



Wolfgang Fratzscher

Über einige thermodynamische Grundlagen der Energiewirtschaft

(Vortrag in der Sitzung der Technikwissenschaftlichen Klasse am 31. Mai 1996)

In: Berichte und Abhandlungen / Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
(vormals Preußische Akademie der Wissenschaften) ; 3.1997, S. 39-51

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:kobv:b4-opus-29561](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b4-opus-29561)

Die vorliegende Datei wird Ihnen von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften unter einer Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (cc by-nc-sa 4.0) Licence zur Verfügung gestellt.



Wolfgang Fratzscher

Über einige thermodynamische Grundlagen der Energiewirtschaft

(Vortrag in der Sitzung der Technikwissenschaftlichen Klasse am 31. Mai 1996)

1 Grundlagen

Heutzutage bedarf eine Diskussion über energetische Probleme keiner breit angelegten Begründung. Die vielfältigsten gesellschaftlichen Probleme der letzten Jahre sind mittelbar oder auch unmittelbar mit der Energie verbunden. Vor knapp 100 Jahren war das noch anders, zu dieser Zeit hat Wilhelm Ostwald sein Anwesen in Großbothen (Nähe Leipzig) Haus Energie getauft, um über die postalische Anschrift zur Popularisierung des Begriffes beizutragen.

Die Aktualität des Energiebegriffes hat aber auch heute noch nicht dazu geführt, daß auf allen Ebenen mit physikalisch sauberen Definitionen gearbeitet wird, die den jeweiligen Stand richtig charakterisieren und zweckmäßige Entwicklungstendenzen ableiten lassen. In besonderem Maße gilt dies für die Quantifizierung der Verschiedenartigkeit der einzelnen Energiearten. Durch diese Situation werden in der Öffentlichkeit häufig falsche Fragestellungen und unzweckmäßige Entwicklungstendenzen diskutiert. Die Ursache liegt darin begründet, daß für die Energieerzeugung und die Energieanwendung nicht allein der Energiesatz oder I. Hauptsatz der Thermodynamik zu berücksichtigen ist, sondern daß eine umfassende physikalische Interpretation nur unter Einbeziehung der Aussagen des II. Hauptsatzes der Thermodynamik – des Entropiesatzes – gelingt. Dabei entstehen eine Reihe von Fragen, z. B. in welcher Form eine solche Berücksichtigung erfolgen soll und in welchem Maße diese Aussagen Einfluß auf die Energiebilanz haben. In einer für technische Aufgabenstellungen befriedigenden Weise können solche Fragen unter Benutzung des Exergiebegriffes beantwortet werden.

Dabei versteht man unter Exergie den unter den bestehenden thermodynamischen Bedingungen vollständig in andere Energieformen und speziell in Arbeit umwandelbaren Anteil einer Energie. Damit lassen sich die verschiedenen technisch inter-

Energieform	Umwandelbarkeit
Energie der Lage (potentielle Energie)	unbegrenzt umwandelbar
kinetische Energie	unbegrenzt umwandelbar
stoffgebundene Energie <ul style="list-style-type: none"> • mechanische Energie • thermische Energie • chemische Energie • Kernenergie 	begrenzt umwandelbar begrenzt umwandelbar begrenzt umwandelbar (un)begrenzt umwandelbar
stofffreie Energie <ul style="list-style-type: none"> • Wärme • Kälte • Arbeit • elektrische Energie 	begrenzt umwandelbar begrenzt umwandelbar unbegrenzt umwandelbar unbegrenzt umwandelbar
Umgebungsenergie	nicht umwandelbar

Tabelle 1
Umwandelbarkeit von Energieformen

essanten Energiearten klassifizieren, wie das in Tabelle 1 gezeigt wird. Danach sind Arbeiten, mechanische und elektrische Energie unbegrenzt umwandelbar, also identisch mit Exergien. Es gibt aber auch nicht umwandelbare Energie, wie die Umgebungsenergie in Übereinstimmung mit der Aussage der Unmöglichkeit eines perpetuum mobile II. Art. Solche Energien werden als Anergie bezeichnet. Die thermischen und chemischen Energien sind begrenzt umwandelbar. Den Grad der Umwandelbarkeit, d. h. ihre Exergie, kann man mit den Methoden der Thermodynamik bestimmen. Für einen beliebigen Stoffstrom läßt sich die Exergie gedanklich über eine Reaktion mit der Umgebung bestimmen, wenn völlige Reversibilität der Prozesse zugrunde gelegt und Energie nur in Form von Arbeit mit der Umgebung ausgetauscht wird. Legt man weiter für die Umgebung Reservoirigenschaften fest, so folgt die Exergie aus der Beziehung

