

Joachim Zschernig (†) und Thomas Sander

Bewertung von Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung

1 Einführung

Durch die gekoppelte Erzeugung von Elektroenergie und Wärme („Kraft-Wärme-Kopplung“/KWK) können bis zu ca. 40 % Brennstoff gegenüber der getrennten Erzeugung eingespart werden. Die energetischen und ökologischen Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung sind in der Energiewirtschaft, der Energiepolitik und im Umweltschutz unumstritten. Der Gesetzgeber hat zur Förderung dieser Technologie staatliche Verordnungen erlassen, die sowohl die gekoppelte Bereitstellung von Strom und Wärme als auch den Einsatz der Abwärme von Stromerzeugern im Heizungsbereich begünstigen sollen.

Die Vorgehensweise bei der Bewertung des Koppelprozesses ist jedoch oft unzureichend und muss 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 der CARNOT-Faktor als Vergleichswirkungsgrad eines von CARNOT entworfenen idealen Prozesses.

In diesem Beitrag wird eine Bewertungsmethode vorgeschlagen, die sowohl den Brennstoffaufwand für Elektroenergie und Wärme korrekt darstellt als auch das Verhältnis von Aufwand und Nutzen für energiewirtschaftliche und ökologische Entscheidungen liefert.

2 Probleme der Bewertungsmethoden

2.1 Charakteristik der Heizkraftwerke

Die Wärmeauskopplung aus Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung kann deren Strom-

erzeugung mehr oder weniger bzw. gar nicht beeinflussen. Es können daher zwei Typen von KWK-Anlagen unterschieden werden. Bei Heizkraftwerken (HKW) vom Typ A (Kolbenmaschinen, Brennstoffzellen, Gasturbinen) tritt durch die Wärmeauskopplung keine oder bestenfalls eine geringfügige Beeinflussung der Stromerzeugung auf. Im Falle von Heizkraftwerken vom Typ B (Dampfturbinen-HKW, Gas- und Dampfturbinen (GuD)-HKW) wird die Temperatur der Wärmeabfuhr auf die für die Heizungssysteme erforderlichen Werte erhöht, was bei gleichem Brennstoffeinsatz zu einem Stromverlust ΔW_{SV} führt. Das bedeutet, dass potenziell weniger Elektroenergie bereitgestellt werden kann, sodass der erforderliche spezifische Brennstoffverbrauch pro kWh Elektroenergie ansteigt. Damit kann der erhöhte Brennstoffbedarf der ausgekoppelten Heizwärme als Aufwand zugeordnet werden. Die unterschiedliche Charakteristik beider Typen von Heizkraftwerken hat wesentlichen Einfluss auf deren Bewertung.

2.2 Vergleich von ungekoppelter und gekoppelter Erzeugung

Eine häufig angewendete Vergleichsrechnung der ungekoppelten und gekoppelten Bereitstellung von Elektroenergie und Wärme weist den geringeren Brennstoffbedarf der gekoppelten Erzeugung aus. Dabei wird normalerweise ein die Bilanz schließendes zusätzliches Ersatzkraftwerk nicht berücksichtigt. Damit wird nur der gleiche Heizwärmebedarf gewählt, die Elektroenergieanteile ändern sich jedoch mit dem Verhältnis zwischen Strom- und Wärmeabgabe (Stromkennzahl σ) im Heizkraftwerk.

Die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) führt zur Brennstoffeinsparung gegenüber der getrennten Bereitstellung von Elektroenergie und Heizwärme und ist daher ein wesentliches Instrument zur Senkung der CO₂-Emissionen. Folglich strebt die EU das Ziel an, die Stromerzeugung aus KWK zu verdoppeln. Zur Bewertung der Effizienz werden jedoch oft Methoden angewendet, die dem Prozess nicht gerecht werden. Weitere Probleme sind die korrekte Definition des Stromes aus KWK, d. h. die physikalisch begründete Unterteilung der gelieferten Elektroenergie in einen gekoppelt und einen ungekoppelt bereitgestellten Anteil, sowie die Aufteilung des benötigten Brennstoffs auf Elektroenergie und Wärme. Der Beitrag schildert ausgehend von den bestehenden Problemen einen Lösungsvorschlag für eine objektive Bewertung.

