

## „KWK-Strom“ - Was ist das?

### 1 Einführung

Durch die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme (KWK – „Kraft-Wärme-Kopplung“) können bis zu ca. 40 % Brennstoff gegenüber der getrennten Erzeugung eingespart werden. Diese Einsparungen können sowohl im Kraftwerksprozess als auch durch Nutzung der Abwärme erzielt werden.

Die energetischen und ökologischen Vorteile der KWK sind in der Energiewirtschaft, der Energiepolitik und im Umweltschutz unumstritten. Der Gesetzgeber hat zur Förderung dieser Technologie staatliche Verordnungen erlassen, die sowohl die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme als auch den Einsatz der Abwärme von Stromerzeugern im Heizungsbereich begünstigen sollen.

Diese Verordnungen sind

1. Gesetz für die Erhaltung, Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKMdG)
2. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (EnEV)

Zur Erläuterung der Anwendung wurden in DIN-Ausschüssen Normen und von der AGFW die begleitenden Richtlinien FW 308 und FW 309 geschaffen, so dass offenbar zufrieden stellende Rahmenbedingungen vorhanden sind.

Die Vorstellungen und Praktiken bei der Bewertung des Koppelprozesses sind jedoch oft ungenügend und müssen qualifiziert werden. Zum Verständnis thermischer Energiewandlungsprozesse und zur Erstellung von Energiebilanzen sind der 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik erforderlich. Der 2. Hauptsatz wird jedoch kaum angewendet, bestenfalls das „Carnot-Gesetz“ als eine ca. 1850 von Clausius formulierte Lesart.

Ziel des Beitrages ist die Präferenzierung einer Bewertungsmethode, die sowohl den Brennstoffaufwand für Strom und Wärme korrekt und differenziert darstellt, als auch das Verhältnis des Aufwandes zum Nutzen für energiewirtschaftliche und ökologische Entscheidungen liefert.

## 2 Charakteristik der Heizkraftwerke

Die Wärmeauskopplung aus KWK-Anlagen kann die Stromerzeugung mehr oder weniger bzw. auch nicht beeinflussen. Entsprechend Tabelle 1 können daher zwei Typen von KWK-Anlagen unterschieden werden.

Tabelle 1: Typen von KWK-Anlagen

| <b>KWK Typ A:</b><br>Ohne Beeinflussung der Stromerzeugung durch Wärmeauskopplung                                                                                                                | <b>KWK Typ B:</b><br>Mit Beeinflussung der Stromerzeugung durch Wärmeauskopplung                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <u>Kolbenmaschinen und Brennstoffzellen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas- und Diesel-Motoren</li> <li>• Stirling-Motoren</li> <li>• Brennstoffzellen</li> </ul>                  | <u>Dampfturbinen-HKW</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• mit Gegendruck-Dampfturbine</li> <li>• mit Entnahme-Kondensations-Dampfturbine</li> </ul>                |
| <u>Gasturbinen-(GT-)HKW</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mikro-GT mit Regeneration</li> <li>• Einfache offene GT</li> <li>• Halbgeschlossene und geschlossene Gasturbinen</li> </ul> | <u>Gas- und Dampfturbinen-(GuD-)HKW</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• mit Gegendruck-Dampfturbine</li> <li>• mit Entnahme-Kondensations-Dampfturbine</li> </ul> |

Bei Heizkraftwerken vom Typ A tritt durch die Wärmeauskopplung keine oder bestenfalls eine geringfügige Beeinflussung der Stromerzeugung auf. Letztere resultiert aus den Druckverlusten der zu installierenden Wärmeübertrager.

Im Falle von Heizkraftwerken vom Typ B wird die Temperatur der Wärmeabfuhr auf die für die Heizungssysteme erforderlichen Werte erhöht und führt bei gleichem Brennstoffeinsatz zu einem **Stromverlust**  $\Delta W_{SV}$ , d. h. einer Verringerung der möglichen Stromerzeugung, so dass der erforderliche spezifische Brennstoffverbrauch pro kWh Elektroenergie ansteigt. Damit kann der erhöhte Brennstoffbedarf der ausgekoppelten Heizwärme als Aufwand zugeordnet werden.

Theoretisch wäre eine großflächige Niedertemperaturheizung schon mit 30 °C anwendbar. Wie bei Kraftanlagen des Typs A mit hohen Abwärmemperaturen (Gasmotoren, Gasturbinen) wäre in diesem Falle auch beim Typ B kein zusätzlicher Brennstoffbedarf erforderlich. Es leuchtet ein, dass der Brennstoffeinsatz für die Stromerzeugung in diesen Fällen der Wärmenutzung unverändert bleibt.

### 3 Probleme der Bewertungsmethoden

#### 3.1 Vergleich von ungekoppelter und gekoppelter Erzeugung

Eine häufig angewendete Vergleichsrechnung der ungekoppelten und gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme weist den geringeren Brennstoffbedarf der gekoppelten Erzeugung aus. In Bild 1 sind die ungekoppelten Erzeuger HK (Heizkessel) und KW 1 (Kraftwerk 1) dem gekoppelten HKW (Heizkraftwerk) gegenüber gestellt. Dabei wird normalerweise ein die Bilanz schließendes KW 2 nicht berücksichtigt. Damit wird nur der gleiche Heizwärmebedarf gewählt, die Stromanteile ändern sich jedoch mit den Qualitäten  $w_{HKW} / q_h$  im Heizkraftwerk. Dieser Quotient stellt die Stromkennzahl  $\sigma$  dar.

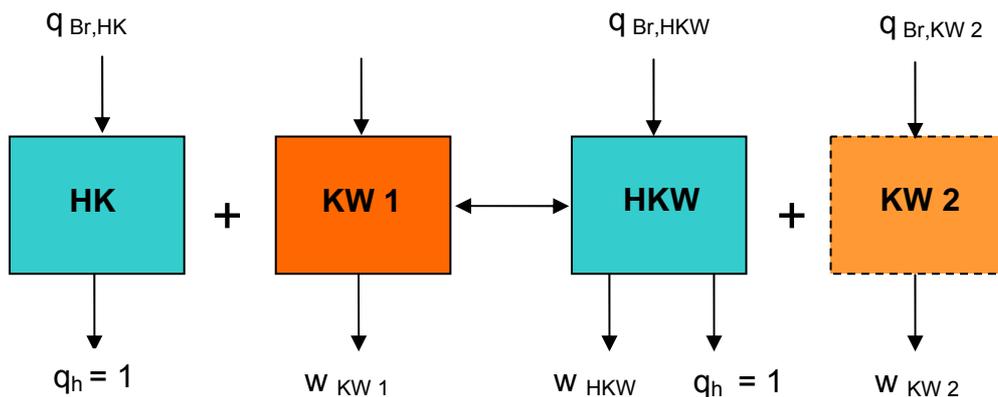


Bild 1: Vergleich der ungekoppelten und gekoppelten Erzeugung

Folgende Möglichkeiten der Brennstoff-Einsparung und der Endenergien können verglichen werden:

- a) Gegenüberstellung von KW und HK zu HKW, gleiche Wärme und ungleicher Strom

$$\left[ \frac{\Delta q_{Br}}{q_{Br}} \right]_a = \frac{(q_{Br,KW} + q_{Br,HK}) - q_{Br,HKW}}{(q_{Br,KW} + q_{Br,HK})}$$

- b) Gegenüberstellung von KW 1 und HK zu HKW mit gleicher Wärme im HKW und die Bilanz schließende Strommenge im Ersatzkraftwerk KW 2

$$\left[ \frac{\Delta q_{Br}}{q_{Br}} \right]_b = \frac{(q_{Br,KW1} + q_{Br,HK}) - (q_{Br,HKW} + q_{Br,KW2})}{(q_{Br,KW1} + q_{Br,HK})}$$

- c) Gegenüberstellung von KW 1 und HK zu HKW mit gleicher Wärme im HKW und die Bilanz schließende Strommenge im Ersatzkraftwerk KW 2. Maximale thermodynamische Qualität  $\bar{\vartheta}_z = 800 \text{ °C}$  in den Kraftwerken KW 1 und KW 2

$$\left[ \frac{\Delta q_{Br}}{q_{Br}} \right]_c = \frac{(q_{Br,KW1-max} + q_{Br,HK}) - (q_{Br,HKW} + q_{Br,KW2-max})}{(q_{Br,KW1-max} + q_{Br,HK})}$$

Wir erkennen, dass die Erzeugung von Strom und Wärme ausschließlich mit KWK in HKW nicht möglich ist, weil die Endenergien Strom und Wärme je nach Strombedarf und Wärmebedarf kein festes Verhältnis haben. Es ist also eine getrennte Bewertung der Wärme unabhängig vom Strom erforderlich, die im Folgenden dargestellt wird.

Zudem ist eine Bewertung nur über den betrachteten Prozess, d. h. ohne Zuhilfenahme von Referenzen, weitgehend frei von subjektiven Einflüssen. Dem gegenüber ist die Einbeziehung von Vergleichskraftwerken generell ein Auslöser von Diskussionen über die Höhe von Wirkungsgraden sowie über andere Merkmale.

