

## Technische Energetik

### 1. Faszination Energie

Der Energiebegriff und die mit der Energieversorgung verbundenen Probleme besitzen eine starke und eigentümliche Faszination für die Gesellschaft allgemein und nicht nur für den, der sich von Amtes oder Berufes wegen mit diesen Objekten auseinandersetzen hat. Das ist nicht allein eine Erscheinung, die mit dem verstärkten Umweltbewusstsein der letzten Jahrzehnte verknüpft ist, sondern lässt sich bereits über mehrere Jahrhunderte verfolgen, wie einige Beispiele zeigen sollen. So wurde früher der rauchende Schornstein und der Schein des Feuers in der Malerei als ein Ausdruck der Prosperität angesehen, während heute dagegen die aus den Kühltürmen der Kraftwerke entweichenden Wasserdampfwolken schon als eine Umweltbelastung empfunden werden. Im 19. Jahrhundert komponierte Berlioz für ein 1 000-Mann Orchester einen Gesang der Eisenbahnen anlässlich der Einweihung der Eisenbahnverbindung Lille-Paris. Honegger widmete 1923 ein Musikstück (Mouvement symphonique) einer speziellen Lokomotive und nannte es dann auch „Pacific 231“. Moderne Kompositionen kennzeichnen dagegen im allgemeinen technische Zusammenhänge durch chaotische Tonballungen, die aber häufig nicht nur den angegebenen Fragenkreis gewidmet werden.

Die Bedeutung der Dampfmaschine als Ausdruck der 2. energetischen Revolution, nämlich der Beherrschung der Umwandlung von Wärme in Arbeit, wurde schon vor der physikalisch umfassenden und vollständigen Beschreibung des Energiebegriffes erkannt. So bezeichnet Adelbert von Chamisso [1] in seiner Weltreise 1815 - 1818 die Dampfmaschine als die erste „warmblütige“ Erfindung der Menschheit. Damit will er auf die damit erreichte neue Qualität dieser Maschine gegenüber den bisherigen Erfindungen wie Wind- und Wasserräder hinweisen. Die Analogie zur Biologie macht das treffend deutlich. Auch das heute so intensiv diskutierte Problem der Erschöpfung von Naturvorräten bestimmter Energiearten ist schon vor langer Zeit angesprochen worden. So beschreibt Georg Forster [2] in seinen Ansichten vom Niederrhein, einem Bericht über eine Reise, die er 1790 gemeinsam mit Alexander von Humboldt unternahm, in Verbindung mit Betrachtungen über die Aachener Region, die Situation, dass durch die Eisenindustrie das gesamte Holz der Umgebung aufgebraucht wurde. Eine weitere Entwicklung dieses Industriezweiges aber war möglich durch den Übergang zu einem neuen Brennstoff – der Steinkohle -, die im Aachener Revier gefunden wurde. In logischer Konsequenz wirft er dann die Frage auf, was geschehen wird, wenn auch diese Energiequelle aufgebraucht ist. Seine Prognose lautet, dass sich dann die Menschheit zur Befriedigung ihrer energetischen Bedürfnisse in den wärmeren Zonen auf der Erde, die Sahara und rund um den Äquator, ansiedeln müsste. Ein Gedanke, der in Verbindung mit der Ausnutzung der Sonnenenergie in jüngster Zeit eigentümlicherweise wiederum aktuelle Bedeutung erlangt hat.

Die Auseinandersetzung mit dem Energiebegriff in der Literatur findet man in Verbindung mit der Schilderung der 2. industriellen Revolution in vielen Romanen z.B. von Kellermann, Hauptmann und vor allem Max Eyth. Sie zieht sich bis in die jüngste Vergangenheit hin. Insbesondere die Science-fiction-Literatur bietet natürlich interessante Ansatzpunkte. Zwei Beispiele aus neuerer Zeit: So beschäftigt sich Lem in seinen Sterntagebüchern mit der

Ausnutzung der kindlichen Energie, die in dem Bewegungsbedürfnis der Kinder zum Ausdruck kommt. Heute liegen schon technische Vorschläge zur Energiegewinnung unter diesen Bedingungen vor, wenn deren Leistungen auch nur im  $\mu\text{W}$ -Bereich liegt. Für Zwecke der Informationsübertragung sind aber derartige Leistungen ohne weiteres interessant. Gerhard Branstner setzt sich in seinem „Entlaufenen Perpetuum mobile“ mit einer Situation auf einem Himmelskörper auseinander, der eine sehr hohe Umgebungstemperatur im Vergleich zur Körpertemperatur des Menschen besitzt. Die technisch vollständige Durchdringung einer solchen Situation dürfte eine außerordentlich interessante akademische Aufgabe sein.

Mit der philosophischen Dimension des Energiebegriffes haben sich zunächst Marx und Engels ausführlich auseinandergesetzt. Das führte im Verlaufe des 19. Jahrhunderts schließlich soweit, dass Henry Adams unter den Einfluss der großen Weltausstellungen sogar den Begriff der sozialen Energie einführte, mit dem er gesellschaftliche Entwicklungen erklären wollte und hierzu auch schon quantitative Abschätzungen vorlegte. Und so schließt sich Wilhelm Ostwald mit seiner Energetik ohne Bruch an eine solche Entwicklung an, obwohl er zunächst nicht aus dem philosophischen sondern bekanntlich aus dem naturwissenschaftlichen Bereich kam. Die Herausbildung der Physikalische Chemie mit ihrem gegenüber der klassischen Chemie neuartigen methodischen Konzept wies der Energie schon eine zentrale Bedeutung zu. Seine Antrittsvorlesung in Leipzig widmete er wohl deshalb dem Thema „Die Energie und ihre Wandlungen“ [3]. Damit war die Basis gegeben, letztendlich die Energietechnik und die Verfahrenstechnik, d.h. die Energieindustrie und die stoffwandelnde Industrie, im speziellen die chemische Industrie, auf gemeinsame und einheitliche naturwissenschaftliche und technische Grundlagen zu stellen. Das soll im folgenden aufgezeigt werden. Auf die weitergehenden naturphilosophischen und allgemein philosophischen Ableitungen und möglichen Konsequenzen soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

## 2. Naturwissenschaftliche Grundprinzipien der Ostwaldschen Energetik

Welche Aussagen Ostwalds sind für die Verfolgung des angedeuteten Zieles interessant? Das ist zunächst der energetische Imperativ selbst:

