

Kennzahlen des KWK-Prozesses

Die Mathematik der Kraft-Wärme-Kopplung

Die effiziente Nutzung von Energie hat in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Gerade im Zusammenhang mit der Energiewende stellen sich die Fragen: Wie wird die Strom- und Wärmeversorgung künftig aussehen? Wie kann diese günstig, sicher und umweltverträglich gestaltet werden? Welche Rolle wird die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) künftig spielen? Die KWK gilt als die Effizienztechnologie schlechthin. Aber warum ist die mit der Stromerzeugung gekoppelte Wärmeerzeugung effizienter und wie kann Effizienz bei KWK-Anlagen gemessen werden?

Wie effizient ist die Wärmeauskopplung aus einer Stromerzeugungsanlage? Was verändert sich, wenn aus einer Stromerzeugungsanlage Wärme ausgekoppelt wird? Wie viel Brennstoff muss für die Auskopplung von Wärme aus einer Stromerzeugungsanlage aufgewendet werden? Wie kann die Wärmeauskopplung aus einer Stromerzeugungsanlage mit anderen Prozessen der Wärmeerzeugung verglichen werden?

Diese Fragen rücken in den vergangenen Jahren vor allem im Zusammenhang mit der Umsetzung der Energieeffizienzrichtlinie in deutsches Recht, dem Energieeinspargesetz und der Energieeinsparverordnung in den Vordergrund. Bei Städten und Kommunen, aber auch in der Wohnungswirtschaft besteht ein verstärktes Interesse, Energieeinsatz und CO₂-Emissionen sowohl in der Strom- als auch in der Wärmeversorgung im Rahmen von Energiebilanzen korrekt zu dokumentieren. In diesem Zusammenhang tauchen in der Literatur immer wieder neue Methoden auf, wie der Brennstoff-

einsatz bei der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung auf die beiden Koppelprodukte aufzuteilen ist. Vielfach wird dabei die Physik des KWK-Prozesses, vor allem der erste und zweite Hauptsatz der Thermodynamik, außer Acht gelassen. Der KWK-Prozess lässt sich jedoch auch mit gemessenen Werten und den daraus abgeleiteten Kennzahlen beschreiben, ohne in thermodynamische Kreislaufrechnungen einsteigen zu müssen.

Der Prozess der Wärmeauskopplung aus einer thermodynamischen Stromerzeugungsanlage

Bei allen thermodynamischen Prozessen geht es primär darum, Brennstoff in Wärme und Wärme in mechanische Arbeit, und letztlich die mechanische Arbeit in Strom umzuwandeln. Um über die Effizienz, den Brennstoffeinsatz und die CO₂-Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung eine Aussage machen zu können, ist es zunächst wichtig, die Effizienz des Stromerzeugungsprozesses ohne Wärmeauskopplung zu kennen.

Beispiel – Kennzahlen der Stromerzeugung ohne Wärmeauskopplung

Eine Stromerzeugungsanlage, hier am Beispiel einer Dampfturbinenanlage erklärt, erzeugt z. B. mit 100 Einheiten Brennstoffenergie 40 Einheiten Strom.

Messwerte ohne Wärmeauskopplung:

Brennstoff	W = 100 MWh
Strom	A = 40 MWh

Der Wirkungsgrad der Stromerzeugung beträgt damit $40/100 = 40\%$:

Wirkungsgrad der Stromerzeugung	$\eta_{el} = A/W$ $\eta_{el} = 0,4 \text{ MWh/MWh}$
---------------------------------	--

Dies beantwortet die Frage, wie viel Strom mit 100 Einheiten Brennstoffwärme erzeugt werden kann. Eine andere Frage wäre: Wie viel Brennstoff muss aufgewendet werden, um 1 MWh Strom zu erzeugen? Dieser Kehrwert des Wirkungsgrads wird als Energiebedarfszahl bezeichnet. Im gewählten Beispiel beträgt die Energiebedarfszahl: $100 \text{ MWh Brennstoffwärme} / 40 \text{ MWh Strom} = 2,5 \text{ MWh/MWh}$:

