

Technik und Kosten der Kraft-Wärme-Kopplung bei GUD- und Dampfkraftwerken

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

Zusammenfassung

GUD- und Dampfkraftwerke erreichen bei Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Brennstoffausnutzungsgrade von bis zu 94 %. Unter Berücksichtigung der Verteilungsverluste (Netzverluste) sinkt dieser Wert jedoch auf rund 86 %. Im Vergleich zur getrennten Erzeugung von elektrischem Strom und Heizwärme kann der Primärenergiebedarf bei der gekoppelten Erzeugung in den hier betrachteten Beispielen um bis zu 28 % gesenkt werden.

Unter der Annahme, daß sich der Wirkungsgrad der Stromerzeugung durch die Auskopplung von Heizwärme nicht ändern soll, ergeben sich für die in KWK erzeugte Heizwärme im Mittel Brennstoffeinsparungen gegenüber einer Erzeugung in dezentralen Heizkesseln von 60 % bis 70 %. Die der Heizwärme anzurechnenden CO₂-Emissionen sinken je nach Art der eingesetzten Brennstoffe um 36 % bis 84 %. Diese Zahlen verdeutlichen, welchen Beitrag die KWK durch die effiziente Nutzung der Primärenergie zur Schonung der Ressourcen und Reduzierung der Emissionen leisten kann.

Die spezifischen Kosten der ausgekoppelten Heizwärme betragen unter der Annahme, daß sich die Kosten der Stromerzeugung durch die Auskopplung von Heizwärme nicht ändern sollen, rund 20 % bis 30 % der Stromerzeugungskosten. Diese Werte enthalten jedoch nicht die Kosten der Wärmeverteilung zum Endverbraucher, die rund drei- bis viermal so hoch sind wie die Wärmeerzeugungskosten im Kraftwerk.

Allgemeines

Unter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird die kombinierte Erzeugung von elektrischem Strom ("Kraft") und Heizwärme in Kraftwerken verstanden. Die Kraft-Wärme-Kopplung führt durch weitgehende Nutzung der bei der Stromproduktion unumgänglich anfallenden Abwärme zu deutlich höheren Brennstoffausnutzungsgraden als die getrennte Erzeugung und kann dadurch, neben anderen Maßnahmen, einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz

beitragen.

Im Folgenden wird dargestellt, zu welchen Ergebnissen die Kraft-Wärme-Kopplung bei fortschrittlichen GUD- und Dampfkraftwerken kommt. Dies geschieht anhand charakteristischer Kenngrößen, wie z. B. dem Brennstoffausnutzungsgrad, der Stromausbeute oder der Stromverlustkennziffer. Es wird gezeigt, in welchen Bereichen diese Kenngrößen liegen und wie sie sich in Abhängigkeit von den Randbedingungen ändern. Zusätzlich zu den thermodynamischen Charakteristika der Kraft-Wärme-Kopplung wird auch ihre Wirtschaftlichkeit untersucht. Da es für die Aufteilung der Anlagen- und Brennstoffkosten auf die Produkte Strom und Wärme keine naturgesetzlichen Zusammenhänge gibt, müssen hierfür möglichst sinnvolle Annahmen getroffen werden.

Die Bilanzgrenze für die Untersuchungen bildet, mit Ausnahme der Fälle, in denen die gekoppelte zentrale Erzeugung von Heizwärme mit der getrennten dezentralen Erzeugung verglichen wird, der Kraftwerkszaun. Dies bedeutet, daß Netzverluste der Strom- und Wärmeverteilung nicht berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen zur KWK werden an fortschrittlichen Kraftwerken der 350 MW-Klasse gemacht, die für den Kondensationsbetrieb, d. h. für den Betrieb ohne Wärmeauskopplung, optimiert wurden. Die Dampfstände des Dampfkraftwerkes (DKW) wurden in Anlehnung an ein von Siemens für einen deutschen Standort neu konzipiertes Kraftwerk gewählt. Sie betragen am Eintritt der HD- bzw. MD-Teilturbine 285 bar / 600 °C bzw. 60 bar / 620 °C. Die Vorwärmstrecke hat 8 Stufen, in denen das Speisewasser bis auf 315 °C vorgewärmt wird. Die Abwärme wird über einen Naturzug-Naßkühlturm abgeführt, der bei dem gewählten Umgebungszustand von 15 °C, 1.013 bar und 60 % relativer Feuchte zu einem Kondensationsdruck von 45 mbar führt. Die Abgase des Dampferzeugers werden nach der Rauchgasreinigung über den Kühlturm abgeleitet und müssen daher nicht wieder aufgeheizt werden. Dies ermöglicht eine zusätzliche Nutzung von Rauchgaswärme zur Speisewasservorwärmung und erhöht dadurch den Dampferzeugerwirkungsgrad [4, 7]. Das Kraftwerk erreicht im Vollastbetrieb ohne Wärmeauskopplung einen Nettowirkungsgrad von 46.6 %.

Das GUD-Kraftwerk wurde auf Basis der weiterentwickelten Siemens-Gasturbine V94.3A gebildet, die vor kurzem im Versuchskraftwerk Cottam (England) in Betrieb genommen wurde. Die Turbineneintrittstemperatur der Gasturbine wurde für diese Studie mit 1230 °C (ISO) angenommen und die Dampfstände wurden auf 130 bar / 565 °C und 31 bar / 565 °C festgelegt. Das Brenngas der Gasturbine wird auf 200 °C vorgewärmt. Im Gegensatz zum DKW wird beim GUD auch Heizwärme aus dem Dampferzeuger gewonnen. Durch diese Maßnahme kann die Abgastemperatur am Austritt des Abhitzedampferzeugers von 88 °C auf 75 °C gesenkt werden. Im Abhitzedampferzeuger ist vor dem Heizwärmeübertrager außerdem eine Zusatzfeuerung vorgesehen, um die auskoppelbare Heizwärmeleistung über das vom Dampfprozeß gebotene Potential hinaus erhöhen zu können. Der für die Untersuchung gewählte Umgebungszustand und das Wärmeabfuhrsystem entsprechen den oben aufgeführten Angaben. Der Nettowirkungsgrad des GUD-Kraftwerkes im Kondensationsbetrieb liegt bei 58.4 %. Weiterführende

Darstellungen zu fortschrittlichen GUD-Kraftwerken sind z. B. in [8, 9, 10] zu finden.

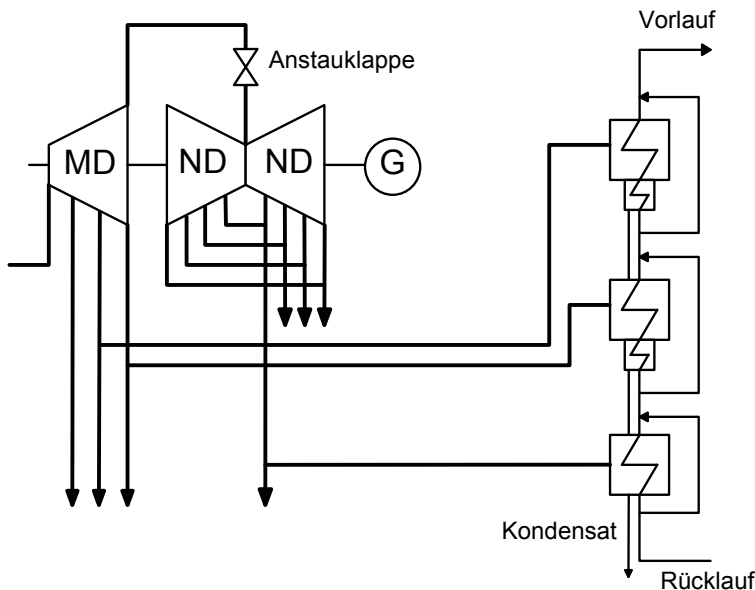


Abbildung 1: Heizschaltung

Für die Wärmeauskopplung wurde eine Entnahme-Kondensationsturbine mit dreistufiger Heizdampfentnahme gewählt (Abb. 1). Der Dampf für den mittleren Heizwärmeübertrager wird aus der Überströmung von der MD- zur ND-Turbine entnommen und kann durch eine Anstauklappe im Druck geregelt werden. Der untere und der obere Heizwärmeübertrager erhalten ihren Dampf jeweils aus einer unregelmäßigen Anzapfung aus der ND- bzw. MD-Turbine. Diese Schaltung führt im Vergleich zu unregelmäßigen Heizdampfentnahmen oder dem Einsatz von Gegendruckturbinen zu einer größeren Flexibilität in Hinsicht auf die Stromerzeugung, die auszukoppelnde Heizwärmeleistung und die Vorlauftemperatur. Eine Beschreibung von anderen Schaltungsvarianten sowie ihrer Vor- und Nachteile ist in [12] zu finden. Die wasserseitigen Umführungen der Heizwärmeübertrager dienen zur Regelung der Temperaturen. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse gelten für eine Vorlauftemperatur von 110 °C und eine Rücklauftemperatur von 55 °C. Die Wärmeübertrager wurden für eine mittlere Heizleistung dimensioniert.