The co-generation of heat and power (CHP) reduces fuel consumption in comparison with the separate production of heat and power. CHP is thus an important instrument for the reduction of CO₂ emissions. Consequently, it is the ambition of the European Union to double the share of CHP in power generation. The methods applied for the assessment of CHP efficiency, however, are often inappropriate. Further problems are accurate definition of the power from CHP and assignment of the fuel consumption to the generated power and heat. Based on the existing problems, the paper offers suggestions for an objective assessment.

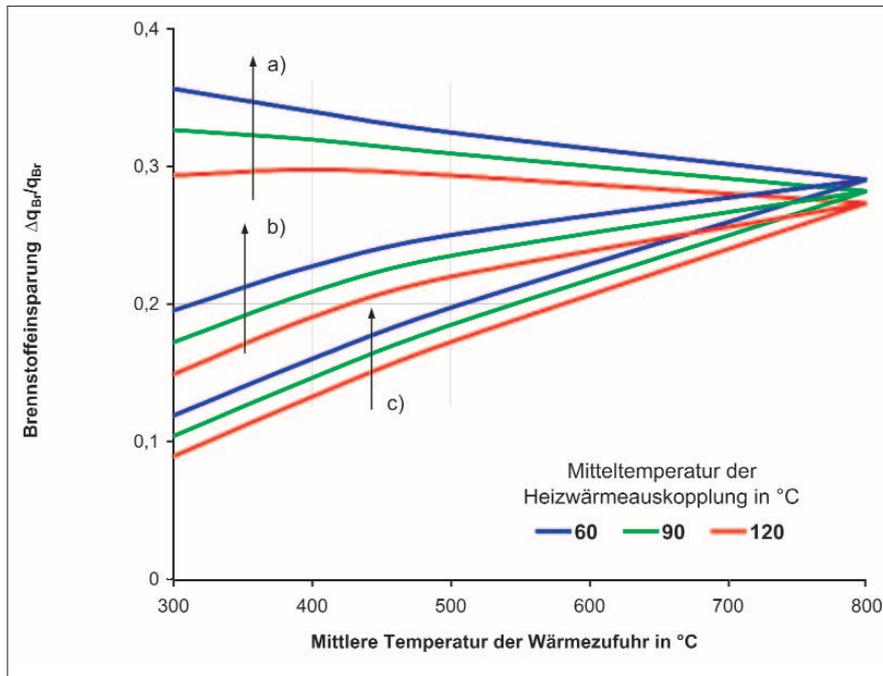


Bild 1. Normierte Brennstoffeinsparung für die Varianten a) – c)

Folgende Möglichkeiten der Brennstoff-Einsparung (Bild 1) und der Endenergien können verglichen werden:

- Gegenüberstellung von getrennter Erzeugung zu Heizkraftwerken, gleiche Wärme- und ungleiche Elektroenergiebereitstellung
- Gegenüberstellung von getrennter Erzeugung zu Heizkraftwerken mit gleicher Wärmebereitstellung im Heizkraftwerk und die Bilanz schließende Elektroenergiebereitstellung im Ersatzkraftwerk
- Gegenüberstellung von getrennter Erzeugung zu Heizkraftwerken mit gleicher Wärmebereitstellung im Heizkraftwerk und die Bilanz schließende Elektroenergiebereitstellung im Ersatzkraftwerk; maximale thermodynamische Qualität in den Kraftwerken.

Die Erzeugung von Elektroenergie und Wärme ausschließlich mit Kraft-Wärme-Kopplung in Heizkraftwerken ist nicht möglich, weil die Endenergien je nach Bedarf an Elektroenergie und Wärme nicht im festen Verhältnis zueinander stehen, wie es der Charakteristik der meisten reinen Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung entspricht. Diesem Problem soll nachgegangen und der Nachweis geführt werden, dass die Elektroenergieerzeugung im Heizkraftwerk kaum im Zusammenhang mit der Brennstoffeinsparung durch Kraft-Wärme-Kopplung steht. Daher muss die Wärme unabhängig von der Elektroenergie bewertet werden. Zudem ist nur eine Bewertung über den betrachteten Prozess, d. h. ohne Zuhilfenahme von Referenzen (z. B. zu definierende Vergleichs-Heizkraftwerks- und -Kraftwerks-Prozesse), weitgehend frei von subjektiven Einflüssen.