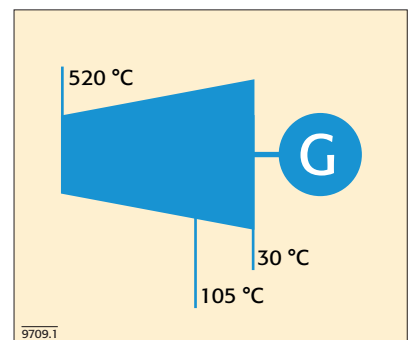
Energiebedarfszahl der Stromerzeugung	$\epsilon_A = W/A$ $\epsilon_A = 2,5 \text{ MWh/MWh}$
---------------------------------------	--

Beide Werte können mit anderen Prozessen der Stromerzeugung verglichen werden. Beide Kennzahlen sind also geeignet, um die Effizienz des thermodynamischen Prozesses und des Prozesses der Stromerzeugung zu vergleichen.

Was ändert sich durch die Wärmeauskopplung?

Auch diese Frage lässt sich am besten anhand eines Beispiels erklären.

Beispiel – Stromerzeugung mit Wärmeauskopplung



Ohne Wärmeauskopplung wird der Dampf am kalten Ende der Turbine kondensiert. Dies geschieht in einem Kondensator, der die Kondensations-



Dipl.-Wirt.-Ing. **Ullrich Müller**, Stellvertretender Bereichsleiter Energiewirtschaft und Politik, AGFW Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt (Main)

wärme bei einer Temperatur etwas über Umgebungstemperatur – im Beispiel bei rd. 30 °C – an die Umgebung abführt. Wird aus der Anlage Wärme ausgekoppelt, z. B. bei 105 °C, steht in der Turbine nur noch eine geringere Temperaturdifferenz zur Stromerzeugung zur Verfügung. Es entsteht ein messbarer Stromverlust.

Messwerte bei maximaler Wärmeauskopplung, wobei der gesamte Dampfmassenstrom bei 105 °C aus der Turbine entnommen wird:

Wärmeauskopplung	$Q_{\text{KWK}} = 61 \text{ MWh}$
KWK-Stromerzeugung	$A_{\text{KWK}} = 29 \text{ MWh}$

Die Stromerzeugung beträgt dann nur noch 29 Einheiten Strom gegenüber vorher 40 Einheiten ohne Wärmeauskopplung:

Stromverlust	$\Delta A = A - A_{\text{KWK}}$ $\Delta A = 11 \text{ MWh}$
--------------	--

Der durch die Wärmeauskopplung verursachte und gemessene Stromverlust beträgt im Beispiel 11 Einheiten.

Welche Kennzahlen braucht es, um den KWK-Prozess zu beschreiben?

Der Prozess der Wärmeauskopplung aus einer Dampfturbinenanlage lässt sich mit einigen Kennzahlen beschreiben.

Die Stromverlustkennzahl

Das Verhältnis von Stromverlust zu Wärmeauskopplung wird als Stromverlustkennzahl bezeichnet:

Stromverlustkennzahl	$\beta = \Delta A / Q_{\text{KWK}}$ $\beta = 0,18 \text{ MWh/MWh}$
----------------------	---

Die Stromverlustkennzahl kennzeichnet die Veränderung der Stromerzeugung durch die Wärmeauskopplung aus der Turbine. Sie ist abhängig von der Temperatur, mit der der Dampf aus der Turbine ausgekoppelt wird. Je höher die Auskopplungstemperatur, umso größer wird die Stromverlustkennzahl.

Der KWK-Nutzungsgrad

Der KWK-Nutzungsgrad ist das Verhältnis von Output (KWK-Strom-

erzeugung + Wärmeauskopplung) zu Input (KWK-Brennstoff). Nutzungsgrad im Unterschied zu Wirkungsgrad deshalb, weil hier zwei Produkte ins Verhältnis zum eingesetzten Brennstoff gesetzt werden:

KWK-Nutzungsgrad	$\zeta_{\text{KWK}} = (A_{\text{KWK}} + Q_{\text{KWK}}) / W_{\text{KWK}}$ $\zeta_{\text{KWK}} = 0,9 \text{ MWh/MWh}$
------------------	---

Bei Dampfturbinen wird der KWK-Nutzungsgrad vor allem durch den Wirkungsgrad des Dampferzeugers bestimmt und liegt zwischen 80 und 90 %.