„Vergeude keine Energie, verwerte sie!“

Ostwald hat diese Formulierung erst relativ spät, als er sich schon mit vielen anderen Problemen auseinander setzte, vorgeschlagen. Ursprünglich war dieser Imperativ als ein allgemeines technisches Grundgesetz gedacht. Erst später ordnete er es als eine philosophische Kategorie ein. Das ist zunächst eine Aufforderung zum sparsamen Einsatz und zur sparsamen Verwendung von Energie. Das entspricht einer Zielsetzung, die sich die Wärmewirtschaft, die später in die rationelle Energieanwendung einmündete, in den zwanziger Jahren zu eigen machte. Es gilt festzuhalten, dass Ostwald nicht aufforderte zur Einschränkung und Verminderung der energetischen Bedürfnisse, sondern lediglich zum sinnvollen und sparsamen Energieeinsatz. Insofern kommt diese Forderung auch den Zielsetzungen der Nachhaltigkeit entgegen. Allerdings nicht in dem Sinne, dass das „Zurück zur Natur“ keine Spuren hinterlassen darf. Jede menschliche Tätigkeit hinterlässt Spuren, wie auch die natürliche Entwicklung. Also in dem Sinn, wie das kürzlich einmal Milberg gesagt hat: Zurück zur Natur ja, aber nicht zu Fuß!

Von besonderer Bedeutung für die zu verfolgende Entwicklung ist die Formulierung des II. Hauptsatzes der Thermodynamik von Ostwald als der Unmöglichkeit eines perpetuum

mobiles II. Art. Er hat diese Formulierung in verschiedenen Zusammenhängen und zu verschiedenen Anlässen ausgesprochen. Eine der frühesten Publikationen ist wohl einem Vortrag zu entnehmen, den 1892 vor der Leipziger Akademie gehalten hat [4]. Diese Formulierung ist neben denen von Rudolf Clausius und Max Planck in die Lehrbücher sowohl der theoretischen Physik als auch der Technischen Thermodynamik eingegangen, so dass sie heute oft als ein „terminus technicus“ ohne Angabe der Ursprungsquelle wiedergegeben wird. Die Formulierung findet sich bei Ostwald in vielen Schriften und mit unterschiedlichen Ausdeutungen und Erklärungen. Erstmals, wie schon angegeben, 1892, wo er sie aus einer Gleichgewichtsdefinition ableitet. Dann in seinen Vorlesungen zur Naturphilosophie [5], in denen er ein perpetuum mobile II. Art explizit als eine Anlage definiert, die in der Lage sein soll, aus Wärme von konstanter Temperatur Arbeit zu erzeugen. Da Wärme, wie er sagt, in unbegrenzter Menge überall gratis herumliegt, wäre eine solche Anlage in ihren Auswirkungen für die menschliche Gesellschaft einem gewöhnlichen perpetuum mobile (I. Art) gleichzusetzen. In dem Buch „Die Philosophie der Werte“ [6] geht er weiter darauf ein, dass zwar die Erzeugung „freier“ Energie aus „ruhender“ Energie nicht möglich ist, der umgekehrte Vorgang, also die Umwandlung und damit die Vernichtung freier Energie in ruhende Energie dagegen immer möglich und auch stattfindet. Diese Aussage ist aber nicht anderes als das, was heute in der Fachliteratur als der 2. Teil des II. Hauptsatzes bezeichnet wird.

Damit hat Ostwald zwei Arten von Energie unterschieden und definiert. Energien, die sich in alle anderen Formen der Energie umwandeln lassen, wie z.B. die Arbeit, und Energien, die sich unter den gegebenen Umständen nicht umwandeln lassen. Die ersten, wie die Arbeit, können als nutzbare oder auch freie Energie bezeichnet werden. Ein Beispiel für nicht umwandelbare Energie ist die Umgebungsenergie. In seiner Antrittsvorlesung 1887 bezeichnet Ostwald die beiden Energiearten als Herren und Knechte. Interessant ist nun, dass diese Überlegungen nicht nur für die Umwandlung von Wärme in Arbeit, also für die Energietechnik im weiteren Sinn, Geltung haben, sondern auch für Stoffwandlungen oder chemische Reaktionen unter Benutzung der sog. „freien Enthalpie“ oder des chemischen Potentials nach Gibbs. Damit sind sie auch die Grundlage für die Stoffwandlungs- oder Verfahrenstechnik. Das war wohl auch der erste Schritt, der Ostwald letztendlich zu seiner allgemeinen Energetik führte. Wir werden sehen, dass bis hierher auch Ostwald nicht nur ohne Bedenken sondern mit Erfolg an Aussagekraft gegenüber anderen Darstellungen gefolgt werden kann.

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass Ostwald in dem angeschnittenen Zusammenhang auch darauf verwiesen hat, dass in einem System gegenüber der Umgebung ein höherer Ordnungszustand, d.h. eine Abnahme der Entropie, erreicht werden kann, wenn der Stoff- und Energieaustausch mit der Umgebung entsprechend gestaltet wird. Zur Erreichung dieses Zieles sind demnach offene Systeme erforderlich. Ostwald bereitet mit diesen Gedanken die später von Prigogine angestellten und ausgeführten Überlegungen vor, die zu einer Physik der Evolution führten. Darauf soll aber im Folgenden nicht eingegangen werden

Ostwalds Allgemeine Energetik hat immer wieder zu Diskussionen und Widersprüchen geführt. Andererseits setzt man sich immer wieder bis in die jüngste Vergangenheit mit ihr auseinander, wie Publikationen von Knizia, Kurz u.a. zeigen. Lenin hat die energetische Philosophie Ostwalds als idealistisch gebrandmarkt. Max Planck vermisste bei Ostwald die quantitative Auseinandersetzung. Ostwald selbst bestätigte diesen Einwand von Planck, indem er noch 1909 bemerkte, dass sie – als junge Wissenschaft und Weltanschauung – „noch nicht einmal imstande gewesen ist, die Ernte unter Dach zu bringen, welche auf dem Gebiete

der physischen Wissenschaften für die Einsammlung reif ist“ [7]. Demgegenüber wendet er sich selbst, entsprechend seiner Grundposition als Romantiker, dem Problemkreis Energetik und Kulturgeschichte zu.