Die Auslegung von Dampfturbinen und Rohrleitungen für KWK-Anlagen weist im Vergleich zu Anlagen ohne Wärmeauskopplung einige Besonderheiten auf [5, 12]. Aufgrund der teilweise großen Entnahmemengen und der dadurch sinkenden Entnahmedrücke werden z. B. für die Anzapfstutzen an der Turbine und einige Rohrleitungen zur Vorwärmstrecke größere Durchmesser benötigt. Des Weiteren muß die Beschaukelung der Mitteldruckturbine im Bereich der Heizdampfentnahmen für höhere Belastungen ausgelegt werden, da der mit zunehmenden Entnahmemengen sinkende Überströmdruck zu einer Vergrößerung des Gefälles (Enthalpiedifferenz) der Mitteldruckturbine führt. Änderungen des Axialschubes durch die zusätzlichen Dampfentnahmen müssen durch entsprechende konstruktive Maßnahmen beherrschbar gemacht werden. Um bei maximaler Wärmeauskopplung hinter der Mitteldruckturbine möglichst den gesamten Dampf entnehmen zu können, wurde für die Niederdruckturbine eine Anzapfkühlung angenommen, wie sie z. B. im Heiz-

kraftwerk Wedel realisiert wurde. Bei der Anzapfkühlung wird Dampf von der MD-Abströmung entnommen, durch Einspritzung von Kondensat in die Nähe des Sattdampfzustandes gebracht und dann durch die Anzapfleitungen in die ND-Turbine eingeleitet. Sattdampf hat eine höhere Wärmekapazität als überhitzter Dampf und ist deshalb besonders gut zur Kühlung der ventilierenden Beschaufelung der ND-Turbine geeignet.

Thermodynamische Kenngrößen der Kraft-Wärme-Kopplung

Die Koppelprodukte der Kraft-Wärme-Kopplung, Strom und Wärme, sind in ihrer thermodynamischen Qualität sehr unterschiedlich. Dies ist an den Unterschieden in bezug auf die Umwandlungsfähigkeit in andere Energieformen zu erkennen. Während elektrische Energie im reversiblen Fall vollständig in jede andere Energieform umgewandelt werden kann, gelten bei der reversiblen Umwandlung von thermischer Energie in hochwertigere Formen, wie z. B. mechanischer Energie, die Beschränkungen durch den Carnot-Wirkungsgrad [1]. Die unterschiedliche Umwandlungsfähigkeit verschiedener Energieträger wird in der Thermodynamik nach ihrer "Arbeitsfähigkeit" oder "Exergie" beurteilt, d.h. danach, in welchem Maße ein Energieträger theoretisch imstande ist, Arbeit zu verrichten [1, 11].

Um die Qualität der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme in einem Heizkraftwerk mit der Qualität der Stromerzeugung in einem Kondensationskraftwerk oder der Qualität der Wärmeerzeugung in einem Heizkessel vergleichen zu können, ist ein Wirkungsgrad allein nicht ausreichend. Hierfür sind zwei geeignet definierte Kenngrößen erforderlich. Mit einem Wirkungsgrad allein können allenfalls verschiedene Heizkraftwerke verglichen werden [2].

Üblicherweise wird bei der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme die Stromerzeugung mit einem Wirkungsgrad η bewertet, der aus dem Verhältnis der elektrischen Leistung P zu der zugeführten Brennstoffleistung $\dot{m}_B H_u$ gebildet wird (Gl. 1).

$$\eta = \frac{P}{\dot{m}_B H_u} \quad (1)$$

Die Umwandlung von Brennstoffenergie in Heizwärme Q_H wird dagegen mit der Heizzahl ξ beurteilt [2] (Gl. 2).

$$\xi = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_B H_u} \quad (2)$$

Im Gegensatz zum Wirkungsgrad η kann die Heizzahl ξ auch Werte größer als 1 erreichen. Dies ist z. B. bei Heizsystemen mit Wärmepumpen der Fall, da bei diesen ein Teil der Heizwärme aus der Umgebung kommt.

Im Falle der Kraft-Wärme-Kopplung ergibt sich das Problem, daß die Brennstoffleistung nicht eindeutig den Koppelprodukten Strom und Wärme zugewiesen werden kann, da es hierfür keine allgemeingültige Beziehung gibt. Es ist daher nicht

möglich, den Wirkungsgrad oder die Heizzahl einer KWK-Anlage zu bestimmen, ohne zusätzliche Annahmen zu treffen.

Der Brennstoffausnutzungsgrad ω einer KWK-Anlage ist von dieser Problematik nicht betroffen, da er aus dem Verhältnis der Summe aus Heizwärmeleistung und elektrischer Leistung zu zugeführter Brennstoffleistung gebildet wird (Gl. 3).

$$\omega = \frac{\dot{Q}_H + P}{\dot{m}_B H_u} = \alpha + \beta \tag{3}$$

Der Brennstoffausnutzungsgrad kann auch aus der Wärmeausbeute α (Gl. 4) und der Stromausbeute β (Gl. 5) berechnet werden.

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_B H_u} \tag{4}$$

$$\beta = \frac{P}{\dot{m}_B H_u} \tag{5}$$

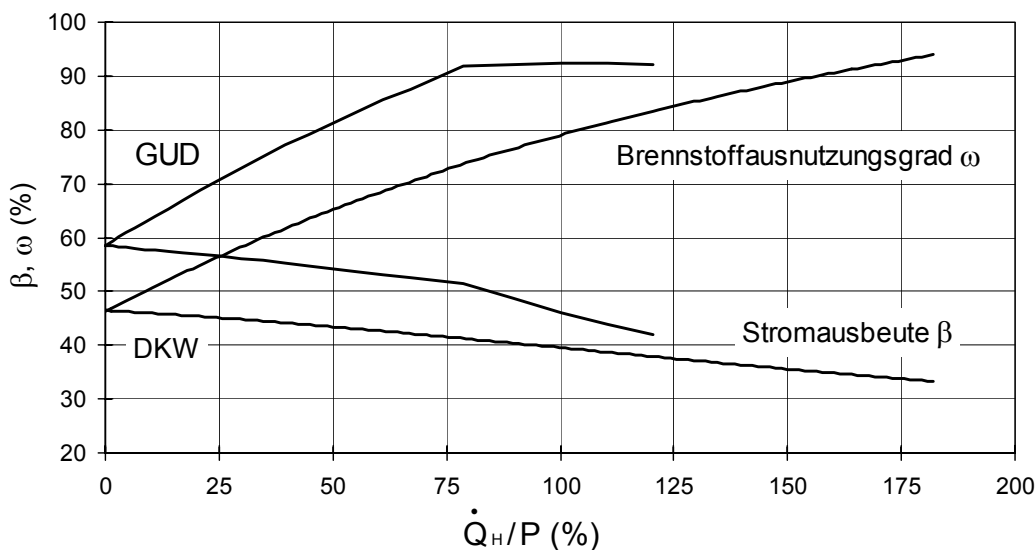


Abbildung 2: Brennstoffausnutzungsgrad ω und Stromaesbeute β

In Abbildung 2 sind die Verläufe des Brennstoffausnutzungsgrades und der Stromaesbeute bei GUD- und Dampfkraftwerken in Abhängigkeit vom Verhältnis von Heizwärmeleistung zu elektrischer Leistung dargestellt. Ausgehend von den Wirkungsgraden im Vollastbetrieb ohne Heizwärmeauskopplung laufen die Linien des Brennstoffausnutzungsgrades und der Stromaesbeute des GUDs und des DKWs nahezu parallel mit zunehmender Heizwärmeauskopplung. Erst wenn beim GUD die Zusatzfeuerung zugeschaltet wird, um die Heizwärmeleistung weiter zu erhöhen, sind die Verläufe verschieden. Der Zuschaltzeitpunkt liegt in diesem Beispiel bei einem Verhältnis von Heizwärmeleistung zu elektrischer Leistung von 79 %. Ohne Zusatzfeuerung ist das Potential der Wärmeauskopplung bei GUDs deutlich