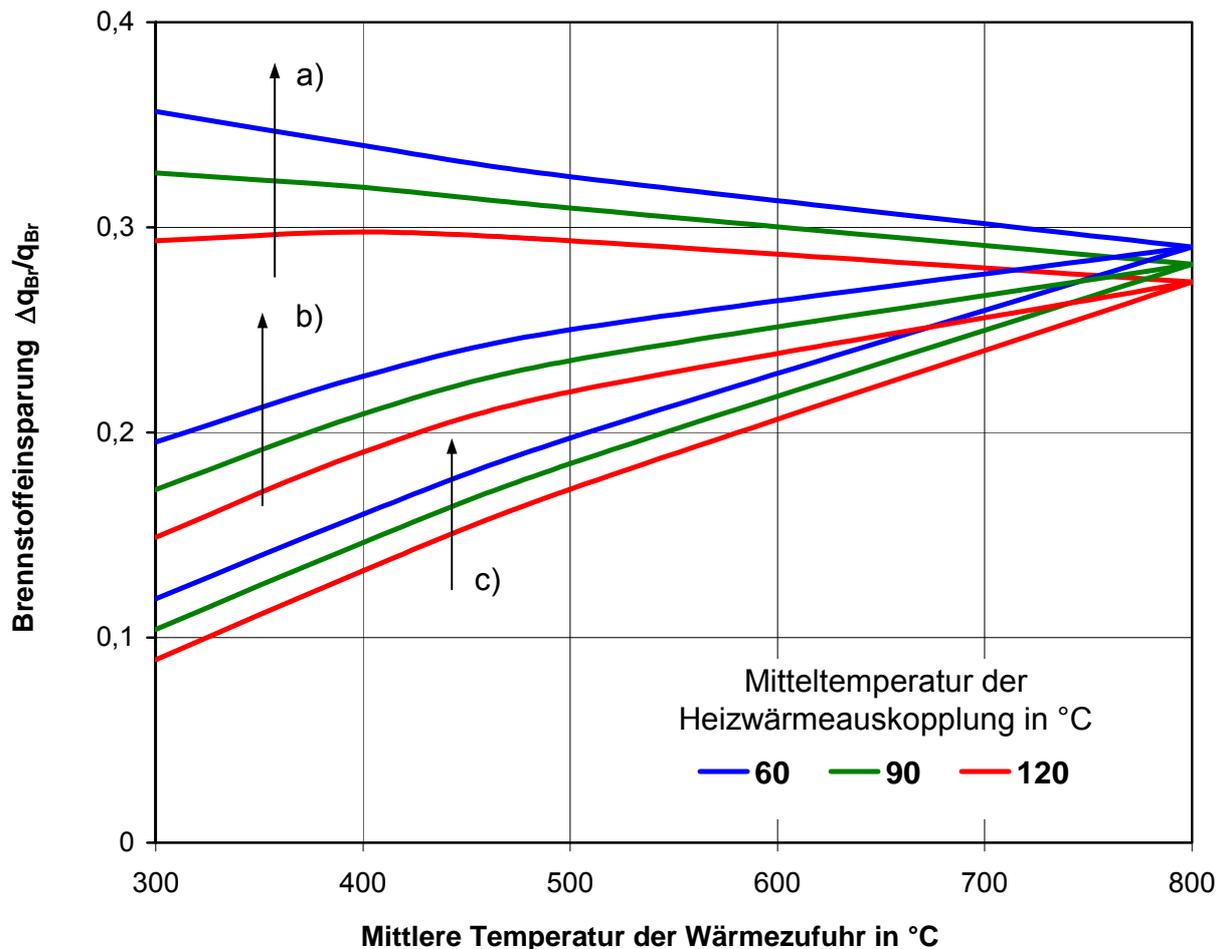


Bild 2: Normierte Brennstoffeinsparung für die Varianten a) – c)

Bei näherem Hinsehen ist anhand von Bild 2 festzustellen, dass die Vergütung des so genannten KWK-Stromes nach KWKModG nur in geringem Zusammenhang mit der Brennstoffeinsparung bei gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugern steht. Wir wollen diesem Problem nachgehen und den Nachweis führen, dass die Stromerzeugung im HKW (Heiz-Kraft-Werk) recht wenig mit der Brennstoffeinsparung durch KWK zu tun hat.

### 3.2 Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung und Brennstoffeinsparung

Im Bild 3 werden die verschiedenen Sichtweisen zur KWK-Stromerzeugung deutlich. Es ist unstrittig, dass die Dampfaufteilung im Parallel-Prozess nicht gerechtfertigt ist, da jede Teildampfmenge vom Frischdampf bis zur Entnahme identisch ist. Das „Schicksal“ der Teildampfmengen geht erst nach der Anzapfung neue Wege.

Zur Vergütung bzw. Bewertung der KWK nach der KWK-Strom-Methode (FW308) wird der Strom als Maßstab der Brennstoffeinsparung verwendet. Dabei wird als Heizwärme die im HKW gemessene Heizwärmeabgabe verwendet, also sind darin auch die im Heiznetz bis zu den Kunden auftretenden Wärmeverluste und die in Absorptions-Kältemaschinen verwendete Heizwärme enthalten, was zu dem Ergebnis führt, dass Wärmeverluste prämiert werden. Die Verbesserung des Kreisprozesses wird ebenfalls als KWK-Effekt gewertet. Dieser unstrittig positive Effekt tritt aber bei Kondensations-Kraftwerken (Kond.-KW) ebenso auf, wird dort jedoch nicht honoriert, wie im Abschnitt 4 dargestellt.

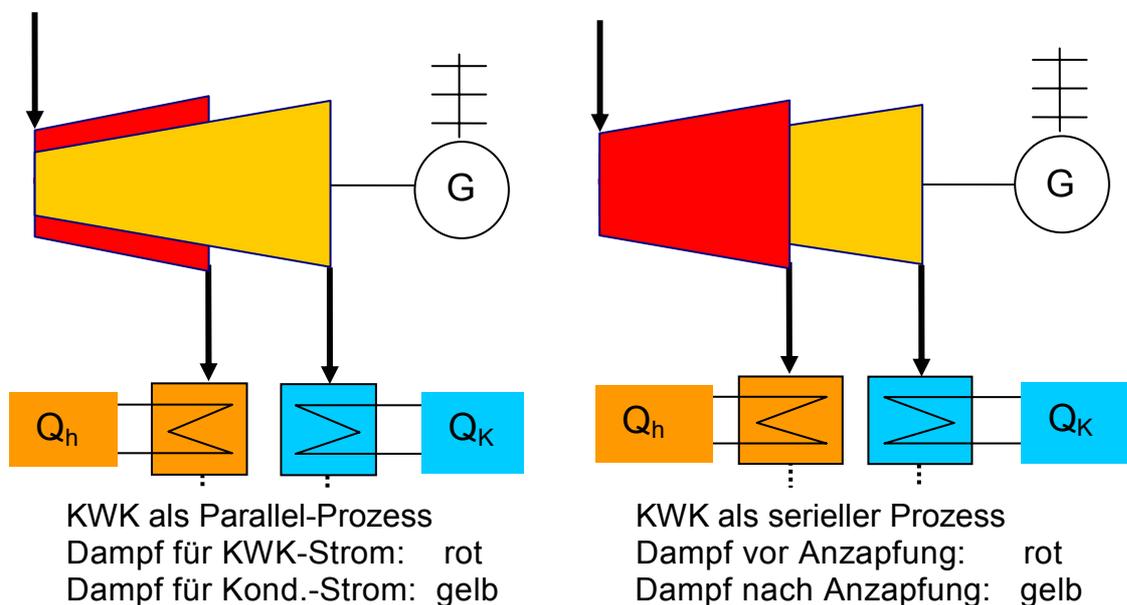


Bild 3: Darstellungsmöglichkeiten der Dampfstrome in einer Entnahme-Kondensations-Turbine

Es ist also zu unterscheiden zwischen

- Brennstoffeinsparung durch Kreisprozess verbessernde Maßnahmen (Steigerung von elektrischem Wirkungsgrad  $\eta_{el}$  und Stromkennzahl  $\sigma$ ), die sowohl bei Kond.-KW als auch bei HKW wirksam sind und sehr wenig mit der KWK zu tun haben, und
- Brennstoffeinsparungen durch die Abwärmenutzung bei HKW, die den zusätzlichen Einsatz von Brennstoff in Heizkesseln vermeiden.

Im Bild 4 wird an einem einfachen Beispiel der geringe Brennstoffanteil der Heizwärme gezeigt. Dazu sind die tatsächlichen Brennstoffeinsparungen im Falle einer Reduzierung des Heizwärmebedarfs z. B. durch Bauwerksdämmung, Verringerung von Leitungsverlusten oder verändertes Nutzerverhalten dargestellt.

Zum Vergleich sind auf der linken und der rechten Seite thermodynamisch ungleichwertige Kraftwerke ohne (Kond.-KW) und mit Anzapfung zur Wärmeauskopplung (HKW) dargestellt. Dabei liegen die mittleren Temperaturen der Wärmezufuhr  $q_z$  im größeren Kondensations-Kraftwerk mit 460 °C höher gegenüber dem HKW mit

350 °C. Im Falle der Heizwärmeeinsparung  $\Delta q_h$  kann bei gleicher Brennstoffmenge bzw. gleicher zugeführter Wärme  $q_z$  im HKW Typ B (siehe Tabelle 1) durch den sinkenden Stromverlust eine größere Strommenge  $(w+\Delta w)_{HKW}$  erzielt werden. Daraus ist zu erkennen, dass der Stromverlust tatsächlich ein Maß für die zur Heizwärmeabgabe benötigte Brennstoffmenge ist.

Im Kraftwerk höherer Frischdampfparameter kann mit der im HKW für die zusätzliche Stromerzeugung benötigten zugeführten Wärme durch den höheren Wirkungsgrad eine noch größere Strommenge  $(w+\Delta w)_{KW}$  erzeugt werden.