2.3 Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung und Brennstoffeinsparung

In Bild 2 werden die verschiedenen Sichtweisen zur Stromerzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung deutlich. Die Dampfaufteilung im Parallel-Prozess ist nicht gerechtfertigt, da jede Teildampfmenge vom Frischdampf bis zur Entnahme identisch ist. Der weitere Weg der Teildampfmenge entscheidet sich erst nach der Anzapfung.

Zur Vergütung bzw. Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung nach der KWK-Strom-Methode (AGFW¹-Richtlinie FW 308) wird die Elektroenergie als Maßstab der Brennstoffeinsparung verwendet. Dabei wird als Heizwärme die im Heizkraftwerk gemessene Heizwärmeabgabe verwendet, d. h., darin sind auch die im Heiznetz bis zu den Kunden auftretenden Wärmeverluste und die in Absorptions-Kältemaschinen verwendete Heizwärme enthalten. Das führt zu dem Ergebnis, dass Wärmeverluste belohnt 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. Es ist also zu unterscheiden zwischen

- Brennstoffeinsparung durch den Kreisprozess verbessernde Maßnahmen (Steigerung von elektrischem Wirkungsgrad η_{el} und Stromkennzahl σ), die sowohl bei Kondensationskraftwerken als auch bei Heizkraftwerken wirksam sind und sehr wenig mit der Kraft-Wärme-Kopplung zu tun haben, und
- Brennstoffeinsparungen durch die Abwärmenutzung bei Heizkraftwerken, wodurch zusätzlicher Brennstoff in Heizkesseln vermieden wird.

2.4 Brennstoffaufteilung auf Elektroenergie und Wärme

Betriebswirtschaftlich gesehen können die Brennstoffe der Elektroenergie und Wärme beliebig zugeordnet werden. Wenn allerdings politische Eingriffe in die Kostenstruktur vorgenommen werden, dann sollten Aufwand und Nutzen in gerechter Relation berücksichtigt werden. Von den zahlreichen Methoden der Brennstoffaufteilung wird oft das kalorische Verfahren verwendet. Demgegenüber schlagen wir ein elektrisches Verfahren vor. Beide Verfahren verwenden

¹ Arbeitsgemeinschaft Wärme und Heizkraftwirtschaft e. V.

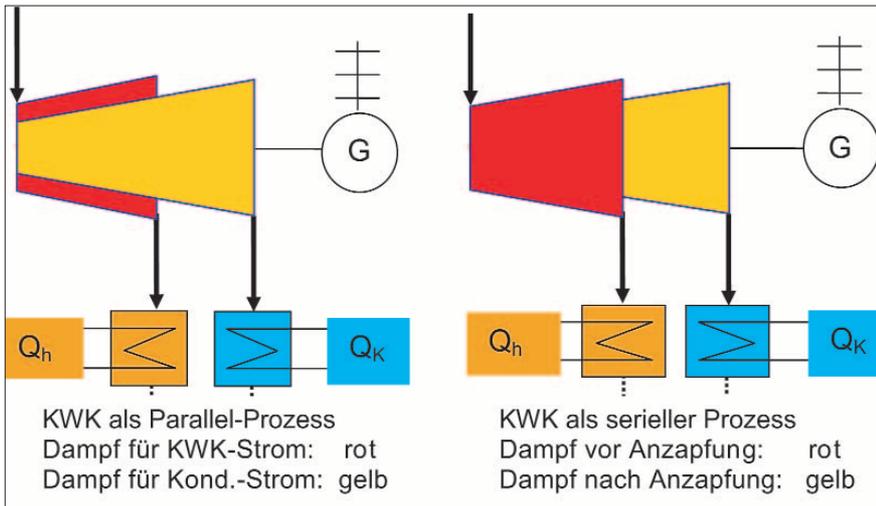


Bild 2. Darstellungsmöglichkeiten der Dampfströme in einer Entnahme-Kondensations-Turbine

als Basis nur die Endenergien Elektroenergie und 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 die Lieferung von Elektroenergie und Heizwärme wird kalorisch gewichtet, d. h., die Abwärme (Heizwärme) und das „Zusatzprodukt“ Elektroenergie resultieren aus entsprechend dem Energiegehalt gleich gewichteten Brennstoffanteilen. Entropiebilanzen belegen, dass diese Methode thermodynamisch unzulässig ist. Leider wird der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik bis heute wenig angewendet.

