

Abfallenergieverwertung aus entropischer Sicht¹

Wolfgang Fratzscher und Karl Stephan

Alle Energie, die technischen Systemen zugeführt wird, findet sich letzten Endes als Abfallenergie in der Umwelt wieder. Eine entsprechende Verringerung oder Verwertung vermindert deshalb nicht nur die Umweltbelastung, sondern reduziert auch den erforderlichen Energieeinsatz und somit die benötigte Primärenergie. Allerdings unterscheidet sich Abfallenergie von der Primärenergie durch ihre geringere Qualität. Abfallenergie im Umgebungszustand ist für irdische Verhältnisse wertlos, denn Umweltenergie steht uns zwar in fast beliebiger Menge zur Verfügung, könnte aber nur durch ein perpetuum mobile II. Art ausgenutzt werden, was naturgesetzlich unmöglich ist. Der Begriff des perpetuum mobile II. Art bezieht sich auf den II. Hauptsatz der Thermodynamik, den Entropiesatz, der sich bei einer Bewertung von Abfallenergie somit als sehr nützlich erweist. Das hat gegenüber den sonst üblichen, nur auf dem Energiesatz beruhenden Überlegungen den Vorteil, dass sich Richtlinien für eine Strategie der Abfallenergieverwertung entwickeln lassen, die ihrerseits einen Beitrag zum Prinzip der Nachhaltigkeit darstellen.

Stellung der Abfallenergie

Ernährung und eine ausreichende Energieversorgung einer ständig zahlenmäßig anwachsenden Weltbevölkerung nehmen eine zentrale Position in der Welt- und Landespolitik ein. Das ist nicht verwunderlich, lassen sich doch alle materiellen und viele ideellen Bedürfnisse der Gesellschaft direkt und indirekt in zufriedenstellender Weise lösen, wenn entsprechend ausreichend billige Energie zur Verfügung steht. Mit aller Deutlichkeit zeigte sich dieser Sachverhalt kürzlich wieder in den Diskussionen anlässlich der UNO-Tagung „Urban 21“.

Schon heute erfordert die Bereitstellung der Energieträger Kohle, Erdöl, Erdgas und Holz mengenmäßig mit weitem Abstand die größte Rohstoffentnahme aus unserer Umwelt. Da diese Stoffe, wenn auch chemisch durch Verbrennung umgewandelt, wie die Energie letzten Endes wieder in der Umwelt landen, beeinträchtigt nicht nur die Gewinnung der Energieträger, sondern auch die damit verbundene Stoffabgabe die Umwelt im bedeutenden Maße, was besonders an der Umweltbelastung durch CO₂ deutlich wird. Wenn deshalb über Nachhaltigkeit, d. h. den verantwortlichen Umgang mit der Umwelt, nachgedacht wird, ist in erster Linie die Energieversorgung oder allgemeiner die Energiewirtschaft angesprochen. Die Auseinandersetzung um die Abfallenergieverwertung kann hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten.

Die zugehörigen strukturellen Zusammenhänge sind in Abb. 1 verdeutlicht. Der Menschheit steht die Umwelt in Gestalt des Planeten Erde zur Verfügung. Darin eingebettet ist das menschliche Sozialsystem mit seinen energetischen und stofflichen Bedürfnissen, die gegeben oder wünschenswert sind. Diese werden durch das Technologie-

system befriedigt, das die Gesamtheit der materiellen technischen Systeme oder Artefakte und die zugehörigen sozialen Organisationsstrukturen umfasst. Damit kann über das Technologiesystem der zur Bedürfnisbefriedigung notwendige Stoff- und Energieaustausch mit der Umwelt definiert und quantifiziert werden.

Zugeführt werden dem Technologiesystem die Rohstoffe, in unserem Falle die Rohenergien aus der irdischen Umwelt und von außerhalb die Sonnenenergie. Die Abfuhr wird über die Wärmeabgabe von Kraftwerken, Heizungen, Industrieöfen u. ä. und über die Stoffabgabe als Anfall- oder Abfallstoffe (u. a. Müll) aus dem System realisiert. Betrachtet man in globalem Maßstab die Mengen, die diesem Stoff- und Energieaustausch zugeordnet sind, so erkennt man, dass auf Grund der Erhaltungssätze von Masse und Energie unsere Umwelt bestenfalls zur Zeit der Jäger- und Sammlergesellschaft lediglich infinitesimalen Änderungen unterworfen war, die vernachlässigt werden konnten. Heute hat der Stoff- und Energieaustausch Dimensionen erreicht, die in mancherlei Hinsicht die Reservoireigenschaften der Umwelt beeinflussen. Damit wird deutlich, dass auch eine langfristig angelegte Strategie unsere Umwelt, so wie sie derzeit ist, nicht erhalten kann, dass es vielmehr auf einen verantwortungsvollen Umgang mit der Umwelt im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung ankommt. Um Aussagen hierzu machen zu können, ist es erforderlich, den Stoff- und Energieaustausch des Technologiesystems mit der Umwelt zu quantifizieren. Für den Materieaustausch kann das relativ einfach durch entsprechende Massenbilanzen geschehen. Diese Betrachtungsweise hat letztlich dazu geführt, dass man bemüht ist, Abfallstoffe durch Stoffrecycling und eine Kreislaufwirtschaft möglichst zu reduzieren.