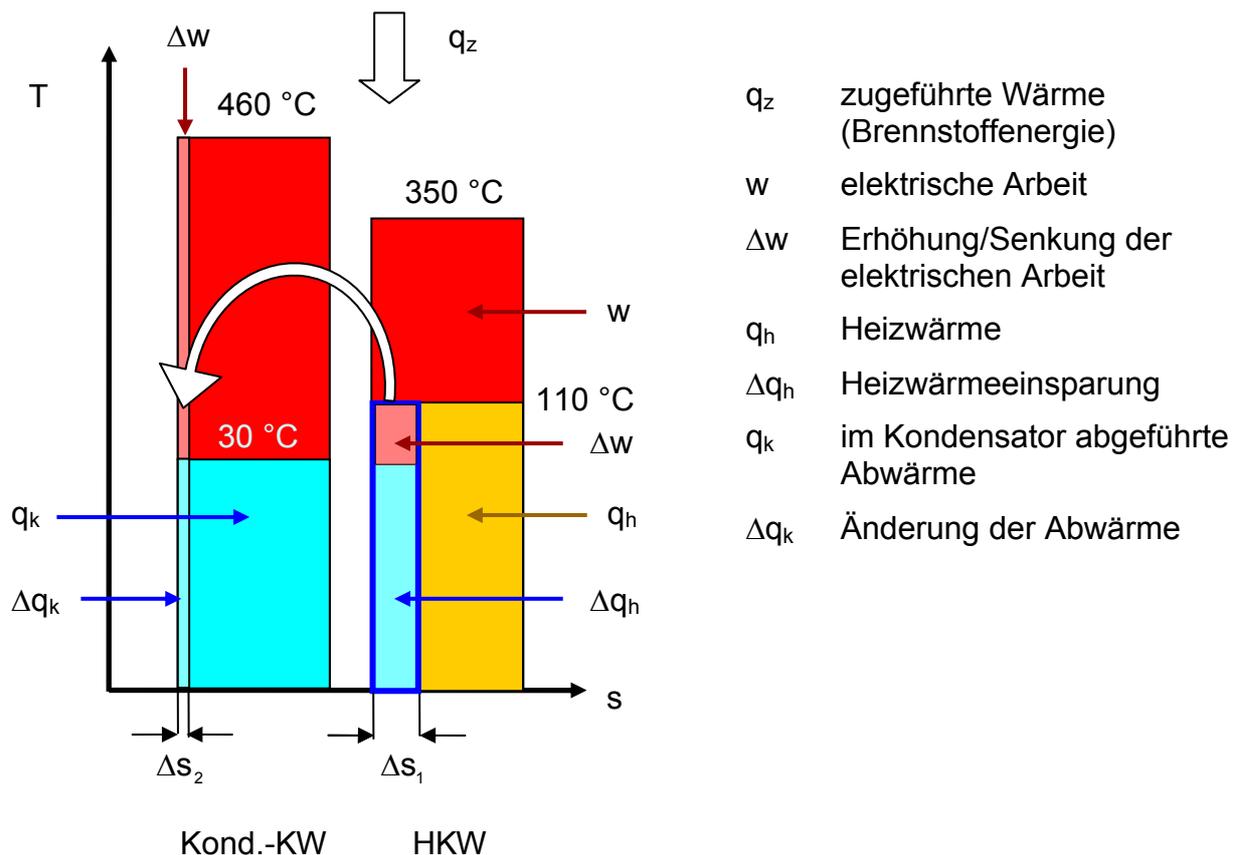


Bild 4: Auswirkungen von Wärmeeinsparungen auf die Stromerzeugung

Betrachten wir die denkbaren Varianten bei Heizwärmeeinsparung im HKW und dort möglichem Kondensator-Betrieb, wenn die Summe der Stromerzeugung in HKW und Kondensationskraftwerk konstant bleiben soll:

- a) steigende Stromerzeugung im HKW bei gleich bleibender Brennstoffzufuhr  
 $\Rightarrow$  Absenkung der Stromerzeugung im Kondensationskraftwerk  
 $\Rightarrow$  Brennstoffeneinsparung im Kondensationskraftwerk
- b) gleich bleibende Stromerzeugung im HKW durch verringerte Brennstoffzufuhr  
 $\Rightarrow$  keine Änderung der Stromerzeugung im Kondensationskraftwerk  
 $\Rightarrow$  Brennstoffeneinsparung im Heizkraftwerk
- c) Gegendruckbetrieb HKW mit sinkender Stromerzeugung und Brennstoffzufuhr  
 $\Rightarrow$  entsprechende Erhöhung der Stromerzeugung im Kondensationskraftwerk  
 $\Rightarrow$  Brennstoffeneinsparung im HKW, zusätzlicher Brennstoffenergiebedarf im Kondensationskraftwerk

Es muss also unterschieden werden, ob die aus KWK frei werdende Arbeitsfähigkeit der Heizwärme in einem HKW mit Kondensations-Anteil genutzt wird oder ob diese Kondensationsstrom-Erzeugung aus einem Groß-KW bereitgestellt wird.

Bei gleich bleibender Stromerzeugung im HKW (Fall b) verringert sich die der Heizwärme anzurechnende Frischdampfenergie.

Falls eine Strommehrproduktion im HKW durch die Stromminderung im Groß-KW mit  $\bar{\vartheta}_z = 460 \text{ °C}$  ausgeglichen wird (Fall a), sinkt die Einsparung an Brennstoffenergie, d.h. unabhängig von der Heizwärmeeinsparung wird wegen der besseren Frischdampfparameter im Groß-KW die Effizienz des Gesamtsystems geringer. Es ist daher sinnvoller, die Kond.-Stromerzeugung im Kond.-KW zu belassen und das HKW herunterzufahren.

Für Fall a ergibt eine Zahlenrechnung gemäß Bild 4 ein Verhältnis  $\Delta q_z/\Delta q_h$  von ca. 0,20. Wird dieses Ergebnis mit dem Wert für Heizkessel von  $\Delta q_z/\Delta q_h \approx 1,1 \dots 1,2$  verglichen, dann wird der wirkliche Vorzug der KWK klar erkennbar.

Aus Bild 5 wird deutlich, dass die Stromverlustzahl deutlich von der Heizungsmitteltemperatur  $\bar{\vartheta}_h$ , aber wenig von der Mitteltemperatur der Wärmezufuhr zum Kreisprozess  $\bar{\vartheta}_z$  abhängt, obwohl diese von 300 bis 800 °C stark variiert wurde. Mit letzteren wurde auch der Kesselwirkungsgrad von 91 bis 95 % variiert. Der Prozessgütegrad (Gütegrad des Kreisprozesses) wurde mit  $\nu_{KP} = 0,80$  angesetzt (siehe auch Abschnitt 5).

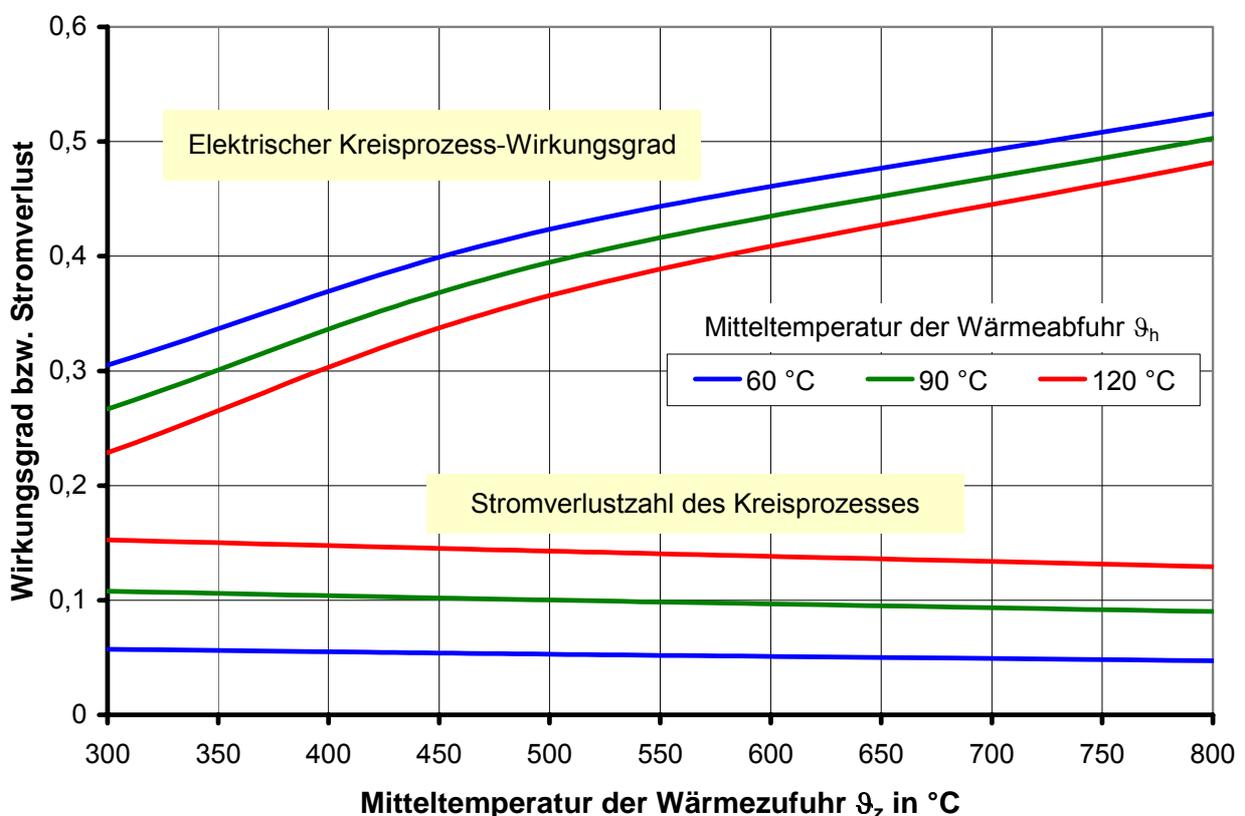


Bild 5: Auswirkung der mittleren Temperatur der Wärmezufuhr  $\bar{\vartheta}_z$  und der Wärmeabfuhr  $\bar{\vartheta}_h$  auf den elektrischen Wirkungsgrad und den Stromverlust

### 3.3 Brennstoffaufteilung auf Strom und Wärme

Die Zuordnung der Brennstoffe auf Strom und Wärme ist **betriebswirtschaftlich beliebig**. Die zu erzielenden Einnahmen hängen ab vom Wettbewerb. Wenn allerdings politische Eingriffe in die Kostenstruktur vorgenommen werden, dann sollten Aufwand und Nutzen in gerechter Relation begünstigt werden. Von den zahlreichen Methoden der Brennstoffaufteilung wird oft das kalorische Verfahren verwendet. Wir schlagen dem gegenüber ein elektrisches Verfahren vor, wie im Weiteren begründet wird. Beide Verfahren verwenden als Grundlage nur die Endenergien Strom und Abwärme (Heizwärme).