kleiner als bei DKWs, da der Dampfprozeß bei GUDs nur rund ein Drittel der elektrischen Gesamtleistung liefert, der Rest kommt von der Gasturbine. Als Folge davon nimmt die elektrische Leistung des GUDs mit zunehmender Heizwärmekopplung in diesem Beispiel maximal um 12 % ab, während die elektrische Leistung des DKWs um bis zu 28 % abnimmt. Die Brennstoffausnutzungsgrade erreichen Werte von 92 % bis 94 %. Der maximale Brennstoffausnutzungsgrad des GUDs ist 2 % niedriger als beim DKW, da die mit dem Abgas abgeführten nicht nutzbaren Abwärmeverluste höher sind.

Eine weitere wichtige Kenngröße der Kraft-Wärme-Kopplung ist die Stromverlustkennziffer S . Sie gibt an, wie die elektrische Leistung P durch Auskopplung von Heizwärme Q_H gegenüber der Leistung im Kondensationsbetrieb P_0 abnimmt und kann zur Beurteilung der Qualität der Wärmekopplung herangezogen werden (Gl. 6).

$$S = \frac{P_0 - P}{\dot{Q}_H} \quad (6)$$

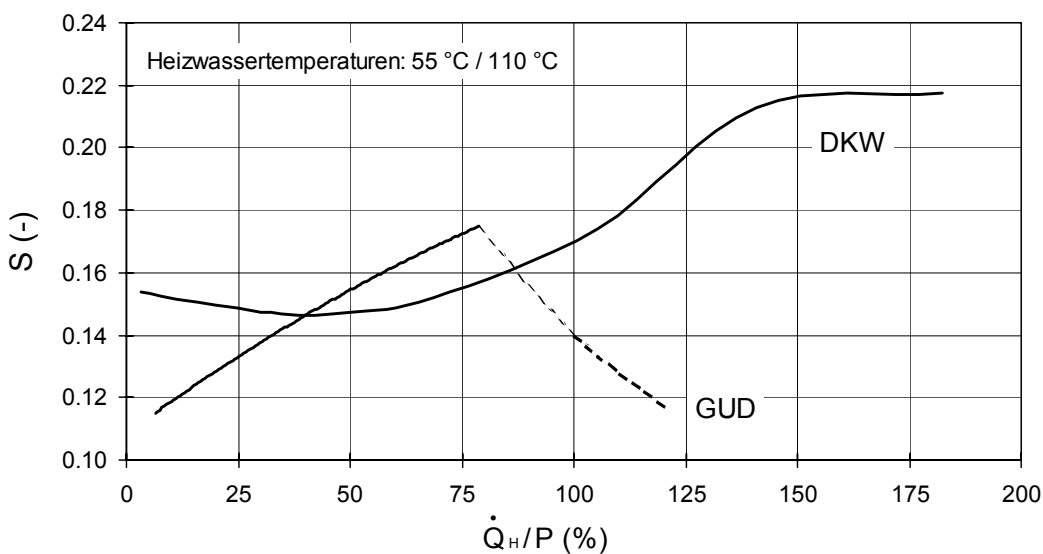


Abbildung 3: Stromverlustkennziffer S

Die Verläufe der Stromverlustkennziffer des GUD- und des Dampfkraftwerkes sind sehr unterschiedlich (Abb. 3). Während sie beim DKW mit 0.154 startet, ein Minimum mit 0.147 durchläuft und sich dann asymptotisch dem Maximalwert 0.217 nähert, startet sie beim GUD in ihrem Minimum bei 0.114 und steigt dann bis zum Zuschaltzeitpunkt der Zusatzfeuerung streng monoton auf 0.172 an. Ab dem Punkt, an dem die ausgekoppelte Heizwärmeleistung durch Zusatzfeuerung erhöht wird, hat die Stromverlustkennziffer eine andere Qualität und ist deshalb gestrichelt dargestellt. Da sich die elektrische Leistung des GUDs nach Hinzuschalten der Zusatzfeuerung nicht mehr ändert, fällt die Stromverlustkennziffer mit steigender Zusatzfeuerungsleistung indirekt proportional zur Heizwärmeleistung und hat damit ihre ursprüngliche Aussagefähigkeit verloren.

Der Verlauf der Stromverlustkennziffer des DKWs kann auf Änderungen der

Verluste im Zusammenhang mit der Heizwärmeauskopplung, der Vorwärmstrecke und der Dampfturbine zurückgeführt werden. Mit Verlusten sind hier nicht Energieverluste, sondern Verluste in bezug auf die „Arbeitsfähigkeit“, also Exergieverluste, gemeint.

Die Exergieverluste der Heizwärmeauskopplung und der Vorwärmstrecke bestehen überwiegend aus den Verlusten der Wärmeübertragung. Die Exergieverluste E_V der Wärmeübertragung werden vor allem von den mittleren Temperaturen des heißen ($T_{m,h}$) und des kalten ($T_{m,k}$) Stoffstromes beeinflusst (Gl. 7).

$$\dot{E}_V = T_U \cdot \dot{Q} \cdot \frac{T_{m,h} - T_{m,k}}{T_{m,h} \cdot T_{m,k}} \quad (T_U = \text{Umgebungstemperatur}) \quad (7)$$

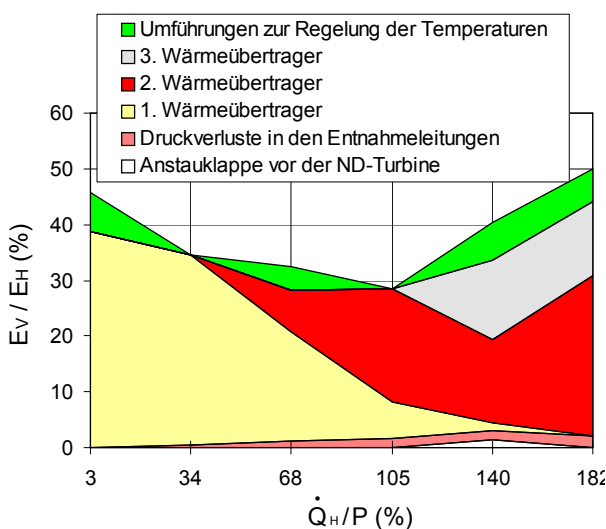


Abbildung 4: Exergieverluste der Heizwärmeauskopplung des DKWs

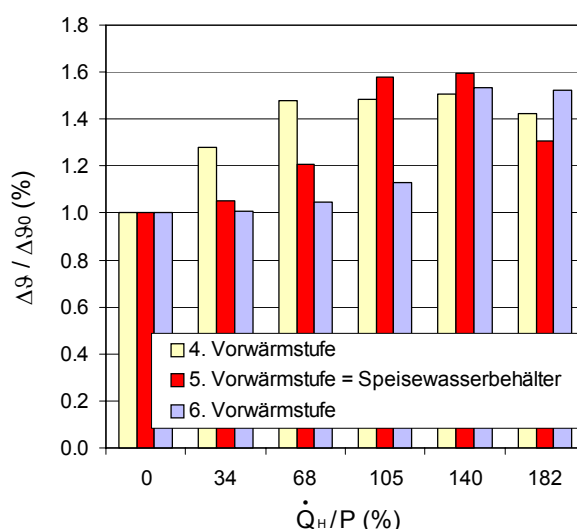


Abbildung 5: Zunahme der Aufwärmspannen in der Vorwärmstrecke des DKWs

In Abb. 4 ist das Verhältnis von Exergieverlusten der Wärmeauskopplung E_V zu Exergie der ausgekoppelten Heizwärme E_H über dem Verhältnis von Heizwärmeleistung zu elektrischer Leistung dargestellt. Es wird deutlich, daß die Qualität der Heizwärmeauskopplung bei mittleren Heizwärmeleistungen am besten ist. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei kleinen Heizwärmeleistungen nur der untere Heizwärmeübertrager in Betrieb ist (einstufige Heizung) und bei großen Heizwärmeleistungen die Grädigkeiten der oberen Wärmeübertrager hoch sind. In beiden Fällen ist die Differenz der mittleren Temperaturen der Stoffströme größer als bei mittlerer Heizwärmeleistung.