Es liegt zunächst nahe, ähnliche Überlegungen hinsichtlich des Energieaustausches anzustellen. Das ist auch mit Erfolg geschehen, schöpft aber die naturwissenschaftliche Potenz der Zusammenhänge unzureichend aus und missachtet so Ansatzpunkte für ein zielgerichtetes Handeln.

Entropische Bewertung der Abfallenergie

Eine entropische Bewertung der Abfallenergie beachtet außer dem Energieerhaltungssatz noch als weiteres Naturgesetz den II. Hauptsatz der Thermodynamik, den sog. Entropiesatz. Dieser besagt, dass es in der Natur bevorzugte Richtungen der von selbst ablaufenden Prozesse gibt, die für abgeschlossene, d. h. massen- und energiedichte Systeme zum Ausgleich der ursprünglich vorhandenen Potenzialdifferenzen führen. Solche Potenziale können durch Temperaturen, Drücke, Zusammensetzungen oder auch die Stoffart gegeben sein. Aus dem Alltag bekannt ist beispielsweise die Tatsache, dass Wärme nur übertragen wird, wenn Temperaturunterschiede vorhanden sind. Die Wärme fließt dabei nur von der höheren zur niederen Temperatur, und sie fließt nur, solange Temperaturunterschiede vorhanden sind.

Diese Zusammenhänge haben eminente energetische Konsequenzen, die wohl erstmals umfassend Wilhelm Ostwald in Verbindung mit seiner Naturphilosophie, die er bezeichnenderweise „Energetik“ nannte, ausgesprochen hat [2]. Danach kann eine Energieumwandlung und insbesondere die Umwandlung von Wärme in Arbeit nur stattfinden, wenn in dem betrachteten System Potenzialdifferenzen der angegebenen Art vorliegen. Sind diese abgebaut, so ist das System keiner Änderung mehr fähig; es kann dann z. B. auch die innere Energie des Systems nicht mehr zur Arbeitserzeugung eingesetzt werden. Eine Einrichtung, die diesen Prozess entgegen der Erfahrung ermöglichen würde, nannte Ostwald ein perpetuum mobile II. Art. Den Begriff II. Art wählte er deshalb, weil eine solche Einrichtung im Unterschied zum perpetuum mobile I. Art keine Energie aus dem Nichts, sondern aus dem Energieinhalt des betrachteten Systems erzeugen würde.

Mit perpetuum mobile II. Art ist eine Einrichtung gemeint, mit deren Hilfe es möglich wäre, allein aus der Energie der Umwelt z. B. Arbeit zu erzeugen, was bekanntlich nicht möglich ist. Leider, muss man sagen, denn Abschätzungen zeigen, dass Umweltenergie in für menschliche Bedürfnisse und Zeithorizonte unendlich großer Menge zur Verfügung steht. Damit ließen sich alle Energieprobleme einfach lösen.

Zur Quantifizierung der bisherigen Aussagen eignet sich in besonderer Weise der Begriff der Entropie. Sie nimmt bei allen natürlichen, d. h. von selbst ablaufenden Prozessen zu und zeigt an, dass die Fähigkeit des betrachteten Systems, Arbeit zu