Die KWK-Stromkennzahl

Die KWK-Stromkennzahl ist das Verhältnis der beiden Output-Produkte KWK-Strom zu ausgekoppelter Wärme im KWK-Betrieb:

KWK-Stromkennzahl	$\sigma_{\text{KWK}} = A_{\text{KWK}} / Q_{\text{KWK}}$ $\sigma_{\text{KWK}} = 0,476 \text{ MWh/MWh}$
-------------------	--

Da nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik keine Energie verloren gehen kann, ist die KWK-Stromkennzahl bereits durch die vorher beschriebenen Kennzahlen definiert: durch den Wirkungsgrad der Stromerzeugung η_{el} , den KWK-Nutzungsgrad ζ_{KWK} und die Stromverlustkennzahl β .

Stromkennzahl	$\sigma_{\text{KWK}} = (\eta_{\text{el}} - \zeta_{\text{KWK}} \cdot \beta) / (\zeta_{\text{KWK}} - \eta_{\text{el}})$ $\sigma_{\text{KWK}} = 0,476$
---------------	--

Die Energiebedarfszahl für die ausgekoppelte Wärme

Äquivalent zur Energiebedarfszahl für den Strom kann die Energiebedarfszahl für die ausgekoppelte Wärme gebildet werden. Die Energiebedarfszahl für den Strom ϵ_{Δ} multipliziert mit der Stromverlustkennzahl β ergibt die Energiebedarfszahl für die ausgekoppelte Wärme $\epsilon_{\text{Q-KWK}}$ ($2,5 \times 0,18 = 0,45$):

Energiebedarfszahl d. Wärmeauskopplung	$\epsilon_{\text{Q-KWK}} = \epsilon_{\Delta} \cdot \beta$ $\epsilon_{\text{Q-KWK}} = 0,45 \text{ MWh/MWh}$
--	---

Die Energiebedarfszahl der Wärme ist die Maßzahl für die Effizienz der ausgekoppelten Wärme. Für eine Einheit KWK-Wärme müssen in diesem Beispiel 0,45 Einheiten Brennstoff eingesetzt werden.

Wird vom KWK-Betrieb der Anlage ausgegangen, hätte die erzeugte Strommenge von 29 MWh in der gleichen Anlage auch – ohne Wärme auszukoppeln – erzeugt werden können. Je ausgekoppelter Einheit Wärme würden dann 0,45 Einheiten Brennstoff weniger anfallen. Ausgehend vom ursprünglichen Stromerzeugungsbetrieb, in dem 40 MWh Strom erzeugt wurden, bedeutet dies: Sollen mit der gleichen Anlage im KWK-Betrieb ebenfalls 40 MWh Strom erzeugt werden, müssten 0,45 MWh Brennstoff je 1 MWh ausgekoppelter Wärme zusätzlich aufgebracht werden. Die Energiebedarfszahl für die ausgekoppelte Wärme wird deshalb vielfach auch als Energiemehrbedarfszahl bezeichnet.

Der Brennstoffeinsatz für eine Einheit ausgekoppelter Wärme bestimmt sich also allein durch die Effizienz der Stromerzeugung und die Stromverlustkennzahl. Die Stromverlustkennzahl hängt vor allem von der Temperatur ab, mit der Dampf aus der Turbine ausgekoppelt wird. Der Brennstoffeinsatz wird also nicht von einem oder zwei externen Referenzsystemen bestimmt – wie vielfach behauptet –, sondern allein durch die Anlagenparameter der KWK-Anlage. Damit ist die Frage, wie viel Brennstoff für die ausgekoppelte Wärme benötigt wird, zunächst beantwortet. Im Arbeitsblatt FW 309 Teil 6 des AGFW [1] wird diese Vorgehensweise deshalb auch zur Ermittlung der CO₂-Emissionen für die ausgekoppelte Wärme empfohlen, wenn sich ein Stromverlust ermitteln lässt.