$$\dot{E} = \dot{m}[(h - h_u) - T_u(s - s_u)] \quad (1)$$

mit \dot{E} als Exergiestrom

\dot{m} als Massenstrom

h als spezifische Enthalpie

s als spezifische Entropie

T als Temperatur,

der Index u bezieht sich auf die Umgebung.

In Verbindung mit den Hauptsätzen kann für einen beliebigen Prozeß von 1 nach 2 eine Exergiebilanz aufgestellt werden. Sie lautet

$$\int_1^2 \frac{T - T_u}{T} dQ + W_{t12} = \Delta E + T_u \Delta S_V \quad (2)$$

Dabei ist ΔE die Exergieänderung der beteiligten Stoffströme, W_{t12} die ausgetauschte Arbeit, die natürlich in voller Größe in die Exergiebilanz eingeht. Der Wärmeaustausch Q wird gewichtet durch eine Temperaturfunktion, die als Carnotfaktor oder exergetische Temperatur τ_e entsprechend

$$\tau_e = \frac{T - T_u}{T} \quad (3)$$

bezeichnet werden kann. Der Verlauf der exergetischen Temperatur für eine vorgegebene Umgebungstemperatur T_u ist in Abb. 1 dargestellt. Danach ist $\tau_e = 0$ für $T = T_u$ in Übereinstimmung mit der Aussage, daß Wärme von Umgebungstemperatur nicht umwandelbar ist und damit keinen Arbeitswert besitzt. Für $T \rightarrow \infty$ wird $\tau_e = 1$ oder, wie das von Sommerfeld formuliert wurde, Wärme von unendlich hoher Temperatur ist identisch mit Arbeit. Für $T \rightarrow 0$ dagegen ergibt sich $\tau_e \rightarrow -\infty$, was die unendlich großen Aufwendungen zur Annäherung an den absoluten Nullpunkt repräsentiert. Zur Illustration sind einige Phasenumwandlungspunkte bestimmter Stoffe in das Bild aufgenommen.

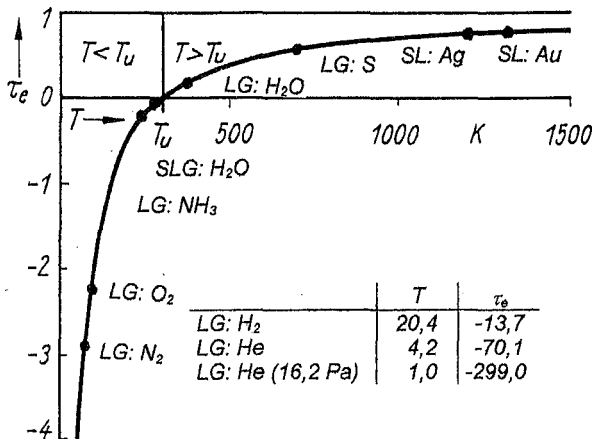


Abb. 1
Verlauf der exergetischen Temperatur

Interessant ist der Term $T_u \Delta S_v$, wobei ΔS_v die nichtumkehrbare Entropieproduktion bedeutet, die jedem natürlichen Prozeß anhaftet. Durch die Multiplikation mit der Umgebungstemperatur wird diese in ein Energiemaß transformiert und läßt sich auffassen als Wärme von Umgebungstemperatur, die per definitionem keinen Arbeitswert besitzt. Nichtumkehrbarkeiten lassen sich demnach als Anergieproduktion auffassen. Sie repräsentieren allgemeingültige Energieverluste, die vorhanden sind, wenn vom energetisch günstigsten Prozeß – dem reversiblen – abgewichen wird.

2 Anwendungen

An dieser Stelle soll nicht auf die thermodynamischen Probleme eingegangen werden, die mit der Definition und Berechnung der Exergie verbunden sind. Der Interessent sei auf die Fachliteratur verwiesen [1]. Vielmehr soll die Leistungsfähigkeit des Exergiebegriffes durch eine Reihe von Anwendungsdimensionen erläutert werden, die vielleicht auch den außerhalb des Fachgebietes Stehenden ansprechen.