### 3. Zur Entwicklung des Exergiebegriffes und der Wärmewirtschaft

Ostwald hätte jedoch ohne weiteres Verbündete in der angesprochenen Richtung finden können, allerdings aus dem technischen Lager. Bei den vielfältigen und breitgefächerten Kontakten, die Ostwald gehabt hat, ist es erstaunlich, dass offensichtlich Verbindungen und ein Meinungsaustausch in dieser Richtung nicht zustande gekommen ist. Gemeint ist eine Verbindung zu Aurel Stodola. In seinem Lehrbuch „Die Dampfturbinen“ [8] geht er in einem Anhang auf die theoretischen Grundlagen der Weiterentwicklung der Wärmekraftmaschinen ein und stellt hierbei den II. Hauptsatz der Thermodynamik in den Mittelpunkt. Interessant für uns ist die Tatsache, dass er schon in der 1. Auflage dieses Buches, die 1903 erschien, dabei nicht von der Planckschen Darstellung des Entropiesatzes sondern von der Unmöglichkeit eines perpetuum mobiles II. Art ausgeht. Diese Tatsache vermerkt er schon im Vorwort, im Text verweist er explizit auf Ostwald als den Urheber dieser Formulierung. Aus diesem Ansatzpunkt leitet sich nun insbesondere in den letzten Jahrzehnten eine Entwicklung ab, die allgemein in der heutigen Interpretation als Technische Energetik oder Allgemeine Energietechnik bezeichnet werden kann. In der Verfolgung ihres Entwicklungsweges lassen sich ihre Aussagen, d.h. ihre qualitativen und quantitativen Erfolge gegenüber anderen Darstellungen. Aber auch die mit ihr verbundenen Probleme veranschaulichen. Damit kann zumindest für den betrachteten Bereich eine Antwort auf die von Planck und auch Ostwald als offen bezeichnete Frage gefunden werden.

Wenden wir uns nun den Überlegungen von Stodola zu. Wie schon angedeutet, geht er von der Ostwaldschen Definition eines perpetuum mobiles II. Art aus und gelangt über den Carnotprozess und dem Clausiusschen Integral und der Entropie schließlich zu einem Abschnitt, den er mit „Die Ökonomie der Wärmekraftmaschinen“ überschreibt. Hierin kommt er zu der Schlussfolgerung:

Bei nicht umkehrbaren Vorgängen irgend welcher (auch chemischer) Art erleidet die Nutzarbeit eine Verringerung um das Produkt aus der stattgefundenen Zunahme der Entropie der am Prozess beteiligten Körper und der Temperatur des wärmeableitenden Behälters, d.h. der Umgebung.

Als Formel schreibt er:

$$L_t = L_0 - PT_0$$

Wobei  $L_t$  die technische Nutzarbeit ist, die im realen Verlauf des Prozesses gewonnen werden kann, und  $L_0$  die maximale Arbeit, die sich bei reversibler Führung des Prozesses zu

$$L_0 = (U + pV) - (U' + p'V') + T_0(S' - S)$$

ergibt. Der Ausdruck  $P$  stellt die nichtumkehrbare Entropiezunahme dar.

An späterer Stelle weist Stodola darauf hin, dass seine Ergebnisse in Übereinstimmung zu Helmholtzschen Überlegungen zu galvanischen Ketten stehen, der  $T_0S$  als gebundene und  $U - T_0S = F$  als freie Energie eingeführt hat. Außerdem weist er darauf hin, dass ihm nachhinein eine Arbeit von Gouy [9] bekannt geworden ist, in der eine ähnliche Formel entwickelt worden ist. Aus diesem Grund wird in der Fachliteratur der Term

$$\Delta L_V = T_U \Delta S_V \equiv Q_U$$

als die Gleichung von Gouy – Stodola bezeichnet. Sie stellt den Verlust an nutzbarer, frier oder arbeitsfähiger Energie dar, der infolge einer beliebigen nichtumkehrbaren Entropieproduktion verursacht wird. Somit stellt sie den energetischen Wert der

Nichtumkehrbarkeiten dar. Sie kann gleichgesetzt werden einer Wärme bei Umgebungstemperatur, d.h. einer Energie, die unter den bestehenden Bedingungen nur unter Zuhilfenahme eines perpetuum mobiles II. Art in nutzbare Energie umgewandelt werden kann.

In der Fachliteratur spielte diese Erkenntnis zunächst keine größere Rolle. Das änderte sich erst als nach dem 1. Weltkrieg in Folge der Kohle- und Energiekrise in Deutschland der Begriff der Wärmewirtschaft entstand und sich als industrieller und wissenschaftlicher Gegenstand etablierte. Die Technische Hochschule Dresden mit den Professoren Nägel und dem jungen Walther Pauer spielte hierbei eine führende und zentrale Rolle. Wärmewirtschaft [10] fungierte dabei als Oberbegriff für die Gesamtheit der Maßnahmen und Techniken, Energie einzusparen und sie rationeller zu verwenden. Sie stellte sich so als ein Gebiet dar, dessen Zielstellung durch den energetischen Imperativ von Ostwald gekennzeichnet werden konnte.

Es ist nun merkwürdig, dass zwischen Ostwald und der Dresdner Entwicklung keine Verbindung nachgewiesen werden kann. Und das trotz der Tatsache, dass in der Person von Georg Helm, einem Briefpartner und Mitstreiter Ostwalds, auch persönliche Beziehungen zu Angehörigen der Dresdner Wärmewirtschaft bestanden. Vielleicht war auch Helm schon zu alt und Ostwald der Energetik schon etwas fern.

Zur Durchsetzung wärmewirtschaftlicher Überlegungen war zunächst eine möglichst umfassende und exakte Erfassung des Energieflusses im jeweiligen Industriebetrieb erforderlich. Es ist nun interessant, dass die Betroffenen häufig einschätzten, dass der Gewinn der damit verbundenen Maßnahmen für den Betrieb nicht nur in der möglichen Energieeinsparung sondern vor allem in der vollständigeren Erfassung der Technologie lag. Bei der Diskussion und Gegenüberstellung der Vielzahl der Möglichkeiten zur Energieeinsparung kristallisierte sich als zentrale Frage heraus, dass es immer möglich ist eine Verminderung der energetischen Aufwendungen zu erreichen, wenn die Apparate und Anlagen größer und komplizierter gestaltet werden. Da hierzu gleichfalls Aufwendungen erforderlich sind, müssen diese den möglichen Energieeinsparungen gegenübergestellt werden. Erst dann kann die zu realisierende Lösung als Ergebnis eines Optimierungsprozesses ermittelt werden. Das gelingt, wenn sowohl die energetischen als auch die apparativen oder anlagentechnischen Aufwendungen in einem einheitlichen Maße z.B. als Kosten in Gestalt der Jahreskosten abgebildet werden. Diese Art der quantitativen Erfassung oder Modellierung der technischen Gegenstände bildete sich so als das wesentlichste methodische Instrumentarium der Wärmewirtschaft heraus.