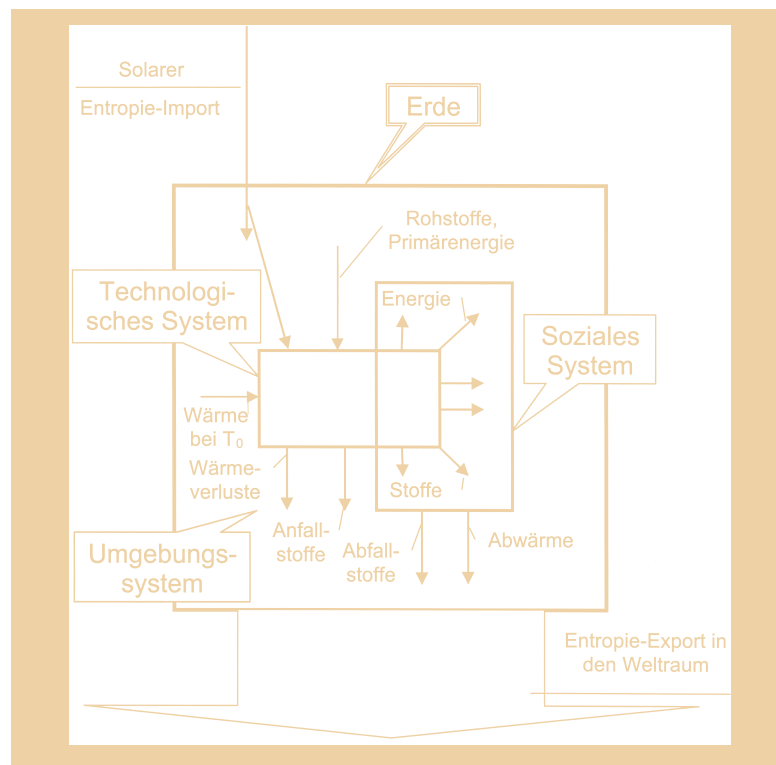
erzeugen, abnimmt. Das kann man als einen Qualitätsverlust ansehen. Natürliche Prozesse werden deshalb als nichtumkehrbar oder irreversibel bezeichnet.

Als Grenzfall natürlicher Prozesse wird ein Idealverlauf definiert, der keinen Qualitätsverlust verursacht. Solche Prozesse heißen reversibel oder umkehrbar. Bei ihnen bleibt die Entropie konstant. Sie haben als Idealprozesse weniger praktische, wohl aber theoretische Bedeutung. Es sei erwähnt, dass in unmöglichen, d. h. entgegen der von der Natur vorgegebenen Richtung ablaufenden Prozessen, die Entropie abnehmen müsste.

Für unsere Überlegungen bedeuten diese Zusammenhänge, dass zwar die gesamte dem technologischen System zugeführte Energie in Gestalt der Rohenergie oder der Sonnenenergie als Abwärme und als Energie der Anfall- und Abfallstoffe wieder abgeführt wird, diese Energie aber von geringerer Qualität ist. Die Qualitätsabnahme kann man nun durch die Entropie quantifizieren, denn die Entropie der Abfallenergie ist mindestens um die Entropiezunahme infolge natürlicher Prozesse im System größer als die Entropie der zugeführten Energie. Eine solche Darstellung hat den Vorteil, dass man mit der Entropie ein Qualitätsmaß für die Energie besitzt, und zugleich, dass man mit ihr auch Energie- und besonders Wärmeströme sowie Stoffströme durch ein einheitliches und damit vergleichbares Maß beurteilen kann.

Weiter können wir feststellen, dass die Umwelt mit ihren Eigenschaften, ausgedrückt durch die thermodynamischen Potenziale, ein natürlicher Bezugspunkt für energetische Prozesse ist. Wenn

Abb. 1 Struktur anthropogener technologischer Systeme



Stoff- und Energieströme in einem Zustand vorliegen, bei dem die maßgebenden Prozessparameter gleich denen der Umwelt sind, z. B. ihre Temperatur gleich der Umgebungstemperatur ist, so besitzen sie im Hinblick auf energetische Prozesse keinen Wert, da sie nur über ein *perpetuum mobile* II. Art umgewandelt werden könnten. Bezieht man die Umgebung in die energetische Betrachtung des Technologiesystems mit ein, stellt man fest, dass die Abgabe von Energie und Stoff an die Umgebung durch natürliche Prozesse, d. h. ohne zusätzliche Aufwendungen, nur möglich ist, wenn der Abgabezustand ein höheres Potenzial aufweist als der Umgebungszustand. Die durch Stoff- und Energieabgabe entstehenden Entropiezunahmen sind sog. äußere Nichtumkehrbarkeiten, die zur vollständigen Beurteilung technologischer Systeme unbedingt zu berücksichtigen sind.

Abfallenergie und Entropieexport

Noch ein weiterer für die Beurteilung des energetischen Geschehens wichtiger Sachverhalt kann unter Benutzung des Entropiesatzes erschlossen werden. Prigogine [3] löste elegant den Widerspruch, der zwischen der Aussage des Entropiesatzes und der Evolution besteht, wonach sich Potenziale aufgrund des Entropiesatzes in geschlossenen Systemen stets ausgleichen, bis schließlich keine Veränderungen mehr möglich sind, während durch Evolution im Verlaufe der Entwicklung höher strukturierte Systeme entstehen können.