Wie sehen diese Ergebnisse im Vergleich zu anderen Formen der Wärmeversorgung aus?

Die Energiebedarfszahl der ausgekoppelten Wärme kann nun mit anderen Formen der Wärmeversorgung verglichen werden. Zum Beispiel mit einer Reserve- oder Spitzenkesselanlage am Kraftwerksstandort. Die Anlage soll beispielhaft einen gemessenen Wirkungsgrad von 0,85 MWh/MWh haben, bzw. eine Energiebedarfszahl von 1,176 MWh/MWh:

gemessener Wirkungsgrad	$\eta_{\text{Q-HK}} = 0,85 \text{ MWh/MWh}$
Energiebedarfszahl Heizkessel	$\epsilon_{\text{Q-HK}} = 1 / \eta_{\text{Q-HK}}$ $\epsilon_{\text{Q-HK}} = 1,176 \text{ MWh/MWh}$

Die spezifische Energieeinsparung der ausgekoppelten Wärme gegenüber der Wärmeerzeugung in der Heizkesselanlage beträgt damit -0,726 MWh Brennstoff je 1 MWh ausgekoppelter Wärme gegenüber der gleichen Wärmeerzeugung in einer Heizkesselanlage:

spezifische Einsparung	$S_w = \varepsilon_{Q-KWK} - \varepsilon_{Q-HK}$ $S_w = -0,726 \text{ MWh/MWh}$
------------------------	--

oder relativ:

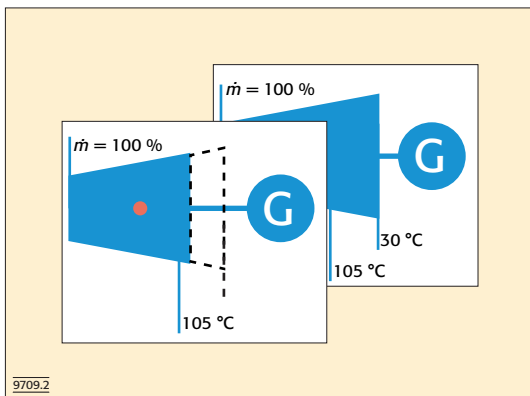
relative Einsparung	$S_w' = (\varepsilon_{Q-KWK} - \varepsilon_{Q-HK}) / \varepsilon_{Q-HK}$ $S_w' = -62 \%$
---------------------	---

oder absolut:

absolute Einsparung	$S = S_w \cdot Q_{KWK}$ $S = -44,3 \text{ MWh}$
---------------------	--

Wie kann vorgegangen werden, wenn sich ein Stromverlust nicht ermitteln lässt?

Dampfturbinen, die nur Wärme und Strom gekoppelt erzeugen, können auf den Teil der Turbine, der ansonsten noch Strom erzeugt hätte, verzichten.



Gemessen werden können deshalb nur der KWK-Brennstoff, die KWK-Stromerzeugung und die Wärmeauskopplung:

KWK-Brennstoff	$W_{KWK} = 100 \text{ MWh}$
Wärmeauskopplung	$Q_{KWK} = 61 \text{ MWh}$
KWK-Stromerzeugung	$A_{KWK} = 29 \text{ MWh}$

Die Formel für die Stromkennzahl lässt sich so umstellen, dass sich die Energiebedarfszahl der Stromerzeugung ergibt:

$$\varepsilon_A = (1 + \sigma_{KWK}) / [\zeta_{KWK} \cdot (\beta + \sigma_{KWK})]$$

$$\varepsilon_A = 2,5$$

KWK-Nutzungsgrad und Stromkennzahl sind bekannt, aber die Stromverlustkennzahl β fehlt, um die Energiebedarfszahl der Stromerzeugung berechnen zu können. Eine Energiebedarfszahl der Stromerzeugung lässt sich also nur noch theoretisch ermitteln, indem ein Referenzprozess unterstellt wird, der einer vergleichbaren Anlage mit dem fehlenden Turbinenteil entspricht. Dafür gibt es verschiedene Hilfsverfahren:

- thermodynamische Kreislaufrechnung,
- Dresdner Methode,
- Carnot-Methode.

