

H2nrw314  
06.07.2007

## **Energieeffizienz, nein: Exergieeffizienz!**

**Von  
Carl-Jochen Winter, Überlingen<sup>1</sup>**

Der aufmerksame politische Beobachter notiert, dass höhere Effizienzen (und erneuerbare Energien) als Maßnahmen gegen den anthropogenen Treibhauseffekt in der politischen Klasse unstrittig sind. 4 x 20 lautete die Formel im EU-Ministerrat vom Frühjahr 2007: 20% weniger Primärenergie, 20% Anteil erneuerbare Energien und 20% weniger Treibhausgasemissionen jeweils bis 2020. Der G8-Gipfel in Heiligendamm beschloss gar, die Emissionen bis 2050, also in nur 43 Jahren, auf die Hälfte zu senken. Deutschland hat sich das ehrgeizige Ziel eines jährlichen Effizienzzuwachses von 3% vorgenommen.

Es ist hier nicht zu rechten, ob die Beschlüsse technisch und wirtschaftlich verifizierbar, ob die Ziele vernünftigerweise erreichbar sind und, der wichtigste Prüfstein überhaupt, ob der Treibhauseffekt in seinen Auswirkungen auf Mensch, Fauna und Flora damit hinreichend eingedeicht ist.

Trivial ist, dass jede wegen des sparsameren Umgangs mit Energie und höherer Effizienz nicht nachgefragte Kilowattstunde umwelt- und klimaökologisch (selbstverständlich auch ökonomisch) irrelevant ist und betrieblich kohlenstofffreie erneuerbare (und nukleare) Energien keinen Beitrag zum Treibhauseffekt leisten.

Überhaupt nicht trivial aber ist - und das ist der Kern dieser Zeilen -, um welche Effizienz es denn geht, Energieeffizienz oder Exergieeffizienz, denn, jede Energieumwandlung von Kettenglied zu Kettenglied im Durchlauf durch die komplette Energiewandlungskette zerlegt Energie in Exergie und Anergie:  $\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie}$ . Mehr Exergie aus Energie ist das eigentliche Ziel jeder Energiewirtschaft, sie liefert technische Arbeitsfähigkeit, auf die es - nahezu - allein ankommt. Exergie ist in jede andere Energieform umwandelbar, Anergie nicht<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Professor Dr.-Ing. Carl-Jochen Winter, Vice President - The International Association for Hydrogen Energy (IAHE), c/o ENERGON Carl-Jochen Winter, o. St.- Leonhardstr. 9, D-88662 Ueberlingen, T/F +49 7551 944 5940/1, [www.itsHYtime.de](http://www.itsHYtime.de), [cjwinter.ENERGON@t-online.de](mailto:cjwinter.ENERGON@t-online.de)

<sup>2</sup> Z. Rant, Thermodynamische Bewertung der Verluste bei technischen Energieumwandlungen, Brennstoff-Wärme-Kraft 16 (1964) Nr.9 September

H.D.Baehr, Definition und Berechnung von Exergie und Anergie, Brennstoff-Wärme-Kraft 17 (1965) Nr. 1 Januar

Machen wir es anschaulich: Deutschlands in mehr als 200 Jahren Energiegeschichte des Landes gewachsener nationaler Energienutzungsgrad ist etwas mehr als 30%, derjenige der Welt wenig mehr als 10%. Deutschland muss gut drei Kilowattstunden an Primärenergie(rohstoffen) in die Volkswirtschaft einführen, um nach Durchlauf durch die nationale Energiewandlungskette eine Kilowattstunde an Energiedienstleistungen bereitstellen zu können, die Welt liegt bei 10 : 1! Die Effizienz des Industrielandes ist schon nicht besonders beeindruckend, diejenige der Welt aber verheerend. Und, das ist nur die eine Seite der Medaille. Die andere, und viel wichtigere, ist, dass Deutschlands exergetischer Nutzungsgrad bei wenig mehr als 15% liegt, und derjenige der Welt kaum angebar ist!