2.1 Vergleichbarkeit der verschiedenen Energieformen

Aus dem täglichen Leben ist jedem bekannt, daß für die unterschiedlichen Energieformen, z. B. Strom, Fernwärme, aber auch Erdgas, Heizöl oder Brikett, unterschiedliche spezifische Energiepreise bezahlt werden müssen. (So beträgt z. B. der Energiepreis für Erdgas zwischen 5 und 15 Pf/kWh, während er für Strom bei 30 bis 40 Pf/kWh liegt.) Das ist nicht nur durch die Ökonomie, so die Marktwirtschaft, bedingt, sondern schon thermodynamisch durch die verschiedene Umwandelbarkeit der einzelnen Energieformen begründet, z. B. im Vergleich zwischen Wärmeenergie und elektrischer Arbeit. Aus dieser Einsicht ist auch Hoch- und Niedertemperaturwärme unterschiedlich zu bewerten. In der Praxis wird dies häufig unzureichend berücksichtigt, was dazu führt, daß der Wärmenutzer Hochtemperaturwärme bevorzugt und damit unnötige Energieverluste in Kauf nimmt. Natürlich muß eine Auswahlmöglichkeit bestehen. Ein klassisches Beispiel hierfür ist die Bewertung von Dampf unterschiedlichen Druckes, der in Koppelproduktion mit Strom in einem Industriekraftwerk erzeugt wird. Unter Anwendung exergetischer Berechnung gelingt eine stärkere Profilierung der spezifischen Dampfpreise, was in Abb. 2 im Vergleich zur energetischen Bewertung gezeigt ist. Bei der praktischen Anwendung in einem Chemiebetrieb ließ