Wenn nun noch, wie früher häufig geschehen, die Aussage des Entropiesatzes mit dem Begriff „Wärmetod“ verknüpft wird, kann die Gegensätzlichkeit dieser beiden Richtungsgesetze nicht deutlicher zum Ausdruck kommen. Dieser scheinbare Widerspruch hat über fast 100 Jahre hinweg viele Geister beschäftigt und heftige Diskussionen ausgelöst.

Prigogine machte deutlich, dass eine Entwicklung zu höheren Strukturen nur in offenen Systemen möglich ist, bei denen ein Stoff- und Energieaustausch mit der Umgebung stattfindet. Dort findet über den Stoff- und Energieaustausch mit der Umgebung ein Entropieexport statt, der nicht nur die Entropiezunahme durch die natürlichen Prozesse in den Systemen kompensieren, sondern darüber hinaus die Entropie der Systeme auf ein niedrigeres Niveau absinken lassen kann. Niedrigere Entropie bedeutet aber eine höhere Strukturierung oder einen höheren Ordnungszustand, als man ihn in der Umgebung vorfindet. Im Gegensatz dazu ist ein strukturloser Zustand, z. B. der des völligen Ausgleiches der Potenziale, durch ein Maximum der Entropie gekennzeichnet.

Durch die Feststellung, dass eine höhere Strukturierung nur in offenen Systemen stattfinden kann, hat Prigogine den alten Widerspruch zwischen den Gesetzen der Entropie und der Evolution beseitigt.

Auch unser Planet Erde ist in diesem Sinn ein offenes System, das die gesamte Energie, welche der Erde von der Sonne zugeführt wird, wieder in den Weltraum abstrahlt. Eingestrahlt wird Energie bei der Oberflächentemperatur der Sonne von rund 5.000 K, während bei rund 300 K, der Temperatur der irdischen Lufthülle, Energie abgestrahlt wird. Damit ist der Einstrahlung eine kleine, der Abstrahlung aber eine große Entropie zuzuordnen. Abb. 1 verdeutlicht diese Gegebenheiten. Es wird etwa 50 Mal mehr Entropie exportiert als importiert. Dieser große Unterschied ist nicht nur auf Entropievermehrung durch natürliche Prozesse auf der Erde zurückzuführen, also auf die natürliche Entropieproduktion, sondern er ermöglicht vor allem die Entstehung höher strukturierter Systeme, also letztlich die Entstehung von Leben.

Diese Interpretation kann man auch auf irdische Teilsysteme anwenden, die sich durch eine höhere Strukturierung von ihrer Umgebung unterscheiden. Aus naturwissenschaftlicher Sicht muss man in diesem Sinn auch alle technologischen Systeme als offene Systeme auffassen. Ihr Energie- und Stoffaustausch mit der Umgebung dient letzten Endes über den damit verbundenen Entropieexport der Herstellung oder der Aufrechterhaltung der Strukturen oder des Ordnungszustandes im System. Insofern ist die einfache Feststellung, alle technologischen Systeme benötigten Energie, unvollständig, als diese Energie ja insgesamt wieder an die Umgebung abgegeben wird. Vielmehr wird in den technologischen Systemen durch Entropieexport ein Zustand hergestellt oder aufrecht erhalten, der sich gegenüber der Umgebung durch eine höhere Strukturierung unterscheidet. Diese bedeutet aber ein niedrigeres Entropieniveau oder größere Potenzialdifferenzen.

Der Entropieexport wird realisiert durch die Abgabe von Wärme und von Stoff, d. h. durch die Ströme, die im Wesentlichen aus Abfallenergie bestehen. Diese erscheint so gegenüber der üblichen Betrachtung in einem anderen Licht, sie ist als Entropieträger für den Ordnungszustand im System verantwortlich.

Diese Feststellung hat vielfältige Konsequenzen. Wenn sich die Anfall- und Abfallstoffe, z. B. Müll, vom Umgebungszustand unterscheiden, erfährt das technologische System als Folge der äußeren Nichtumkehrbarkeiten einen Entropieexport. Die mengenmäßige Reduzierung dieser Stoffe durch Maßnahmen der Abfallstoffwirtschaft könnte dann aber eine Erhöhung des Entropieexportes durch eine Mehrzufuhr an Energie erforderlich machen, wenn der gleiche Ordnungszustand im System aufrechterhalten werden soll. Anders ausgedrückt: Abfallstoff-Recycling kann den Einsatz von Energie erfordern und führt dadurch wieder zu einer Umweltbelastung, die den Gewinn auf der stofflichen Seite teilweise, oder in ungünstigen Fällen sogar vollständig, zunichte machen kann. Abfallstoffwirtschaft und Abfallenergiewirtschaft

sollten deshalb z. B. über entropische Zusammenhänge unter einem einheitlichen Gesichtspunkt betrachtet werden, wenn man widersprechende Tendenzen vermeiden will.