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 (Bild 3). 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 aufgrund des im Vergleich zur Kondensation erforderlichen höheren Temperaturniveaus der Heizwärme einen Verlust an elektrischer Leistung, den sogenannten Stromverlust. Gegenüber dem exergetischen wird folglich beim elektrischen

Verfahren der Heizwärme nicht die gesamte Exergie ange-rechnet, sondern nur soviel, wie mit realen Technologien in elektrische Energie transformiert werden kann.

Da der weitaus größere Brennstoffanteil für die Erzeugung von Elektroenergie benötigt wird, ist nur ein geringer Brennstoffbedarf für die Heizwärme zu berücksichtigen. Dieser entspricht bei Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung vom Typ B dem Anteil des Stromverlustes durch Wärmeentnahme.

3 Effizienzsteigerung

Vergleicht man durch Erhöhung der mittleren Temperaturen der Wärmezufuhr hervorgerufene Effizienzsteigerungen von Heizkraftwerken und Kondensationskraftwerken, so sind die Wirkungsgrade bei der Erzeugung von Elektroenergie im Heizkraftwerk aufgrund der höheren Abwärmertemperaturen grundsätzlich geringer als im Kondensationskraftwerk. Es steht daher außer Zweifel, dass der KWK-Strom W_{KWK} im Heizkraftwerk nach Typ B ineffizienter erzeugt wird als der Kondensationsstrom. Der Vorteil des Heizkraftwerks ergibt sich aus der zusätzlichen Wärmenutzung.

4 Vorschlag einer Berechnungsmethodik

4.1 Berechnung am Beispiel eines Kondensationskraftwerks

Im Falle eines Kondensationskraftwerkes (Dampfkraftwerk) kann der elektrische Wirkungsgrad η_{el} als Verhältnis der elektrischen Nutzleistung P_{el} und der Brennstoff-

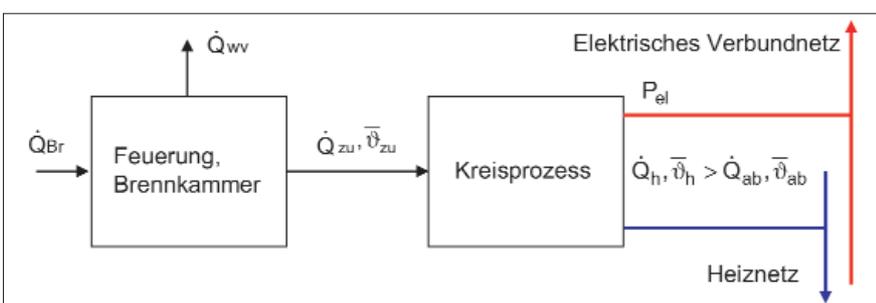


Bild 3. Energiefluss vom Brennstoff zu den Endenergien Strom und Wärme

wärmeleistung \dot{Q}_{BR} unter Berücksichtigung des Feuerungswirkungsgrades η_F , des CARNOT-Wirkungsgrades η_C als maximal erreichbarer Wirkungsgrad eines idealen und damit verlustfreien thermischen Energieumwandlungsprozesses sowie des Prozess-Gütegrades v_{KP} berechnet werden. Der Gütegrad v_{KP} ergibt sich dabei aus dem CARNOT-Wirkungsgrad η_C und dem Wirkungsgrad des Kreisprozesses η_{KP} . \dot{Q}_{zu} ist die dem Kreisprozess zugeführte Wärme, \bar{T}_{zu} und \bar{T}_{ab} sind die mittleren Temperaturen der Wärmez- bzw. -abfuhr. Als Kondensationstemperatur wird einheitlich $\vartheta_{ab} = \vartheta_K = 30^\circ\text{C}$ als guter Jahresdurchschnittswert für Dampfkraftwerke verwendet.