Thermodynamische Kreislaufrechnung

Der Kondprozess wird mit einer thermodynamischen Kreislaufrechnung nachgebildet. Eine aufwendige Methode mit der sich aber auch unterschiedliche Lastzustände theoretisch abbilden lassen.

Dresdner Methode

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, nicht den Stromverlust, sondern die Stromerzeugungsfähigkeit der ausgekoppelten Wärme zu ermitteln. Vereinfachend kann dazu die Vorlauftemperatur herangezogen werden.

Wird die Kondensationstemperatur mit 303,15 K (30 °C) als Konstante festgelegt und werden alle Verluste auf die messbare Vorlauftemperatur bezogen, lässt sich mit beiden Temperaturen ein Carnot-Faktor bilden. Multipliziert mit einem Prozessfaktor, der die Verluste eines realen Stromerzeugungsprozesses abbildet, lässt sich daraus ein theoretischer Stromverlust ermitteln, der dem tatsächlichen Stromverlust recht nahe kommt.

Im folgenden Beispiel wurde für den Prozessfaktor ein Wert von 0,91 unterstellt. Der damit ermittelte Referenzstromverlust ergibt sich zu 0,18 MWh Strom je 1 MWh ausgekoppelter Wärme. Die Referenzenergiebedarfszahl für die ausgekoppelte Wärme liegt bei 0,451 MWh Brennstoffenergie je 1 MWh ausgekoppelter Wärme.

Referenzstromverlustkennzahl der ausgekoppelten Wärme:

Vorlauftemperatur	$T_{KWK-Vorlauf} = 378,15 \text{ K} (105 \text{ °C})$
Prozessfaktor	$\nu = 0,91$
Referenzstromverlustkennzahl	$\beta_{Ref1} = \nu \cdot (1 - 303,15 / T_{KWK-Vorlauf})$ $\beta_{Ref1} = 0,18$

Referenzenergiebedarfszahl der ausgekoppelten Wärme:

Brennstoff	$W = 100 \text{ MWh}$
Wärmeauskopplung	$Q_{KWK} = 61 \text{ MWh}$
Strom	$A = 29 \text{ MWh}$
Referenzenergiebedarfszahl	$\varepsilon_{Q-Ref1} = W \cdot \beta_{Ref1} / (A + \beta_{Ref1} \cdot Q_{KWK})$ $\varepsilon_{Q-Ref1} = 0,451$

Ausführlich wurde die Dresdner-Methode 2007 von [2] veröffentlicht.

Carnot-Methode

Mit der Temperaturdifferenz zwischen ausgekoppelter Wärme und Umgebungstemperatur ist es möglich, die Exergie der ausgekoppelten Wärme zu bestimmen und diese als Referenzwert für den Stromverlust zu verwenden. Die Exergie der ausgekoppelten Wärme ist für alle thermodynamischen Stromerzeugungsprozesse eine physikalische Obergrenze für die Stromerzeugung. Mit der Carnot-Methode ist damit eine konservative Abschätzung des Stromverlustes möglich, da lediglich die theoretische Umwandlungsfähigkeit von Wärme in Arbeit ohne Berücksichtigung jeglicher Verluste ermittelt wird.

Benötigt werden dazu außer dem Brennstoffeinsatz, der Wärmeauskopplung und dem erzeugtem Strom drei Temperaturen: die Vor- und Rücklauftemperatur der KWK-Wärmenetzeinspeisung sowie die Umgebungstemperatur.

