

Der exergetische Wirkungsgrad

von Udo Backhaus und H. Joachim Schlichting

Der exergetische Wirkungsgrad wird eingeführt, um bei der Beurteilung von Energiewandlern den Wert der beteiligten Energiearten berücksichtigen zu können. Am Beispiel einer Raumheizung werden energetischer und exergetischer Wirkungsrad miteinander verglichen.

1 Einleitung

Die Güte eines Energiewandlers oder einer Energieübertragung wird üblicherweise durch den sogenannten energetischen Wirkungsgrad η gekennzeichnet. Diese ist der Quotient aus der zur Erzielung eines bestimmten Nutzens abgegebenen Energie E_n und der zu diesem Zweck aufgewendeten Energie E_a :

$$(1) \quad \eta = \frac{E_n}{E_a}.$$

Die Angabe dieses Wirkungsgrades führt jedoch in vielen Fällen zu einer Fehleinschätzung der Effektivität einer Vorrichtung. So suggeriert z. B. die Angabe $\eta = 0,2$ für eine Wärmekraftmaschine eine sehr schlechte Ausnutzung der eingesetzten Wärme und die Angabe $\eta = 1$ für eine elektrische Widerstandsheizung das Maximum an Effektivität. Berücksichtigte man jedoch in beiden Fällen die maximal möglichen Wirkungsgrade, so käme man zu einer anderen Beurteilung. Diese Schwierigkeit beruht auf der fehlenden Berücksichtigung des Wertes der beteiligten Energiearten: so verwandelt eine Wärmekraftmaschine minderwertige Wärme in hochwertige mechanische Energie, und es ist deshalb gar nicht zu erwarten, daß der Wirkungsgrad sehr hoch sein wird (vgl. den Beitrag von SCHLICHTING et al. 1984 in diesem Heft). Umgekehrt verwandelt eine Widerstandsheizung hochwertige elektrische Energie in minderwertige Wärme. Der Wirkungsgrad eines solchen Wandlers kann aber wesentlich größer als eins sein.

Die vorangegangenen Aufsätze (SCHLICHTING et al. 1984, BACKHAUS et al. 1984) haben mit der Exergie einen geeigneten Begriff zur Berücksichtigung der mit einer Energieumwandlung einhergehenden Wertänderung zur Verfügung gestellt. Darauf aufbauend soll nun ein Wirkungsgrad diskutiert werden, der eine realistischere Beurteilung von Energieumwandlungsvorgängen ermöglicht.

2 Definition des exergetischen Wirkungsgrades

Um den Wert der beteiligten Energiearten zu berücksichtigen, vergleicht man die Exergie X_n der genutzten Energie mit der Exergie X_z der zugeführten Energie und definiert den sogenannten „exergetischen Wirkungsgrad“ (“second law efficiency”) ζ eines Energiewandlers gemäß

$$(2) \quad \zeta = \frac{X_n}{X_z}$$

(vgl. WOLFE 1975, S. 25 ff.; BAEHR 1981, S. 142 ff.; FRICKE et al. 1981, S. 22 ff.). Da die Exergie eines Systems ein Maß für seine Arbeitsfähigkeit ist (s. BACKHAUS et al. 1984 in diesem Heft, S. 53), ist ζ ein Maß dafür, wieviel Arbeitsfähigkeit bei dem betrachteten Prozeß verloren geht. Er gibt damit an, wie weit der Prozeß vom Idealfall der Reversibilität entfernt ist, in dem

$$(3) \quad X_n = X_{n\max} = X_z$$

gilt. Für den exergetischen Wirkungsgrad gilt also

$$(4) \quad 0 \leq \zeta \leq \zeta_{\max} = 1,$$

während der maximale energetische Wirkungsgrad sowohl kleiner, als auch größer als eins sein kann.