Was heißt das praktisch? Die Energiewirtschaften der Welt, auch diejenige Deutschlands, produzieren viel zu viel Wärme der falschen Temperatur am falschen Ort (= Anergie): Thermische Kraftwerke, so bewundernswert etwa die jetzt für Kohlekraftwerke angepeilten elektrischen Wirkungsgrade von 50% sind, liefern - wegen der jeweils irreversiblen Verbrennung und des Wärmeübergangs in den Dampfkesseln - riesige Mengen anenergetischer Wärme an Orten, an denen kein Nutzer sie abnimmt. Oder, der Kessel in den Zentralheizungskellern hat ein ähnliches Problem: er erzeugt eine Feuerungstemperatur von bis zu 1000°C, obwohl doch die Radiatoren für die Raumheizung nur 70°C Vorlauftemperatur abnehmen. Und ein drittes, wiederum ähnliches Wärmeproblem hat der Verbrennungsmotor im Auto: nur 20% (äußerstenfalls 30%) des Energieinhalts des Benzins oder Diesels gehen in die Traktion (= Exergie), der größere anenergetische Rest wird über das Kühlwasser oder das Abgas abgeführt.

Nun macht der Rezensent es sich zu leicht, Klage zu führen über den miserablen exergetischen Zustand seines Landes und der Welt, ohne den Versuch zu unternehmen, Wege aus dem Dilemma zu weisen: Zunächst erstaunt, wie wenig die lange bekannten Prinzipien der Exergothermodynamik bisher in die politische Entscheidungsfindung Eingang gefunden haben. Gesetze der Parlamente und die Gesetze der Natur gehen zunehmend auseinander, und es ist verständlicherweise nicht zu erwarten, dass die Gesetze der Natur einlenken werden! Effizienzerhöhungen, also mehr Energiedienstleistungen bei weniger Primärenergie des nationalen Energiesystems, bleiben im gewachsenen System und verkennen, dass Exergieeffizienzerhöhungen große ungehobene virtuelle Potentiale bereithalten, aber den Systemwechsel verlangen. Virtuell heißt, die Potentiale sind da, gleichsam im Verborgenen, aber sie sind bisher nicht genutzt.

Machen wir das an den drei oben erwähnten Beispielen deutlich (es gibt in allen Energiebereichen, der Industrie, des Gewerbes, des Transports und der Gebäude, nahezu unendlich viel mehr Beispiele): Wir sprachen von den beeindruckenden, wenn auch asymptotischen (materialtechnologisch mit zunehmender

Entwicklung zu höheren Temperaturen immer schwerer zu erreichenden) elektrischen Wirkungsgraden moderner Kohlekraftwerke, das ist Exergieeffizienzsteigerung im System; nach wie vor wird die Hälfte des Energieinhalts der eingesetzten Kohle nicht in technische Arbeitsfähigkeit (= Exergie) umgewandelt. Anders ein Systemwechsel (beispielhaft) zur kombinierten entkarbonisierten Produktion von Wasserstoff und Strom, etwa durch Luftzerlegung, Kohlevergasung, Kohlendioxidabstreifung, Wasserstofferzeugung und GuD-Anlage - alles seit langem mehr oder minder marktgängige Technologien -, die bei einer Kohlendioxidabstreifung von 90% 58% des Energieinhalts der Kohle in Wasserstoff umwandeln und 4% in Strom, zusammen also 62%<sup>3</sup>. Auch wenn zur Kohlendioxid-Sequestrierung und für die Atmosphäre schadlosen Endlagerung 10% reserviert werden, bleiben immerhin 52%. All das ist keine Frage der Technologie, sondern eine der Wirtschaftlichkeit, der gesellschaftlichen Akzeptanz und des politischen Willens. (Zum Vergleich: die Stromproduktion selbst in einem modernen Kohlekraftwerk mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 46% und einem Energieaufwand zur Abstreifung und für die Atmosphäre schadlosen Endlagerung des mitproduzierten Kohlendioxids von 10% bringt es zusammen auf 36%) .