Diese Entwicklung initiierte eine Intensivierung auch der thermodynamischen Auseinandersetzung mit den entsprechenden Vorschlägen zur Energieeinsparung. Dazu griff man die Überlegungen von Gouy und Stodola wieder auf und entwickelte sie weiter. In der deutschen Fachliteratur ist hier vor allem Fran Bošnjaković zu nennen, der mit Vorträgen und einem Aufsatz mit dem Thema „Kampf den Nichtumkehrbarkeiten“ [11] programmatische Positionen bezog. Er lenkte damit die Aufmerksamkeit der Fachöffentlichkeit auf die Tatsache, dass die eigentlichen Energieverluste durch die Nichtumkehrbarkeiten gegeben sind. Quantitativ werden sie durch die entsprechenden Entropieproduktionen erfasst, ihr energetischer Wert ist durch die Gleichung von Gouy und Stodola gegeben. Danach produzieren die nichtumkehrbaren Prozesse nicht ausnutzbare oder gebundene Umgebungsenergie. Diese Position bedeutete einen inhaltlichen Paradigmenwechsel, da man bislang als Energieverluste vor allem äußere Verluste, wie z.B. die Abwärme, ansah. Danach ist der adiabate Prozess verlustfrei, was natürlich im allgemeinen falsch ist.

Für die Verfolgung derartiger Überlegungen ist natürlich als Vergleichsprozess der umkehrbare oder reversible Prozess zu betrachten, der dann der energetisch beste Prozess ist. Er arbeitet verlustfrei und besitzt damit die geringsten energetischen Aufwendungen. Zu seiner Kennzeichnung hatte Stodola den Begriff der maximalen Arbeit eingeführt. Sie kann mit der nutzbaren Arbeit nach Ostwald gleichgesetzt werden. Bošnjaković beschäftigte sich ausführlich mit dieser Größe, er nahm sie in seine Lehrbücher zur Technischen Thermodynamik [12] auf. Er bezeichnete sie als „technische Arbeitsfähigkeit“. Unter dieser Bezeichnung fand sie eine relativ breite Anwendung in der deutschen Fachliteratur. Auch in der französischen Fachliteratur wurden seit Gouy ähnliche Fragestellungen unter der Bezeichnung „l'énergie utilisable“ diskutiert. In den dreißiger Jahren arbeitete auf diesem Gebiet Darrieus [13]. In der angelsächsischen Literatur wurde der Begriff „availability“ benutzt. In dieser Zeit ist er insbesondere mit dem Namen Keenan [14] verbunden.

Die Entwicklung wurde weltweit durch den 2. Weltkrieg unterbrochen. Sie setzte sich dann erst in den fünfziger Jahren, allerdings von da an recht stürmisch fort und erfasste alle industriell und energetisch bedeutsamen Bereiche der Gesellschaft. 1953 wurde nach einer Anregung von Rudolf Plank von Zoran Rant, einem Schüler von Bošnjaković, für die technische Arbeitsfähigkeit das Kunstwort „Exergie“ vorgeschlagen [15], das in Erweiterung des Energiebegriffes auf die Nutzarbeit und die Bereitstellungsmöglichkeit durch die Vorsilbe „ex“ hinweisen soll. Diese Wortbildung setzte sich international durch und wird heute weltweit angewandt. Damit kann der durch die Gleichung von Gouy-Stodola erfasste Arbeitsverlust infolge irreversibler Führung des Prozesses nicht nur als eine Produktion von Umgebungsenergie sondern allgemeiner als ein Exergieverlust angesehen werden.

Die nicht mehr umwandlungsfähige Energie, z.B. eben die Wärme bei Umgebungstemperatur, wurde dann als „Anergie“ bezeichnet, mit der Vorsilbe „a“ als Negativbezeichnung. Verallgemeinernd lässt sich damit sagen: Jede Energie  $W$  setzt sich aus der Summe von Exergie  $E$  und Anergie  $A$  zusammen

$$W = E + A$$

Einige Energieformen bestehen aus reiner Exergie, wie die Arbeit, einige aus reiner Anergie, wie die Umgebungsenergie. Andere Energieformen, wie die thermische Energie bei Temperaturen ungleich der Umgebungstemperatur und vor allem die chemische Energie, enthalten beide Bestandteile. Mit der Begriffsbildung lassen sich die beiden Hauptsätze der Thermodynamik folgendermaßen formulieren [16]:

Der Energiesatz: Die Summe von Exergie und Anergie bleibt konstant.

Der Entropiesatz: Exergie kann sich nur in Anergie umwandeln. Eine Umwandlung von Anergie in Exergie setzt ein perpetuum mobile II. Art voraus. Bei allen natürlichen Vorgängen nimmt die Exergie ab, lediglich im Grenzfall der Reversibilität bleibt sie konstant.

Diese Formulierung, die nichts weiteres ist als eine Art Übersetzung der Ostwaldschen Vorstellungen, erweist sich insbesondere für die Verfolgung technischer Sachverhalte als außerordentlich fruchtbar. So ist es nur zwingend, wenn Graßmann die Exergie als den Energiebegriff des Technikers bezeichnet. Das wird durch die Breite der Anwendungen illustriert. So sind nicht nur die zunächst im Vordergrund stehenden Wärmekraftmaschinen und Kraftwerke untersucht worden, sondern auch die verschiedenen Technologien zur Wärmebereitstellung und zur Kälteerzeugung. Wesentlichstes Ergebnis der Untersuchungen der Kraftwerke war die Feststellung, dass nicht die Abwärme, kenntlich durch die Kühltürme und ihr Wasserdampfschwaden, die größte Verlustquelle ist sondern die