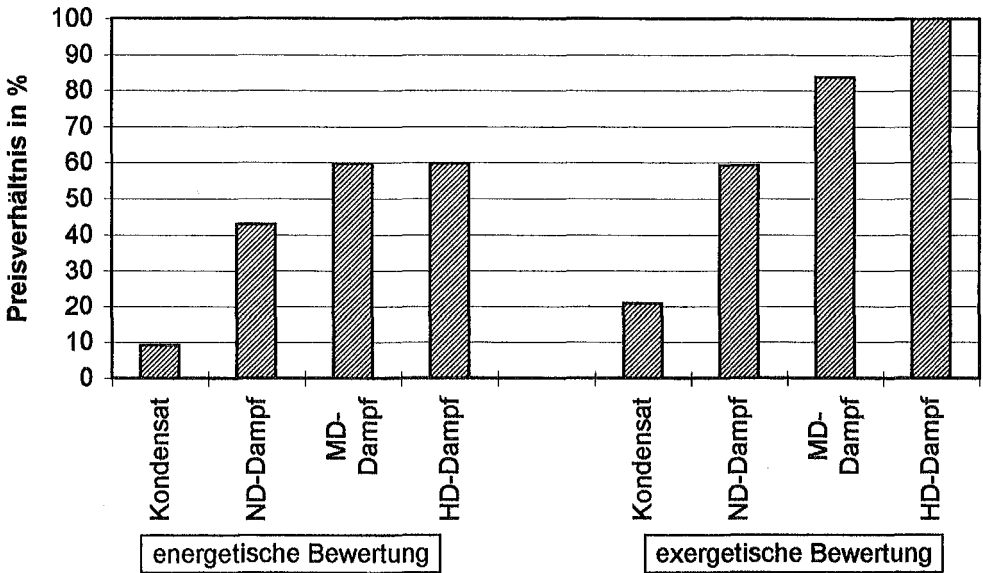


Abb. 2

Vergleich zwischen energetischer und exergetischer Bewertung von Energieträgern

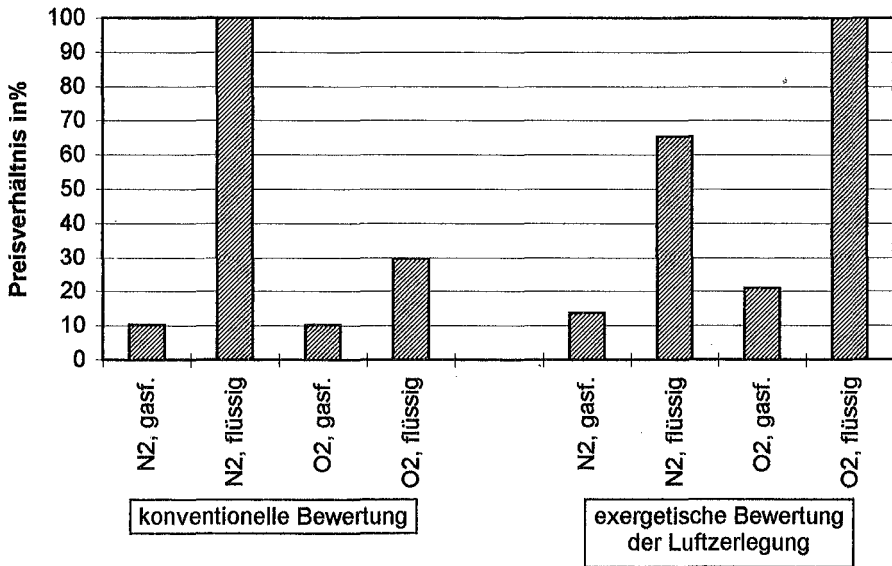


Abb. 3

Konventionelle und exergetische Bewertung von Sauerstoff und Stickstoff

sich nach einigen Monaten der Erfolg dieser Maßnahme nachweisen, die Nutzer griffen im zunehmenden Maße auf den Niederdruckdampf, so daß bald Hochdruckdampf für andere Zwecke, z. B. zur Stromerzeugung zur Verfügung stand. In ähnlicher Weise kann die Luftzerlegung als eine Koppelproduktion von Sauerstoff und Stickstoff aufgefaßt werden. Die konventionelle Bewertung ist in Abb. 3 dargestellt, danach werden die gasförmigen Produkte gleich bewertet. Es ist nun ohne Schwierigkeiten möglich, eine exergetische Bewertung der Produkte vorzunehmen. Dabei wird die Preisrelation zwischen flüssigen und gasförmigen Produkten thermodynamisch begründet und eine richtige Differenzierung zwischen Sauerstoff und Stickstoff vorgenommen, für die Reindarstellung von Stickstoff ist aufgrund des höheren Partialdruckes eine geringere Arbeit erforderlich als für die des Sauerstoffes.

Der Versuch einer objektiveren Bewertung ist aber auch für Untersuchungen zur Ausnutzung von Abfall- oder Sekundärenergien notwendig. Hier wird bei einer ausschließlich energetischen Einschätzung häufig ein großes Nutzungspotential vorgespiegelt, ohne die Temperatur des Wärmeangebotes zu berücksichtigen. Zur Qualifizierung dieses Sachverhaltes ist im Rahmen einer Richtlinie vorgeschlagen worden, die Abfallwärme mit Qualitätsfaktoren zu wichten, die in Tabelle 2 wiedergegeben sind. Der Kundige erkennt, daß hinter diesen Qualitätsfaktoren nichts anderes als die exergetische Temperatur steht, die z. B. besagt, daß Wärme von Umgebungstemperatur keinen Wert besitzt, da sie ohnehin in

t_m in °C	f	t_m in °C	f
-30	-0,17	30	0,07
-25	-0,14	35	0,08
-20	-0,12	40	0,10
-15	-0,10	45	0,11
-10	-0,08	50	0,12
-5	-0,06	75	0,19
0	-0,04	100	0,23
5	-0,02	150	0,32
10	0	200	0,38
15	0,02	250	0,44
20	0,03	300	0,48
25	0,05	350	0,52

Tabelle 2

Qualitätsfaktoren von Sekundärenergie

in Abhängigkeit von der arithmetischen Mitteltemperatur ($t_u = 10^\circ\text{C}$)

unendlicher Menge zur Verfügung steht und keinen Arbeitswert aufweist. Weiter wird deutlich, daß auf dieser Basis ohne jede Schwierigkeit auch Abfallkälte bewertet werden kann, was energetisch gar nicht direkt möglich ist.

