

# DIE ANWENDUNG DER EXERGIE IN DER GEKOPPELTEN KRAFT-WÄRMEWIRTSCHAFT\*

Von

J. SZARGUT

Technische Hochschule, Gliwice

(Eingegangen am 3. Dezember, 1965)

## 1. Definition und Bedeutung der Exergie

In den letzten zehn Jahren hat sich in der technischen Thermodynamik sehr schnell ein neues Teilgebiet entwickelt, das man vor kurzem als die exergetische Analyse bezeichnet hat [1]. Die exergetische Analyse kann als zugleich wärmetechnische und entropische Analyse angesehen werden, da sie auf der Anwendung sowohl des ersten als auch des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik beruht.

Bisher bediente man sich zur Untersuchung der Vollkommenheit von Wärmeprozessen gewöhnlich der Wärmebilanz. Eine solche Bilanz bietet jedoch nur ein recht einseitiges Bild der Wärmeprozesse. Erstens erfaßt sie nämlich verschiedene Energiearten nur quantitativ, ohne ihre unterschiedliche Qualität zu berücksichtigen. Zweitens gestattet sie es nicht, den höchstmöglichen erreichbaren Wirkungsgrad eines Prozesses zu ermitteln, sie erlaubt es also nicht, den Gütegrad des Prozesses abzuschätzen. Drittens ist die Wärmebilanz nicht geeignet, die Ursachen der Verringerung der Vollkommenheit eines Wärmeprozesses zu erklären. Die in der Wärmebilanz ausgewiesenen Energieverluste bilden lediglich die letzte Folge irreversibler Erscheinungen. Um feststellen zu können, wo die Ursachen dieser Verluste einwirken, und um ihren Einfluß mengenmäßig ermitteln zu können, muß man vom II. Hauptsatz der Thermodynamik Gebrauch machen. So bedeutet z. B. in einem Kondensationskraftwerk die im Kondensator an das Kühlwasser abgegebene Wärme den größten Wärmeverlust. Die Ursache dieses Verlustes ist jedoch nicht etwa eine mangelhafte Arbeitsweise des Kondensators, sondern vor allen Dingen die Irreversibilität der im Kessel verlaufenden Prozesse.

Um den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zur Analyse von Wärmeprozessen auswerten zu können, ist für verschiedene Energiearten ein gemeinsamer Qualitätsmaßstab einzuführen und ein Nullpunkt dieses Maßstabes festzusetzen. Als Maßstab der Energiequalität hat man die maximale Arbeit

\* Text eines Vortrages, den Verfasser am 13. Oktober 1965 am Lehrstuhl für Energiewirtschaft der Technischen Universität Budapest gehalten hat.

angenommen, die mittels dieser Energie geleistet werden kann. Beim Festsetzen des Nullpunktes müssen nicht nur die Gesetze der Thermodynamik, sondern auch die technisch-ökonomischen Voraussetzungen Berücksichtigung finden. Analysiert man die Rolle der Umgebung bei technischen Wärmeprozessen [2], so gelangt man zu der Überzeugung, daß die uns umgebende Natur für solche Prozesse die Quelle einer ökonomisch wertlosen Wärme und auch ökonomisch wertloser Substanzen bildet. Das energetische Niveau der allgemein in der Umgebung auftretenden Materie ist demnach bei der Bewertung der Qualität verschiedener Energiearten als Nullpunkt anzusehen. Auf diese Weise gelangt man zu der Größe, die Z. RANT [1] als Exergie bezeichnet hat.

Die Exergie der Materie ist also die maximale Arbeitsfähigkeit, wie sie in Beziehung auf die allgemein in der Umgebung auftretende Materie festgesetzt worden ist. Die Exergie bringt die Qualität der Energie in Hinsicht auf die Möglichkeit ihrer Auswertung in industriellen Wärmeprozessen zum Ausdruck. Diese Größe stellt also die praktische energetische Anwendbarkeit des energetischen Zustandes der Materie dar.

Im Gegensatz zur Energie unterliegt die Exergie nicht dem Erhaltungsgesetz. Jede irreversible Erscheinung bildet die Ursache eines unwiederbringlichen Exergieverlustes, und wie bekannt, sind alle wirklichen Erscheinungen irreversibel. Neben dem Gesetz der Energieerhaltung gilt demnach das Gesetz der Exergievernichtung [4], das durch die Gouy—Stodolasche Gleichung

$$\delta B = \Pi T_0 \quad (1)$$

ausgedrückt wird. Dabei ist

- $\delta B$  — der durch die Irreversibilität des Prozesses verursachte Exergieverlust;  
 $\Pi$  — die Summe der Entropiezunahmen aller am Prozess teilnehmenden Körper;  
 $T_0$  — die absolute Umgebungstemperatur.