Nichtumkehrbarkeiten der Verbrennung und Wärmeübertragung. Die Bereitstellung von Heizwärme und die Kälteerzeugung konnten durch exergetische Untersuchungen einer rationellen Bewertung zugeführt werden. So geht es sowohl bei der Wärmebereitstellung als auch bei der Kälteerzeugung nicht nur um den Wärmetausch schlechthin, sondern um den Wärmetausch bei ganz bestimmten Temperaturen. Dieser Sachverhalt lässt sich quantifizieren durch die Forderung, dass jeweils eine Energie mit einer bestimmten Mischung aus Exergie und Anergie bereitgestellt werden muss. Damit sind auch diese Prozesse einer den Wärmekraftmaschinen vergleichbaren Betrachtung erschließbar. Im Ergebnis zeigt sich, dass insbesondere die einfache Direktheizung mit fossilen Brennstoffen die größten Exergieverluste aufweist, da bei ihr hochwertige Energie, nämlich die Brennstoffexergie, in Wärme umgewandelt wird, die sich in der Temperatur nur wenig von der Umgebungstemperatur unterscheidet. Aber auch die Stoffwandlungs- und Stoffänderungsprozesse sind auf der Basis exergetischer Untersuchungen einer energetischen Interpretation zugänglich. So können z.B. Phasenänderungsprozesse, wie die Luftverflüssigung, in einfacher Weise durch die Phasenänderungsarbeit, das ist die nutzbare Energie oder auch Exergie, in ihrer energetische Effizienz charakterisiert werden. In ähnlich einfacher Weise sind die Prozesse der Gastrennung energetisch zu deuten, z.B. der industriell bedeutsamen Prozess der Luftzerlegung. Der energetische Nutzen dieser Prozesse besteht in der Bereitstellung der Trennarbeit, die gleich ist der Energie, die bei der Vermischung der reinen Komponenten nichtumkehrbar verloren geht. Dieser Sachverhalt lässt sich quantitativ unter Benutzung des Exergiebegriffes erfassen. Danach zeigt sich z.B., dass die übliche destillative Trennung eine sehr geringe energetische Güte aufweist. Eine grundsätzliche Verbesserung wäre z.B. durch die Einbeziehung von Kraft- und Arbeitsmaschinen zu erreichen. Damit könnten die Nichtumkehrbarkeiten bei der Wärmeübertragung vermindert werden. Ideal wäre natürlich die Verwendung semipermeabler Kolben für die jeweils erforderliche Verdichtung der Einzelgase von dem Partialdruck auf den Gesamtdruck. Die Gastrennprozesse wie insbesondere die Luftzerlegung liefern Produkte, die dann letzten Endes auf nichtumkehrbaren Wege wieder in der Umgebung landen. Das bedeutet, dass das Druckgefälle vom Gesamtdruck bis zum Partialdruck nutzlos verloren geht. Eine Expansionsmaschine mit semipermeablen Wänden könnte ein solches Gefälle ausnutzen.

Schließlich lassen sich durch die Gibbssche Fundamentalgleichung

$$Tds = dU + pdV - \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i$$

auch chemische Reaktionen energetisch erschließen und in die Exergiebetrachtungen einbeziehen. Das war auch wohl einer der wesentlichsten Gründe, die Ostwald zu seiner Energetik führten. Neben der Wärme, der Arbeit und der inneren Energie lässt sich ein Term für die chemische Energie angeben, der durch das chemische Potential  $\mu_i$  und die Molzahländerung  $dm_i$  gegeben ist.

Damit sind auch die Prozesse der stoffwandelnden Industrie einer energetischen Interpretation zugänglich. Das betrifft sowohl die Prozesse der chemischen Industrie als auch die der Hüttenindustrie und der Metallurgie und schließlich auch der Landwirtschaft und den Folgebereichen. Von besonderer aktueller Bedeutung ist der Fakt, dass auch die Prozesse der Umweltverschmutzung und natürlich die der Verminderung der Umweltbelastung als stoffwandelnde Prozesse aufgefasst und so einer energetischen Betrachtung zugänglich gemacht werden können.

Auf dieser Basis sind eine Vielzahl von stoffwirtschaftlichen Technologien energetisch untersucht worden. Im Ergebnis kann eine quantitative Einschätzung und Bewertung vorgenommen und Ansatzpunkte für die Ableitung von Energieeinsparmaßnahmen aufgezeigt

werden. Global und damit natürlich vereinfachend durchschnittlich lässt sich sagen, dass die energetische Effizienz der stoffwandelnden Prozesse relativ hoch ist, da im allgemeinen die chemische Energie gegenüber den anderen Energiearten einen großen Betrag einnimmt.

#### 4. Die Umgebung

Die Definition des perpetuum mobile II. Art bezieht sich auf eine Umgebung als ein energetisches Level, auf dem nicht mehr eine Energieumwandlung z.B. zur Arbeitserzeugung vollzogen werden kann. Zur Bestimmung und Quantifizierung der nutzbaren Energie oder Exergie ist deshalb eine Festlegung der relevanten Parameter der Umgebung erforderlich. Das erweist sich insbesondere bei weitergehenden exergetischen Untersuchungen und Analysen als ein nicht triviales Problem.

Zur Einführung wollen wir den Energieaustausch der Erde im Weltraum betrachten. Die Erde empfängt die Sonnenstrahlung, die einem Temperaturniveau von etwa 5 000 K, der Oberflächentemperatur der Sonne, entspricht. Für irdische Verhältnisse, also für eine Umgebung von etwa 300 K, kann damit eine nutzbare Energie von etwa 1 000 W/m<sup>2</sup> erzeugt werden. Dieser Wert stellt auch die Exergie der Sonnenstrahlung dar. Auf der Schattenseite der Erde steht die Hintergrundstrahlung mit einem Temperaturniveau von etwa 3 K zur Verfügung. Gelingt es technisch, diese Energiequelle anzuzapfen, dann könnten für irdische Bedingungen damit etwa 150 W/m<sup>2</sup> an nutzbarer Energie gewonnen werden, das sind immerhin 15 % der Leistung auf der Sonnenseite. Deshalb ist es erstaunlich, dass diese „erneuerbare“ Energiequelle bislang noch nicht in Betracht gezogen ist. Schiebt man nun einen Satelliten in die Schattenseite der Erde, so kann auf diesem aus der Erdstrahlung, die, wie schon angegeben, einem Temperaturniveau von 300 K entspricht, eine nutzbare Energie von 450 W/m<sup>2</sup> gewonnen werden, da auf dem Satelliten als Umgebung das Niveau der Hintergrundstrahlung zur Verfügung steht. Das ist das Dreifache dessen, was auf der Erde aus dergleichen Temperaturdifferenz gewonnen werden kann. Voraussetzung hierfür ist der Rollentausch von Energiequelle und Umgebung.