Aus diesen Grundprämissen lassen sich Prinzipien einer Entropiewirtschaft formulieren, die darauf beruhen, dass eine Verminderung der Entropiezunahme, d. h. eine Annäherung an die reversible Prozessführung, nicht nur die Stoff- und Energiebelastung der Umgebung reduziert, sondern auch den erforderlichen Primärenergieeinsatz bei gleichem Nutzen vermindert. Diese Ziele einer Entropiewirtschaft stimmen deshalb mit denen einer nachhaltigen Entwicklung überein. Die Entropie vermag die Prozessabläufe und ihre Auswirkungen auf die Umgebung zu quantifizieren und ermöglicht so eine vergleichende Beurteilung verschiedener Verfahren und technologischer Prozesse. Der Abfallenergie als Entropieträger kommt in diesem Konzept eine zentrale Rolle zu, und sinnvolle Strategien zu ihrer Verwertung sind Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung.

Einige Zahlenangaben mögen diese allgemeinen Überlegungen verdeutlichen: Der gesamte Entropieexport der Erde beträgt etwa 1 PW/K. Als Vergleich: der Energieverbrauch der Menschheit liegt derzeit bei etwa 12 TW². Zur Veranschaulichung sei angemerkt, dass eine solche Leistung etwa der von 12.000 modernen Großkraftwerken entspricht, wenn sie nur Elektroenergie wäre. Bezieht man den Entropieexport der Erde auf die vorhandene Durchschnittstemperatur, so entspricht er etwa dem 25.000-fachen dieser Leistung. Spezifisch ist das ein Entropieexport von 1 bis 1,2 W/m²K. Noch einige Zahlen zum Vergleich: bei einem Menschen liegt der Entropieexport, der notwendig ist zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur von 37°C, bei etwa 0,5 W/K. Bezieht man den gesamten Energieverbrauch der Welt auf die Erdbevölkerung, ergibt sich ein durchschnittlicher Entropieexport von 10 W/K und Mensch, also das 20-fache des natürlichen Entropieexportes. Auch für einzelne Länder lassen sich Größenordnungen des Entropieexportes als Maß für die Umweltbelastung abschätzen. Er beträgt für die USA rund 9 GW/K und liegt für Deutschland bei 1,5 GW/K.³ Indien weist trotz zehnfacher Bevölkerung etwa den gleichen Wert wie Deutschland auf. Anders ausgedrückt: Der Entropieexport in Indien ist kaum größer als der natürliche Entropieexport durch Abstrahlung, während der Wert für die USA fast 100 Mal so groß ist.

Noch einige Abschätzungen zum Entropieexport technologischer Prozesse: Zum Vergleich mit dem Primärenergieaufwand werden diese Zahlen im Energiemaßstab angegeben. Sie stellen Energie im Umgebungszustand dar. Die an die Umgebung abgegebene Energie erhält man durch Multiplikation der Entropiewerte mit der Umgebungstemperatur von etwa 300 K [4]. Diese Energie ist wertlos. Es ist aber interessant, sie mit dem Gesamtenergie-

verbrauch von 12 TW zu vergleichen, weil man so erkennt, wie viel Energie ungenutzt, sozusagen als Energiemüll, an die Umgebung abgegeben wird und diese belastet. So findet man, dass die Energieabgabe eines Menschen bei etwa 100 W, die einzelner Länder wie der USA bei 2,7 TW, die von Deutschland und Indien bei 0,45 TW liegt. Die Energieabgabe von allen Kraftwerken und allen Raumheizungen liegt bei 2,4 bis 3 TW, also etwa bei einem Viertel des gesamten Energieverbrauches, die von Rauch- und Abgasen bei 0,2 bis 0,3 TW oder etwa einer Größenordnung unter dem gesamten Energieverbrauch. Der durch das Rosten des Eisens verursachte Entropieexport stellt etwa einen Energieverlust von 1,2 TW oder fast 10 % des Gesamtverbrauches dar.

Man muss sich vergegenwärtigen, dass diese Zahlen nur unvollständig oder überhaupt nicht in den üblichen Energiebilanzen in Erscheinung treten. Damit wird bestenfalls indirekt oder verdeckt auf Verlustherde verwiesen, deren Verminderung aber wesentlich die energetische Effizienz und damit auch die Maßnahmen zur nachhaltigen Entwicklung beeinflussen kann.