2.2 Einheitliche Bewertung von Stoff- und Energiewandlungen

Jede Stoffwandlung ist mit einer Energiewandlung verknüpft und umgekehrt. Das zeigt sich z. B. darin, daß die Fähigkeit zur Durchführung einer chemischen Reaktion durch eine energetische Größe – die freie Enthalpie – charakterisiert ist. Weiter ist jeder natürliche Prozeß von einer Abnahme der Arbeitsfähigkeit oder der Exergie begleitet und umgekehrt erfordern Prozesse, die entgegen natürlichen, d. h. von selbst verlaufenden Prozessen geführt werden sollen, einen Energieaufwand. Dieser Sachverhalt kann unter Benutzung des Exergiebegriffes zum Ausdruck gebracht werden. Das wurde schon weiter oben bei der Bewertung der Luftzerlegungsanlage verdeutlicht. In diesem Zusammenhang spielen die Begriffe chemische Energie oder Exergie und Konzentrations- oder Mischungsenergie und -exergie eine besondere Rolle. Unter der chemischen Exergie versteht

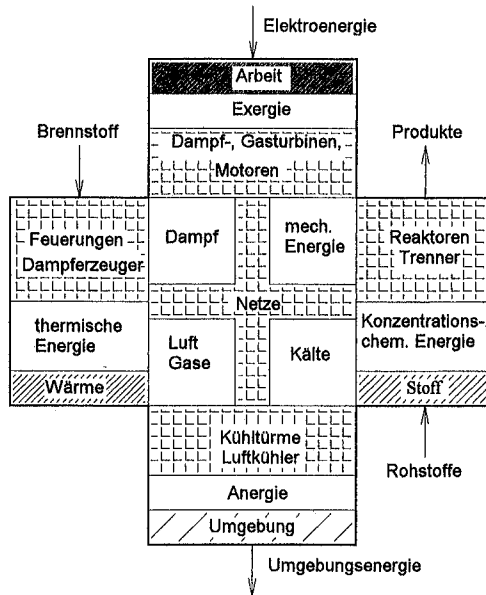


Abb. 4

Energetische Struktur eines Chemiebetriebes

man die mit der Stoffwandlung verbundene Exergieänderung, die durch die freie Enthalpie und den Arbeitswert der ausgetauschten Wärme bestimmt werden kann. Die Konzentrationsexergie ist die durch den Ideal- und Realanteil eines Gemisches bestimmte Exergieänderung, die identisch mit der minimalen Trennarbeit des Gemisches ist.

Unter diesem Aspekt läßt sich die energetische Struktur eines chemischen Betriebes schematisch, wie in Abb. 4 angegeben, darstellen. Die durchzuführenden Stoffwandlungen werden durch die chemischen Exergien bzw. Konzentrationsexergien gekennzeichnet. Um diese bereitzustellen, ist Arbeit, d. h. reine Exergie, und Wärme oder thermische Energie erforderlich. Schließlich wird der weitaus größere Teil der zugeführten Energie wieder an die Umgebung, letzten Endes als Anergie, abgegeben. Für die entsprechenden Energiewandlungen werden z. Z. jeweils typische Apparate oder Maschinen verwandt. Schließlich sind die verschiedenen energetischen Teilsysteme durch Energienetze miteinander verbunden. Ein weiteres instruktives Beispiel für die einheitliche Einschätzung von Stoff- und Energiewandlungen ist die exergetische Input/Output-Analyse eines chemischen Verfahrens, wie der Methanolsynthese (Abb. 5). Zur besseren Veranschau-

