

Noch einmal: der Wirkungsgrad

Gegenstand:

Der Wirkungsgrad einer Maschine wird definiert durch den Quotienten aus der abgegebenen Nutzenergie und dem hierfür nötigen Aufwand an Energie:

$$\eta = \frac{\text{Nutzenergie}}{\text{aufgewendete Energie}}$$

Für eine gewöhnliche Widerstandsheizung erhält man mit dieser Formel einen Wirkungsgrad von $\eta = 1$.

Bei einer Wärmekraftmaschine setzt man für den Zähler dieses Ausdrucks diejenige Energie ein, die von der Wärmequelle kommt und in die eigentliche Kraftmaschine hineinfließt. Falls die Wärmekraftmaschine ideal ist, d. h. falls keine Entropieerzeugung stattfindet, ergibt sich für den Wirkungsgrad der *Carnotfaktor*:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Bei einer Wärmepumpe setzt man für die in der gewünschten Form abgegebene Energie die Energie, die die Wärmepumpe auf der hohen Temperatur T_2 verlässt, und es ergibt sich

$$\eta = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Mängel:

Der Wirkungsgrad ist ungeschickt definiert. Man erwartet von einem vernünftig definierten Wirkungsgrad, dass

1. seine Werte zwischen 0 und 1 liegen;
2. eine ideale Maschine den Wirkungsgrad 1 hat;
3. eine nichtideale Maschine einen Wirkungsgrad < 1 hat.

Eine Maschine ist ideal, wenn sie reversibel arbeitet oder in anderen Worten: wenn in ihr keine Entropie erzeugt wird.

Keine dieser drei Bedingungen wird nun durch die oben angegebene Definition des Wirkungsgrades erfüllt. Der Wirkungsgrad der Wärmepumpe ist größer als 1, die erste Bedingung ist also verletzt. Die ideale, also reversibel arbeitende Carnotmaschine, bekommt einen Wirkungsgrad, der kleiner als 1 ist, d. h. die zweite Bedingung ist verletzt. Die Widerstandsheizung, ein extrem nichtreversibel arbeitendes Gerät und notorischer Energieverschwender, bekommt den Wirkungsgrad 1. Damit ist die dritte Bedingung verletzt.

Herkunft:

Die Definition eines *Wirkungsgrades*, *Nutzeffektes* oder *ökonomischen Coeffizienten* ging einher mit dem sich über fast hundert Jahre hinziehenden, verwickelten Prozess der Differenzierung zwischen Energie und Entropie. In Carnots Arbeit gibt es ihn noch nicht. Man kann sich auch nicht vorstellen, dass Carnot die heute übliche Definition geschätzt hätte. Bei Helmholtz ist er aber schon zu finden. Ob Helmholtz der Erfinder dieses Maßes ist, konnten wir allerdings nicht feststellen. Die Definition war sicher schon in den alten Zeiten kein glücklicher Griff. Immerhin war das Vorgehen aber verständlich.

Einerseits gab es noch keine Wärmepumpe, also ein Gerät, das nach der Definition einen Wirkungsgrad liefert, der größer als eins ist. Andererseits gab es noch keine Brennstoffzelle, und es schien so, als sei die Verbrennung prinzipiell die einzige Möglichkeit, die Energie aus der Reaktion von Kohle und Sauerstoff nutzbar zu machen, sodass es keine Rolle spielte, ob man für den niedrigen Wirkungsgrad einer Dampfmaschine die Feuerung oder die eigentliche Maschine verantwortlich machte.

Entsorgung:

Man benutze für den Wirkungsgrad die folgende Definition:

$$\eta = \frac{P_{\text{ideal}}}{P_{\text{real}}}$$

P_{real} ist der Energieverbrauch der realen Maschine, deren Wirkungsgrad man bestimmen möchte. P_{ideal} ist der Energieverbrauch einer Maschine oder Anlage, die dasselbe leistet, aber reversibel, d. h. ohne Entropieproduktion arbeitet.

Für die reversibel arbeitende Carnot-Maschine erhält man $\eta = 1$, denn sie ist mit der idealen Maschine, die dasselbe leistet, identisch.

Für die Wärmepumpe ergibt sich immer ein η -Wert, der kleiner oder gleich 1 ist. Arbeitet die Maschine verlustfrei, also ohne Reibungsverluste, Wärmeverluste oder Verluste in elektrischen Leitungen, so ist sie ideal, und der Wirkungsgrad wird gleich 1. In dem Maße, wie solche Verluste vorhanden sind, wird η kleiner als 1.

Eine ideale Maschine, die dasselbe leistet, wie die Widerstandsheizung, nämlich einen bestimmten Entropiestrom (Wärmestrom) I_S auf einer hohen Temperatur T_2 zu liefern, ist eine Wärmepumpe, die diese Entropie auf der Umgebungstemperatur T_1 aufnimmt. Der Energieverbrauch der Widerstandsheizung ist

$$P_{\text{real}} = T_2 \cdot I_S,$$

Der Energieverbrauch der Wärmepumpe, die denselben Wärmestrom $T_2 \cdot I_S$ liefert, ist

$$P_{\text{ideal}} = (T_2 - T_1) \cdot I_S.$$

Für den Wirkungsgrad erhält man also den Carnotfaktor:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Die Widerstandsheizung verschwendet in der Tat um so mehr Energie, je höher die Umgebungstemperatur ist, denn je höher T_1 ist, mit desto weniger Aufwand hätte man sich den gewünschten Wärmestrom beschaffen können.

Auf Grund derselben Überlegung erhält jede Anlage, deren Aufgabe es ist, Wärme zu liefern, und die die entsprechende Entropie zu 100 % erzeugt, als Wirkungsgrad den Carnotfaktor. In einem Kohlekraftwerk bekommt daher auch die irreversibel arbeitende Feuerung die "schlechte Note" und nicht die fast reversibel arbeitende Turbine.

Die hier vorgeschlagene Definition ist in der thermodynamischen Literatur bekannt unter dem Namen exergetischer Wirkungsgrad /1/. Sie wird allerdings dargestellt als ein Konzept für Fortgeschrittene. Wir schlagen vor, nur diesen Wirkungsgrad, und zwar von Anfang an, zu behandeln, und ihn einfach "Wirkungsgrad" zu nennen.

/1/ Baehr, H. D.: Thermodynamik. – Springer-Verlag, Berlin, 1981. – S. 142