- **Kalorisches Verfahren:**

Hier liegt eine aus der Sicht der Heizungstechnik verständliche, aber physikalisch nicht haltbare Auffassung zur Kraft-Wärme-Kopplung vor. Der Bedarf an Brennstoffen für Strom und Heizwärme wird kalorisch gewichtet, das heißt die Abwärme (Heizwärme) und das „Zusatzprodukt“ Strom entstehen aus gleich gewichteten Brennstoffanteilen. Die Denkweise bei diesem Verfahren kann so interpretiert werden, dass die Bilanzen ausgehend vom unteren Temperaturniveau in die dem Energiestrom entgegen gesetzte Richtung aufgebaut werden. Diese Methode ist thermodynamisch unzulässig. Entropiebilanzen belegen das. Die kleinere, der „KWK-Stromerzeugung“ zugewiesene Brennstoffmenge ist wegen der großen thermodynamischen Verluste im Verbrennungsprozess und im Temperaturabbau bis in den Kreisprozess hinein nicht in der Lage, die erforderliche Strommenge zu liefern. Leider ist der zweite Hauptsatz der Thermodynamik bis heute nicht Allgemeingut vieler Ingenieure der Energietechnik geworden, und **„gedankliche Verstöße gegen das Entropiegesetz beflügeln bis in unsere Tage Utopien“** (Zitat von Knizia, K.: VGB PowerTech 9/2001).

- **Elektrisches Verfahren:**

Der physikalisch sinnvolle Ansatz aus der Stromerzeugung heraus besteht darin, den Energiestrom entsprechend seiner Fließrichtung vom Verbrennungsvorgang über den Kreisprozess bis zur Abwärmeentsorgung thermodynamisch zu bilanzieren. Bei ausschließlicher Stromerzeugung im Kondensationskraftwerk kann die aufgewendete Brennstoffenergie eindeutig der Elektroenergie zugeordnet werden. Wird aus diesem Kraftwerk Wärme zu Heizzwecken ausgekoppelt, erleidet der Prozess auf Grund des im Vergleich zur Kondensation erforderlichen höheren Temperaturniveaus der Heizwärme einen Verlust an elektrischer Leistung, den so genannten Stromverlust.

Gegenüber dem exergetischen wird folglich beim elektrischen Verfahren der Heizwärme nicht die gesamte Exergie, sondern nur soviel, wie mit realen Technologien in elektrische Energie transformiert werden kann, angerechnet.

Da der weitaus größere Brennstoffanteil für die Stromerzeugung benötigt wird, ist nur ein geringer Brennstoffbedarf für die Heizwärme zu berücksichtigen. Dieser entspricht bei KWK-Anlagen vom Typ B (siehe Tabelle 1) dem Anteil des Stromverlustes durch Wärmeentnahme.

Im Bild 6 ist diese Brennstoffaufteilung nach den beiden genannten Verfahren für drei unterschiedliche Mitteltemperaturen der Wärmeabgabe 60/90/120 °C dargestellt, die einen erheblichen Einfluss haben. In dieser Temperaturwahl liegt die wirkliche Einflussnahme der Wärmeauskopplung auf den Brennstoffbedarf des Heizens.

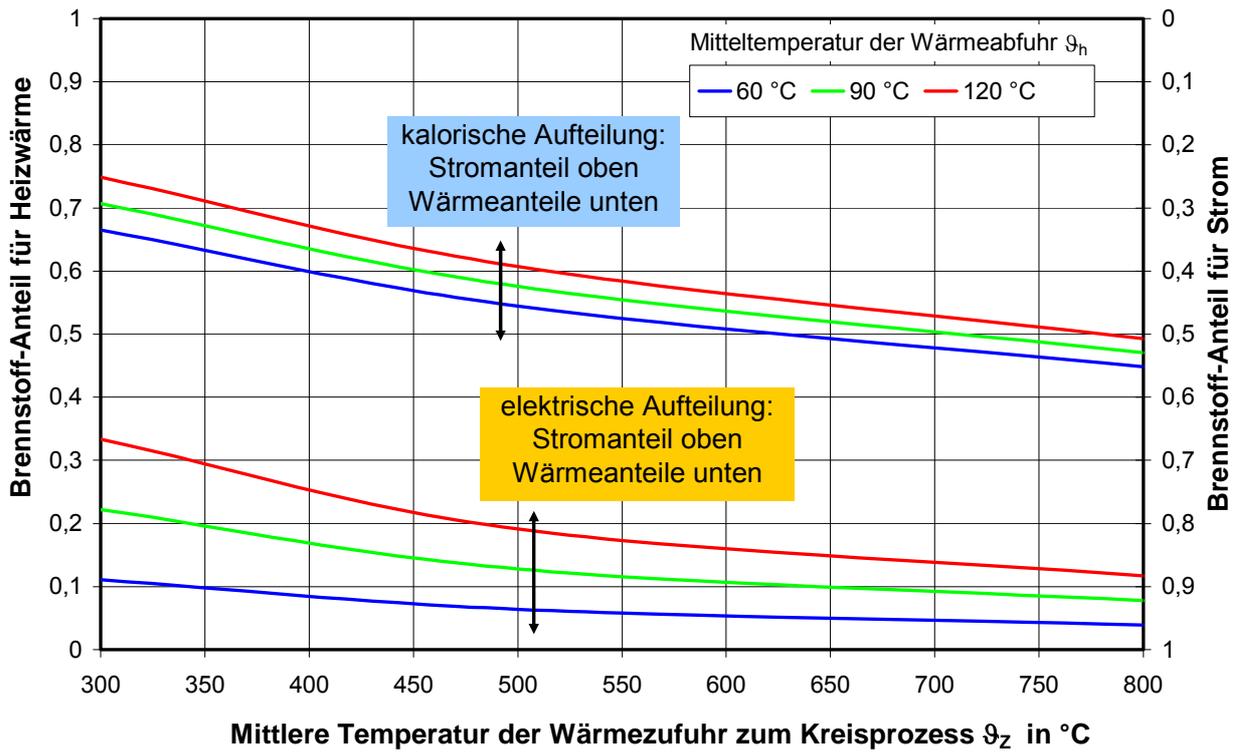


Bild 6: Brennstoffaufteilung nach elektrischem und kalorischem Verfahren bei mittleren Temperaturen der Heizwärmeabgabe von 60/90/120 °C

## 4 Effizienz und Brennstoffeinsparung

In Bild 7 und Bild 8 sind in Form vereinfachter Carnot-Prozesse zwei Beispiele für die in Tabelle 1 verglichenen HKW des Typs A (hohe Abwärmtemperatur) und B (niedrige Abwärmtemperatur) dargestellt. Der Ansatz isothermer Wärmez- und -abfuhr ist durch die Verwendung von Mitteltemperaturen gerechtfertigt.

Bei Typ A liegt die Abwärmtemperatur des Kreisprozesses über der erforderlichen Heiztemperatur, so dass im Heizprozess nur ein Teil der Arbeitsfähigkeit des Abgases benötigt wird. Bei Typ B geht wegen der erforderlichen Heiztemperatur ein Teil des Stromes als so genannter Stromverlust verloren.

Effizienzberechnung eines Gasturbinen-Heizkraftwerkes ohne und unter Berücksichtigung des Kreisprozess-Gütegrades  $\nu_{KP}$  (Brennkammerwirkungsgrad und Verluste bei der Wärmeübertragung an das Heizwasser werden vernachlässigt):

reversibel:

$$w = (\bar{T}_z - \bar{T}_a) \cdot \Delta s_1$$

$$q_h = \bar{T}_h \cdot \Delta s_2$$

irreversibel:

$$w = (\bar{T}_z - \bar{T}_a) \cdot \nu_{KP} \cdot \Delta s_1$$

$$q_h = \bar{T}_h \cdot \Delta s_2 + (\bar{T}_z - \bar{T}_a) \cdot \Delta s_1 \cdot (1 - \nu_{KP})$$

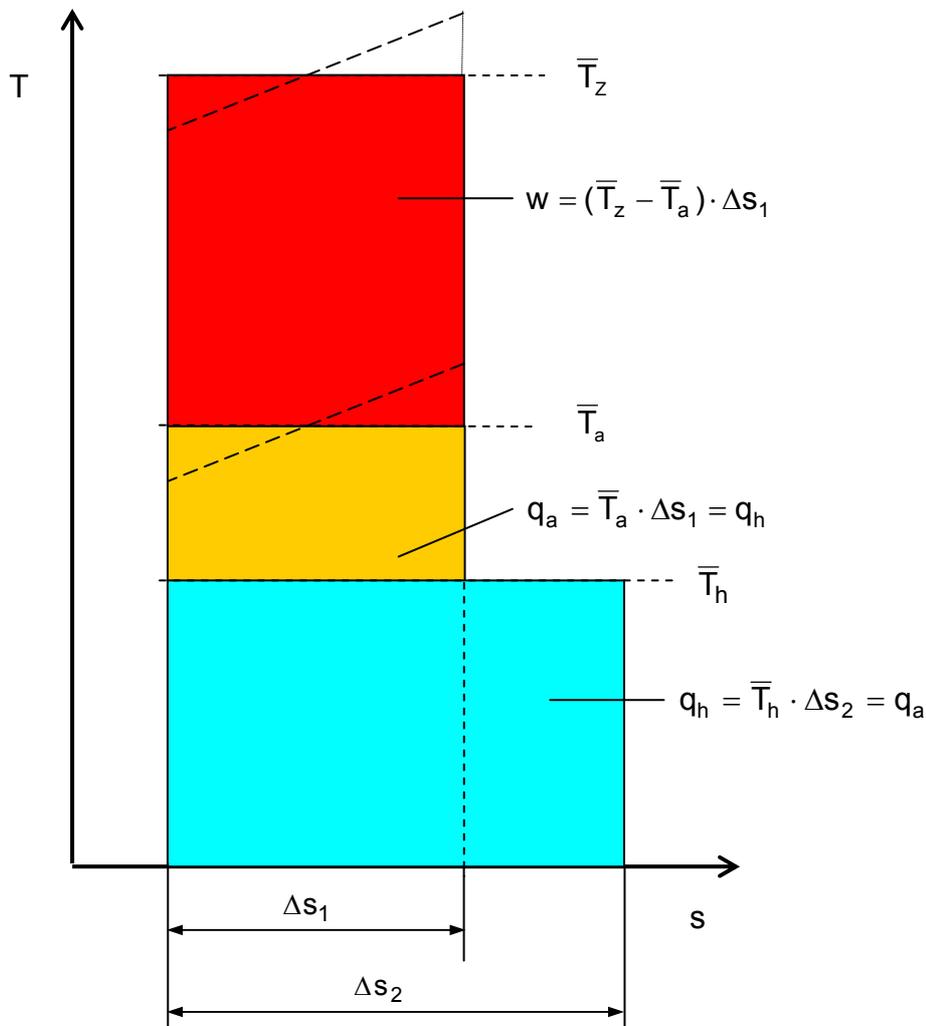


Bild 7: Heizkraftwerk (Gasturbinen, Kolbenmaschinen) mit hohen mittleren Abgastemperaturen und Wärmetransformation auf  $\bar{T}_h < \bar{T}_a$  (reversible Darstellung)

Bild 8 zeigt den reversiblen Carnotprozess von Dampfkraftanlagen mit und ohne Heizwärmeauskopplung.

