Kraftwerken erzeugten Heizwärme sind auf Unterschiede bei den Heizzahlen (Abb. 15) und dem Kohlenstoffgehalt der Brennstoffe zurückzuführen. Die energiebezogene Emission von Kohlendioxid ist bei Steinkohle z.B. rund 70 % höher als bei Erdgas [2].

Kosten der KWK-Heizwärme im Kraftwerk

Da es für die Aufteilung der Kosten auf die Produkte Strom und Heizwärme keine allgemeingültigen Beziehungen gibt, müssen dafür Annahmen getroffen werden. Auch hier erscheint, wie schon bei der Aufteilung der Brennstoffleistung praktiziert, die Anwendung einer Restwertmethode sinnvoll. Die spezifischen Kosten der Stromerzeugung werden hier anhand eines Referenz-Kondensations-Kraftwerkes ermittelt und für den in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Strom übernommen. Die verbleibenden Restkosten werden dann der Heizwärme zugeschlagen. Als Referenz-Kraftwerke werden hier das GUD- und das Dampfkraftwerk im Kondensationsbetrieb bei Grundlast benutzt. Die spezifischen Anlagenkosten des Kondensations-Dampfkraftwerkes wurden bei dem hier vorliegenden hohen Wirkungsgradniveau mit 1700 DM / kW rund doppelt so hoch angesetzt wie die spezifischen Anlagenkosten des Kondensations-GUD-Kraftwerkes, die mit 800 DM / kW abgeschätzt wurden. Bei den Brennstoffkosten ist das Verhältnis umgekehrt, hier wurden die Brennstoffkosten des DKWs mit 2.5 DM / GJ für importierte Steinkohle nur halb so hoch angenommen wie die Brennstoffkosten des GUDs mit 5 DM / GJ für Erdgas.

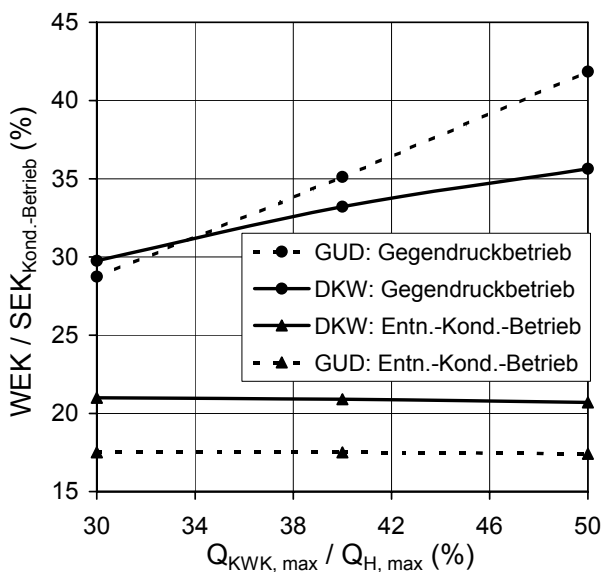


Abb. 17: Verhältnis von Wärmeerzeugungskosten zu Stromerzeugungskosten des Kondensations-Kraftwerkes

Die Anwendung der Restwertmethode führt zu den in Abb. 17 dargestellten Werten der Wärmeerzeugungskosten WEK, die nicht die Kosten der Verteilung zum Verbraucher enthalten. Als Bezugsgröße für die relative Darstellung der Wärmeerzeugungskosten wurden hier die jeweils dazugehörigen Stromerzeugungskosten $SEK_{Kond.-Betrieb}$ des GUD- bzw. des Dampfkraftwerkes im Kondensationsbetrieb gewählt. Wie schon an den niedrigeren Vollastbenutzungsstunden (Abb. 6 und 7)

abzusehen war, sind die Wärmeerzeugungskosten der Gegendruck-Kraftwerke höher als die der Entnahme-Kondensations-Kraftwerke. Niedrige Vollastbenutzungsstunden führen erstens wegen einer geringeren Nutzungsdauer und zweitens wegen teillastbedingter Prozessverschlechterungen zu höheren Erzeugungskosten. Ein weiterer Grund für die ungünstigeren Kosten sind die höheren Stromverlustkennziffern der Gegendruck-Kraftwerke, die sich auf die Kosten zur Kompensation des Stromverlustes auswirken. Diese Kompensationskosten können aus dem Produkt von Stromverlustkennziffer und Stromerzeugungskosten berechnet werden und haben einen bedeutenden Anteil an den Wärmeerzeugungskosten. Die hier dargestellten Verläufe der Wärmeerzeugungskosten können auf diese beiden Mechanismen, Vollaststunden und Stromverlustkennziffer, zurückgeführt werden. Die Wärmeerzeugungskosten der Gegendruck-Kraftwerke sind aus diesen Gründen im Mittel fast doppelt so hoch wie die der Entnahme-Kondensations-Kraftwerke, welche bei 17 % (GUD) bzw. 21 % (DKW) der jeweiligen Stromerzeugungskosten liegen. Die Wärmeerzeugungskosten der Entnahme-Kondensations-Kraftwerke sind damit rund halb so hoch wie die Brennstoffkosten des Erdgases.

Literaturverzeichnis

- [1] Baehr, H. D.: Wirkungsgrad und Heizzahl zur energetischen Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung. VGB-Kongress "Kraftwerke 1985", S. 332-337, Essen, 1985
- [2] Baehr, H. D.: Die energiebezogene CO₂-Erzeugung der Brennstoffe. BWK Bd. 44 (1992), Nr. 7/8, S. 337-339
- [3] BMWi-Dokumentation Nr. 465, Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen, 1999
- [4] Grundsatzpapier zur Kraft-Wärme-Kopplung der Arbeitsgruppe KWK (VDMA, VKU, BUND, FG-BHKW, E⁵, VIK, AGFW), Energie & Management 19/2000, S. 4
- [5] Kail, C.: Fortschrittliche gasbefeuerte Kraftwerksprozesse für höchste Wirkungsgrade und niedrige Stromerzeugungskosten. VGB-Kongress „Forschung für die Kraftwerkstechnik 1998“, Tagungsband VGB-TB 233A, Kap. 6-3, Essen, 1998
- [6] Kail, C.; Haberberger, G.: Technik und Kosten der Kraft-Wärme-Kopplung bei GUD- und Dampfkraftwerken. VDI-Berichte 1495, S. 95-111, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [7] Rukes, B.: Technik und Emissionen großer KWK-Anlagen. VDI-Berichte 923, S. 87-106, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991