Die Beziehung zwischen den beiden Wirkungsgraden wird noch deutlicher, wenn man den Zusammenhang zwischen Energie E und damit verbundener Exergie X mit Hilfe des sogenannten Exergiefaktors ε folgendermaßen schreibt:

$$(5) \quad X = \varepsilon E.$$

Aufgrund von Gleichung (3) ergibt sich dann nämlich

$$\zeta = \frac{X_n}{X_z} = \frac{X_n}{X_{n\max}} = \frac{E_n \varepsilon_n}{\varepsilon_n E_{n\max}}$$

und damit

$$(6) \quad \zeta = \frac{E_n}{E_{n\max}} = \frac{E_{a\min}}{E_a} = \frac{\eta}{\eta_{\max}}$$

Durch Angabe des exergetischen Wirkungsgrades wird also ein Energiewandler an der Effektivität gemessen, die er unter gleichen äußeren Bedingungen maximal haben könnte.

3 Beispiel: Raumheizung

Die Tragfähigkeit des exergetischen Wirkungsgrades soll am Beispiel der Heizung eines Zimmers demonstriert werden, das bei einer Außentempera-

tur $T_u = 273 \text{ K}$ ($\square 0^\circ\text{C}$) auf einer Temperatur $T_z = 293 \text{ K}$ ($\square 20^\circ\text{C}$) gehalten wird.

Sieht man von den (geringen) Verlusten in den Zuleitungen ab, ist der energetische Wirkungsgrad η_W einer elektrischen Widerstandsheizung

$$(7) \quad \eta_W = 1.$$

Für den exergetischen Wirkungsgrad ζ_W dieser Heizungsmethode ergibt sich (vgl. Gleichung (29) in BACKHAUS et al. 1984, in diesem Heft, S. 50):

$$(8) \quad \zeta_W = \frac{X_n}{X_z} = \frac{\varepsilon_Q Q}{W_{el}} = \varepsilon_Q = 1 - \frac{T_u}{T_z} = 0,07.$$

Gleichungen (7) und (8) gelten näherungsweise auch für eine Ölheizung, wenn man auch dort von Leitungsverlusten absieht und den Exergiefaktor $\varepsilon_{\text{Öl}}$ chemischer Energie näherungsweise gleich eins setzt. Gleichung (8) bedeutet, daß im Idealfall 7 % der bei der Widerstandsheizung aufgewendeten Energie genügen würden, um dem Zimmer dieselbe Energie zuzuführen. Möglich wäre das mit einer idealen Wärmepumpe, die der Umgebung, d. h. der Außenluft, Wärme entzieht, um sie auf das Temperaturniveau des Zimmers hochzupumpen. Bekanntlich hat eine solche Wärmepumpe die Wirkungsgrade

$$(9) \quad \eta_{WP(id)} = \left(1 - \frac{T_u}{T_z}\right)^{-1} \quad \text{und} \quad \zeta_{WP(id)} = 1.$$

Diese Überlegungen zeigen, daß es möglich sein sollte, die Effektivität der Heizung durch Benutzung einer Wärmepumpe zu erhöhen. Allerdings unterscheiden sich reale Anlagen in zwei entscheidenden Punkten von der als Bezug herangezogenen idealen:

- Technisch realisierbare Wärmepumpen arbeiten nicht reversibel. Für die folgenden Rechnungen gehen wir von $\zeta_{WP} = 0,6$.
- Heizkörper müssen wärmer als die Zimmerluft sein. Wir nehmen zunächst eine Heizkörpertemperatur von $T_H = 333 \text{ K}$ ($\square 60^\circ\text{C}$) an.

Der gesamte Heizungsvorgang setzt sich zusammen aus dem Pumpvorgang (WP) und dem Wärmeleitungsvorgang (WL) zwischen Heizkörper und Zimmerluft. Für den gesamten Wirkungsgrad gilt demnach

$$(10) \quad \zeta_{ges}^{(1)} = \zeta_{WP} \cdot \zeta_{WL} = \zeta_{WP} \cdot \frac{\frac{T_u}{T_z}}{1 - \frac{T_u}{T_H}} = 0,23$$

Dieser Wert ist immerhin noch etwa dreimal so groß wie der für die Widerstandsheizung (8), bedeutet also eine Abnahme des Energieverbrauchs auf 1/3 des ursprünglichen Wertes.