Die Ergebnisse der exergetischen Analyse faßt man zur besseren Übersicht gewöhnlich in Form einer Bilanz zusammen, in der selbstverständlich neben der dem untersuchten System zugeführten und wieder entzogenen Exergie auch der Exergieverlust berücksichtigt werden muß, welcher durch die innerhalb der Bilanzhülle verlaufenden nicht umkehrbaren Prozesse verursacht wird:

$$B_1 = \Delta B_u + B_2 + \Sigma \Delta B_{zr} + L + \delta B_{1-2}. \quad (2)$$

Hier ist

- $B_1, B_2$  — die Exergie der dem System zugeführten und entzogenen Materie;  
 $\Delta B_u$  — die Exergiezunahme des Systems;  
 $\Delta B_{zr}$  — die Exergiezunahme einer äußeren Wärmequelle, die das System mit Wärme versorgt;

$L$  — die durch das System geleistete mechanische oder elektrische Arbeit;

$\delta B_{1-2}$  — der Exergieverlust, wie er durch die innerhalb des Systems verlaufenden nicht umkehrbaren Prozesse verursacht wird.

Die klassische Anwendung der Exergie beruht auf der Untersuchung des Gütegrades von Wärmeprozessen und der Ermittlung von Exergieverlusten, die durch die Irreversibilität der einzelnen Zustandsänderungen im Prozeß verursacht werden. Eine solche Analyse ermöglicht es, die Hauptursachen der Verminderung der Vollkommenheit eines Prozesses aufzudecken, und somit weist sie auch darauf hin, wie man ihn möglicherweise vervollkommen kann. Die Exergie gestattet uns auch, in jedem Prozeß die Grenzen der Verbesserungsmöglichkeiten festzustellen. Außerdem ermöglicht es die Exergie, die energetische Nutzbarkeit von abfallenden Energieträgern, wie z.B. von Rauchgasen, Kühlwasser usw. richtig zu bewerten.

Besonders günstig kommen die Vorteile der exergetischen Analyse in Prozessen der gekoppelten Kraft-Wärmewirtschaft zum Ausdruck. In solchen Prozessen stoßen wir nämlich auf Energieträger von offenkundig heterogener Qualität. Ein rein quantitativer Vergleich der einzelnen Energieströme, der ihre verschiedenartige Qualität nicht berücksichtigt, führt in diesem Falle zu falschen Folgerungen. Erst die Exergie gestattet es, die einzelnen Energieströme richtig zu beurteilen, und zwar vom Standpunkt ihrer praktischen Nutzbarkeit aus. Auch die Beurteilung des Wirkungsgrades eines gekoppelten Prozesses führt zu falschen Ergebnissen, wenn nicht auch die Qualitätsunterschiede der Energie mitberücksichtigt werden. Der thermische Wirkungsgrad eines Heizkraftwerkes hat z.B. einen Wert von ungefähr 75%; dies könnte zu der fälschlichen Überzeugung führen, daß im Heizkraftwerk fast alle Möglichkeiten der thermodynamischen Vervollkommnung des Prozesses erschöpft sind.

Neuerdings stößt man immer häufiger auf Versuche zur Anwendung der Exergie zur Lösung technisch-ökonomischer Probleme. Jede Verminderung der Exergieverluste bedeutet nämlich gleichzeitig auch eine Verminderung der veränderlichen Kosten; eine Steigerung der Investitionskosten ist andererseits mit einer Steigerung der Exergieverluste verbunden, die während der Produktion von Investitionsgütern auftreten. Deshalb trachtet man danach, jeden Prozeß mit möglichst geringen Kosten für die Volkswirtschaft ablaufen zu lassen. Es ist demnach zu überlegen, ob es nicht besser wäre, Mittel und Wege zu suchen, die es gestatten, den Produktionsprozeß mit tunlichst geringen Exergieverlusten in der Volkswirtschaft zu verwirklichen. Auf diese Weise wäre es möglich, den wirtschaftlichen Wert der Industrieerzeugnisse anhand der »gesellschaftlich notwendigen, in der Volkswirtschaft auftretenden Summe der Exergieverluste« zu bestimmen.

Es muß jedoch ausdrücklich betont werden, daß die hier in allgemeinen Umrissen dargestellte »exergetische Ökonomik« keinesfalls mit der klassischen

Ökonomik übereinstimmt. Denken wir daran, daß die Exergiequellen, die dazu dienen, Industrieprozesse im Gang zu halten, in den Naturschätzen zu suchen sind, so gelangen wir zu der Überzeugung, daß die Bedingung der minimalen Exergieverlustsumme gleichbedeutend ist mit der Bedingung der maximalen Einsparung von Naturschätzen. Und so würde also die exergetische Ökonomik die Produktionsprozesse unter dem Gesichtswinkel der Einsparung von Naturschätzen zur Verwirklichung bringen. Eine auf dem Wertgesetz aufbauende Ökonomik setzt sich dagegen zum Ziel, möglichst an menschlicher Arbeit zu sparen.