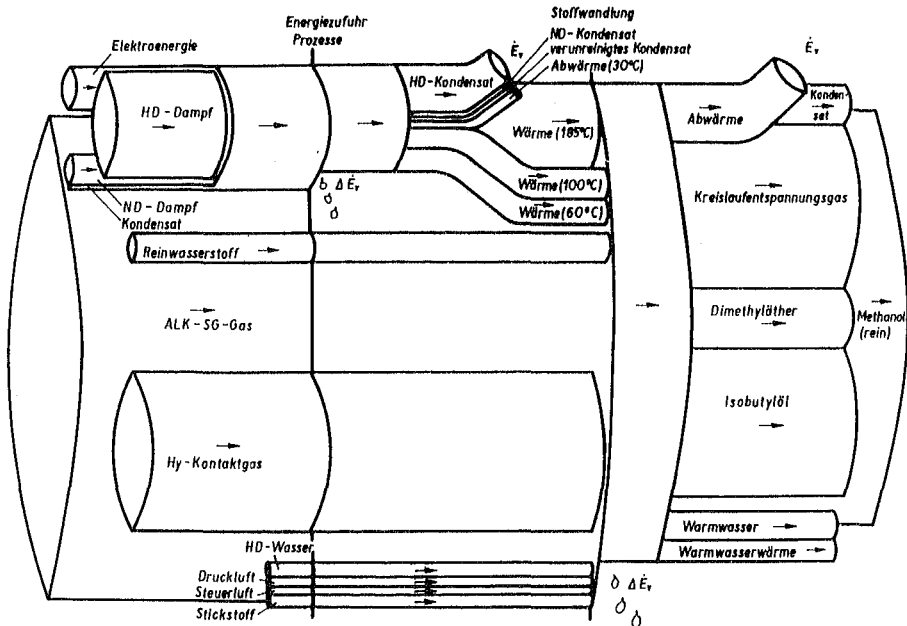


Abb. 5

Exergieströme bei einer Methanolsynthese

lichung sind die Exergiebeträge durch Säulen dargestellt. Daraus erkennt man, daß das energetische Geschehen eines solchen Verfahrens hauptsächlich durch die Stoffströme und weniger durch die Energieträger bestimmt wird. Da auch die Verluste in dieser Darstellung enthalten sind, erkennt man weiter, daß die energetische Güte derartiger Verfahren relativ hoch sein kann, insbesondere im Vergleich zu vielen Energiewandlungsverfahren.

2.3 Allgemeine Verlustdefinition

Schon bei der Diskussion der Exergiebilanz war darauf hingewiesen worden, daß im Zusammenhang mit exergetischen Untersuchungen ein Term auftritt, der ursächlich durch die nichtumkehrbare Entropiezunahme bestimmt ist und als Anergieproduktion aufgefaßt werden kann. Er verschwindet bei reversibler Führung der Prozesse. Da die Reversibilität naturgesetzlich die besten energetischen Resultate gewährleistet, entweder einen maximalen Energiegewinn oder einen minimalen Energieaufwand, läßt sich dieser Term als energetischer Verlust, konkret als Exergieverlust auffassen, der entweder die abgegebene Leistung schmälert oder den Aufwand erhöht. Diesen Zusammenhang erkannten schon Gouy und Stodola um die Wende des 19. und 20. Jahrhunderts, weshalb die Berechnungsgleichung auch häufig nach ihnen benannt wird. Diese Verlustdefinition ist allgemeingültig und allen anderen Definitionen überlegen, da mit ihrer Hilfe Entstehungsorte der Verluste lokalisiert und die Größe der Verluste in vergleichbarer Weise quantifiziert werden können. Damit sind echte Ansatzpunkte zur Verbesserung der Prozesse gegeben. In Abb. 6 ist dieser Sachverhalt dargestellt. Sie veranschaulicht das Energie- und Exergieflußbild eines Kondensationskraftwerkes, einer Heizung mittels konventionellen Brennstoffes und eines Blockheizkraftwerkes in Wärme-Kraft-Kopplung. Das Verhältnis von Nutzen und Aufwand ist beim Kondensationskraftwerk energetisch und exergetisch ungefähr gleich, da Arbeit in beiden Bilanzen in gleicher Größe enthalten ist und der Energieinhalt von konventionellen Brennstoffen etwa ihrem Exergieinhalt entspricht. Allerdings unterscheiden sich die Verluste grundsätzlich. In der Energiebilanz ist der Hauptverlust durch die Abwärme gegeben, in der Exergiebilanz werden die Verluste durch die Nichtumkehrbarkeiten der Verbrennung und die Wärmeübertragung bei endlichem Temperaturgefälle verursacht. Allein die Suche nach anderen Möglichkeiten auf der Ebene der Verbrennung und der Wärmeübertragung führt zu prinzipiellen Verbesserungen des Kondensationskraftwerkes. Eine Verminderung der Abwärme führt in der Endkonsequenz zu einem perpetuum mobile II. Art.