Möglichkeiten der Abfallenergieverwertung

Die angegebenen Zahlen verdeutlichen nicht nur die quantitative Bedeutung der Abfallenergie. Sie zeigen auch, welche Prozesse den größten Entropieexport verursachen und ermöglichen so, Maßnahmen zur Reduzierung der Verluste vorzuschlagen. Ein solches Vorgehen ist mit Methoden wie der reinen Energiebilanzierung nicht unmittelbar möglich. Alle anderen Methoden erfordern Gesamt- und Detailvergleiche und liefern als Ergebnis nur summarische Werte. Die Untersuchung mit Hilfe der Entropie vermag Kriterien zu liefern, aus denen sich Strategien zur Erhöhung der energetischen Effizienz der Prozesse ableiten lassen. Die daraus folgenden Reduzierungen des Stoff- und Energieaustausches der technologischen Systeme mit der Umgebung sind so auch ein Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung. Wichtig ist dabei festzuhalten, dass diese Aussagen sowohl die Energiezufuhr durch Roh- oder Primärenergie betreffen wie auch die Abfallstoffe und Abfallenergie selbst und damit die Umweltbelastung einbeziehen. Für beide Bereiche lassen sich aus derartigen Untersuchungen quantifizierte Angaben ableiten. Welche Konsequenzen muss man nun ziehen, um in dem angegebenen Sinn Verbesserungen in technologischen Systemen zu erzielen? Zunächst kann die Feststellung quantifiziert werden, dass jede Stoff- mit einer Energiewandlung und natürlich auch jede Energie- mit einer Stoffwandlung verknüpft ist. Um Schlussfolgerungen daraus ausnützen zu können, sollte sich die prozess- oder verfahrenstechnische Industrie im stärkeren Maße bewusst und zielstrebig mit der energetischen Indu-

II. Hauptsatz der Thermodynamik

Naturgesetz, das den einseitigen Ablauf der Prozesse in abgeschlossenen Systemen in Richtung des Ausgleiches der Potenziale beschreibt.

Perpetuum mobile II. Art

Virtuelle Einrichtung, die Prozesse entgegen dem natürlichen Ablauf erlauben würde.

Entropie

Physikalische Kategorie, die die Aussagen des II. Hauptsatzes der Thermodynamik auf der Grundlage ihres Vorzeichens zu unterscheiden und zu quantifizieren erlaubt. Für alle natürlichen Prozesse nimmt sie stets zu. Bei unmöglichen Prozessen (perpetuum mobile II. Art) würde sie abnehmen.

Entropieexport

In offenen Systemen kann im Gegensatz zu abgeschlossenen Systemen eine Abnahme der Entropie erreicht werden durch Wärme- und/oder Stoffabgabe an die Umgebung. Der Entropieabnahme im System steht dann eine mindestens gleich große Entropiezunahme in der Umgebung gegenüber.

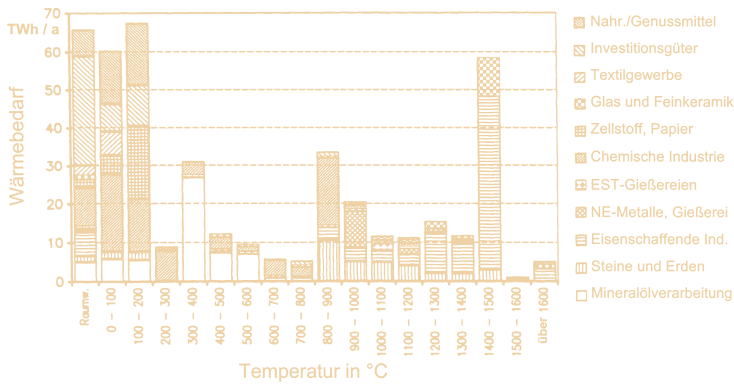


Abb. 2
Temperaturniveau
und Wärmever-
brauch der Industrie-
branchen in Deutsch-
land. Aus: B. Gei-
ger/H. Heß: *Energie-
wirtschaftliche Da-
ten, Energiever-
brauch in der Bun-
desrepublik Deutsch-
land*, S. 272. In:
VDI-GET: Jahrbuch
1999. VDI-Verlag,
Düsseldorf 1999

strie verbünden. Die dadurch möglichen integrativen Effekte könnten große Reserven zur Effizienzsteigerung erschließen. Hierbei sei auf die Integration von verfahrenstechnischen und energetischen Systemen und Anlagen aus der Metallurgie und der Chemie verwiesen. So gelang es z. B. durch die Einbeziehung von Kraftwerksprozessen bei der Ammoniaksynthese eine fast energieautarke Fahrweise zu erreichen. Eigene Beispiele zeigten, dass auch bei der Müllverarbeitung die kombinierte energetische und stoffliche Nutzung optimale Verhältnisse zu realisieren erlaubt. Ein Argument mehr dafür, dass Abfallwirtschaft und Abfallenergiewirtschaft unter entropischen Gesichtspunkten zusammengeführt werden sollten. Eine Integration und Kombination kann aber auch zwischen energetischen Systemen, z. B. zur Bereitstellung von Strom und Wärme, wie die Kraftwärmekopplung zeigt, und zwischen stoff-