In diesem Zusammenhang möchte ich auf eine Diskussion eingehen, die ich vor langen Jahrzehnten über die Exergie mit einem theoretischen Physiker hatte. Wir konnten lange Zeit keine gemeinsame Basis finden, die Grundpositionen und die Denkstrukturen zwischen Physik und Technik waren doch zu unterschiedlich. Bis wir schließlich herauskristallisierten, dass mit der Exergie und der Exergiebilanz mathematisch unter Benutzung der Umgebungstemperatur als Parameter aus den zwei Bilanzen von Energie und Entropie eine zusammenfassende Bilanz geschrieben worden ist. Für die Grenzfälle 0 und  $\infty$  ergeben sich aus dieser zusammengefassten Bilanz wiederum die beiden Hauptsätze. Das ist natürlich auch physikalisch richtig. Stünde uns eine Umgebung mit dem Niveau 0 K zur Verfügung, wäre es möglich, Wärme vollständig in Arbeit umzuwandeln. Andererseits ist es bei einem unendlich hohem Umgebungstemperaturniveau überhaupt nicht möglich, aus dieser Wärme nutzbare Energie zu erzeugen. Die Tatsache, dass wir uns in der realen Welt mit endlichen Umgebungstemperaturen auseinandersetzen müssen, führt zu der gleichberechtigten Bedeutung beider Hauptsätze und kennzeichnet das Spannungsfeld der Technik und der Energetik.

Der Vollständigkeit halber angemerkt sei, dass se in der Frühzeit der exergetischen Analysen immer wieder Diskussionen um die Bedeutung der Umgebung gab. So wurde darauf

verwiesen, dass z.B. adiabate Prozesse keine Wechselwirkung mit der Umgebung haben und deshalb deren Einbeziehung überflüssig sei.

Die bisherige Betrachtung beschränkte sich auf rein energetische Umwandlungsprozesse z.B. die Transformation von Wärme in Arbeit und umgekehrt. Aber schon für derartige Prozesse ist die quantitative Festlegung der Umgebungstemperatur nicht ganz einfach. Wir wissen, dass die Umgebungstemperatur auf der Erde örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterliegt. Das führt z.B. dazu, dass für Wärmekraftanlagen in den südlichen Breiten eine andere Umgebungstemperatur für die Wärmeabfuhr zugrunde gelegt werden muss als für solche, die im hohem Norden arbeiten. Daraus kann sich ergeben, dass in beiden Fällen unterschiedliche Prozessführungen sinnvoll sein können, bis hin zur Wahl verschiedenartiger Kreisprozesse.

Noch deutlicher wird das Problem der Festlegung der Umgebungstemperatur bei der Betrachtung von Heiz- und Klimaprozessen. Die Funktion dieser Prozesse wird durch die Höhe der Umgebungstemperatur bestimmt. Wenn dem nicht Rechnung getragen wird, können in technischer Hinsicht unsinnige Aussagen erhalten werden. So können Prozesse, zu deren Durchführung unter realen Bedingungen ein energetischer Aufwand notwendig ist, zu von selbst verlaufenden, d.h. nichtumkehrbaren Prozessen werden und umgekehrt. Also ist bei solchen Untersuchungen zwischen Sommer- und Winterbetrieb zu unterscheiden.

Die Zielstellungen der Ostwaldschen Energetik und die Potenz des Exergiekonzeptes bestehen aber darin, auch Stoffaustausch- und Stoffwandlungsprozesse energetisch zu erschließen. Demnach muss die Umgebung auch hinsichtlich der stofflichen Parameter energetisch festgelegt werden. Dazu ist nicht nur die Temperatur sondern auch der Gesamtdruck vorzugeben, um z.B. Ansaug- und Auspuffprozesse richtig beschreiben zu können. Darüber hinaus muss auch die Zusammensetzung der Umgebung erfasst werden, wenn z.B. Stofftrenn- und Vermischungsprozesse in Verbindung mit der Luftzerlegung und der CO<sub>2</sub>-Problematik verfolgt werden sollen. Und sollen schließlich chemische Zustandsänderungen energetisch untersucht werden, sind auch die chemischen Eigenschaften und Parameter der Umgebung zu erfassen und für quantitative Bestimmungen festzulegen. Für technische Aufgabenstellungen ist mit dem hiermit verbundenen Fragen eine erhebliche Problemstellung formuliert, deren Lösung aus pragmatischen Gründen eine entsprechende Berechnungsstrategie erfordert.

Zunächst muss man sich auf die für die durchzuführende Untersuchung wesentlichen Wechselwirkungen zwischen dem betrachteten System und seiner Umgebung beschränken. Das betrifft sowohl die Festlegung der Systemoberfläche oder die Abgrenzung des Systems und damit auch die Definition der Umgebung wie auch die Beschreibung der zu erfassenden Wechselwirkungen. Technische Zustandsbeschreibungen von komplexen Stoffen und Stoffgemischen für die Quantifizierung entsprechender Prozesse liefern hierzu illustrative Beispiele. Das ideale Gas und die sog. Feuchte Luft sind charakteristisch in ihren Anwendungen. Es kommt darauf an, nicht alles so genau wie möglich zu erfassen, sondern eine dem Prozess und seiner Einordnung in höhere Systeme adäquate Beschreibung zu finden. Das wird durch den Charakter des Modells und damit der Modellierungsstrategie bestimmt.

Unter technischen Aspekten kann zur Festlegung der Umgebung eine Orientierung an den für das betrachtete System wesentlichen Eintritts- oder Austrittsstoffströmen sein. Damit können z.B. Bezugnahmen auf die Eigenschaften von Lagerstätten bestimmter Rohstoffe oder Rohenergien hergestellt werden. Auch die Probleme der Umweltbelastung und damit der Nachhaltigkeit von einzelnen Technologien lassen sich so energetisch und auch quantitativ deuten.

Aus thermodynamischer Sicht ist zu fordern, dass die Umgebung im Gleichgewicht vorliegt und durch die stofflichen und energetischen Wechselwirkungen mit dem zu betrachteten System nicht aus dem Gleichgewicht geführt wird. Diese Festlegung hat für das System den Vorteil, dass die interessierenden energetischen Größen physikalisch als Zustandeigenschaften des Systems und mathematisch als vollständige Differentiale beschrieben werden können. Das sichert eine Verallgemeinerung der Aussagen. Für die Definition der Umgebung bedeutet diese Annahme, dass sie entweder gegenüber dem System unendlich groß sein oder aber Reservoireigenschaften besitzen muss. Im ersten Fall muss postuliert werden, dass der Gleichgewichtsbegriff auf unendlich große Systeme angewandt werden kann, im zweiten Fall, dass die intensiven und molaren Zustandseigenschaften der Umgebung entgegen den Erhaltungssätzen konstant bleiben. Damit führen auch diese Überlegungen zwingend zur Beschränkung auf die wesentlichsten Aspekte des zu betrachteten Systems, wie die schon bei der Diskussion der kybernetischen Gesichtspunkte angesprochen wurde.