Der Zuschaltzeitpunkt für den jeweils nächst höheren Heizwärmeübertrager wird immer dann erreicht, wenn die Höhe des Dampfdruckes der darunter liegenden Anzapfung nicht mehr ausreicht, um die gewünschte Vorlauftemperatur zu realisieren. Diese Punkte zeichnen sich durch zu null werdende Mischungsverluste aus. Wenn bereits alle Heizwärmeübertrager in Betrieb sind, wird die Anstauklappe in der Überströmung benutzt, um bei weiterer Erhöhung der Heizwärmeleistung die gewünschte Vorlauftemperatur einhalten zu können.

Die Exergieverluste durch Druckverluste in den Dampfleitungen und in der Anstauklappe und durch Mischungen zur Regelung der Heizwassertemperaturen sind vergleichsweise gering und haben deshalb nur einen untergeordneten Einfluß auf die Stromverlustkennziffer.

Die mit zunehmender Heizedampfentnahme fallenden Drücke an der ersten, zweiten und dritten Anzapfung führen dazu, daß die darauffolgende vierte, fünfte und sechste Vorwärmstufe jeweils eine höhere Aufwärmspanne leisten muß (Abb. 5). Diese Erhöhung beträgt bei der fünften Vorwärmstufe im Maximalfall z. B. rund 60 %. Durch die mit den Aufwärmspannen steigenden Differenzen der mittleren Temperaturen und Grädigkeiten der Wärmeübertrager bzw. der Mischungsverluste des Speisewasserbehälters steigen auch die Exergieverluste. Der Verlauf der Aufwärmspannen beeinflußt dadurch den der Stromverlustkennziffer.

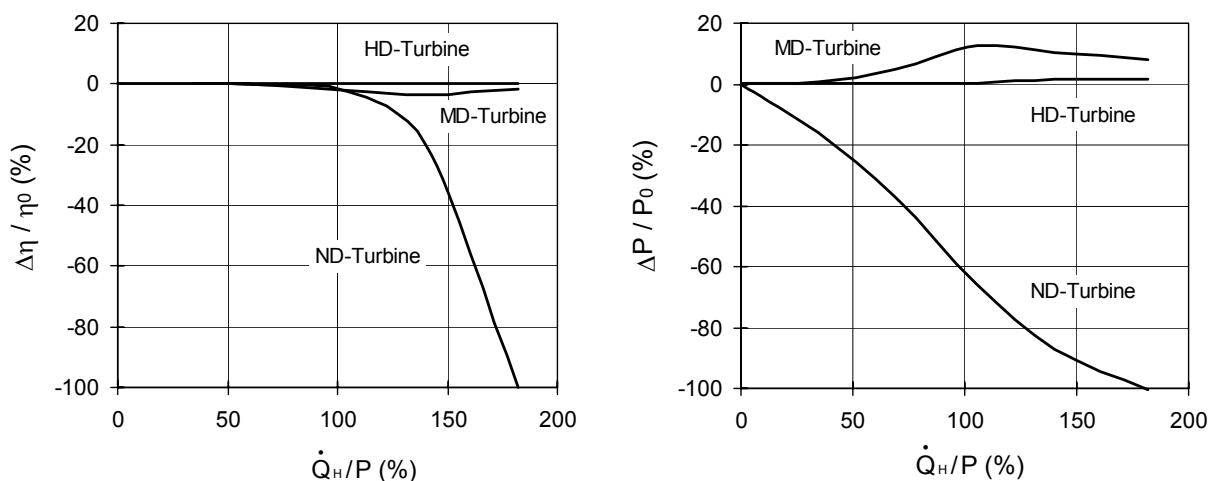


Abbildung 6: Isentrope Wirkungsgrade und Leistungen der Teilturbinen des DKWs

Nach Analyse der Änderungen der Verluste in den Heizwärmeübertragern und der Vorwärmstrecke wird nun die Änderung der Qualität der Expansion untersucht. Die Entnahme von Heizedampf führt durch eine Verringerung der weiterströmenden Dampfmenge zu einer Abnahme der Leistung der ND-Turbine und zu einem Absinken des Überströmdruckes (Abb. 6). Der Wirkungsgrad der ND-Turbine bleibt bis zu einer Abnahme der Leistung um rund 60 % nahezu konstant und fällt dann bei weiterer Reduzierung der Leistung relativ stark ab. Der niedrigere Überströmdruck bewirkt wiederum durch eine Vergrößerung des Gefälles eine Zunahme der Leistung der MD-Turbine um bis zu 13 %. Der Wirkungsgrad der MD-Turbine weist wegen des sinkenden Überströmdruckes und des damit zunehmenden Gefälles eine Verschlechterung von bis zu 4 % auf. Der Wirkungsgrad und die Leistung der HD-Turbine werden nur marginal von der Wärmeauskopplung beeinflusst.

Die Summe der oben beschriebenen Effekte (Heizwärmeauskopplung, Vorwärmstrecke, Dampfturbine) führt letztendlich zu dem in Abbildung 3 dargestellten Verlauf der Stromverlustkennziffer des DKWs.

Die Stromverlustkennziffer des hier betrachteten fortschrittlichen DKWs ist aufgrund der hohen ZÜ-Temperatur von 620 °C und der damit verbundenen

stärkeren Überhitzung des Heizdampfes rund 2 % bis 3 % höher als bei den bisher üblichen ZÜ-Temperaturen von 540 °C bis 560 °C. Eine Änderung der Kondensationstemperatur wirkt sich bei der Stromverlustkennziffer des DKWs mit rund 2 % / K und bei der des GUDs mit rund 2.5 % / K aus. Änderungen der Vorlauf-temperatur haben bei beiden Kraftwerkstypen einen Einfluß von rund 0.6 % / K.

Die Stromverlustkennziffer des GUDs startet im Vergleich zum DKW, wie in Abb. 3 dargestellt, bei einem niedrigeren Wert. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, daß die Heizwärme bei kleinen Leistungen überwiegend aus Abgaswärme gewonnen wird, die ansonsten ungenutzt an die Umgebung abgeführt wird, und zum anderen können beim GUD optimale Entnahmedrücke für die Heizung gewählt werden, da hier nicht wie beim DKW auf Auswirkungen auf die Vorwärmstrecke geachtet werden muß. GUD-Kraftwerke haben keine Vorwärmstrecke. So kann der Druck der unteren Heizdampfentnahme beim GUD z. B. niedriger als beim DKW und damit günstiger gewählt werden. Die Verlustmechanismen der Heizwärmeübertrager und der Dampfturbine sind beim GUD ähnlich wie beim DKW.

Aufteilung der Brennstoffleistung auf die Koppelprodukte

Für die Aufteilung der Brennstoffleistung auf die Produkte Strom und Heizwärme müssen Annahmen getroffen werden, da es hierfür keine allgemeingültigen Beziehungen gibt. Das einfachste Prinzip ist eine Aufteilung proportional zu den Energieströmen der Produkte. Dies führt dazu, daß der Wirkungsgrad und die Heizzahl gleich groß sind und mit dem Brennstoffausnutzungsgrad übereinstimmen. Hierdurch wird der Stromerzeugung, zu Lasten der Wärmeerzeugung, ein unrealistisch hoher Wirkungsgrad von bis zu 94 % zugewiesen.