Berücksichtigt man jedoch, daß die zum Betrieb der Wärmepumpe erforderliche elektrische Energie in einem Kraftwerk hergestellt werden muß, für dessen energetischen (und wegen $\varepsilon_{\text{Öl}} = 1$ auch exergetischen) Wirkungsgrad

$$(11) \quad \eta_{KW} = \zeta_{KW} = 0,33$$

gilt, dann ergibt sich für den Heizvorgang mit der Wärmepumpe insgesamt

$$(12) \quad \zeta_{ges}^2 = \zeta_{KW} \cdot \zeta_{WP} \cdot \zeta_{WL} = 0,08,$$

gegenüber der Ölheizung also praktisch keine Verbesserung. Der Gewinn durch den Einsatz der Wärmepumpe wird in etwa durch den Verlust im Kraftwerk wieder wettgemacht. Ein Plädoyer für elektrisch betriebene Wärmepumpenanlagen muß demnach als Argument für den weiteren Bau von Kernkraftwerken angesehen werden, da durch ihren Betrieb fossile Brennstoffe nur dann eingespart werden, wenn die elektrische Energie nichtfossilen Ursprungs ist.

Energie läßt sich beim Heizen zunächst dadurch sparen, daß man die Energieabgabe an die Umgebung und damit die erforderliche Energiezufuhr reduziert. Möglichkeiten dazu bestehen in einer Verbesserung der Isolierung und in einer Erniedrigung der Zimmertemperatur durch die die Wärmeabgabe verlangsamt wird. Beide Maßnahmen greifen unabhängig vom Heizungssystem. Eine Wärmepumpenanlage eröffnet jedoch weitere Möglichkeiten:

1. Erniedrigt man die Heizkörpertemperatur durch Verwendung großflächiger Heizkörper (z.B. Fußbodenheizung) auf z. B. $T_B = 313 \text{ K}$ ($\square 40^\circ\text{C}$), eine Maßnahme, die eine Ölheizung unter den obigen Voraussetzungen nicht effektiver macht, dann erhöht sich der Wirkungsgrad auf

$$(13) \quad \zeta_{ges}^{(3)} = \zeta_{KW} \zeta_{WP} \frac{\frac{T_u}{T_z}}{1 - \frac{T_u}{T_B}} = 0,11$$

Das bedeutet gegenüber (12) eine Erhöhung der Effektivität um fast 40 %.

2. Die Verwendung von diesel- oder gasbetriebenen Wärmepumpen könnte von großem Vorteil sein, weil im Unterschied zum Wärmekraftwerk die Abwärme in diesem Fall voll genutzt werden könnte.
3. Wärmepumpen, die statt der Außenluft das Grundwasser (G) mit einer Temperatur von z. B. $T_G = 283 \text{ K}$ benutzen, haben, solange das Grundwasser wärmer als die Außenluft ist, den

Vorteil, daß die aufzuwendende Exergie X_a um die Exergie X_G des verwendeten Grundwassers geringer ist als die zugeführte Exergie X_z :

$$(14) \quad X_a = X_z - X_G.$$

Dadurch vergrößert sich zwar nicht der exergetische Wirkungsgrad ζ_{WP} der Wärmepumpe, wohl aber nimmt die zur Erhöhung der Exergie des Fußbodens um X_B aufzuwendende Exergie ab:

$$(14') \quad X_a = \frac{X_B}{\zeta_{WP}} - X_G.$$

Zur Berechnung dieses Effektes zieht man die Bilanzgleichungen für Energie und Exergie heran:

$$(15) \quad E_B = E_a + E_G$$

$$(16) \quad X_B = \zeta_{WP} (X_a + X_G).$$

Auswertung ergibt:

$$(17) \quad \frac{X_G}{X_B} = \frac{\epsilon_G (\zeta_{WP} \epsilon_a - \epsilon_B)}{\zeta_{WP} \epsilon_B (\epsilon_a - \epsilon_G)}.$$