Mit $\eta_F = \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{Q}_{Br}}$, $\eta_C = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$ und $v_{KP} = \frac{\eta_{KP}}{\eta_C}$ ergibt sich

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Br}} = \eta_F \cdot \eta_C \cdot v_{KP}$$

Die häufig vorgeschlagene, aber kaum angewendete exergetische Methode ist insofern nicht unproblematisch, als die Temperatur des Kühlkreislaufes im Dampfkraftwerk nur einen geringen Spielraum für die Nutzung sehr niedriger Temperaturen ($< 20^\circ\text{C}$) ermöglicht. Die Prozesse mit höheren Abwärmertemperaturen, wie bei Gasmotoren, Gasturbinen und Brennstoffzellen, könnten durch nachgeschaltete Dampfkraftprozesse bezüglich ihrer Ausbeute an Elektroenergie verbessert werden, die Kondensationstemperatur würde dann wieder bei $\vartheta_K = 30^\circ\text{C}$ liegen.

Eine Proberechnung für $\eta_F = 0,95$ und $v_{KP} = 0,85$ ergibt recht gute Vergleichswerte η_{el} für hoch entwickelte Dampfkraftwerke, wie in Bild 4 dargestellt ist.

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

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

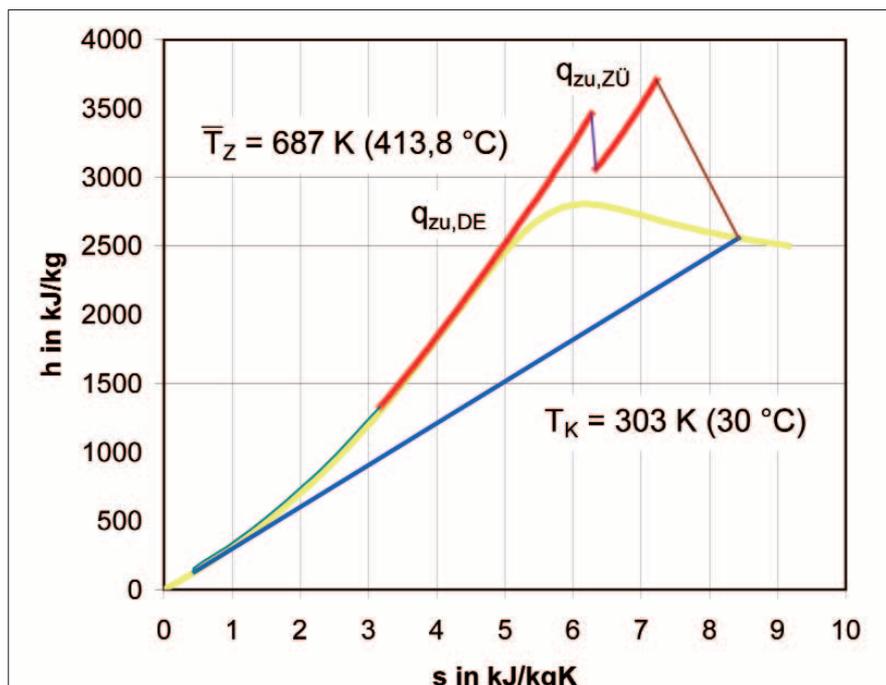


Bild 4. Berechnung der mittleren Prozesstemperaturen \bar{T}_{zu} und T_K eines modernen Wasserdampf-Kraftwerkes mit regenerativer Speiswasservorwärmung

4.2 Heizkraftwerke ohne Beeinflussung der Elektroenergiebereitstellung durch Wärmeauskopplung

Bei Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung des Typs A mit hohen Abwärmertemperaturen (Gasmotoren, Gasturbinen) ist kein zusätzlicher Brennstoffbedarf bei Wärmeauskopplung erforderlich. Der Brennstoffeinsatz für die Bereitstellung von Elektroenergie 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 wird die Umrechnung der abgegebenen Heizwärme Q_H in einen äquivalenten Stromverlust mit Hilfe der Mitteltemperatur \bar{T}_H der Heizwärmelieferung empfohlen. Es ist also die Frage zu beantworten, wie viel Elektroenergie aus der für Heizzwecke abgegebenen Energie erzeugt werden könnte.