Analog zur energetischen Aufteilung ist auch eine exergetische Aufteilung denkbar. Bei diesem Ansatz sind die exergetischen Wirkungsgrade der Strom- und Heizwärmeerzeugung und der exergetische Wirkungsgrad des Gesamtprozesses gleich. Die Unterschiede bei den Verlustmechanismen der Strom- und Wärmeerzeugung können nicht berücksichtigt werden. Versucht man, statt dieser pauschalen Zuordnung der Exergieverluste eine möglichst sachgerechte Zuordnung auf die Koppelprodukte nach einem Verursacherprinzip zu erreichen, so kommt man nicht ohne willkürliche Abgrenzungen aus, die das in der Theorie so klare und einfache Prinzip der exergetischen Aufteilung in seiner praktischen Anwendung erschweren [2].

Da die Kraft-Wärme-Kopplung mit der getrennten Erzeugung von Kraft und Heizwärme konkurriert, empfiehlt es sich, eine Aufteilung zu untersuchen, die sich an Referenzanlagen zur getrennten Kraft- und Heizwärmeerzeugung orientiert [2]. Hierzu kann man zum einen die der in einer KWK-Anlage erzeugten Heizwärmeleistung anzurechnende Brennstoffleistung aus der Heizzahl ξ_0 eines Referenzheizwerkes oder zum anderen die der elektrischen Leistung anzurechnende Brennstoffleistung aus dem Wirkungsgrad η_0 eines Referenzkondensationskraftwerkes bestimmen. Die beiden Verfahren entsprechen der Restwertrechnungsmethode, die auch zur Bestimmung der Kosten von Koppelprodukten verwendet werden kann.

Bei der Bewertung der Heizwärme mit der Heizzahl ξ_0 eines Referenzheizwerkes gibt es allerdings Fälle, die zu ähnlich hohen Wirkungsgraden der Stromerzeugung führen wie die Aufteilung der Brennstoffleistung proportional zu den Energieströmen der Produkte. Ein Beispiel hierfür ist eine KWK-Anlage bei maximaler Wärmeauskopplung. Der in diesem Lastpunkt vorliegende Brennstoffausnutzungsgrad ω von rund 92 % entspricht ungefähr der Heizzahl ξ_0 eines Referenzheizwerkes. Als Konsequenz davon nimmt der Wirkungsgrad η den gleichen Wert von 92 % an, der in diesem Zusammenhang jedoch nicht sinnvoll ist.

Im zweiten Fall, in dem die Brennstoffleistung, die dem elektrischen Strom anzurechnen ist, aus dem Wirkungsgrad η_0 eines Referenzkondensationskraftwerkes bestimmt wird, nimmt die Heizzahl ξ in allen Lastfällen plausible Werte an. Diese Vorgehensweise scheint die sinnvollsten Ergebnisse zu liefern und wird deshalb im Folgenden angewendet.

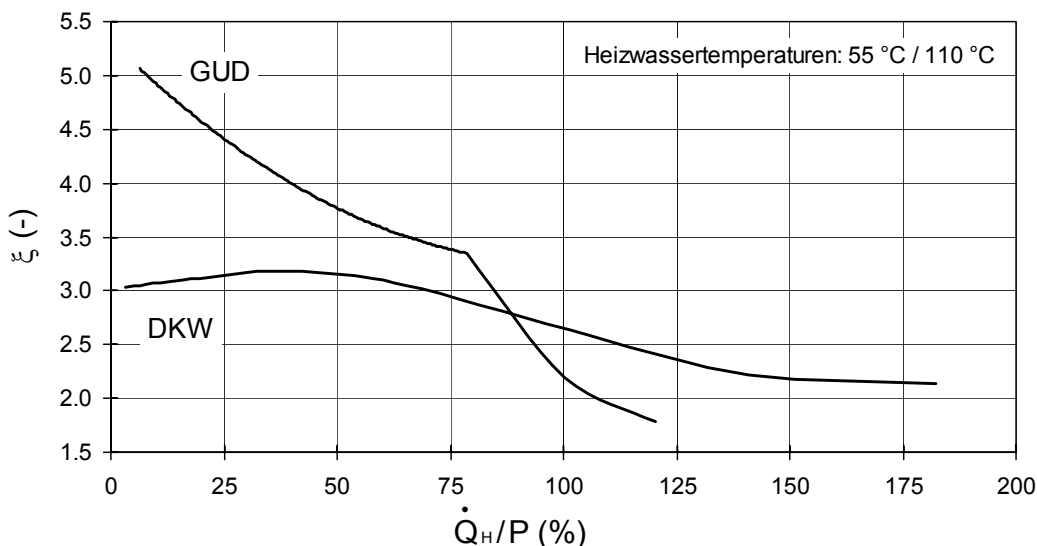


Abbildung 7: Heizzahl ξ

In Abb. 7 sind die Heizzahlen des GUD- und des Dampfkraftwerkes in Abhängigkeit vom Verhältnis von Heizwärmeleistung zu elektrischer Leistung dargestellt. Vergleicht man die Kurven der Heizzahlen mit den Kurven der Stromverlustkennziffern (Abb. 3), so fällt auf, daß sie indirekt proportional zueinander verlaufen. Niedrige Stromverlustkennziffern führen also zu hohen Heizzahlen und hohe Stromverlustkennziffern zu niedrigen. Dies erscheint plausibel und ist eine Folge der Annahme, daß der Wirkungsgrad der Stromproduktion sich nicht durch die Heizwärmeauskopplung ändern soll. Eine Ausnahme bildet hier der Bereich des GUDs mit zugeschalteter Zusatzfeuerung, da die Brennstoffleistung der Zusatzfeuerung in die Berechnung der Heizzahl eingeht, bei der Bestimmung der Stromverlustkennziffer aber nicht berücksichtigt wurde. Würde die Stromverlustkennziffer unter der Annahme bestimmt, daß die Brennstoffleistung der Zusatzfeuerung auch zur Stromproduktion genutzt wird, so würde auch in diesem Bereich die indirekte Proportionalität zwischen Heizzahl und Stromverlustkennziffer gelten.

Die Unterschiede bei den Verläufen der Heizzahlen des GUDs und des DKWs können wegen der indirekten Proportionalität mit den gleichen Argumenten begründet werden, mit denen schon die Verläufe der Stromverlustkennziffern erläutert wurden.

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

Im Folgenden wird die gekoppelte Erzeugung von Strom und Heizwärme mit der getrennten Erzeugung in Hinsicht auf den Brennstoffbedarf und die CO₂-Emissionen verglichen. Für die gekoppelte Erzeugung wurde ein Dampfkraftwerk mit Wärmeauskopplung gewählt und für die getrennte Erzeugung ein DKW ohne Wärmeauskopplung in Kombination mit einem dezentralen Heizkessel. Die im DKW bei maximaler Wärmeauskopplung erzeugte elektrische Leistung und Heizwärmeleistung wird hierbei als Vorgabe für die getrennte Erzeugung übernommen.

Bei dem Vergleich der beiden Varianten müssen fairerweise auch die Netzverluste der Wärmeverteilung berücksichtigt werden, da hier die Heizwärmeerzeugung in zentralen und dezentralen Systemen miteinander verglichen wird. Die Bilanzgrenze wird also für diesen Vergleich vom Kraftwerkszaun bis zum Endverbraucher erweitert. Für die Verluste der Wärmeverteilung wurde angenommen, daß 10 % der Heizwärme verlorengehen und daß die Pumpleistung zum Betrieb des Fernwärmenetzes 1 % der Heizwärmeleistung beträgt. Für die Übertragung des elektrischen Stromes wurden Netzverluste in Höhe von 4 % angesetzt.