Wegen $\epsilon_a = 1$ folgt damit aus (14'):

$$(18) \quad X_a = \left(1 - \frac{\epsilon_G (\zeta_{WP} - \epsilon_B)}{\zeta_{WP} \epsilon_B (1 - \epsilon_G)} \right) \frac{X_B}{\zeta_{WP}} = 0,77 \frac{X_B}{\zeta_{WP}}.$$

Gegenüber der mit Außenluft arbeitenden Wärmepumpe ergibt sich also ein um 23 % verringelter Aufwand an elektrischer Energie. Unter den gemachten Voraussetzungen und bei den angenommenen Temperaturen ergibt sich für eine solche Wärmepumpe insgesamt der Wirkungsgrad

$$(19) \quad \zeta_{ges}^4 = \zeta_{WP} \zeta_{WL} \frac{\zeta_{WP}}{0,77} = 0,14$$

und damit immerhin eine Verdoppelung der Effektivität gegenüber der Ölheizung (vgl. (8)). Der Wirkungsgrad ist allerdings immer noch viel kleiner als 1. Die Faktoren in Gleichung (19) weisen auf die Stellen hin, an denen Exergieverluste auftreten, an denen also Verbesserungsversuche ansetzen müssen. Die entsprechende Beziehung zwischen den energetischen Wirkungsgraden

$$(20) \quad \eta_{ges} = \eta_{KW} \cdot \eta_{WL} \cdot \eta_{WP} = 0,33 \cdot 1 \cdot 6,26 = 2,07$$

hätte keinerlei Hinweis gegeben, um wieviel das Ergebnis vergrößert werden könnte und an welchen Stellen Verbesserungsversuche lohnend und aussichtsreich erscheinen.

4 Schlußbemerkungen

Das Beispiel der Raumheizung hat gezeigt, daß der exergetische Wirkungsgrad besser als der energetische geeignet ist, die Stellen einer Anlage zu lokalisieren, an denen Exergie vernichtet, also Energie

verschwendet wird. Es muß jedoch betont werden, daß der hier propagierte Wirkungsgrad ebenso wie der herkömmliche zur energetischen Beurteilung technischer Prozesse eingeführt wird. Beide erfassen damit nur einen - wenn auch sehr wichtigen - Aspekt: Die Entwicklung und Optimierung technischer Abläufe muß nicht nur der Notwendigkeit zur Energieeinsparung Rechnung tragen, sondern auch Faktoren berücksichtigen wie Umweltbelastung, Kosten, Materialverbrauch, Bedienungskomfort und Prozeßgeschwindigkeit. Das oben diskutierte Problem macht das beispielhaft deutlich:

- Würden viele Wohnungen mit Grundwasserwärmepumpen betrieben, hätte das eine merkliche Abkühlung des Grundwassers zur Folge, deren Konsequenzen nicht zu übersehen sind.
- Eine Absenkung der Heizkörpertemperatur verlangsamt bei gleicher Raumtemperatur die Energieabgabe an das Zimmer. Dadurch werden größere Heizkörper erforderlich, die wiederum größeren Materialverbrauch und erhöhte Kosten zur Folge haben.

Aber selbst die energetische Beurteilung bleibt unvollständig, da es oft weitgehend willkürlich ist, aus welchen Anteilen die aufgewendete Exergie zusammengesetzt wird: die Einschätzung vieler technischer Prozesse würde sich drastisch ändern, wenn man bei der Berechnung ihrer Effektivität den energetischen Aufwand für Bau und Abriß der Anlage, für die nötige Infrastruktur usw. berücksichtigen würde.

Literatur

BACKHAUS, U.; SCHLICHTING, H. J.: Entropie und Exergie: Zwei Größen zur Beschreibung von Irreversibilität und Energieentwertung, Der Physikunterricht 18/3, S. 41 (1984)

BAEHR, H. D.: Thermodynamik, Springer: Berlin usw. 1981

FRICKE, J.; BORST, W. L.: Energie. Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen, Oldenbourg: München, Wien 1981

SCHLICHTING, H. J.; BACKHAUS, U.: Energieverbrauch und Energieentwertung, Der Physikunterricht 18/3, S. 24 (1984)

WOLFE, H.C. (Ed.): Efficient Use of Energy, New York 1975