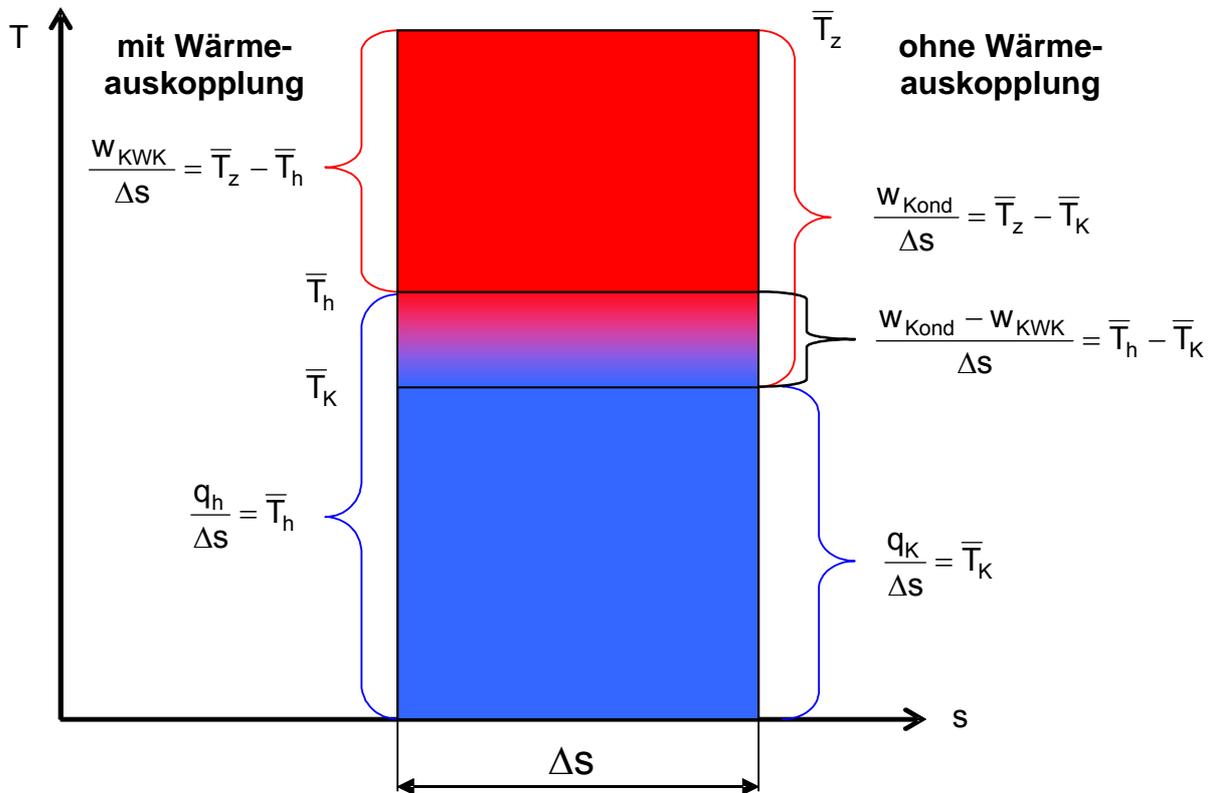


Bild 8: Carnot-Prozess mit unterschiedlichen Abgastemperaturen  $\bar{T}_h$  und  $\bar{T}_K$

Bei Berücksichtigung der Gütegrade des Dampfkraft-Prozesses ergeben sich

$$\frac{W_{KWK}}{\Delta S} = (\bar{T}_z - \bar{T}_h) \cdot v_{KP} \quad \frac{q_h}{\Delta S} = \bar{T}_h + (\bar{T}_z - \bar{T}_h) \cdot (1 - v_{KP})$$

$$\frac{W_{Kond}}{\Delta S} = (\bar{T}_z - \bar{T}_K) \cdot v_{KP} \quad \frac{q_K}{\Delta S} = \bar{T}_K + (\bar{T}_z - \bar{T}_K) \cdot (1 - v_{KP})$$

Im folgenden Bild 9 sind die Effizienzsteigerungen von Heizkraftwerk (HKW) und Kondensations-Kraftwerk (KW) durch Erhöhung der mittleren Temperaturen der Wärmezufuhr  $\bar{\vartheta}_{z1}$ ;  $\bar{\vartheta}_{z2}$ ;  $\bar{\vartheta}_{z3}$  mit 300/500/800 °C dargestellt. Wegen der höheren Abwärmtemperaturen des Heizkraftwerkes  $\bar{\vartheta}_H = 90^\circ\text{C} > \bar{\vartheta}_K = 30^\circ\text{C}$  sind die Wirkungsgrade der Stromerzeugung grundsätzlich geringer als im Kondensations-Kraftwerk. Es steht außer Zweifel, dass der KWK-Strom  $W_{KWK}$  im HKW nach Typ B ineffizienter erzeugt wird als der Kondensations-Strom  $W_{KW}$ . Der Vorteil des HKW ergibt sich aus der zusätzlichen Wärmenutzung.

$$W_{HKW} < W_{KW} \quad W_{HKW} + \Delta W_{SV} = W_{KW} \quad \Delta W_{SV} : \text{Stromverlust}$$

Carnot-Prozess:  $\eta_{C,HKW} = \frac{\bar{T}_z - \bar{T}_h}{\bar{T}_z}$      $\eta_{C,KW} = \frac{\bar{T}_z - \bar{T}_k}{\bar{T}_z}$     mit  $\bar{T}_h > \bar{T}_k$

Die realen elektrischen Wirkungsgrade ergeben sich unter Berücksichtigung von beispielsweise  $\eta_F = 0,95$  und  $v_{KP} = 0,80$ .

Realer Prozess:  $\eta_{HKW} = \eta_F \cdot \frac{\bar{T}_z - \bar{T}_h}{\bar{T}_z} \cdot v_{KP}$      $\eta_{KW} = \eta_F \cdot \frac{\bar{T}_z - \bar{T}_k}{\bar{T}_z} \cdot v_{KP}$

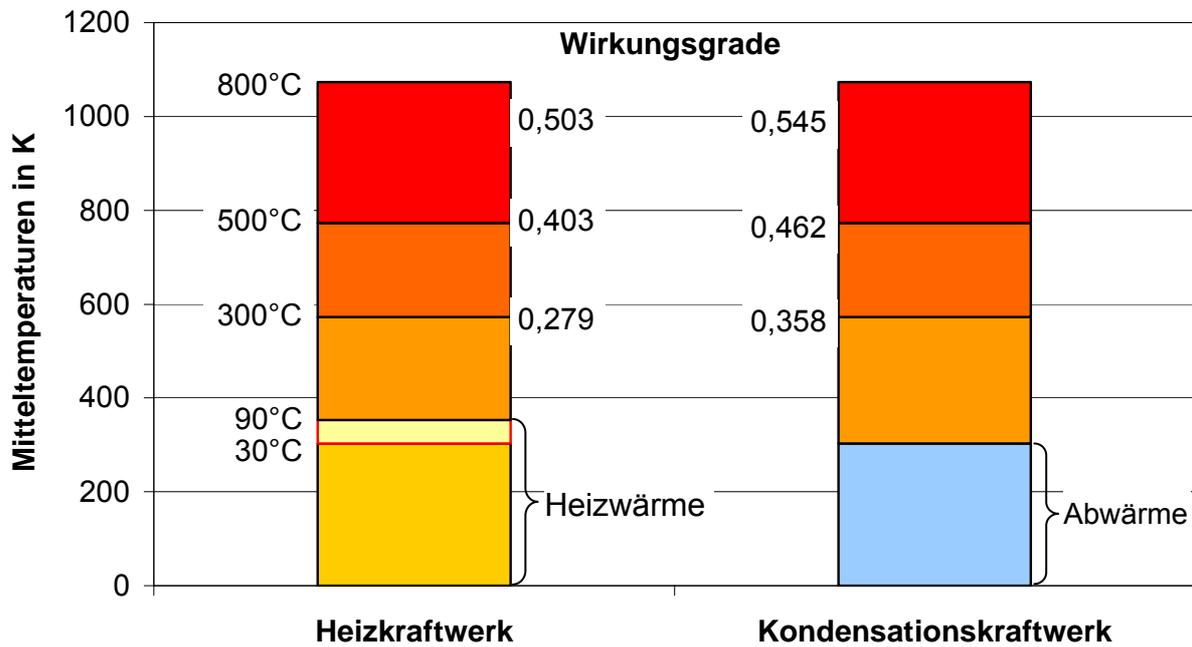


Bild 9: Effizienzvergleich von Heizkraftwerk und Kondensationskraftwerk bei Steigerung der Prozesstemperaturen