wirtschaftlichen Anlagen über energetische Effekte realisiert werden. Diese Erkenntnisse sind zwar nicht neu, aber ihre Verfolgung ist mit den bisherigen Methoden nur auf empirischer Basis möglich, während die entropische Methode zielstrebig Ansatzpunkte zur Verbesserung erkennbar macht und man die jeweiligen Verbesserungsmöglichkeiten sofort quantitativ vergleichend bewerten kann. Daraus ergeben sich zwanglos Auswahlkriterien für die zu verfolgenden Entwicklungen. Von besonderer Bedeutung ist der Aufbau von Wärmekaskaden und Wärmenetzen. In der Tat werden rund zwei Drittel der Primärenergie als Wärme, je zur Hälfte als Prozess- und als Raumwärme, benötigt. Deshalb sind mit der Wärmeabgabe auch die größten Entropieexporte verbunden. Während die Raumwärme etwa bei konstanter Temperatur benötigt wird, fällt die Prozesswärme, wie Abb. 2 zeigt, in einem breiten Temperaturbereich an. Maxima liegen bei Hochtemperaturprozessen (Eisenindustrie) und bei niedrigeren Temperaturen (Chemische Industrie). So könnte die Abwärme der einen Industrieprozesse die erforderliche Wärmebereitstellung der anderen Prozesse realisieren. Die Einbeziehung des Raumwärmemarktes ist möglich durch den Aufbau von Fernwärmenetzen.

Von der Bilanz her ist so in Ballungsräumen eine vollständige Raumwärmeverversorgung allein durch Abwärme denkbar. Beispielberechnungen haben gezeigt, dass mit derartigen Maßnahmen rund die Hälfte des Primärenergieaufwandes eingespart werden könnte.

Verlustquellen von volkswirtschaftlichen Dimensionen sind unter entropischen Gesichtspunkten der Prozess der Wärmeübertragung, derjenige der Verbrennung und auch der Drossel- und Reibungsprozess. Alle diese Prozesse können in energetischer Hinsicht scheinbar verlustfrei betrieben werden. Dazu müssen sie nur adiabatisch, d. h. ohne Wärmeverluste ablaufen, was man durch entsprechende Isolation relativ leicht erreichen kann.

Das Spektrum der möglichen Maßnahmen wird qualitativ erweitert, wenn man Energiewandlungen als sog. Energie- oder Wärmetransformationen einsetzt. Darunter sind nicht nur einfache Kreisprozesse, wie die von Dampf- bzw. Gasturbinen und Verbrennungsmotoren sowie verdichteter betriebenen Wärmepumpen und Kältemaschinen, zu verstehen, sondern besonders auch Sorptions- oder auch thermochemische Prozesse. Anlagen mit derartigen Prozessen zur Wärmetransformation ähneln äußerlich mehr einer Chemieanlage als einer Kraftmaschine, wie Abb. 3 zeigt. Durch eine Vielzahl von denkbaren Arbeitsstoffen und Schaltungsvarianten erreicht man mit diesen Prozessen eine große Flexibilität und damit Anpassbarkeit an die speziellen Bedingungen und Gegebenheiten. Wie eigene Untersuchungen gezeigt haben, lassen sich mit solchen Prozessen sowohl in Ballungsräumen wie in ländlichen Räumen thermodynamisch ansprechende Lösungen finden.



Abb. 3
Offener Sorptions-
kreisprozess für die
Brüdenwärmever-
nutzung in der Malz-
fabrik Landsberg. Fo-
to: Martin-Luther-
Universität Halle-
Wittenberg/IW-UT

Alle diese Maßnahmen verdeutlichen aber auch ein Problem der Abfallenergieverwertung: eine Verbesserung der energetischen Güte kann zwar durch viele verschiedene Maßnahmen erreicht werden, diese erfordern aber stets eine Erhöhung des apparativen oder anlagentechnischen Aufwandes. Eine Einsparung an laufenden, im vorliegenden Fall energetischen Aufwendungen bedingt daher oft eine Erhöhung des einmaligen, d. h. investiven Aufwands. Die zu realisierende Lösung erfordert somit stets einen Kompromiss, der z. B. durch ökonomische Kategorien quantifiziert werden kann.