Dazu werden wiederum reale Annahmen zu Prozessgütegrad und Kondensationstemperatur getroffen. Es wird vorgeschlagen, Werte von $v_{KP} = 0,80$ sowie $\vartheta_{ab} = \vartheta_K = 30^\circ\text{C}$ zu verwenden. Damit ergibt sich der Stromverlust ΔW_{SV} in Form einer elektrischen Arbeit zu

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

Als Beispiel dient eine Gasturbine mit Abhitzekegel. Der Vergleich der Bewertungsmethoden ist in Bild 5 grafisch dargestellt.

4.3 Heizkraftwerke mit Beeinflussung der Elektroenergiebereitstellung durch Wärmeauskopplung

Bei Heizkraftwerken, bei denen die Lieferung von Elektroenergie durch die Wärmeauskopplung beeinflusst wird (Typ B), kann analog zu Heizkraftwerken vom Typ A vorgegangen werden. Einen Vergleich der Bewertungsmethoden am Beispiel eines Heizkraftwerkes mit Gegendruck-Dampfturbine zeigt Bild 6.

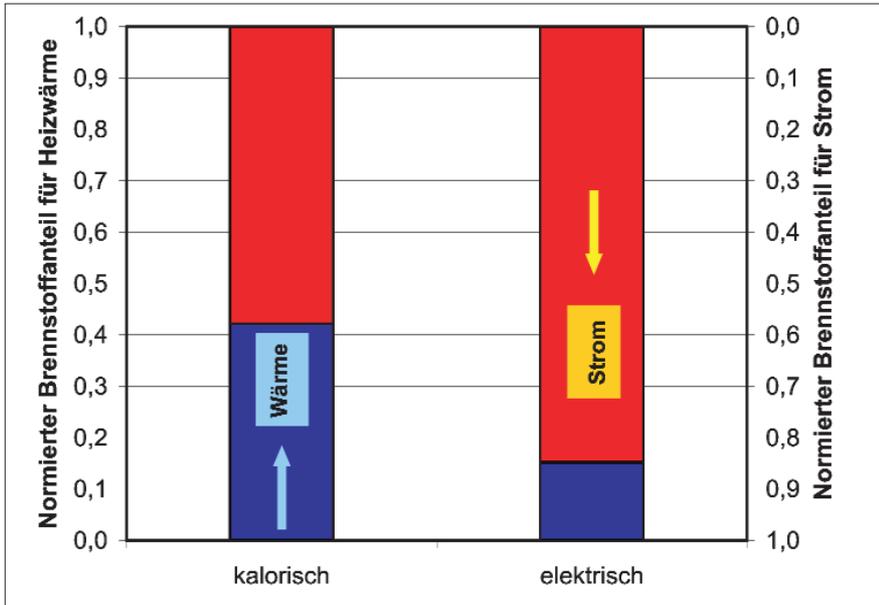


Bild 5. Vergleich der Bewertungsmethoden für ein Heizkraftwerk vom Typ A

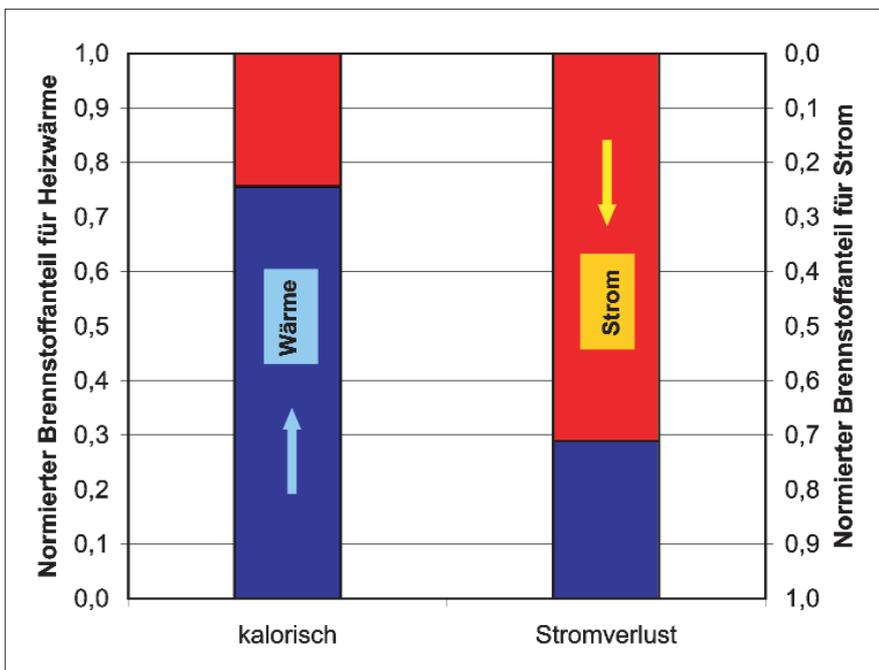


Bild 6. Vergleich der Bewertungsmethoden für ein Heizkraftwerk vom Typ B

5 Zusammenfassung

Für Heizkraftwerke ist eine getrennte Bewertung von Elektroenergie und Wärme erforderlich. Vergleiche von Koppelprozessen mit getrennter Energiebereitstellung sind wegen der von Fall zu Fall unterschiedlichen Elektroenergielieferung ungenügend. Wir vertreten das elektrische bzw. 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 Heizwärmeentnahme bewertet werden. Vor allem bei kleineren Heizkraftwerken, 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 Potenzial an erzeugbarer Elektroenergie der ausgekoppelten Heizwärme unter festgelegten, realistischen

Bedingungen für den Kreisprozess und die Wärmeabfuhr auszugehen. Dieses Potenzial entspricht dem Stromverlust ΔW_{SV} für diese Art der Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung.