## 5 Vorschlag einer Berechnungsmethodik

### 5.1 Berechnung am Beispiel eines Kondensationskraftwerks

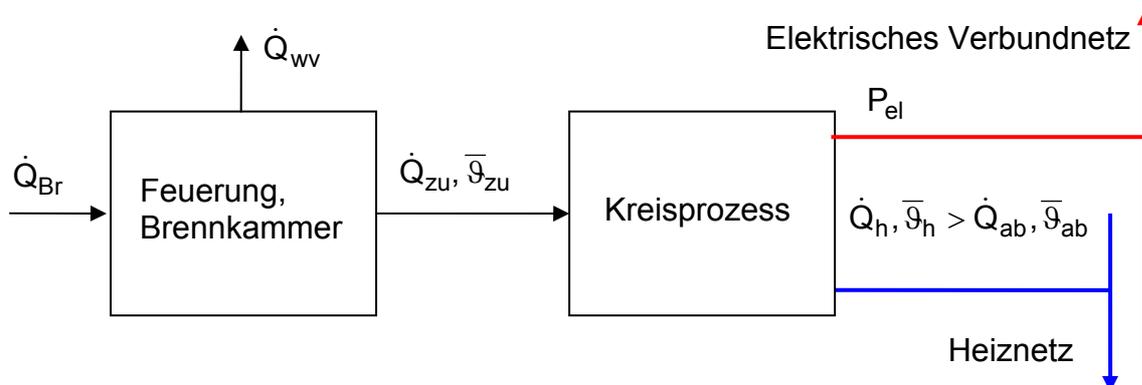


Bild 10: Energiefluss vom Brennstoff zu den Endenergien Strom und Wärme

Im Falle eines Kondensations-Kraftwerkes kann das Verhältnis der elektrischen Nutzleistung  $P_{el}$  und der Brennstoffwärmeleistung  $\dot{Q}_{Br}$  unter Berücksichtigung des Feuerungswirkungsgrades  $\eta_F$ , des Carnot-Wirkungsgrades  $\eta_C$  und des Prozess-Gütegrades  $v_{KP}$  berechnet werden. Der Gütegrad  $v$  ergibt sich dabei aus dem Carnot-Wirkungsgrad  $\eta_C$  und dem Wirkungsgrad des Kreisprozesses  $\eta_{KP}$ . Als Kondensationstemperatur soll einheitlich  $\bar{\vartheta}_{ab} = \bar{\vartheta}_K = 30 \text{ °C}$  als guter Jahresdurchschnittswert für Dampfkraftwerke verwendet werden.

$$\text{Mit } \eta_F = \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{Q}_{Br}}, \quad \eta_C = 1 - \frac{\bar{T}_{ab}}{\bar{T}_{zu}} \quad \text{und} \quad v_{KP} = \frac{\eta_{KP}}{\eta_C} \quad \text{ergibt sich} \quad \eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Br}} = \eta_F \cdot \eta_C \cdot v_{KP}.$$

Die häufig vorgeschlagene exergetische Methode ist insofern nicht unproblematisch, als die Temperatur des Kühlkreislaufes des Dampfkraftwerkes nur einen geringen Spielraum für die Nutzung sehr niedriger Temperaturen ( $< 20 \text{ °C}$ ) ermöglicht. Die Prozesse mit höheren Abwärmepertemperaturen, wie Gasmotoren, Gasturbinen und Brennstoffzellen, könnten durch nachgeschaltete Dampfkraftprozesse bezüglich Stromausbeute verbessert werden, die Kondensationstemperatur würde dann wieder bei  $\bar{\vartheta}_K = 30 \text{ °C}$  liegen.

Eine Proberechnung für  $\eta_F = 0,95$  und  $v_{KP} = 0,85$  ergibt recht gute Vergleichswerte  $\eta_{el}$  für hoch entwickelte Dampfkraftwerke, wie in Bild 11 dargestellt ist.

Der vereinfacht berechnete Wert für  $\eta_{el}$  stimmt hinreichend mit den Angaben für moderne Dampfkraftwerke überein. Der Kraftwerkswirkungsgrad beträgt:

$$\eta_{el} = \eta_F \cdot \left\{ 1 - \frac{T_K}{T_{zu}} \right\} \cdot v_{KP} = 0,95 \cdot \left\{ 1 - \frac{303}{687} \right\} \cdot 0,85 = 0,451$$

Die thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmezufuhr nach Bild 11 beträgt:

$$\bar{T}_{zu} = \frac{(h_{Fd} - h_{Sp}) + (h_{Zü2} - h_{Zü1})}{(s_{Fd} - s_{Sp}) + (s_{Zü2} - s_{Zü1})} = 687 \text{ K} \equiv 413,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

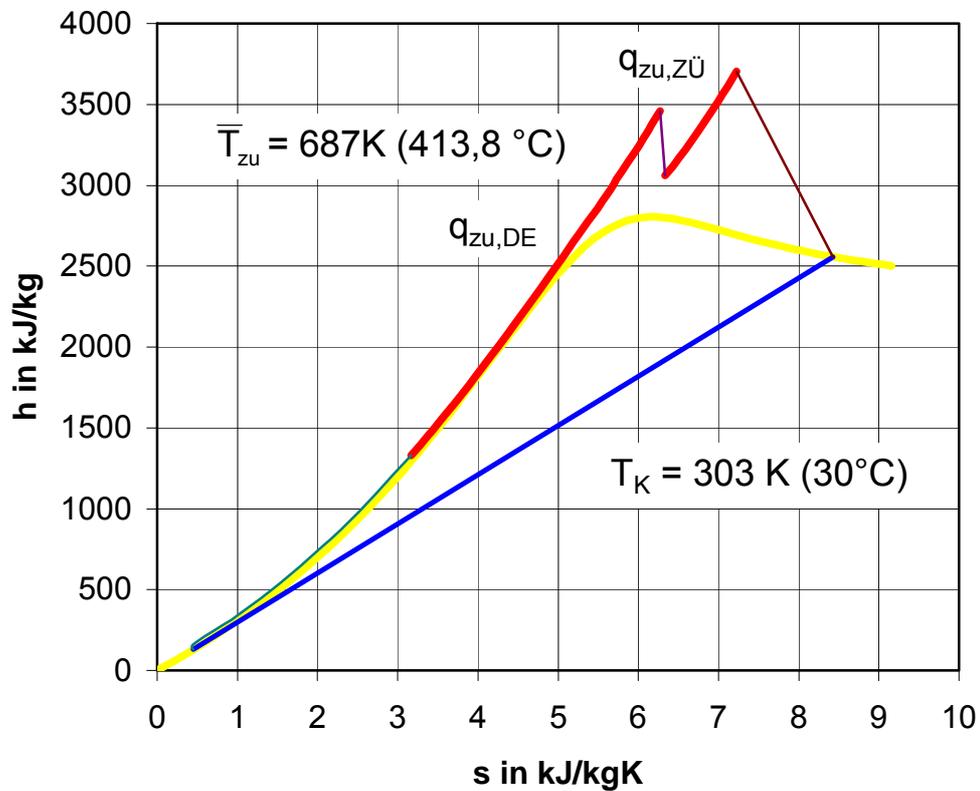


Bild 11: Berechnung der mittleren Prozesstemperaturen  $\bar{T}_{zu}$  und  $T_K$  eines modernen Wasserdampf-Kraftwerkes mit regenerativer Speisewasservorwärmung

## 5.2 HKW ohne Beeinflussung der Stromerzeugung durch Wärmeauskopplung

Wie bereits erwähnt, ist bei KWK-Anlagen des Typs A mit hohen Abwärmertemperaturen (Gasmotoren, Gasturbinen) kein zusätzlicher Brennstoffbedarf bei Wärmeauskopplung erforderlich. Der Brennstoffeinsatz für die Stromerzeugung bleibt unverändert.

Im Extremfall kann daraus abgeleitet werden, dass die Heizwärme kostenlos abgegeben werden kann. Das erscheint nicht gerechtfertigt, da sich in ihr ebenfalls Brennstoffenergie widerspiegelt. Daher ist die Umrechnung der abgegebenen Heizwärme in einen äquivalenten Stromverlust zu empfehlen. Es ist also die Frage zu beantworten, wie viel Strom aus der für Heizzwecke abgegebenen Energie erzeugt werden könnte.

Dazu werden wiederum reale Annahmen zu Prozessgütegrad und Kondensations-temperatur getroffen. Es wird vorgeschlagen, die bereits genutzten Werte von  $v_{KP} = 0,8$  sowie  $\bar{\vartheta}_{ab} = \bar{\vartheta}_K = 30 \text{ °C}$  zu verwenden. Damit ergibt sich der Stromverlust  $\Delta W_{SV}$  in Form einer elektrischen Arbeit zu

$$\Delta W_{SV} = Q_H \cdot \eta_C \cdot v_{KP} \quad \text{mit} \quad \eta_C = 1 - \frac{\bar{T}_K}{\bar{T}_H} \quad \text{und} \quad v_{KP} = \frac{\eta_{KP}}{\eta_C}.$$

Als Beispiel soll eine Gasturbine mit Abhitzekeessel dienen. Tabelle 2 zeigt Vorgaben und Ergebnisse. Der Vergleich der Bewertungsmethoden ist in Bild 12 grafisch dargestellt.

Tabelle 2: Bewertung einer Gasturbine mit Abhitzekeessel

|                                               |          |
|-----------------------------------------------|----------|
| <b>Daten der Gasturbinenanlage</b>            |          |
| Elektrische Leistung $P_{el}$ der Gasturbine: | 32,4 MW  |
| Wärmeabgabe $\dot{Q}_H$ im Abhitzekeessel:    | 44,5 MW  |
| Stromkennzahl $\sigma$ :                      | 0,727    |
| Vorlauftemperatur $\vartheta_V$ :             | 120 °C   |
| Rücklauftemperatur $\vartheta_R$ :            | 60 °C    |
| Gütegrad Dampfprozess $v_{KP}$ :              | 0,80     |
| Mittlere Heiztemperatur $\bar{T}_h$ :         | 362,3 K  |
| Kondensationstemperatur $T_K$ :               | 30 °C    |
| Carnot-Faktor $\eta_C$ :                      | 0,163    |
| Äquivalenter Stromverlust $\Delta W_{SV}$ :   | 5,814 MW |
| <b>Elektrische Bewertung (Stromverlust)</b>   |          |
| Brennstoffanteil für Stromerzeugung:          | 84,8 %   |
| Brennstoffanteil für Wärmelieferung:          | 15,2 %   |
| <b>Kalorische Bewertung</b>                   |          |
| Brennstoffanteil für Stromerzeugung:          | 57,9 %   |
| Brennstoffanteil für Wärmelieferung:          | 42,1 %   |