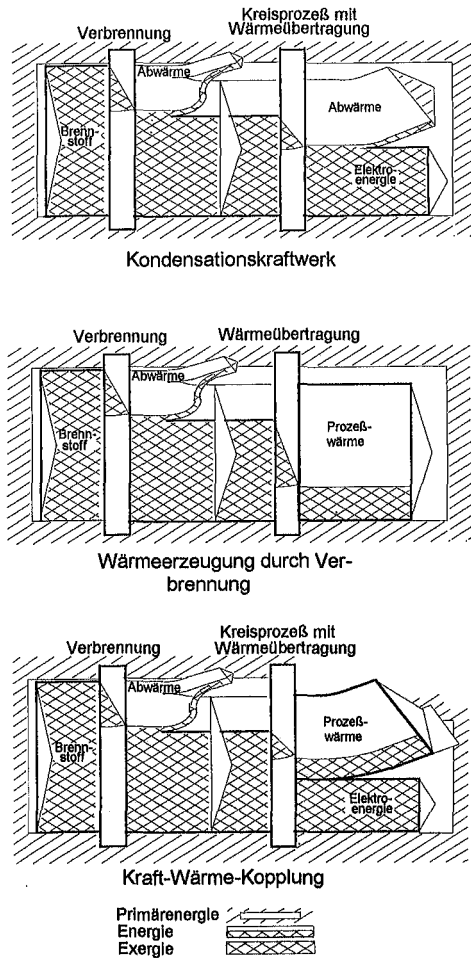


Abb. 6

Energie- und Exergieflußbilder für ein Kondensationskraftwerk, für die Wärmeerzeugung und für eine Wärme-Kraft-Kopplung

Bei der üblichen Art der Wärmebereitstellung unterscheiden sich energetische und exergetische Bewertung auch zahlenmäßig grundsätzlich. Während energetisch gesehen kaum Verluste auftreten (moderne Brennwertkessel werden schon mit Wirkungsgraden von über 100 % angeboten!), ist die exergetische Güte außerordentlich gering, insbesondere wenn es sich um die Bereitstellung von Raumheizwärme handelt. Aus energetischer Sicht ist mithin kaum noch etwas zu ver-

bessern, während die Exergiebilanz die großen Potentiale zur Verbesserung wiederum bei der Verbrennung und der Wärmeübertragung aufzeigt.

Die nämlichen Aussagen lassen sich bei der Wärme-Kraft-Kopplung ableiten, bei der durch die gleichzeitige Bereitstellung von Elektroenergie und Prozeß- oder Raumwärme ein hohes Niveau in energetischer Hinsicht erreicht wird. Exergetisch gesehen ist das Niveau der Wärmebereitstellung meistens niedrig, so daß sich auch hier wesentliche Verbesserungspotentiale bei der Verbrennung und Wärmeübertragung zeigen. Auch erweist sich in diesem Licht die übliche Argumentation zu den Vorteilen der gekoppelten gegenüber der getrennten Erzeugung als falsch. Gewöhnlich wird darauf hingewiesen, daß die gekoppelte Erzeugung insbesondere das Niveau des Kondensationskraftwerkes verbessere, da die Abwärme wegfiere. Diese ist aber, wenn sie bei Umgebungstemperatur abgegeben ist, gar kein Verlust. Richtig ist, daß die Wärmebereitstellung bei der gekoppelten Erzeugung thermodynamisch wesentlich günstiger gelöst werden kann als bei der Einzelheizung, was durch die Exergieflußbilder belegt wird. Mit dieser Argumentation werden nicht nur die Schwerpunkte für entsprechende Forschungen richtig gelegt, sondern es werden auch ökonomische und juristische Überlegungen, die z. B. angestellt werden, um bestimmte Entwicklungstendenzen zu befördern, von vornherein in Übereinstimmung zu den naturgesetzlichen Gegebenheiten gelenkt.

2.4 Thermoökonomische Bewertung

Die laufenden ökonomischen Aufwendungen technischer Systeme lassen sich gewöhnlich massenproportional oder auch energieproportional darstellen. Deshalb lassen sich diese Aufwendungen ohne Schwierigkeiten auch exergieskaliert entwickeln. Damit ist es möglich, die Exergieaufwendungen aufzuteilen in die Aufwendungen zur Durchführung des reversiblen Prozesses und diejenigen, die zur Überwindung der Nichtumkehrbarkeiten erforderlich sind. Letztere sind dann durch die Energieproduktion bzw. die nichtumkehrbare Entropiezunahme gegeben. Trägt man die ökonomischen Aufwendungen über der so definierten Nichtumkehrbarkeit auf, so ergibt sich eine lineare Abhängigkeit (Abb. 7). Der Ordinatenabschnitt kennzeichnet die Aufwendungen des reversiblen Prozesses, die naturwissenschaftlich richtig die geringsten sind.