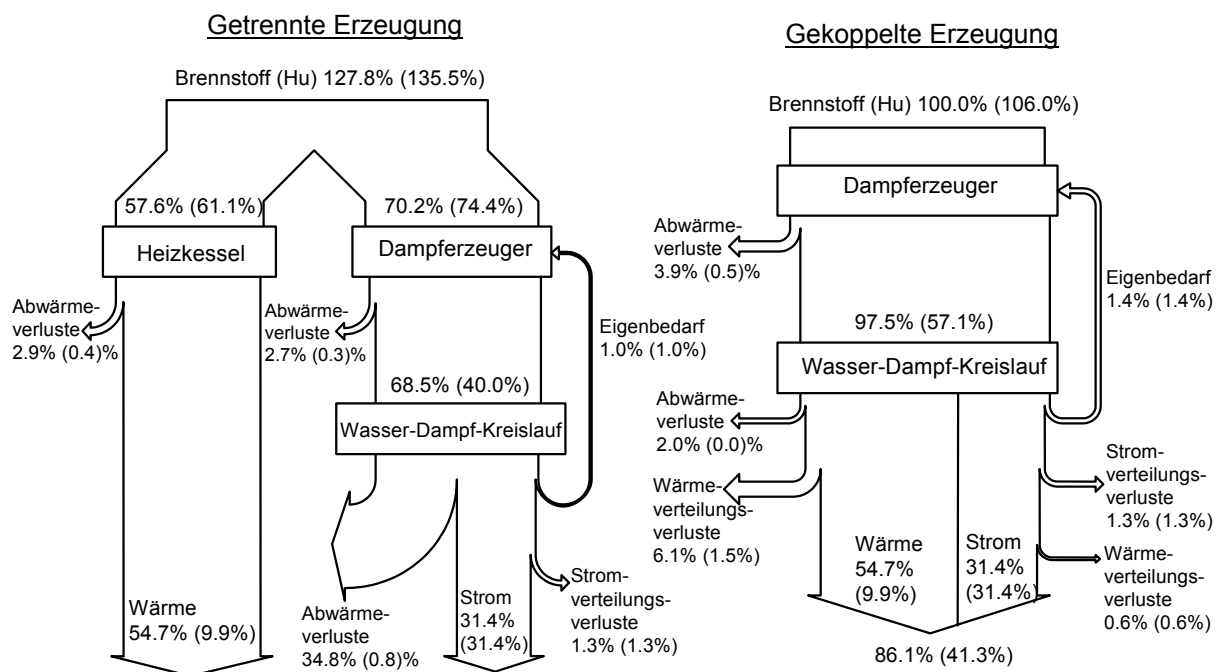


Abbildung 8: Energiefluß (Exergiefluß) der getrennten und gekoppelten Erzeugung

Auf der linken Seite der Abbildung 8 ist die getrennte Erzeugung von Strom und Heizwärme und auf der rechten Seite die gekoppelte Erzeugung dargestellt. Es

sind jeweils die Energie- und Exergieflüsse aufgeführt, wobei die Werte der Exergien in Klammern stehen. Die Exergie des hier eingesetzten Brennstoffes Steinkohle ist rund 6 % höher als der Heizwert H_u [1]. Die Eigenbedarfsleistung des Dampferzeugers enthält in dieser Darstellung auch den Eigenbedarf der Rauchgasreinigung.

Schaut man sich im Falle der getrennten Erzeugung die Abwärmeverluste des Wasser-Dampf-Kreislaufes des DKWs an, so wird deutlich, daß hier in bezug auf die Energie rund die Hälfte der dem Dampferzeuger zugeführten Brennstoffleistung abgeführt wird und in bezug auf die Exergie nur rund 1 %. Dies ist auf das niedrige Temperaturniveau der Abwärme zurückzuführen, die dadurch relativ wertlos ist. Der Vorteil der gekoppelten Erzeugung ist nun, daß die energetischen Abwärmeverluste des Wasser-Dampf-Kreislaufes von 50 % auf rund 2 % der zugeführten Brennstoffleistung reduziert werden können. Der Brennstoffausnutzungsgrad steigt dadurch von 67 % auf 86 %. Die Brennstoffleistung ist bei der getrennten Erzeugung entsprechend rund 28 % höher als bei der gekoppelten Erzeugung.

Die Entwertung der Brennstoffenergie durch den Verbrennungsprozeß und die Wärmeübertragung ist im Falle des Heizkessels stärker ausgeprägt als beim Dampferzeuger des DKWs, da die hochwertige Brennstoffenergie im Heizkessel auf ein niedrigeres Temperaturniveau übertragen wird. Der Exergiegehalt des austretenden Wärmestromes beträgt beim Heizkessel deshalb nur rund 16 % der zugeführten Brennstoffexergie und beim Dampferzeuger immerhin rund 54 %. Durch KWK kann diese starke Entwertung von hochwertiger Brennstoffenergie in Heizkesseln vermieden werden.

Wird für diesen Vergleich anstelle eines Dampfkraftwerkes ein GUD-Kraftwerk ohne Zusatzfeuerung eingesetzt, so beträgt der Brennstoffausnutzungsgrad bei maximaler Wärmeauskopplung rund 85 % im Vergleich zu 68 % bei der getrennten Erzeugung. Die Brennstoffeinsparung durch KWK ist hier mit 26 % trotz des kleineren Verhältnisses von Heizwärmeleistung zu elektrischer Leistung etwas niedriger als beim DKW, da der Wirkungsgrad des GUDs im Kondensationsbetrieb bereits deutlich höher ist. Beim GUD-Kraftwerk mit Zusatzfeuerung beträgt der Brennstoffausnutzungsgrad aufgrund des größeren Verhältnisses von Heizwärmeleistung zu elektrischer Leistung bereits im Falle der getrennten Erzeugung rund 72 %. Die Erhöhung auf 85 % durch KWK bewirkt deshalb nur eine Brennstoffeinsparung von rund 19 %. Für die getrennte Erzeugung wurde hierbei jeweils das Verhältnis von Heizwärme zu elektrischem Strom übernommen, welches sich bei der KWK-Anlage bei maximaler Wärmeauskopplung eingestellt hat.

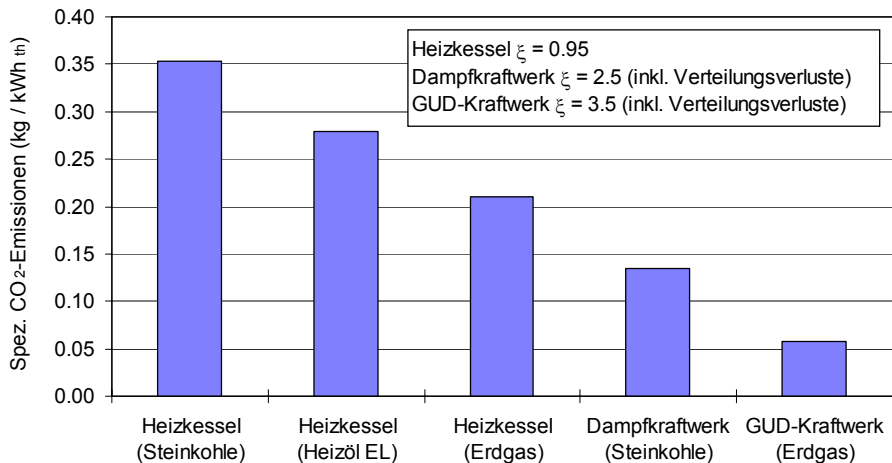


Abbildung 9: CO₂-Emissionen der getrennten und gekoppelten Erzeugung von Heizwärme

In Abbildung 9 sind die der Heizwärme anzurechnenden CO₂-Emissionen bei getrennter und gekoppelter Erzeugung dargestellt. Für die getrennte Erzeugung wurden dezentrale Heizkessel mit Heizzahlen von 0.95 (Kesselwirkungsgrad 95 %) gewählt, die mit den Brennstoffen Steinkohle, Heizöl oder Erdgas betrieben werden. Die Unterschiede bei den CO₂-Emissionen dieser drei Varianten sind ausschließlich auf Unterschiede bei der Brennstoffzusammensetzung zurückzuführen. Die CO₂-Emissionen sind dadurch bei Steinkohle rund 68 % und bei Heizöl rund 33 % höher als bei Erdgas [6]. Die mittlere Heizzahl der in zentralen KWK-Anlagen erzeugten Heizwärme wurde beim DKW mit 2.5 und beim GUD mit 3.5 angenommen (Abb. 7). In diesen Zahlen sind die Verluste der Wärmeverteilung bereits enthalten.