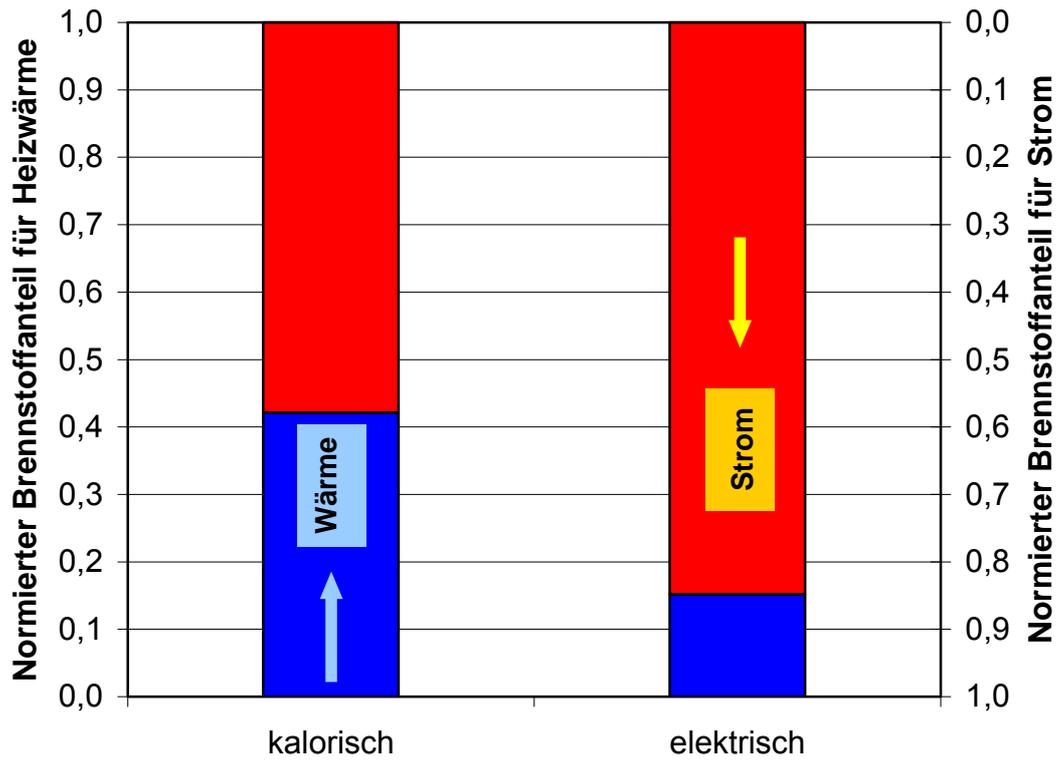


Bild 12: Vergleich der Bewertungsmethoden für ein HKW vom Typ A

### 5.3 HKW mit Beeinflussung der Stromerzeugung durch Wärmeauskopplung

Bei HKW mit Beeinflussung der Stromerzeugung (Typ B) kann analog zu HKW vom Typ A vorgegangen werden. Ein Beispiel zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Bewertung eines HKW mit Gegendruck-Dampfturbine

| <b>Daten der Dampfturbinenanlage</b>        |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| Elektrische Leistung $P_{el}$ :             | 35,7 MW   |
| Wärmeabgabe $\dot{Q}_H$ im Heizkondensator: | 110,4 MW  |
| Stromkennzahl $\sigma$ :                    | 0,323     |
| Vorlauftemperatur $\vartheta_V$ :           | 120 °C    |
| Rücklauftemperatur $\vartheta_R$ :          | 60 °C     |
| Gütegrad Dampfprozess $\nu_{KP}$ :          | 0,80      |
| Mittlere Heiztemperatur $\bar{T}_h$ :       | 362,3 K   |
| Kondensationstemperatur $T_K$ :             | 30 °C     |
| Carnot-Faktor $\eta_C$ :                    | 0,163     |
|                                             |           |
| Äquivalenter Stromverlust $\Delta W_{SV}$ : | 14,463 MW |
|                                             |           |
| <b>Elektrische Bewertung (Stromverlust)</b> |           |
| Brennstoffanteil für Stromerzeugung:        | 71,2 %    |
| Brennstoffanteil für Wärmelieferung:        | 28,8 %    |
|                                             |           |
| <b>Kalorische Bewertung</b>                 |           |
| Brennstoffanteil für Stromerzeugung:        | 75,6 %    |
| Brennstoffanteil für Wärmelieferung:        | 24,4 %    |

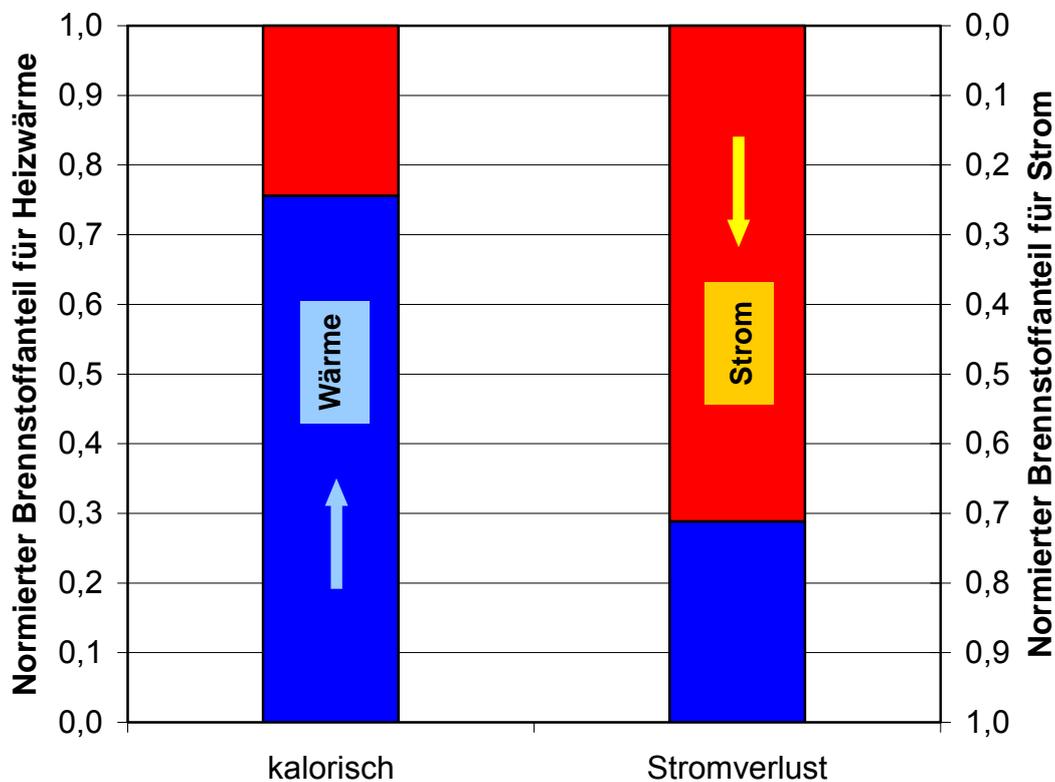


Bild 13: Vergleich der Bewertungsmethoden für ein HKW vom Typ B

## 6 Verbesserung der Wärmeauskopplung aus Dampfturbinen

Entscheidend für die KWK-Abwärmenutzung ist der Entnahmedruck bzw. die Temperatur des kondensierenden Abdampfes. Die Entnahme kann, wie aus Bild 14 ersichtlich, mehrstufig ausgeführt und damit thermodynamisch verbessert werden.

Gegenüber der in Bild 9 dargestellten Prozessverbesserung durch Steigerung der Prozesstemperaturen erscheint es hier gerechtfertigt, von einer positiven Auswirkung auf den KWK-Strom nach herkömmlicher Definition zu sprechen.

Die Arbeitsfähigkeit des zum Heizen entnommenen Abdampfes berechnet sich nach dem Carnot-Faktor, wobei eine Grädigkeit von 5 K in den Heizkondensatoren angenommen wurden:

|                            |                                                                     |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1-stufiger Heizkondensator | $\eta_{C1} = 1 - 303 / (125 + 273)$                                 |
| 2-stufiger Heizkondensator | $\eta_{C2} = 1 - 303 \cdot 2 / (125 + 95 + 2 \cdot 273)$            |
| 3-stufiger Heizkondensator | $\eta_{C3} = 1 - 303 \cdot 3 / (125 + 105 + 85 + 3 \cdot 273)$      |
| 4-stufiger Heizkondensator | $\eta_{C4} = 1 - 303 \cdot 4 / (125 + 110 + 95 + 80 + 4 \cdot 273)$ |

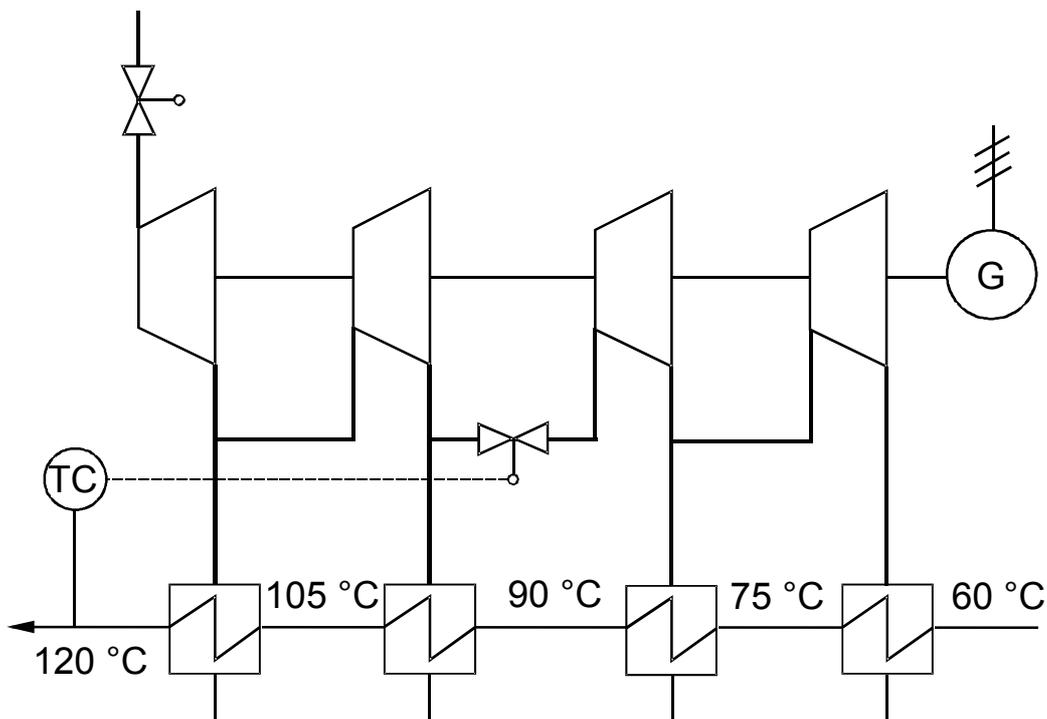


Bild 14: Heizwasserentnahme aus mehreren Abdampfentnahmen

Tabelle 4 zeigt über der Stufenzahl der Entnahmen die Arbeitsfähigkeit der Abdampfmenge, die mögliche Strommenge aus dieser Abdampfmenge und die Arbeitsfähigkeit im Heizwasser. Wir erkennen, dass die Stromverluste durch Dampfentnahme annähernd in der Arbeitsfähigkeit der Heizwärme wieder gefunden werden.