Das zweite Beispiel: der schon erwähnte Kessel der Zentralheizungen ist energetisch exzellent, nahezu 100% des Energieinhalts des Brennstoffes Erdgas oder Leichtöl werden in Wärme umgewandelt, wenn auch einer Temperatur, für die es keinen Abnehmer gibt. Exergetisch hingegen ist der Kessel miserabel, denn es ist exergothermodynamisch schlicht absurd, Feuerungstemperaturen von bis zu 1000°C zu erzeugen, um letztlich Radiator-Vorlauftemperaturen von 70°C für die Raumheizung bereitzustellen. Würde anstelle des Kessels eine Wasserstoff (purer Wasserstoff oder Wasserstoff aus reformiertem Erdgas) versorgte Niedertemperatur- (< 100°C) oder Mitteltemperaturbrennstoffzelle (≈ 200°C) eingesetzt, erzeugte sie mit 30 bis 40% zunächst elektrischen Strom (= reine Exergie), und die Restwärme genügte nach wie vor, über große Teile des Jahres das Haus zu beheizen. Bei derzeit 15 Millionen Kesseln allein in Deutschland und deren Ersatz durch Brennstoffzellen à, sagen wir, 5kWe entstünde ein Anschlusswert von 75.000 MWe, der dem überkommenen Anschlusswert im Lande von 100.000 MWe nahe kommt: eine Exergetisierung des Heizungssystems unseres Landes par excellence! (Und nebenbei, ein ernstzunehmender dezentraler Wettbewerber hoher exergetischer Effizienz zum gewachsenen Elektrizitätssystem zentraler Struktur!). – All das muss nicht so kommen, zeigt aber den Weg auf.

---

<sup>3</sup> P. Chiesa et al., Co-production of hydrogen, electricity and CO<sub>2</sub> from coal from commercially ready technology. Part A: Performance and emissions, Part B: Economic analysis, Int'l J Hydrogen Energy 30 (2005), 747-767, 769-784

Schließlich das dritte Beispiel: die Antriebsaggregate der Automobile. Es steht hier nicht in Kritik, dass im gewachsenen System Exergieeffizienzpotentiale bestehen, die schrittweise aktiviert werden. Der Otto- oder Dieselmotor, beide mehr als 100 Jahre alt, sind nach wie vor nicht ausgereizt, besonders dann nicht, wenn im System des gesamten Automobils gedacht – und gehandelt wird. Worum es hier geht, ist wieder der Systemwechsel zur Exergetisierung: Erneuerbarer Wasserstoff oder Wasserstoff aus entkarbonisierter fossiler Energie oder aus nuklearem Strom oder - besser - nuklearer Hochtemperaturwärme an Bord des Autos versorgt einen wasserstoffoptimierten Verbrennungsmotor oder eine Niedertemperaturbrennstoffzelle. Beide sind umweltökologisch sauber, beide tragen ohne Kohlendioxidemissionen im gesamten Lebenszyklus (well-to-wheel) zum anthropogenen Treibhauseffekt nicht bei. Beide arbeiten bei höheren Exergetisierungsgraden. Das Entwicklungs-„Rennen“ zwischen beiden ist für den Ingenieur hochspannend, aber es ist nicht entschieden: Um es kurz zu machen, wir haben bei allen entwicklungsgeschichtlichen Bemühungen um alternative Antriebe - Stirling, Gasturbine, Wankel, ... - mit der Brennstoffzelle erstmals in der Technikgeschichte einen wirklich ernstzunehmenden Wettbewerber in Form eines nicht-Carnotischen, elektrochemischen Energiewandlers hoher exergetischer Effizienz vor uns; aber der Verbrennungsmotor wartet nicht, er sitzt auf einem Wissens- und Erfahrungspotential von mehr als 100 Jahren Entwicklungsgeschichte und bringt es mit wenigen zig Euro/kW auf den Markt; hiervon ist die Brennstoffzelle meilenweit entfernt – noch; sie holt auf.