Ein Vergleich der Emissionsdaten der verschiedenen Wärmeerzeugungsarten ergibt, daß die CO₂-Emissionen der im Dampfkraftwerk erzeugten Heizwärme 36 % bis 62 % niedriger sind als bei der Erzeugung in Heizkesseln. Für die im GUD-Kraftwerk erzeugte Heizwärme ergibt sich gegenüber der getrennten Erzeugung eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 73 % bis 84 %.

Kosten der Strom- und Wärmeerzeugung

Da es auch für die Aufteilung der Anlagen- und Brennstoffkosten auf die Koppelprodukte Strom und Heizwärme keine eindeutigen Beziehungen gibt, müssen hierfür Annahmen getroffen werden. Analog zu den im Zusammenhang mit der Aufteilung der Brennstoffleistung bereits diskutierten Möglichkeiten können auch hier vier verschiedene Fälle unterschieden werden. Die ersten beiden Möglichkeiten basieren auf einer Aufteilung der Kosten proportional zu den Energie- bzw. Exergieströmen der Produkte.

Die Aufteilung proportional zu den Energieströmen bewirkt, daß die auf die Energie bezogenen spezifischen Kosten des elektrischen Stromes und der Heizwärme gleich sind. Die Kosten der Heizwärme werden hierdurch, zugunsten des elektrischen Stromes, stark pönalisiert. Diese Annahme erscheint nicht sinnvoll, da sie den unterschiedlichen Qualitäten der Energieströme in keiner Weise Rechnung trägt.

Eine Aufteilung der Kosten proportional zu den Exergieströmen liefert

sinnvollere Ergebnisse, ist aber auch nicht ganz unproblematisch, da die Exergie in Abhängigkeit von ihren Erscheinungsformen einen unterschiedlichen ökonomischen Wert hat. Die gleiche Menge Exergie in Form von elektrischer Energie hat einen weit höheren wirtschaftlichen Wert als Exergie, gespeichert in Kohle oder Öl. Diese wiederum ist sicher wertvoller als Exergie in Form von Wärme [3].

Der dritte und vierte Ansatz zur Aufteilung der Kosten orientiert sich an Referenzanlagen. Werden die spezifischen Kosten der in KWK-Anlagen erzeugten Heizwärme aus den spezifischen Kosten der in einem Referenzheizwerk erzeugten Heizwärme bestimmt, so werden die Stromerzeugungskosten zu Lasten der Wärmeerzeugungskosten subventioniert. Dieser Ansatz führt deshalb zu nicht mehr wettbewerbsfähigen hohen Wärmeerzeugungskosten.

Die vierte Möglichkeit zur Aufteilung der Anlagen- und Brennstoffkosten besteht in der Verwendung eines Referenzkondensationskraftwerkes zu Ermittlung der Stromerzeugungskosten. Hier wird bewirkt, daß der in KWK-Anlagen erzeugte elektrische Strom unabhängig von der ausgekoppelten Heizwärmeleistung immer die gleichen Stromerzeugungskosten zugewiesen bekommt. Die Kosten der Wärmeerzeugung ergeben sich dann zum einen aus den Kosten des Stromverlustes und zum anderen aus den Kosten für die zusätzlichen Komponenten, die für die Wärmeauskopplung benötigt werden.

Tabelle 1: Randbedingungen der Kostenrechnung

| | GUD | DKW |
|--|------------|------------|
| Bauzeit (Jahre) | 2 | 3 |
| Spezifischer Anlagenpreis der 350 MW-Klasse (DM / kW) | 800 | 1700 |
| Spezifischer Brennstoffpreis (DM / GJ (H_U)) | 5.0 | 2.5 |
| Kapitalzins 7 % / Jahr; Inflationsrate 2 % / Jahr; Abschreibungszeitraum 20 Jahre; Vollaststunden im Kondensationsbetrieb 7000 bzw. 5000 Std / Jahr; Vollaststunden mit max. Wärmeauskopplung 2000 Std / Jahr; Reale Steigerung des Brennstoffpreises 1 % / Jahr | | |

Die nachfolgend dargestellten Daten sind Ergebnisse einer Beispielrechnung und wurden unter den in Tabelle 1 aufgelisteten Randbedingungen durchgeführt. Die spezifischen Anlagenkosten des DKWs wurden bei dem hier vorliegenden hohen Wirkungsgradniveau mit 1700 DM / kW rund doppelt so hoch angesetzt wie die spezifischen Anlagenkosten des GUDs, 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. Die nachfolgend dargestellten Strukturen der Strom- und Wärmeerzeugungskosten sind repräsentative Werte für den Betrachtungszeitraum und wurden unter Verwendung der Nettowirkungsgrade im Vollastbetrieb ermittelt. Die Einflüsse von An- und Abfahrvorgängen und Teillastbetrieb auf den Wirkungsgrad bleiben hier unberücksichtigt.

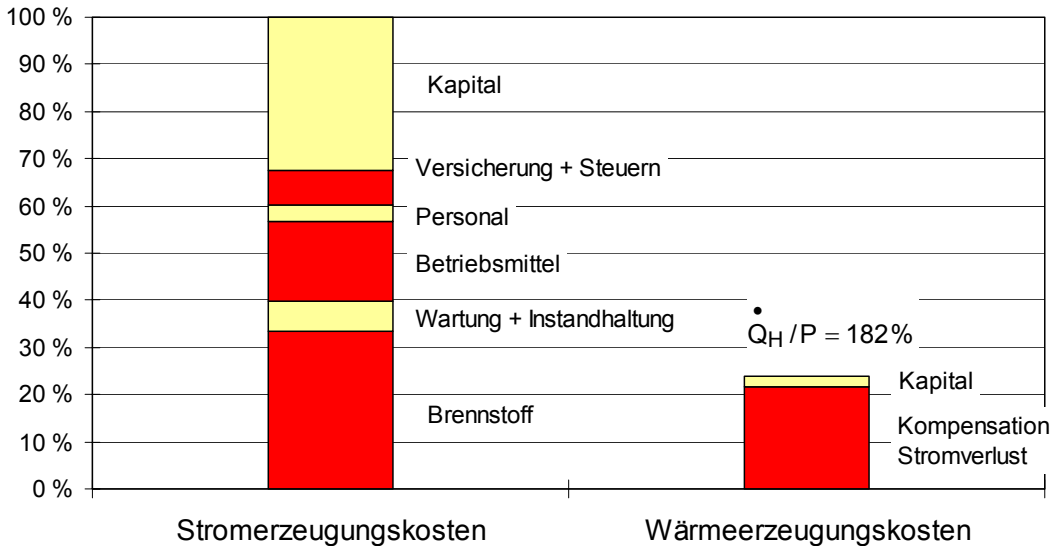


Abbildung 10: Struktur der Strom- und Wärmeerzeugungskosten des DKWs

Die Brennstoffkosten und die Kapitalkosten haben bei Dampfkraftwerken jeweils einen Anteil von rund einem Drittel an den Stromerzeugungskosten (Abb. 10). Die Betriebsmittelkosten, die überwiegend aus Kosten für die Rauchgasreinigung bestehen, betragen rund 17 %. Die Kosten der Rauchgasreinigung wurden hierbei unter Annahme deutscher Emissionsvorschriften ermittelt und sind daher unter Umständen höher als an anderen Standorten. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung sowie für Versicherung und Steuern wurden jeweils mit rund 7 % angesetzt. Die Personalkosten von rund 3 % gelten für eine Doppelblockanlage (2 x 350 MW).

Die Wärmeerzeugungskosten bestehen aus zwei Teilen. Zum einen aus den Kosten zur Kompensation des Stromverlustes, die unter den hier getroffenen Annahmen aus dem Produkt von Stromerzeugungskosten und Stromverlustkennziffer bestimmt werden können, und zum anderen aus den Kosten für die zusätzlichen Komponenten der Wärmeauskopplung. Die Kosten zur Kompensation des Stromverlustes betragen rund 90 % der Wärmeerzeugungskosten und sind damit eindeutig dominierend. Niedrige Stromverlustkennziffern wirken sich daher entsprechend positiv auf die Wärmeerzeugungskosten aus. Insgesamt betragen die Wärmeerzeugungskosten bei 2000 Vollaststunden pro Jahr mit maximaler Heizwärmeauskopplung rund 24 % der Stromerzeugungskosten.