Dabei stößt man häufig auf gesellschaftliche Rahmenbedingungen, welche die technischen Möglichkeiten zur Verbesserung der Entropiewirtschaft und damit die einer nachhaltigen Entwicklung einschränken. Auch rechtliche Festlegungen, wie Besteuerungen oder Subventionierungen sowie gesetzlich vorgeschriebene Grenzwerte, z. B. für Emissionen, wirken sich auf die technischen Lösungen aus. Dass Abfallenergie oft in Industriebetrieben anfällt, als Nutzer aber Kommunen, also verschiedene juristische Körperschaften, infrage kommen, führt u. a. zu erheblichen Interessensgegensätzen. Der Industriebetrieb produziert Abwärme auf der Grundlage einer bestimmten Technologie, möchte aber gegenüber der Kommune keine Vereinbarung eingehen, die ihn zur Wärmelieferung zwingt, auch bei einer Änderung der Technologie infolge von Modernisierung. Im steigendem Maße kommen heute soziale Bedingungen hinzu, die über das Akzeptanzverhalten der betroffenen Bevölkerung bestimmte technische Entwicklungen fördern oder hemmen.

Wenn man demnach die Chancen einer besseren Abfallenergieverwertung erörtern will, sind auch die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen und ihre denkbare Beeinflussbarkeit zu berücksichtigen. Ein Vergleich mit dem Vorgehen in anderen Ländern ist hier sehr hilfreich und zeigt, welche verschiedenen Konzepte möglich sind. Beachtung dieser Konzepte und Erfahrungen werden es erleichtern, Handlungsempfehlungen abzuleiten. Es ist aber auch offensichtlich, dass noch erhebliche Grundlagenprobleme von den einschlägigen Disziplinen zu lösen sind, wenn man schlüssige Konzepte entwickeln will.

So verweist die Abfallenergieverwertung als ein Beispiel aus den Technikwissenschaften darauf, dass eine Fortentwicklung der Technik einerseits die vertiefte naturwissenschaftliche Durchdringung voraussetzt und andererseits darüber hinaus die Erweiterung des Betrachtungshorizontes vom technischen Objekt zu geistes- und sozialwissenschaftlichen Dimensionen notwendig ist.

Schlussfolgerung

Die in dem Beitrag vorgestellte Methode ermöglicht zunächst eine naturwissenschaftlich exakte Erfassung des Begriffes Abfallenergie. Danach

müssen außer den Energieabgaben, wie z. B. der Abwärme, in diesen Begriff auch die Abfallstoffe einbezogen werden. Auf dieser Grundlage lassen sich vielfältige Verbesserungsmöglichkeiten im Sinne einer Verwertung der Abfallenergie angeben. Bei vielen Anwendungsfällen kann eine Verminderung des Energieeinsatzes und damit auch der Umweltbelastung in dem hier zu Grunde gelegten Quantitäten, also der Entropie, um den Faktor 2 erreicht werden. Allerdings sprechen heute häufig technische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen dagegen. Da diese aber auch beeinflussbar sind, ist die anzustrebende Lösung durch einen entsprechenden Kompromiss zu suchen. Im Gegensatz zu sonst üblichen Betrachtungsweisen ist unter Benutzung der vorgestellten Methode im naturwissenschaftlichen Sinn eine allgemeingültige Aussage zu erreichen, auf deren Grundlage eine vergleichbare Abwägung vorgeschlagener technischer wie auch gesellschaftlicher Maßnahmen erfolgen kann.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fratzscher

Prof. Dr.-Ing. Karl Stephan

Berlin-Brandenburgische Akademie
der Wissenschaften

AG „Strategien zur Abfallenergieverwertung“

Jägerstr. 22/23

10117 Berlin

Anmerkungen

- ¹ Bericht aus einem Forschungsprojekt [1] der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Eine internationale Konferenz zum gleichen Thema wurde gemeinsam mit dem Konvent der Technikwissenschaften am 2. und 3. Dezember 1999 in Berlin veranstaltet.
- ² 1 PW ist 1 Petawatt, das sind 10^{15} Watt, das Zeichen K steht für die Temperatur Kelvin. 1 TW ist 1 Terawatt, das sind 10^{12} Watt.
- ³ 1 GW ist 1 Gigawatt, das sind 10^9 Watt.

Literatur

- ^[1] Fratzscher, W. und K. Stephan (Hrsg.): Strategien zur Abfallenergieverwertung. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden 2000.
- ^[2] Ostwald, W.: Vorlesungen über Naturphilosophie. Veit u. Comp., Leipzig 1902.
- ^[3] Prigogine, I. und P. Glansdorff: Thermodynamic Theory of Structure Stability and Fluctuations. New York 1971.
- ^[4] Fratzscher, W. und V. M. Brodjanskij, K. Michalek: Exergie – Theorie und Anwendung. DVG, Leipzig 1986.