Stromverlust:  $\Delta W_{VW} = \eta_{C,1...4} \cdot v_{KP} \cdot q_h$  ;

Arbeitsfähigkeit der Heizwärme:  $\eta_{C,HW} = \eta_{C,1...4} \cdot v_{HeiKo}$

Tabelle 4: Einfluss der Stufenzahl der Entnahmen

| Zahl der Heizkondensatoren bei Heizwärmemetemperaturen von $\vartheta_{RL} / \vartheta_{VL} = 60 / 120 \text{ }^\circ\text{C}$ | Arbeitsfähigkeit des Abdampfes $\eta_{C,1\dots4}$ | Arbeitsverlust bei $v_{KP} = 0,8$ $\eta_{C,1\dots4} \cdot v_{KP}$ | Arbeitsfähigkeit der Heizwärme $\eta_{C,HW}$ | Arbeitsverlust / Arbeitsfähigkeit $\frac{\eta_{C,1\dots4} \cdot v_{KP}}{\eta_{C,HW}}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 - 60/120                                                                                                                     | 0,2387                                            | 0,1910                                                            | 0,1634                                       | 1,1687                                                                                |
| 2 - 60/90/120                                                                                                                  | 0,2089                                            | 0,1671                                                            | 0,1634                                       | 1,0228                                                                                |
| 3 - 60/80/100/120                                                                                                              | 0,1984                                            | 0,1587                                                            | 0,1634                                       | 0,9714                                                                                |
| 4 - 60/75/90/105/120                                                                                                           | 0,1931                                            | 0,1545                                                            | 0,1634                                       | 0,9454                                                                                |

Nur in großen Heizkraftwerken bzw. Kondensationskraftwerken mit Entnahmen lässt sich der Wärmeverluststrom gut berechnen oder messen. Auf viele andere und vor allem kleinere HKW könnte die mit einem realen Prozessgütegrad bewertete Arbeitsfähigkeit der Heizwärme recht gut als Äquivalent der Stromverluste übertragen werden. Das wäre eine praktikable Methode zur Beurteilung der Abwärmenutzung.

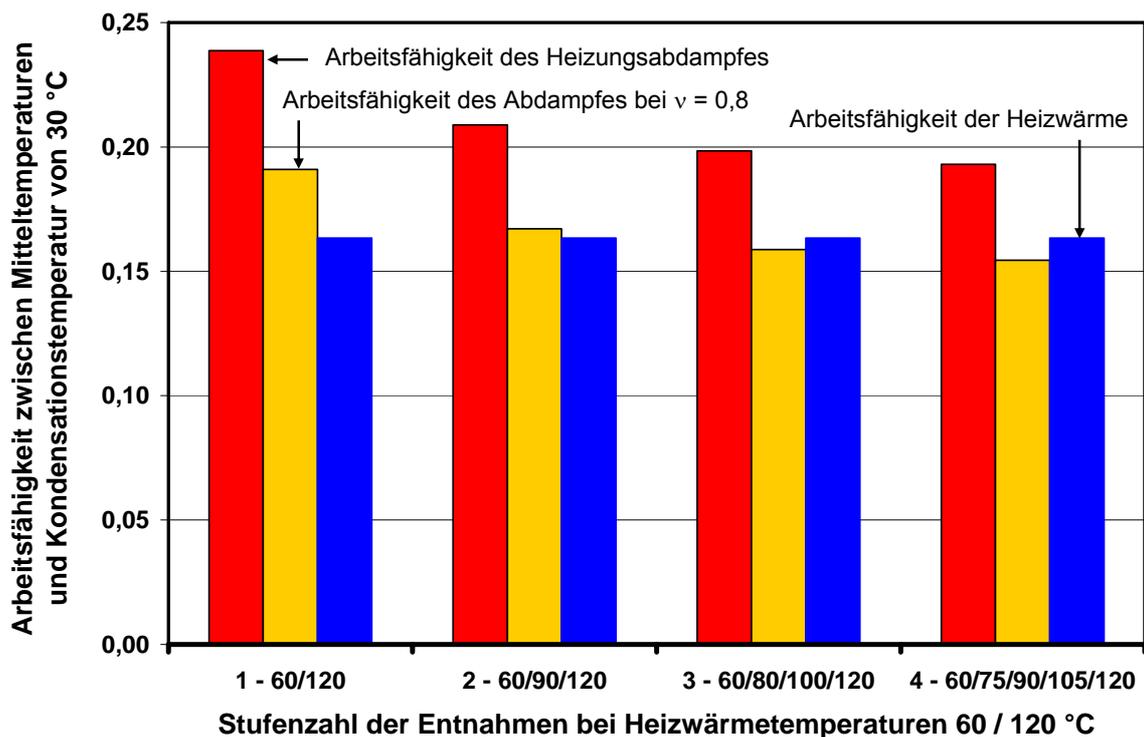


Bild 15: Vergleich der Arbeitsfähigkeiten

Aus Bild 15 geht hervor, dass der größte Gewinn beim Übergang zur zweistufigen Auskopplung auftritt. Danach sinkt er stark ab, so dass der höhere Aufwand nur in wenigen Fällen gerechtfertigt ist.

## 7 Zusammenfassung

Für Heizkraftwerke ist eine getrennte Bewertung von Strom und Wärme erforderlich. Vergleiche von Koppelprozessen mit getrennten Erzeugern sind wegen der von Fall zu Fall unterschiedlichen Strommengen ungenügend.

Wir vertreten das elektrische bzw. besser das strombasierte Verfahren. Es berücksichtigt gegenüber dem exergetischen Modell den realen Wandlungsprozess und arbeitet mit ohnehin zu bestimmenden elektrischen Größen.

Anlagen mit Stromverlust (Wasserdampf-Kondensation) können relativ einfach über den Stromverlust bei Heizwasserentnahme bewertet werden. Vor allem bei kleineren HKW, bei denen der Wärmeverluststrom nur schwer ermittelt werden kann, ist die mit einem realen Prozessgütegrad bewertete Arbeitsfähigkeit der Heizwärme als äquivalenter Stromverlust nutzbar.

Bei Anlagen ohne Stromverlust ist eine dementsprechende sinnvolle Zuordnung der Brennstoffenergie vorzunehmen. Dazu wird vorgeschlagen, vom Stromerzeugungspotenzial der ausgekoppelten Heizwärme unter festgelegten, realistischen Bedingungen für den Kreisprozess und die Wärmeabfuhr auszugehen. Dieses Potenzial entspricht dem Stromverlust  $\Delta W_{SV}$  für diese Art der KWK-Anlagen.

Für alle Typen von KWK-Anlagen kann der Brennstoffaufwand demzufolge nach Ermittlung des Stromverlustes in der einfachen Form

$$Q_{Br,Strom} = \frac{W - \Delta W_{SV}}{W} \cdot Q_{Br} \quad \text{und} \quad Q_{Br,Wärme} = \frac{\Delta W_{SV}}{W} \cdot Q_{Br} \quad \text{mit} \quad W = W_{el} + \Delta W_{SV}$$

auf Strom und Heizwärme aufgeteilt werden. Diese Aufteilung kann sowohl in der energetischen als auch in der ökonomischen Bilanzierung verwendet werden.

Wenn der geringe Anteil des Brennstoffs an der Heizwärme betrachtet wird, werden die wirklichen Vorzüge der Kraft-Wärme-Kopplung deutlich. Sie liegen in der Ablösung der Heizkessel mit ihrem hohen Brennstoffbedarf und nicht im Ersatz der reinen Stromerzeugung durch KWK.

Das wesentliche Ziel der KWK ist die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Brennstoffeinsparung in der Heizungstechnik. Da verschiedene Brennstoffe bezogen auf ihren Energiegehalt unterschiedliche Mengen an Kohlenstoff enthalten und somit bei der Verbrennung unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Mengen freisetzen, sind die bisherigen Methoden der Bewertung von Brennstoffmengen ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Anteils unbefriedigend.

Neben der Durchsetzung einer sachgerechten Bewertung von Strom und Wärme im oben dargestellten Sinn ist die Einbeziehung der CO<sub>2</sub>-Emissionen daher für die Zukunft zu ergänzen.

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| „KWK-Strom“ - Was ist das?.....                                        | 1  |
| 1 Einführung.....                                                      | 1  |
| 2 Charakteristik der Heizkraftwerke.....                               | 2  |
| 3 Probleme der Bewertungsmethoden .....                                | 3  |
| 3.1 Vergleich von ungekoppelter und gekoppelter Erzeugung.....         | 3  |
| 3.2 Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung und Brennstoffeinsparung .....      | 5  |
| 3.3 Brennstoffaufteilung auf Strom und Wärme .....                     | 8  |
| 4 Effizienz und Brennstoffeinsparung.....                              | 10 |
| 5 Vorschlag einer Berechnungsmethodik.....                             | 13 |
| 5.1 Berechnung am Beispiel eines Kondensationskraftwerks.....          | 13 |
| 5.2 HKW ohne Beeinflussung der Stromerzeugung durch Wärmeauskopplung   | 15 |
| 5.3 HKW mit Beeinflussung der Stromerzeugung durch Wärmeauskopplung .. | 17 |
| 6 Verbesserung der Wärmeauskopplung aus Dampfturbinen .....            | 18 |
| 7 Zusammenfassung .....                                                | 20 |