Gemessene Werte:

Brennstoff	$W = 100 \text{ MWh}$
Wärmeauskopplung	$Q_{KWK} = 61 \text{ MWh}$
Strom	$A = 29 \text{ MWh}$

Gemessene Temperaturen:

Vorlauftemp.	$T_{KWK-Vorlauf} = 378,15 \text{ K} (105 \text{ °C})$
Rücklauftemp.	$T_{KWK-Rücklauf} = 333,15 \text{ K} (60 \text{ °C})$
Umgebungstemp.	$T_{Umgebung} = 283,15 \text{ K} (10 \text{ °C})$

Aus der Vor- und Rücklauftemperatur wird zunächst eine Mitteltemperatur gebildet. Da beide Temperaturen relativ dicht beieinander liegen, kann vereinfachend das Arithmetische Mittel gebildet werden:

$$\begin{aligned} \text{Mitteltemp. } T_{\text{Mittel}} &= (T_{\text{Vorlauf}} + T_{\text{Rücklauf}})/2 \\ T_{\text{Mittel}} &= 355,65 \text{ K (83 } ^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

Die Referenzstromverlustkennzahl und die Referenzenergiebedarfszahl für die ausgekoppelte Wärme ergeben sich damit folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \text{Referenzstrom-} & \beta_{\text{Ref2}} = 1 - T_{\text{Umgebung}}/T_{\text{Mittel}} \\ \text{verlustkennzahl} & \beta_{\text{Ref2}} = 0,20 \\ \text{Referenzenergie-} & \varepsilon_{\text{Q-Ref2}} = W \cdot \beta_{\text{Ref2}} / (A + \beta_{\text{Ref2}} \cdot Q_{\text{KWK}}) \\ \text{bedarfszahl} & \varepsilon_{\text{Q-Ref2}} = 0,492 \end{aligned}$$

Die Abweichung gegenüber dem realen Prozess ist zwar größer als bei der Dresdner-Methode, die Carnot-Methode hat aber den Vorteil, dass sie keine zusätzlichen Annahmen über einen Referenzprozess benötigt. Sie lässt sich auf alle thermodynamischen Stromerzeugungsprozesse mit Wärmeauskopplung anwenden und die Abhängigkeit der Energiebedarfszahl von der Tempe-

ratur der Wärmeauskopplung wird berücksichtigt.

Die zusätzlich erforderlichen Parameter – Vor- und Rücklauftemperatur sowie Umgebungstemperatur – können messtechnisch erfasst werden bzw. liegen in vielen Fällen bereits vor. Im VDI-Regelwerk wird die Methode unter dem Namen Exergetische Methode beschrieben [3;4]. Im Arbeitsblatt FW 309 Teil 6 des AGFW [1] wird diese Methode deshalb zur Ermittlung der CO₂-Emissionen für die ausgekoppelte Wärme empfohlen, wenn sich ein Stromverlust nicht ermitteln lässt.

Fazit

Mit den beschriebenen Methoden lassen sich für alle thermodynamischen Anlagen, aus denen Wärme ausgekoppelt wird, die Brennstoffeinsätze für die ausgekoppelte Wärme ermitteln. Sind die eingesetzten Brennstoffe mit ihren Heizwerten und CO₂-Emissionen bekannt, wird die ausgekoppelte Wärme damit sowohl hinsichtlich ihres Brennstoffeinsatzes, als auch hinsichtlich ihrer CO₂-Emissionen mit anderen Formen der Wärmeerzeugung vergleichbar.

Literatur

- [1] Arbeitsblatt AGFW FW 309 Teil 6 – Energetische Bewertung von Fernwärme – Bestimmung spezifischer CO₂-Emissionsfaktoren. Dezember 2014.
- [2] Zschernig, J.; Sander, Th.: Bewertung von Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 56 (2007), H. 3 – 4, S. 89 – 94.
- [3] VDI 4608 Teil 2. Energiesysteme – Kraft-Wärme-Kopplung. Juli 2008.
- [4] VDI 4660 Blatt 2. Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energieumwandlung. Mai 2003.

u.mueller@agfw.de

www.agfw.de

Anzeige

Langzeit präzise.

- hohe Präzision und Zuverlässigkeit —
- alle Anwendungen werden abgedeckt —
- für Wärme- und Kältemessung —

More than **sensors + automation**



91005

Temperaturfühler für Wärmezähler nach EN 1434

Sie schätzen Leistungsfähigkeit, Genauigkeit und Langlebigkeit? Sie wissen, dass Qualität die Summe aus Erfahrung, Innovation und Praxisnähe ist? Dann haben Sie den passenden Partner gefunden: **Willkommen bei JUMO.**

www.jumo.net