Das Fazit: Höhere Effizienzen im gewachsenen System sind willkommen. Der eigentliche Durchbruch aber zu umwelt- und klimaökologischer Verantwortbarkeit verlangt die höheren Exergieeffizienzen und diese den Systemwechsel, der dem energiearmen, aber technologiereichen Industrieland nun wahrlich auf den Leib geschrieben sein sollte: Deutschlands nahezu unerschöpfliche „Energie“ ist das Wissen seiner Wissenschaftler und das Können seiner Ingenieure und Handwerker. Energiepolitik als kluge Technologiepolitik bringt den Eintritt in die Wasserstoffenergiewirtschaft, den erforderlichen Wechsel zu den nicht-Carnotischen Energiewandlern, zu der mit ihnen verbundenen Verschiebung des Bedeutungsschwerpunktes innerhalb der nationalen Energiewandlungskette gegen ihr Ende in die von Strom und Wasserstoff getragene Sekundärenergiewirtschaft und zu den dezentralen Energiewandlern kleinerer bis mittlerer Einheitsleistung (Watt bis Megawatt). Denken und Handeln in Energierohstoffen war 19. und 20. Jahrhundert, Denken und Handeln in exergieeffizienten Energiewandlungstechnologien ist 21. Jahrhundert.

Nun mag der nüchterne Energetiker einwenden, dass der Systemwechsel Jahrzehnte brauchen, wenn nicht halbe Jahrhunderte, und Billionen kosten wird. Gewiss, das überkommene Energiesystem lässt sich nicht im Handumdrehen

ändern und das neue System nicht aus der Portokasse bezahlen; auch die Lebensdauern soeben getätigter (oder noch zu tätigender) Milliardeninvestitionen im gewachsenen System sind Jahrzehnte bis zu halbe Jahrhunderte. Aber danach fragt die Klimaökologie nicht. Die Erwartung, durch die schlichte, allenfalls vielleicht ein wenig beschleunigte Fortentwicklung des überkommenen Systems den anthropogenen Treibhauseffekt auf ein für Mensch, Fauna und Flora verantwortbares Maß zu reduzieren, mag trügen. Die 2 Grad-plus als zulässig angesehene anthropogene atmosphärische Temperaturerhöhung sind Fiktion, deren Umsetzung in die Realität noch aussteht. Spätestens nach den künftigen gigantischen Hurrikanen und Sturmfluten à la New Orleans, spätestens nach Abschmelzen des Inlandeises, der nachfolgenden Meeresspiegelanhebung und der Überflutungen der Flachküstenzonen der Erde, spätestens nach der fortschreitenden Umwandlung heute noch fruchtbaren Bodens in Wüste, alles in der Folge verbunden mit anschwellenden Strömen von Millionen Klimaflüchtlingen, spätestens dann beginnt die Suche nach dem Systemwechsel. Und darauf vorbereitet zu sein, hierfür plädiert das vorliegende Papier, nicht mehr, nicht weniger.

Menschliche Phantasie ist endlich, ihre Eindringtiefe ist häufig nicht viel größer als einige Jahre. Durch unvorhergesehene Überraschungen werden in der Regel jeweilige Prospektionen in die Zukunft beendet<sup>4</sup>, weil sie Fortschreibungen des Bestandes sind. Beispiele für Überraschungen im Energiebereich sind kriegerische Ereignisse, der Untergang von Öltankern oder das beabsichtigte Versenken einer Ölplattform in der Nordsee, das Spielen am Erdgaspipelinehahn, Reaktorunfälle oder auch nur präsidiale Äußerungen aus einem wichtigen Ölexportland: Die nahezu automatischen Konsequenzen sind Preissteigerungen bei Öl und im Gefolge bei den anderen Primärenergierohstoffen, Preissteigerungen, denen Abnehmerländer hoher Importquote und mäßiger Exergieeffizienz (Deutschlands Importquote ca. 75%, seine Exergieeffizienz  $\geq 15\%$ ) nahezu ungeschützt ausgesetzt sind. –

Überraschungsfest ist der Systemwechsel zur exergieeffizienten Energiewirtschaft; Phantasie in der Prospektion ist dazu nicht nötig: Komme, was wolle, Exergie ist das nicht weiter steigerbare Maß an technischer Arbeitsfähigkeit aus Energie! Diese Grenze setzt die Thermodynamik. Kein Land der Erde hat diese Grenze auch nur angekratzt, der Weg dorthin ist vorgezeichnet, wenn auch noch sehr weit. Die Klimaökologie verlangt, den Weg zu gehen und die pace durchzuhalten.

... merke: itsHytime.de

---

<sup>4</sup> ähnliche Gedanken in D.S.Scott, Smelling Land, The Hydrogen Defense against Climate Catastrophe, 2007 [www.h2.com](http://www.h2.com)