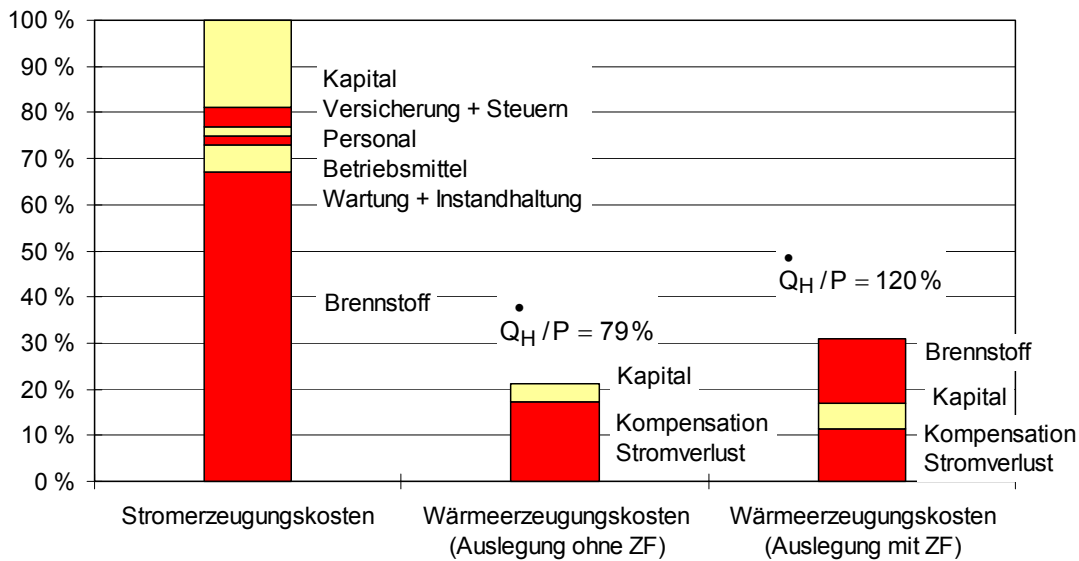


Abbildung 11: Struktur der Strom- und Wärmeerzeugungskosten des GUDs

Die Struktur der Stromerzeugungskosten von GUD-Kraftwerken (Abb. 11) unterscheidet sich stark von der bei Dampfkraftwerken. Der Brennstoffkostenanteil beträgt hier rund zwei Drittel anstatt wie beim DKW ein Drittel und ist damit beim GUD eindeutig dominierend. Dies führt zu einer starken Abhängigkeit der Stromerzeugungskosten vom Brennstoffpreis und vom Wirkungsgrad. Der Anteil der Kapitalkosten liegt beim GUD bei 19 % im Vergleich zu 33 % beim DKW. Die Stromerzeugungskosten des GUDs reagieren daher entsprechend schwächer auf Änderungen des Zinssatzes, der Betriebsstunden und des Abschreibungszeitraumes als die des DKWs. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung betragen rund 6 %, die Kosten für Versicherung und Steuern rund 4 % und die für Personal und Betriebsmittel jeweils rund 2 %.

Die Stromerzeugungskosten des Dampfkraftwerkes sind unter den oben aufgeführten Annahmen (Tab. 1) höher als die des GUD-Kraftwerkes. Die Differenz nimmt jedoch mit steigender Leistungsgröße ab, da DKWs eine stärkere Degression der spezifischen Anlagenkosten aufweisen. Bei großen Anlagen (1000 MW_{el}) geht die Differenz der Stromerzeugungskosten z. B. gegen null, wenn der Gaspreis um rund 20 % steigt oder wenn an die Emissionen des DKWs weniger scharfe Anforderungen als am Standort Deutschland gestellt werden. Bei den hier betrachteten Anlagen der 350 MW-Klasse ist der erforderliche Anstieg des Gaspreises nahezu doppelt so hoch.

Bei den Wärmeerzeugungskosten des GUDs können zwei Fälle unterschieden werden. Zum einen eine Anlage ohne Zusatzfeuerung im Abhitzedampferzeuger, die jedoch in Hinsicht auf das Potential zur Wärmeauskopplung beschränkt ist, und zum anderen eine Variante mit Zusatzfeuerung im Abhitzedampferzeuger, die ein größeres Potential zur Wärmeauskopplung bietet aber auch mit höheren Investitionen verbunden ist. Im ersten Fall betragen die Wärmeerzeugungskosten

rund 21 % der Stromerzeugungskosten, im zweiten Fall durch die höheren Kapital- und die zusätzlichen Brennstoffkosten rund 31 %.

Die Kosten der aus GUD- und Dampfkraftwerken ausgekoppelten Heizwärme haben ein durchaus attraktives Niveau, welches sogar unterhalb der Brennstoffkosten von Erdgas liegt. Unter der Annahme, daß die Kosten des Fernwärmenetzes bei 800 DM / kW_{th} liegen, steigen die spezifische Kosten der Heizwärme durch die Wärmeverteilung um das drei- bis vierfache der Wärmeerzeugungskosten im Kraftwerk. Wenn es gelingt, die Kosten der Wärmeverteilung weiter zu reduzieren, ist die Kraft-Wärme-Kopplung bei Großkraftwerken nicht nur unter ökologischen sondern auch unter ökonomischen Gesichtspunkten eine erfolgsversprechende Maßnahme, um durch die effiziente Nutzung von Primärenergie einen Beitrag zur Entschärfung der Klimaproblematik und zur Erhöhung der zeitlichen Reichweite der Ressourcen zu leisten.

Literaturverzeichnis

- [1] Baehr, H. D.: Thermodynamik, 8. Auflage. Springer Verlag, Berlin, 1992
- [2] Baehr, H. D.: Wirkungsgrad und Heizzahl zur energetischen Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung. VGB-Kongreß "Kraftwerke 1985", VGB Kraftwerkstechnik, Essen, 1985
- [3] Baehr, H. D.: Nutzungsgrenzen der Energie – Einführung, Bedeutung und Grenzen des Exergiebegriffs. HLH 32, Heft 8, 1981
- [4] Bauer, G.; Lankes, F.: Erhöhung des Blockwirkungsgrades durch verbesserte Abgaswärmenutzung. VGB Kraftwerkstechnik 77, Heft 5, 1997
- [5] Bergmann, D; Koch, R.-D.; Röttger, G.: Dampfturbinen für große Heizkraftwerke. VGB Kraftwerkstechnik 75, Heft 10, 1995
- [6] Demmel, S.: Analyse von Systemen zur Versorgung mit Strom, Wärme und Kälte. Dissertation, TU München, 1995
- [7] Franke, J; Kral, R.; Wittchow, E.: Dampferzeuger für die nächste Kraftwerksgeneration – Gesichtspunkte zur Auslegung und zum Betriebsverhalten. VGB Kraftwerkstechnik 79, Heft 9, 1999
- [8] Kail, C.; Rukes, B.: Fortschrittliche Gas- und Dampfturbinenprozesse zur Wirkungsgrad- und Leistungssteigerung bei GUD-Kraftwerken. VDI-Berichte 1182, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- [9] Kail, C.: Bewertung der zur Zeit besten gasbefeueren Kraftwerksprozesse mit Heavy-Duty-Gasturbinen. VDI-Berichte 1321, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [10] Kail, C.: Fortschrittliche gasbefeuerte Kraftwerksprozesse für höchste Wirkungsgrade und niedrige Stromerzeugungskosten. Tagungsband VGB-TB 233A, VGB Kraftwerkstechnik, Essen, 1998
- [11] Knoche, K. F.; Rudolph, M.; Schaefer, H.: Zur Problematik der Bewertung von Energieträgern und Energieumwandlungsprozessen. BWK, Bd. 46, Nr. 10, 1994
- [12] Rukes, B.: Technik und Emissionen großer KWK-Anlagen. VDI-Berichte 923, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991