Schließlich ist noch ein vierter Gesichtspunkt bei der Definition und Festlegung der Parameter der Umgebung zu berücksichtigen, das ist die Orientierung an der natürlichen Umgebung. Wegen der thermodynamischen Bedeutung des Gleichgewichtes der Umgebung ist über die Minimierung der freien Enthalpie für die 17 wichtigsten Elemente, das entspricht einem Massenanteil von 99,95 %, und 692 Verbindungen und Stoffmodifikationen eine theoretische Umgebung berechnet worden, die tatsächlich für alle erfassten Stoffe exergielos ist und negative Exergien vermeidet. Das Ergebnis hat mit der natürlichen Umgebung nichts zu tun und ist deshalb für technische Aufgabenstellungen völlig ungeeignet.

Aus diesem Grunde muss man davon ausgehen, dass die natürliche Umgebung im gehemnten Gleichgewicht vorliegt. Die Definition der Berechnungsumgebung muss dieser Tatsache Rechnung tragen. Damit lassen sich für bestimmte Aufgaben spezielle Umgebungen definieren. Dieses Konzept ist aber auch geeignet für die Definition einer Umgebung, die einer allgemeinen Vergleichbarkeit der verschiedensten Technologien dienen kann. Auf dieser Basis können allen Stoffen und Stoffverbindungen Exergiewerte zugeordnet werden, die das energetische Gewicht des jeweiligen Stoffes kennzeichnet. Ausgangspunkt für die Definition der stofflichen Umgebung ist die Verteilung der Elemente in der Geosphäre. Zugrundegelegt werden die Bestandteile der Atmosphäre und bestimmte Verbindungen in der Lithosphäre. Später gab man für eine Reihe von Stoffen ihrem Gehalt im Meerwasser eine Priorität, da in diesem Zustand mit einer gewissen Berechtigung von einem Lösungsgleichgewicht gesprochen werden kann. Stoffe, die nicht in der Umgebung enthalten sind, werde durch Reaktionen mit Bezugssubstanzen in die Umgebung überführt. Die Bezugssubstanzen werden aus der Umgebung ausgewählt. Auswahlkriterien sind die Häufigkeit der jeweiligen Verbindung und der Wert der freien Bildungsenthalpie. Damit ist eine Orientierung an dem in der Geosphäre vorliegenden natürlichen gehemnten Gleichgewicht möglich.

Es ist hier nicht der Ort, das gesamte Konzept im einzelnen darzulegen. Nur soviel sei festgehalten, dass auf dies Weise jedem Stoff und jeder Verbindung eine Exergie zugeordnet werden kann, die ihrem Wert an nutzbarer Energie auf der Erde repräsentiert. Damit lassen sich Stoffwandlungsprozesse, d.h. auch chemische Technologien energetisch bewerten und natürlich auch Einsparstrategien ableiten. Das ist insgesamt für eine einzelne Aufgabe nicht einfach zu lösen. Es wird aber vereinfacht dadurch, dass in der Fachliteratur die Exergien der Elemente vertafelt vorliegen und einfache Berechnungsgleichungen für die Exergien von Verbindungen angegeben worden sind [17].

Mit diesem Konzept ist nun nicht nur die Energiewirtschaft sondern auch die gesamte Stoffwirtschaft auf eine einheitliche energetische Basis zurückzuführen. Deshalb kann mit Fug und Recht das Konzept als Energetik und von der Zielsetzung als Technische Energetik bezeichnet werden. In diesem Rahmen sind die Ostwaldschen Vorstellungen über eine Energetik in Gänze auch quantitativ nachzuvollziehen.

##### 5. Tendenzen zur Verallgemeinerung

Aber Ostwalds Anspruch ging natürlich sehr viel weiter. Die technisch-wirtschaftlichen Zielstellungen, die seinerzeit mit der Wärmewirtschaft und nach den fünfziger Jahren mit der Energiewirtschaft in Richtung auf eine rationelle Energieverwendung verfolgt werden, waren gleichfalls mit den angedeuteten Möglichkeiten nicht vollständig zu erreichen. Das vorhandene Methodeninstrumentarium erschloss quantitativ den Energie- und Stoffeinsatz. Es war aber bereits in den zwanziger Jahren deutlich geworden, dass dieser mit erhöhten Apparate- und Anlageneinsatz stets zu vermindern ist. Daraus ergab sich als zentrale Optimierungsaufgabe die Gegenüberstellung von apparativen Mehraufwand und Exergieeinsparung. Unter Benutzung von ökonomischen Kategorien, im einfachsten Fall von Jahreskosten, kann diese Aufgabe quantitativ formuliert und gelöst werden. Weiter vorn war schon darauf verwiesen worden. Aus dieser Aufgabenstellung entwickelte sich ein neues Gebiet: die thermoökonomische Modellierung und Optimierung [16]. Die Hintergrund dieser Aufgabe lässt sich illustrieren durch den Sachverhalt, dass die exergetischen Aufwendungen theoretisch linear von den nichtumkehrbaren Entropiezunahmen abhängen und die einmaligen Aufgaben für Apparate und Anlagen im einfachsten Fall als eine hyperbolische Abhängigkeit erfasst werden können. Das ist theoretisch dadurch begründet, dass für die Realisierung des reversiblen Grenzfall eines Prozesses unendlich große Apparate und Anlagen erforderlich wären. Mit derartigen Ansätzen ergibt sich aus den Gesamtkosten immer eine optimale Lösung, deren Größenordnung von dem Verhältnis bestimmter spezifischer Energie- oder Stoffkosten und spezifischer Anlagekosten abhängt. So elementar zunächst dieser Schritt zur thermoökonomischen Betrachtung erschien, so fundamental war er in wissenschaftstheoretischer Hinsicht. Es wurde nämlich damit der naturwissenschaftlich-thermodynamische Kreis gesprengt und zunächst wirtschaftliche Kategorien in die Betrachtung einbezogen. Das führte in der weiteren Entwicklung dazu, dass man auch andere gesellschaftliche Bezüge zu exergetischen Überlegungen suchte und formulierte. Das betraf vordergründig volkswirtschaftliche und soziale Dimensionen.