Die Exergie ist demnach keine ökonomische Größe. In vielen Fällen jedoch ist eine offenkundige Übereinstimmung der Richtung der Exergieveränderungen mit der Richtung der wirtschaftlichen Wertveränderung zu beobachten. In solchen Fällen kann die Exergie zur angenäherten ökonomischen Bewertung des Energieträgers genutzt werden. Zweckmäßig wird man solche Bewertungsmethoden nur dann anwenden, wenn rein ökonomische Methoden nicht vorhanden sind oder auch wenn solche Methoden zu kompliziert sind. Die Möglichkeiten der ökonomischen Anwendung der Exergie sind besonders bei gekoppelten Kraft-Wärmeprozessen von großem Nutzen, da bei diesen Schwierigkeiten in der ökonomischen Bewertung des Anzapf- und Gegendruckdampfes auftreten. Dank der Anwendung der Exergie können auf recht einfache Weise zahlreiche technisch-ökonomische Probleme der gekoppelten Kraft-Wärmewirtschaft gelöst werden, unter Vermeidung so bedeutender Fehler, wie sie bei Lösungen auftreten, die auf einer rein wärmemäßigen Bewertung von Energieträgern fußen.

## 2. Die Berechnung der Exergie

Die allergrößte Bedeutung haben in der Industrie Durchflußprozesse, die allgemein im Beharrungszustand untersucht werden. Deshalb auch ist als grundlegende exergetische Größe die Exergie eines die unbewegliche Bilanzhülle durchschneidenden Substanzstromes anzunehmen. Diese Größe bezeichnet der Verfasser als Exergie  $b$ .

Abb. 1 veranschaulicht schematisch die Zerlegung der Exergie in ihre einzelnen Bestandteile [5]. Demjenigen Teil der Exergie, der nach Abzug der kinetischen und potentiellen Energie des Substanzstromes übrigbleibt, hat der Verfasser den Namen thermische Exergie  $b_t$  gegeben. Die thermische Exergie hinwieder kann in die physikalische Exergie  $\Delta_0 b$  und die chemische Exergie  $b_{ch}$  unterteilt werden. Die Ausnutzung der physikalischen Exergie beruht darauf, daß die untersuchte Substanz in einen Zustand mit den Parametern  $p_0$  und  $t_0$  der Umgebung gebracht wird. Eine Substanz mit den Parametern  $p_0$  und  $t_0$  hat eine positive chemische Exergie; diese ergibt sich aus der Differenz



zur Anwendung gelangen, in der

$T_n$  — die Normaltemperatur (in der vorliegenden Abhandlung sind 298,2° K zugrunde gelegt worden);

$T_0$  — die Umgebungstemperatur bezeichnet.

Am Lehrstuhl für Wärmeenergetik der Technischen Hochschule zu Gliwice wurden die Normalwerte der chemischen Exergie und Devaluationsenthalpie für 380 chemische Verbindungen ermittelt und in Tabellen zusammengestellt [10], [11].

Einige Schwierigkeiten bereitet die Berechnung der chemischen Exergie technischer Brennstoffe, für die die Werte der chemischen Entropie unbekannt sind. Wie aus den vom Lehrstuhl für Wärmeenergetik durchgeführten Forschungsarbeiten zu ersehen ist [11], kann die chemische Exergie der Steinkohle, Braunkohle sowie des Kokes anhand der Gleichung

$$b_{ch} = (W_d + r w) \left( 1,0438 + 0,1882 \frac{h}{c} + 0,0610 \frac{o}{c} + 0,0404 \frac{n}{c} \right) + (b_{chS} - W_{dS}) s \quad (5)$$

ermittelt werden. Dabei ist

$W_d$  — der Heizwert eines feuchten Brennstoffes;

$r$  — die Verdampfungsenthalpie des Wassers bei Umgebungstemperatur;

$c, h, o, n, s, w$  — die Grammanteile des Kohlenstoffes, Wasserstoffes, Sauerstoffes, Stickstoffes, Schwefels und der Feuchtigkeit im Brennstoff und

$b_{chS}, W_{dS}$  — die chemische Exergie und Heizwert des Schwefels.

### 3. Der exergetische Wirkungsgrad eines Heizkraftwerkes

Zu den Nutzeffekten der gekoppelten Prozesse eines Heizkraftwerkes zählen: die elektrische Energie und die Wärme, die vom Gegendruck- bzw. Anzapfdampf abgegeben wird. Bei der Berechnung des Wirkungsgrades eines Heizkraftwerkes sollten diese Nutzeffekte nicht als gleichbedeutend angesehen werden, da ja die Heizwärme eine weitaus geringere Qualität besitzt als die elektrische Energie; auch ist die Qualität der Heizwärme um so kleiner, je mehr sich die Temperatur des Wärmeträgers derjenigen der Umgebung nähert. Es ist deshalb ratsam, den Wirkungsgrad eines Heizkraftwerkes mittels der Exergie zu bestimmen.

Der Gütegrad eines Heizkraftwerkes ist offenbar größer als derjenige der gesonderten Kraft- und Wärmeproduktion (und besonders die Produktion eines Wärmeträgers in einer Kesselanlage weist einen nur geringen Vollkommenheitsgrad auf). Trotzdem aber treten in einem Heizkraftwerk immer noch

Prozesse auf, die in bedeutendem Maße irreversibel sind und zwar die Verbrennung und der Wärmeaustausch zwischen den Rauchgasen einerseits und dem Wasser und dem Dampf andererseits. Und so ist der exergetische Wirkungsgrad eines Heizkraftwerkes zwar weitaus besser als der Wirkungsgrad der Kesselanlage, die die Wärme liefert, doch ist er nicht viel besser als der exergetische Wirkungsgrad eines Kondensationskraftwerkes.

Es könnten Zweifel auftauchen, worauf die Erhöhung der Vollkommenheit eines Heizkraftwerkes beruhen könnte, da doch die energetischen Nutzeffekte nicht viel geringer sind als die chemische Energie des Brennstoffes. Es darf jedoch nicht vergessen werden, daß die Änderung der Dampfparameter das Verhältnis der hochwertigen elektrischen Energie zur Menge der Heizwärme zu verbessern vermag. Die Erhöhung der Parameter des frischen Dampfes bewirkt eine Verringerung der Irreversibilität des Wärmeaustausches im Kessel; dadurch erzielt man eine Verbesserung des exergetischen Wirkungsgrades des Heizkraftwerks. Es sei darauf hingewiesen, daß der Einfluß dieser Parameter bei der Berechnung des thermischen Wirkungsgrades unsichtbar bleibt.

Bei der Definition des exergetischen Wirkungsgrades eines Heizkraftwerkes habe man stets im Auge, daß jede in der Exergiebilanz auftretende Größe einer der folgenden drei Gruppen einzugliedern ist: 1. den Bestandteilen der Antriebsexergie, 2. den Bestandteilen des Nutzeffektes oder 3. den Exergieverlusten. Die Antriebsexergie tritt in der Bilanz lediglich auf der Aktivseite auf, während die Verluste nur auf der Seite der Passiva erscheinen. Der Nutzeffekt kann aus der Differenz mancher auf der Aktivseite und mancher auf der Passivseite angeführten Größen hervorgehen. Aus der hier erörterten Einteilung ist zu ersehen, daß z. B. die Exergie des im Kreisprozess verlorengegangenen Wassers der Antriebsexergie des Prozesses beizuzählen ist.

Abb. 2 zeigt das vereinfachte Schema eines Heizkraftwerkes zusammen mit dem Heizwasser- und Kühlwasserkreislauf. Bei der Bewertung der Vollkommenheit eines Heizkraftwerkes können verschiedene Vereinbarungen getroffen werden, die den Bereich des erörterten Systems zu bestimmen helfen. Die Bilanzhülle I enthält das eigentliche Heizkraftwerk. Den exergetischen Wirkungsgrad eines solchen Systems könnte man als den Wirkungsgrad brutto  $\eta_{bccB}$  des Heizkraftwerkes bezeichnen

$$\eta_{bccB} = \frac{N + N_w + \sum_i (\dot{G}_u b_u - \dot{G}_k b_k)_i}{\dot{P}b_p + \dot{G}_d b_d}, \quad (6)$$

wenn

- $N$  die an das Stromnetz abgegebene elektrische Leistung;  
 $N_w$  die für den Antrieb der Kühlwasserpumpe abgegebene elektrische Leistung;

- $\dot{P}, b_p$  den Verbrauch und die spezifische Exergie des Brennstoffes;  
 $\dot{G}_u, b_u$  den Mengenstrom und die spezifische Exergie des der Turbine entweichenden Anzapfdampfes;  
 $\dot{G}_k, b_k$  den Mengenstrom und die spezifische Exergie des aus dem Anzapfdampf entstandenen Kondensats;  
 $\dot{G}_d, b_d$  den Mengenstrom und die spezifische Exergie des Zusatzwassers bedeutet, das die im Kreisprozeß entstandenen Verluste ergänzt.

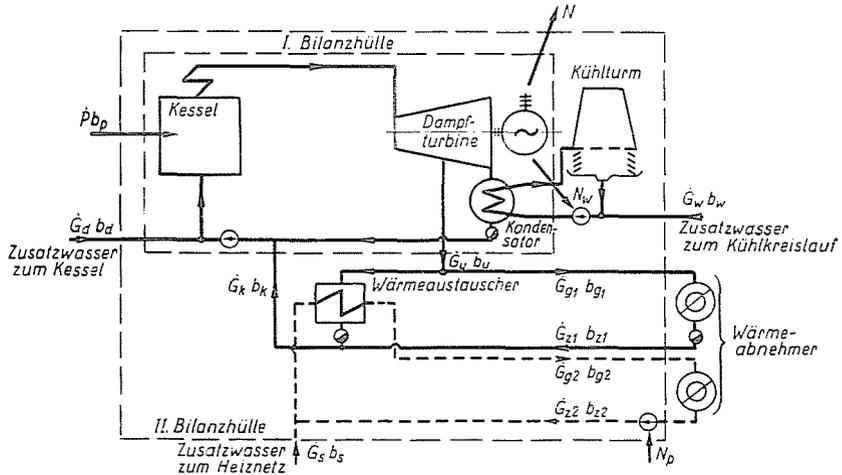


Abb. 2. Schema eines Heizkraftwerkes

(Es ist hierbei vorausgesetzt, daß Kühlwasserpumpen vom Turbosatz des Heizkraftwerkes eine Antriebsleistung  $N_w$  beziehen, während Wärmenetzpumpen eine Antriebsleistung  $N_p$  vom elektroenergetischen Netz erhalten.)

In der in Gleichung [6] auftretenden Summe  $\sum_i$  bedeutet der Index  $i$  die laufende Nummer des der Turbine entnommenen Heizdampfstromes, während die zur Speisewasservorwärmung benötigten Anzapfdampfströme bei der Numerierung unbeachtet bleiben. In der Exergiebilanz eines durch die Bilanzhülle I bestimmten Systems wurde der Exergiezuwachs des Kühlwassers im Kondensator als äußerer Exergieverlust behandelt. Der Ausdruck  $\dot{G}_d, b_d$  hat im allgemeinen nur den geringen Wert von etwa 0,3% der Brennstoffexergie.

Die Bilanzhülle II (Abb. 2) umfaßt alle Anlagen eines Heizkraftwerkes, bis zur Stelle der Abgabe des Wärmeträgers an den Verbraucher. Das in der Bilanzhülle II enthaltene System umfaßt also außer den im System I auftretenden Anlagen auch noch eine Kühlwasser- und eine Wärmenetzpumpe sowie Wärmeaustauscher zum Vorwärmen des Heizwassers, Heißdampfrohrleitungen

und Heiznetzrohrleitungen. In diesem System treten zusätzliche Exergieverluste in den Wärmeaustauschern, ferner Exergieverluste bei der Übertragung des Heizmittels sowie Kühlwasser- und Heizwasserverluste auf. Den exergetischen Wirkungsgrad eines durch die Bilanzhülle II erfaßten Systems könnte man als exergetischen Wirkungsgrad netto  $\eta_{becN}$  des Heizkraftwerkes bezeichnen:

$$\eta_{becN} = \frac{N - N_p + \sum_j (\dot{G}_g b_g - \dot{G}_z b_z)_j}{\dot{P} b_p + \dot{G}_d b_d + \dot{G}_w b_w + \dot{G}_s b_s} \quad (7)$$

Hier bedeutet

- $\dot{G}_g, b_g$  — den Mengenstrom und die spezifische Exergie des an den Verbraucher gelieferten Heizmittels (Wasser bzw. Dampf);
- $\dot{G}_z, b_z$  — den Mengenstrom und die spezifische Exergie des vom Verbraucher rückerstatteten Heizwassers bzw. Kondensats;
- $\dot{G}_w, b_w$  — den Mengenstrom und die spezifische Exergie des Wassers, welches die Verluste des Kühlwassers ergänzt;
- $\dot{G}_s, b_s$  — den Mengenstrom und die spezifische Exergie des Wassers, welches die im Heiznetz entstehenden Verluste ergänzt;
- $N_p$  — die elektrische Antriebsleistung der Heiznetzpumpe.

Der Ausdruck  $\dot{G}_w b_w$  besitzt in den meisten Fällen einen Wert von etwa 1,5% der Brennstoffexergie, wogegen die Größe  $\dot{G}_s b_s$  auf ungefähr 0,7% geschätzt werden kann.

#### 4. Anwendung der Exergie bei der Lösung von technisch-ökonomischen Problemen der gekoppelten Kraft-Wärmewirtschaft

##### 4. 1. Die Verteilung der Herstellungskosten in einem Heizkraftwerk

Einer der frühesten Vorschläge zur Anwendung der Exergie bei der Lösung technisch-ökonomischer Probleme in der gekoppelten Kraft-Wärmewirtschaft betrifft die Verteilung der Produktionskosten eines Heizkraftwerkes auf den Heißdampf und auf die elektrische Energie [1]. Nach dem Vorschlag Z. RANTS sollten die Produktionskosten proportional dem exergetisch erfaßten Nützeffekt eines Heizkraftwerkes verteilt werden, d. h. proportional der erzeugten Menge elektrischer Energie und der Exergiemenge des erzeugten Heizmittels (Abb. 3).

Die allgemeine Richtigkeit dieser Methode kann an einem Kriterium nachgeprüft werden, das der Verfasser schon früher ausgedrückt hat [8]. Die Methode der Verteilung der Herstellungskosten in einem Heizkraftwerk ist keineswegs widersinnig, wenn mit dem Absinken des Anzapfdampfdruckes auch die Eigenkosten der Dampferzeugung immer kleiner werden, um schließ-

lich bei gesättigtem Dampf in Umgebungstemperatur einen Nullwert zu erreichen.

Die bisher so oft angewandte physikalische Methode z.B. kommt diesen Anforderungen nicht nach; sie verteilt die Kosten proportional auf die erhaltenen Ströme nutzbarer Energie. Die exergetische Methode dagegen erfüllt diese Voraussetzungen. Dennoch können die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse ediglich als angenäherte Werte angesehen werden. Es ist nur dann ratsam,

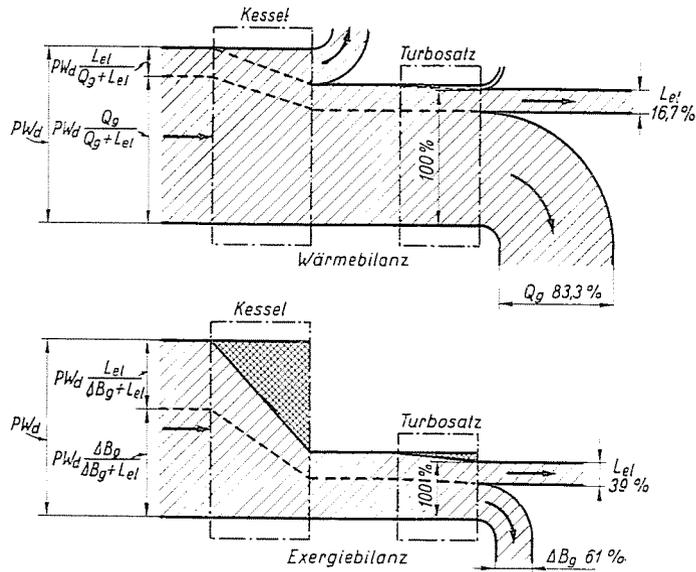


Abb. 3. Die Wärme- und Exergiebilanz eines Heizkraftwerkes

die exergetische Methode zur Anwendung zu bringen, wenn rein ökonomische Verteilungsmethoden nicht zugänglich sind; dies gilt z. B. für Heizkraftwerke, die mit dem elektroenergetischen System nicht zusammenarbeiten.

Bei der Erörterung eines Heizkraftwerkes, welches mit dem elektroenergetischen System zusammenarbeitet, findet man das richtige Kostenverteilungsverfahren in Anlehnung an rein wirtschaftliche Voraussetzungen. Ein solches Verfahren ist in Polen von J. WAGNER vorgeschlagen worden [12].

#### 4. 2. Der Gebührentarif für den Wärmeträger

Die Gebührensätze eines rationalen Tarifs für den Wärmeträger haben den richtig berechneten Eigenkosten der Heizträgerproduktion zu entspringen. Diese Kosten sind also nach einer Methode zu berechnen, die auf rein ökonomischen Voraussetzungen fußt (z.B. nach dem Verfahren von J. WAGNER), wobei die Berechnungen für verschiedene Heizkraftwerke und für verschiedene

Parameter des Wärmeträgers berechnet werden sollten. Aus den Berechnungsergebnissen sind entsprechende Mittelwerte zu ermitteln, da die Gebührensätze für den Heizträger lediglich von dessen Parametern abhängig sein sollten, nicht aber von den lokalen technisch-ökonomischen Verhältnissen, die in den einzelnen Heizkraftwerken herrschen.

Die hier besprochene Methode würde aber ziemlich mühsame Berechnungen erforderlich machen und zu einem nicht eben günstigen Tarif führen. Die Tarifsätze müßten nämlich als Funktion der Parameter des Heizträgers in Gestalt ausführlicher Tabellen zusammengestellt werden. Deshalb hat der Verfasser 1957 vorgeschlagen, einen exergetischen Tarif einzuführen [8], in welchem aus der Berechnung der Eigenkosten der Heizträgerproduktion mit gegebenen Parametern nur ein Bezugspunkt hervorgehen darf.

Die Richtigkeit des Gebührentarifs kann anhand des früher gegebenen Kriteriums nachgeprüft werden. Der Preis des Heizträgers sollte bis auf Null absinken, wenn seine Temperatur der Umgebungstemperatur zustrebt. Der exergetische Tarif kommt dieser Anforderung nach.

Der exergetische Tarif würde wahrscheinlich nur in geringem Maße von einem Tarif abweichen, der nach rein ökonomischen Methoden aufgestellt wird, da in den beiden extremen Punkten (d. h. für einen typischen Heizträger, der als Bezugspunkt des exergetischen Tarifs dient, und für eine Substanz mit Umgebungstemperatur) beide Tarife übereinstimmende Werte aufweisen.

#### *4. 3. Optimale Parameter des Wärmeträgers und der weiteste lohnende Fortleitungsbereich eines Wärmeträgers*

Lehnen wir uns den exergetischen Gebührentarif für den Wärmeträger an, so können wir einige typische technisch-ökonomische Probleme der gekoppelten Kraft-Wärmewirtschaft lösen. Zu diesen Problemen gehört unter anderem die Wahl des optimalen Druckes des Anzapfdampfes, der einen Wärmeaustauscher zu speisen hat. Je höher der Druck des Anzapfdampfes ist, desto höher sind die Kosten dieses Dampfes im exergetischen Tarif. Andererseits aber erhöht sich dank der Steigerung des Anzapfdampfdruckes auch der Temperaturunterschied beim Wärmeaustausch zwischen Dampf und erwärmter Substanz, es vermindern sich also die Heizfläche des Wärmeaustauschers sowie dessen Herstellungskosten. Summiert man die Kosten des Dampfes und die ständigen Exploitationskosten des Wärmeaustauschers, so gelangt man zum optimalen Druck, bei welchem die Kostensumme ihren niedrigsten Wert erreicht.

Das hier erörterte Problem hat in der Abhandlung [9] eine allgemeine Lösung gefunden, und zwar für festgesetzte Temperaturen und Durchflußwiderstände der erwärmten Substanz, wobei vorausgesetzt ist, daß der Heizdampf gesättigt war.

Es soll noch erwähnt werden, daß es der traditionelle Gebührentarif des Wärmeträgers, bezogen auf eine Wärmeeinheit, nicht gestattet, den optimalen Druck des Anzapfdampfes zu bestimmen, da bei Anwendung dieses Tarifs die Kosten der Wärme vom Dampfdruck unabhängig sind.

Was den weitesten lohnenden Fortleitungsbereich des Wärmeträgers betrifft, der im Heizkraftwerk erzeugt wird, führt der exergetische Tarif zu anderen Ergebnissen als der traditionelle Wärmetarif. Außer dem Einfluß nämlich, den der Fortleitung auf größere Entfernungen auf die ständigen Kosten der Rohrleitung ausübt, ermöglicht es der exergetische Tarif, die mit der Entfernung wachsenden Druckverluste mit in Rechnung zu ziehen. Je größer die Verluste an Anzapfdampfdruck sind, um so teurer wäre der der Turbine entnommene Dampf (dies natürlich wenn der Dampfdruck beim Abnehmer einen konstanten Wert haben soll). Die größte, in wirtschaftlicher Hinsicht zweckmäßige Entfernung der Wärmeträgerfortleitung aus dem Heizkraftwerk bestimmt man, indem man die Summe der ständigen Kosten der Rohrleitung und der Kosten des im Heizkraftwerk erzeugten Wärmeträgers mit den Wärmeproduktionskosten in einer lokalen Kesselanlage vergleicht.

Bei der exergetischen Beurteilung des ökonomischen Wertes eines Wärmeträgers lassen sich Probleme, in denen eine Gesamtmenge der vom Wärmeträger abgegebenen Wärme auftritt, mit ziemlicher Genauigkeit lösen (in solchen Fällen tritt in den ökonomischen Berechnungen ein Durchschnittswert der Wärme auf).

Doch gibt es Probleme, bei deren Lösung man den lokalen ökonomischen Wert der Wärme unumgänglich kennen muß. Ein klassisches Beispiel hierfür bildet die Berechnung der optimalen Isolierstärke der Rohrleitung. Je dicker die Wärmeisolation ist, um so höher sind ihre Herstellungskosten. Andererseits vermindern sich die Kosten aus dem Wärmeverlust, wenn die Isolation dicker wird. Es besteht demnach eine gewisse optimale Isolierstärke, bei der die Summe der ökonomischen Verluste ihren niedrigsten Punkt erreicht.

Bisher hat man bei Berechnungen der optimalen Isolierstärke einer Rohrleitung gewöhnlich die Kosten der verlorengehenden Wärme nach einem Mittelwert der spezifischen Kosten der im Kessel zugeführten Wärme bestimmt. Eine solche Verfahrensweise ist natürlich falsch. Die Wärme, die während der Übertragung eines heißen Wärmeträgers innerhalb der Rohrleitung verlorengeht, zeichnet sich durch ihre hohe Qualität aus, da die Temperatur des Wärmeträgers während der Abgabe dieser Wärme höher ist als bei allen seinen anderen Zuständen.

Die erhöhte lokale Qualität der durch die Wärmeisolation verlorengehenden Wärme kann anhand der Exergie bestimmt werden. In einem solchen Falle ist es aber ungewiß, ob der lokale Wärmewert, berechnet anhand der Exergie, dem auf rein ökonomischer Grundlage berechneten lokalen Wärmewert nahe liegt.

## 5. Schlußfolgerungen

Wie aus den vorausgehenden Erörterungen erhellt, beruht die Anwendung der Exergie hauptsächlich auf der Bestimmung der durch irreversible Erscheinungen verursachten Verluste sowie auf der Ermittlung des Vollkommenheitsgrades eines Prozesses unter Zuhilfenahme des exergetischen Wirkungsgrades. Dieses Gebiet der Exergieanwendung ist in der gekoppelten Kraft-Wärmewirtschaft besonders wichtig, da hier Energieströme von beträchtlich differenzierter Qualität auftreten.

Ebenso wichtig ist die Möglichkeit der ökonomischen Anwendung der Exergie in der gekoppelten Kraft-Wärmewirtschaft. Die Exergie kann dazu dienen, den Gegendruck- bzw. Anzapfdampf ökonomisch zu bewerten. Eine solche Methode ist weitaus einfacher als die rein ökonomischen Verfahren, aber doch genau genug. Die exergetische Bewertung schaltet große Fehler aus, die sonst bei der Beurteilung eines Wärmeträgers nur bezüglich der Wärmemenge auftreten.

## Zusammenfassung

Die Exergie stellt die maximale Arbeitsfähigkeit der Materie in Beziehung zu der allgemein in der Umgebung auftretende Materie dar. Die Exergie bringt also die Qualität der Energie zum Ausdruck. Die exergetische Analyse ist ein zuverlässiges Mittel zur Untersuchung des Gütegrades energetischer Prozesse, insbesondere in der gekoppelten Kraft-Wärmewirtschaft, wo verschiedenartige Energieströme auftreten. Der exergetische Wirkungsgrad eines Heizkraftwerkes ist nicht viel besser als der eines Kondensationskraftwerkes. Die Exergie kann zur Lösung mancher technisch-ökonomischer Probleme der gekoppelten Kraft-Wärmewirtschaft ausgenutzt werden. Sie ist zwar keine ökonomische Größe, doch gestattet sie die angenäherte ökonomische Bewertung des Anzapf- und Gegendruckdampfes.

## Literatur

1. RANT, Z.: Bewertung und praktische Verrechnung von Energien, Allg. Wärmetechn. **8**, Nr. 3, 73—79 (1961).
2. SZARGUT, J.: Straty pracy mechanicznej w energetycznych urządzeniach przemysłowych (Verluste mechanischer Arbeit in energetischen Industrieanlagen), Gospodarka Ciepłna **2**, Nr. 1, 20—23 (1954).
3. SZARGUT, J.: Bilans eksergetyczny procesów cieplnych (Die Exergiebilanz von Wärmeprozessen), Energetyka Przemysłowa **9**, Nr. 3, 73—79 (1961).
4. SZARGUT, J.: Pojęcie egzergii w odróżnieniu od energii i możliwości praktycznego stosowanie egzergii (Der Begriff der Exergie im Gegensatz zur Energie und die Möglichkeit der praktischen Anwendung der Exergie), Energetyka Przemysłowa **10**, Nr. 11, 374—378 (1962).
5. SZARGUT, J.: Klasyfikacja pojęć egzergii (Die Klassifikation der Exergiebegriffe), Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr. 104; Energetyka **14**, 4—12 (1964).
6. SZARGUT, J.: Zastosowanie nowej metody bilansowanie opartej na ciepłe dewaluacji w hutnictwie metali nieżelaznych (Die Anwendung einer neuen Bilanzmethode in Anlehnung an die Devaluationswärme im Hüttenwesen nichtferritischer Metalle), Rudy i Metale Nieżelazne **1**, 1—7 (1958).
7. SZARGUT, J.: Bilans eksergetyczny procesów hutniczych (Die Exergiebilanz von Hüttenprozessen), Archiwum Hutnictwa **6**, Nr. 1, 23—60 (1961).

8. SZARGUT, J.: Zagadnienie racjonalnej taryfy opłat za parę i gorącą wodę (Das Problem der Aufstellung eines rationalen Gebührentarifs für Dampf und Heizwasser), *Gospodarka Paliwami i Energią* **II**, Nr. 4, 132—135 (1963).
9. SZARGUT, J.—PETELA, R.: Dobór parametrów pary grzewczej wytwarzanej w gospodarce skojarzonej dla przepływowych wymienników ciepła (Die Wahl der Parameter des Heißdampfes, der in der gekoppelten Kraft-Wärmewirtschaft zum Heizen von Wärmeaustauschern erzeugt wird), *Problemy Projektowe Hutnictwa* **II**, Nr. 8, 234—240 (1963).
10. SZARGUT, J., ZIEBIK, A.: Egzergia związków chemicznych w procesach hutniczych (Die Exergie chemischer Verbindungen in Hüttenprozessen), *Problemy Projektowe Hutnictwa* **XIII**, Nr. 2, 40—49 (1965).
11. SZARGUT, J., STYRYLSKA, T.: Die angenäherte Bestimmung der Brennstoffexergie, *BWK* **16**, Nr. 12, 589—596 (1964).
12. WAGNER, J.: Metoda podziału kosztów własnych elektrociepłowni między oddawaną z niej energią elektryczną i ciepłą (Verfahrensweise beim Verteilen der Eigenkosten eines Heizkraftwerkes in die von ihm gelieferte elektrische Energie und Wärmeenergie), *Polska Akademia Nauk, Komitet Elektryfikacji Polski, Materiały i studia*, Bd. V, Łódź—Warszawa 1962.

Prof. Dr. Jan SZARGUT, Polytechnika Śląska, Gliwice, Polska