Auch die einmaligen ökonomischen Aufwendungen müssen funktionell durch die Nichtumkehrbarkeiten bestimmt werden können. Aus Plausibilitätsgründen folgt, daß die einmaligen Aufwendungen für den reversiblen Grenzfall über alle Grenzen wachsen müssen. Mit zunehmender Nichtumkehrbarkeit müssen sie abnehmen.

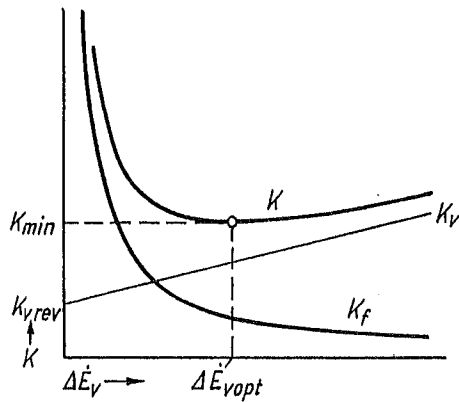


Abb. 7

Ökonomische Aufwendungen als Funktion der thermodynamischen Nichtumkehrbarkeiten

Ein derartiges Verhalten kann z. B. in einfacher Form durch eine hyperbolische Abhängigkeit beschrieben werden, wie sie in Abb. 7 dargestellt ist.

Die ökonomischen Gesamtaufwendungen als Summe der einmaligen und laufenden Aufwendungen führen unter diesen Bedingungen stets zu einem Minimum, das nun eine optimale Nichtumkehrbarkeit definiert. Es gibt also stets eine Anlage, die die geforderte Aufgabe mit einem Minimum an Aufwendungen zu lösen vermag. Sie ist in ihren Dimensionen durch die optimale Nichtumkehrbarkeit definiert, und diese ist eine Funktion der Struktur der ökonomischen Aufwendungen, also z. B. des Verhältnisses spezifischer einmaliger zu laufenden ökonomischen Aufwendungen.

Ein solches Vorgehen bezeichnet man als thermoökonomische Modellierung und Optimierung, da hierbei mit Hilfe ökonomischer Kategorien technische Parameter über thermodynamische Interpretationen festgelegt werden. Es sei darauf hingewiesen, daß im konkreten Fall nicht die Energieproduktion oder der Exergieverlust als unabhängiger Parameter eingesetzt werden muß, sondern auch jede die Nichtumkehrbarkeit kennzeichnende Größe wie z. B. Temperaturen, Drücke, Durchsätze oder auch entsprechende Differenzen dieser Größen.

3 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden nach einer kurzen Einführung einige wesentliche Anwendungsmöglichkeiten des Exergiebegriffes vorgestellt. Dabei versteht man unter der Exergie den arbeitsfähigen Anteil der Energie. Die Exergie ist in den letzten Jahrzehnten in die Lehrbücher der Technischen Thermodynamik „eingegangen“. Ihre Anwendung und vor allem die durch die Anwendung aufzeigbaren Konsequenzen werden z. Z. noch unzureichend von der breiten Öffentlichkeit aufgenommen. Das ist in mancherlei Hinsicht unbefriedigend, als der Exergiebegriff insbesondere die Aussagen des II. Hauptsatzes der Thermodynamik, des Entropiesatzes, in einer für die industrielle Praxis illustrativen Weise zu quantifizieren gestattet. Die Berücksichtigung dieser Aussagen ist aber eine der wesentlichen Grundlagen einer auf lange Sicht vernünftigen Energiewirtschaft und Energiepolitik. Letztere nur auf die Basis der Aussagen des I. Hauptsatzes der Thermodynamik, des Energiesatzes, zu stellen, ist vergleichbar z. B. mit dem Versuch, die Qualität der Malerei etwa nur am Verbrauch der Farben zu messen.

Literatur

- [1] Fratzscher, W. et al. (1986): Exergie – Theorie und Anwendungen. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.