Eine vorsichtige Übersicht über mögliche Teilgebiete dieses gesamten Komplexes zeigt eine formale Zusammenstellung von G. Wall [18]. Hieraus ist noch ein weiterer Aspekt herauszulesen, das ist die Verbindung zur Informationstheorie. Bekanntlich kann nach Shannon eine Informationsentropie definiert werden, die formal der in der Energetik benutzten gleicht. Dieser Ausgangspunkt führt auch zu interessanten Zusammenhängen, die jedoch an dieser Stelle nicht weiter verfolgt werden sollen.

Auf der Grundlage der thermodynamisch-energetischen Sicht des angedeuteten Konzeptes mir der ständigen Abtastung möglicher wirtschaftlicher Bezüge und den sich anbietenden quantitativen Abschätzungen von Umwelteinflüssen finden seit vielen Jahren internationale Konferenzen statt, die in der letzten Zeit alljährlich weltweit die auf diesem Gebiet arbeitenden Wissenschaftler zusammenführen. Seit einigen Jahren werden sie als ECOS-Konferenzen [19] bezeichnet. Die Abkürzung steht für Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Ein Gleichklang mit den Ostwaldschen Zielstellungen ist wohl heraus zu lesen. Die 18. Konferenz wird 2005 in

Trondheim, Norwegen, stattfinden. Hinter diesen Konferenzen steht auch eine breite Lehrbuch- und Fachliteratur, die ein gegenständlicher Beweis ist, dass diese Art der Energetik „in die Lehrbücher eingegangen ist.“

## 6. Zusammenfassung

Unter Technischer Energetik kann ein Komplex verstanden werden, dessen naturwissenschaftliche Grundlagen in der Energielehre der Technischen Thermodynamik, bestimmten Seiten der Physikalischen Chemie, insbesondere der Mischphasenthermodynamik, und in der Elektrochemie zu finden sind. Der technische Einzugsbereich liegt in der gesamten energiewandelnden und stoffwandelnden Industrie. Die Technische Energetik vermag für diesen Bereich das gesamte energetische Geschehen umfassend und mit einem einheitlichen Konzept zu beschreiben. Dieses Konzept lässt sich letzten Endes auf den Entropiesatz in der Formulierung von Wilhelm Ostwald zurückführen. Insofern ist der skizzierte Komplex zwar nicht als ein Beispiel dessen anzusehen, was Ostwald in philosophischer Hinsicht anstrebte, aber als ein vollständig durchgearbeitetes und in sich geschlossenes Konzept einer Energetik, die sich auf technische Zielstellungen und deren naturwissenschaftliche Grundlagen beschränkt. Es kann die Leistungsfähigkeit eines solchen Konzeptes aufgezeigt werden aber auch die Schwierigkeiten und Probleme, die mit der umfassenden Ausarbeitung verbunden sind. Bei dem Versuch der Klärung des Begriffes Umgebung lassen sich diese Zusammenhänge verdeutlichen.

Die Verfolgung des energetischen Imperativs von Wilhelm Ostwald im Rahmen des angegebenen technischen Bereiches führt zunächst auf das Gebiet der Wärme- oder allgemeiner Energiewirtschaft und damit über naturwissenschaftliche und technische Kategorien hinaus. Heute wird die Auseinandersetzung mit derartigen Fragen als thermoökonomische Bewertung bezeichnet. Neben wirtschaftlichen Bezügen spielen dabei juristische und im zunehmenden Maße auch soziale Gesichtspunkte eine Rolle. Letztere vordergründig in der Auseinandersetzung mit den Problemen der Nachhaltigkeit. Diesen Fragestellungen widmet eine internationale Konferenzreihe. In gewisser Weise können die Diskussionen, die dort und in dem entsprechenden Umfeld geführt werden, als Beiträge in die Richtung einer allgemeinen Energetik im Ostwaldschen Sinn angesehen werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Chamisso, A.v.: Reise um die Welt, S. 167ff, Rütten u. Loening, Leipzig 1978
- [2] Forster, G.: Ansichten vom Niederrhein, Werke in vier Bänden, Bd. 2, S. 719/720, Inselverlag, Leipzig
- [3] Ostwald, W.: Die Energie und ihre Wandlungen (Antrittsvorlesung), Leipzig 1887
- [4] Ostwald, W.: Studien zur Energetik, Z. phys. Chem. 10 (1892), S. 363ff
- [5] Ostwald, W.: Vorlesungen über Naturphilosophie, S. 259, Veit u. Comp., Leipzig 1902
- [6] Ostwald, W.: Die Philosophie der Werte, S.133, Alfred Kröner Verlag, Leipzig 1913
- [7] Ostwald, W.: Energetik und Kulturgeschichte, S. 379ff, aus: Die Forderung des Tages, Akad. Verlagsges., Leipzig 1910
- [8] Stodola, A.: Die Dampfturbinen, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1905
- [9] Gouy, M.: Sur l'énergie utilisable, Journal de Physique II (1889), S. 501ff
- [10] Pauer, W. (Hrsgb): Wärmelehre und Wärmewirtschaft in Einzeldarstellungen, Verlag Theodor Steinkopff, Dresden u. Leipzig 1926ff
- [11] Bošnjaković, F.: Kampf den Nichtumkehrbarkeiten, Archiv für Wärmewirtschaft u. Dampfkesselwesen 1938 (BD. 19), H.1
- [12] Bošnjaković, F.: Technische Thermodynamik, 1. Teil, Verlag Theodor Steinkopff, Dresden u. Leipzig 1935
- [13] Darrieus, M.G.: L'évolution des centrales thermiques et la notion d'énergie utilisable, Science et industrie, Mars 1931, S 122/126
- [14] Keenan, J.H. : A Steam Chart for Second Law Analysis, Mechanical Engineering 54 (1932), S. 197/204
- [15] Rant, Z.: in Energie und Exergie, S. 11, VDI-Verlag, Düsseldorf 1965
- [16] Fratzscher, W. u.a.: Exergie - Theorie und Anwendungen, DVG, Leipzig 1986
- [17] VDI-GET: Energietechnische Arbeitsmappe, 15. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2000
- [18] Wall, G.: Exergy – A Useful Concept, Chalmers University of Technology, Göteborg 1986
- [19] ECOS 2002, Proceedings of the 15<sup>th</sup> Conference, Berlin