Für alle Typen von Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung kann der Brennstoffaufwand Q_{Br} demzufolge nach Ermittlung des Stromverlustes in der einfachen Form

$$Q_{Gr,Strom} = \frac{W}{\Delta W_{SV}} \cdot Q_{Gr} \quad \text{und} \quad Q_{Gr,Wärme} = \frac{\Delta W_{SV}}{W} \cdot Q_{Gr}$$

mit $W = W_{el} + \Delta W_{SV}$

auf Strom W_{el} und Wärme Q_H aufgeteilt werden. Diese Aufteilung kann sowohl in der energetischen als auch in der

ökonomischen Bilanzierung verwendet werden. Betrachtet man den geringen Anteil des Brennstoffs an der Heizwärme, 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 Erzeugung von Elektroenergie durch die Kraft-Wärme-Kopplung.

Manuskripteingang: 15.3.2007
Angenommen am: 7.5.2007



Zschernig, Joachim

Prof. Dr.-Ing. habil.

Studium Wärmetechnik von 1963 bis 1969 an der TU Dresden ♦ 1973 Promotion zum Dr.-Ing. ♦ 1991 Habilitation zum Dr.-Ing. habil. ♦ von 1969 bis 1973 wissenschaftlicher Assistent an der TU Dresden ♦ von 1973 bis 1982 wissenschaftlicher Mitarbeiter und von 1982 bis 1990 Forschungsgruppenleiter am Institut für Energieversorgung Dresden ♦ von 1990 bis 1993 Beratender Ingenieur in der Dresdner Ökotherm GmbH ♦ von 1993 bis 2003 Professor für Energiewirtschaft, ab 2003 Professor für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft und von 1996 bis 2003 Direktor des Instituts für Energietechnik, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden ♦ ab 2006 im Ruhestand ♦ 2007 in Dresden verstorben



Sander, Thomas

Dr.-Ing.

Studium Energieanlagentechnik von 1982 bis 1987 an der TU Dresden ♦ 1994 Promotion zum Dr.-Ing. ♦ von 1987 bis 1989 Tätigkeit im Ingenieurbetrieb der Energieversorgung Berlin ♦ seit 1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter/Oberassistent am Institut für Energietechnik, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden