

Regenerative Energiequellen aus thermodynamischer Sicht

Jan-Peter Meyn

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,
Physikalisches Institut - Didaktik,
Stadtstraße 7, 91058 Erlangen, jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de

Kurzfassung

Ein hoher Lebensstandard ist mit einer Vielzahl von irreversiblen Prozessen verbunden. Zum Abtransport der dabei entstehenden Entropie muss Energie zugeführt werden. Die Verfügbarkeit von Energieströmen aus geologischen Lagerstätten ist räumlich und zeitlich beschränkt, und deren Erschließung ist mit Gefahren für Umwelt und Frieden verbunden. Langfristig muss der Energiebedarf aus regenerativen Quellen gedeckt werden, welche auf dem Zustrom von Energie durch Sonnenlicht basieren. Durch die Identifikation von Wärme und Entropie können die thermodynamischen Prozesse systematisch formuliert und Schülern prinzipiell zugänglich gemacht werden.

Dieser Artikel ist in leicht veränderter Fassung bereits erschienen in: Kolling, Stefan (Hrsg.) : Beiträge zur Experimentalphysik, Didaktik und computergestützten Physik. Berlin : Logos, 2007, S. 97-117.

1 Energiekrise und globale Erwärmung

Der Wunsch nach Gesundheit und Bequemlichkeit sind ein Antrieb für wissenschaftliche, technische und gesellschaftliche Entwicklungen. Abgesehen von zeitlich vorübergehenden Rückschlägen und lokalen Unterschieden kann man feststellen, dass der Lebensstandard in den letzten zweihundert Jahren ständig angestiegen ist. Parallel dazu ist die pro Zeiteinheit umgesetzte Energiemenge angestiegen.

Da Energie nicht frei erhältlich ist, sondern durch Maschinen auf technisch nutzbare Träger verfügbar gemacht werden muss, besteht ein Wettbewerb um begrenzte Ressourcen, der Konflikte bis hin zum Krieg mit sich bringt. Diese Konflikte beeinträchtigen den Lebensstandard über die Menschheit gemittelt in ganz erheblichen Maße, auch wenn Verursacher und Notleidende oft nicht der selben Gesellschaft angehören. Zusätzlich erhöht die Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte den CO_2 -Gehalt der Atmosphäre, was zur Klimaveränderung führt.

Die Bedrohung durch Krieg und Umweltschäden kann durch regenerative Methoden zur Energiegewinnung sowie durch Steigerung der Effizienz zur Verminderung der benötigten Primärenergie abgewendet werden.

2 Entropie als Wärme

In der konventionellen Wärmelehre hat der Begriff der Wärmemenge Q in Energieeinheiten eine zentrale Bedeutung. Damit wird das Wesen der Wärme als eigenständige Entität nicht erfasst, und es sind eine Vielzahl von umständlichen Formulierungen und

Hilfsgrößen erforderlich, sobald Prozesse im Detail erklärt werden sollen. Eine analoge Vorgehensweise in der Elektrizitätslehre würde bedeuten, dass man keine Ladungsströme, sondern nur Energieströme betrachtet würde, was uns ungewohnt und absurd erscheint [1].

CALLENDER [2] hat schon vor knapp einhundert Jahren in einem Übersichtsartikel die Gestalt der konventionellen Wärmelehre mit historischen Entwicklungen begründet und aufgezeigt, dass man dem Wesen der Wärme und deren quantitativer Beschreibung, auch in Analogie zu anderen Teilgebieten der Physik, am besten gerecht wird, wenn man begrifflich festlegt:

Wärme ist Entropie

Demnach ist die Wärme eine eigenständige physikalische Größe und hat eine eigene Einheit (Carnot). Die Gleichsetzung von Entropie und Wärme stimmt sehr gut mit der umgangssprachlichen Verwendung des Wortes überein: Reibung erzeugt Wärme, ein heißer Körper enthält viel Wärme, zur Erzeugung von Wärme ist Energie notwendig.

Die Entropiezunahme beschreibt die Irreversibilität von Naturvorgängen quantitativ, und die Deutung dieser makroskopischen Größe als Wahrscheinlichkeitsmaß erlaubt den Übergang zur mikroskopischen Theorie der Wärme.

Akademische Lehrbücher, die Entropie als Wärmebegriff verwenden [3–5], haben sich bisher nicht als Standardwerke etablieren können. In der Physikdidaktik wird die Einführung der Entropie als makro-

skopische Grundgröße schon lange gefordert [6–8]. Der Karlsruher Physikkurs [9, 10] ist ein systematisches und erprobtes Unterrichtskonzept, dessen Vorteile in der Wärmelehre empirisch nachgewiesen sind [11]; diesen Kurs gibt es auch in englischer, spanischer und italienischer Übersetzung. Ein Lehrbuch mit systemdynamischen Schwerpunkt für den Unterricht der Sekundarstufe II der Schweiz verwendet ebenfalls die Entropie als Wärmebegriff [12].

3 Entropie- und Energieströme

In diesem Abschnitt sind einige Aspekte der Thermodynamik in der Entropie-Formulierung des Karlsruher Physikkurses zusammengefasst.

Ein Entropiestrom der Stärke I_s trägt Energie. Die Energiestromstärke (Leistung) P ist proportional zur Temperatur T :

$$P = TI_s \quad (1)$$

Oft findet man die differentielle Schreibweise:

$$dE = TdS \quad (2)$$

3.1 Diffusion

Temperaturunterschied ist Antrieb einer Entropiestromung gegen einen Wärmewiderstand. Im Falle der Diffusion von Entropie von einem warmen Reservoir der Temperatur T_1 zu einem kalten Reservoir mit T_2 entsteht zusätzliche Entropie, wie man in Abbildung 1 ablesen kann. Die Entropiestromstärken am Eingang des kalten Reservoirs und am Ausgang des warmen Reservoirs werden direkt aus Gleichung 1 berechnet; die Zunahme der Entropie ist deren Differenz.

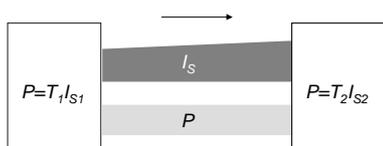


Abbildung 1: Entropie und Energie strömen aus einem warmen Reservoir nach rechts durch einen Wärmewiderstand zu einem kalten Reservoir

3.2 Wärmekraftmaschine

Ersetzt man den passiven Wärmewiderstand durch eine Wärmekraftmaschine, so wird die Erzeugung von Entropie verringert. Im Grenzfall der dissipationfreien, also reversibel arbeitenden Wärmekraftmaschine, wird keine Entropie erzeugt. Am Ausgang der Wärmekraftmaschine wird bei niedriger Temperatur und konstantem Entropiestrom weniger Energie abgegeben. Die Differenz von einströmender Energie und ausströmender Energie wird - je nach Konstruktion - auf dem Träger Impulsstrom, Drehimpulsstrom oder Ladungsstrom abgegeben; das Prinzip ist in Abbildung 2 skizziert.

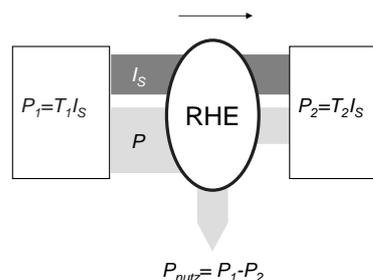


Abbildung 2: Strömung von Entropie und Energie durch eine reversible Wärmekraftmaschine (RHE) als Verbindung zwischen einem warmen und einem kalten Wärmereservoir

Der Anteil der nutzbaren Energiestromstärke (Leistung) P_{nutz} im Verhältnis zur einströmenden Energiestromstärke P_1 ist der Carnot'sche Wirkungsgrad η :

$$\eta = P_{\text{nutz}}/P_1 = (P_1 - P_2)/P_1 \quad (3)$$

$$= (T_1 I_s - T_2 I_s)/T_1 I_s = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (4)$$

Reale Wärmekraftmaschinen kann man formal beschreiben, in dem man den reversiblen Anteil und den Diffusionsanteil getrennt betrachtet.

3.3 Strahlungsgleichgewicht der Erde

Auf geologischer Zeitskala bleibt die Temperatur der Erde konstant und der thermodynamische Zustand ändert sich nicht wesentlich, abgesehen von vorübergehenden Schwankungen wie Eiszeiten, etc. Daraus folgt die Konstanz der in Oberflächennähe vorhandenen Energie- und Entropiemenge. Die Erde empfängt von der Sonne einen Zustrom elektromagnetischer Strahlung mit einer Energiestromstärke P von insgesamt $1,74 \cdot 10^{17} \text{W}$ [13], das sind im Mittel 342W/m^2 . Die elektromagnetische Strahlung wird nahe des thermischen Gleichgewichts in der Photosphäre der Sonne erzeugt, daher kann die Sonne als Schwarzer Strahler betrachtet werden. Die elektromagnetische Strahlung transportiert auch Entropie mit einer Entropiestromstärke I_s gemäß [5]:

$$P = \frac{3}{4} T I_s \quad (5)$$

Die Entropiestromstärke von der Sonne zur Erde beträgt $6 \cdot 10^{13} \text{Cts}^{-1}$; die mittlere Entropiestromdichte ist $7,9 \cdot 10^{-2} \text{Cts}^{-1} \text{m}^{-2}$.

Die elektromagnetische Strahlung wird in der Atmosphäre und auf der Erdoberfläche gestreut und absorbiert. Für die Bilanzierung sind die Details der Streuprozesse, z.B. meteorologische Erscheinungen, unerheblich. Es reicht die Kenntnis der zeitlich und räumlich gemittelten Temperatur von 288K. Zur Abschätzung der ins Weltall abgestrahlten elektromagnetischen Strahlung wird die Erde als schwarzer Strahler im thermischen Gleichgewicht bei 288K

betrachtet. Die Energiestromstärke der abgegebenen elektromagnetischen Strahlung ist gleich der Energiestromstärke der einfallenden Strahlung. Die Stärke des abgestrahlten Entropiestroms ist größer als der Entropiezustrom von der Sonne zur Erde, da die Oberflächentemperatur der Erde kleiner ist als die der Sonne. Die mittlere Entropiestromdichte ins Weltall beträgt $1,58\text{Cts}^{-1}\text{m}^{-2}$ nach Gleichung 5. Netto wird also durch Absorption der Sonnenstrahlung und Diffusion von Wärme auf der Erde Entropie mit einer mittleren Dichte von $1,50\text{Cts}^{-1}\text{m}^{-2}$ erzeugt.

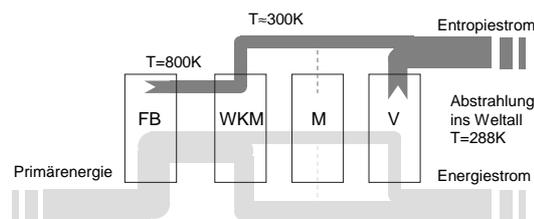


Abbildung 3: Energie- und Entropiebilanz. FB: Fossiler Brennstoff, WKM: Wärmekraftmaschine, M: Motor, V: Verbraucher

4 Energiequellen

4.1 Antrieb von irreversiblen Prozessen

Alle Vorgänge, die nicht von allein ablaufen, benötigen einen Zustrom von Energie. Viele Prozesse sind in hohem Maße irreversibel, so dass Entropie entsteht. Diese Entropie muss abtransportiert werden, und zwar auf dem Energiestrom, der für den Antrieb des Prozesses notwendig ist. Der Wert eines Energiestroms für den Nutzer ist durch die Menge an Entropie gegeben, die diesem Energiestrom zusätzlich aufgeladen werden kann.

Alternativ kann man sagen, dass zum Antrieb eines irreversiblen Vorgangs negative Entropie hinzuströmen muss [14]; diese Formulierung erlaubt aber keine direkte Beziehung zum gewöhnlichen Wärmebegriff wie oben gefordert.

4.2 Primärenergieträger

Technische Energieträger sind elektrische Ströme, Ströme bewegter Körper oder Fluide sowie Ströme chemisch umwandelbarer Substanzen wie z.B. Erdgas.

Unter *Primärenergie* versteht man den Energieinhalt eines bestimmten Trägers am Ort der erstmaligen technischen Gewinnung aus der Umwelt unter der Annahme, dass der Energiestrom vollständig auf einen Entropiestrom umgeladen werden könne. Primärenergieströme werden im Verlauf des Transports zum endgültigen Nutzer mehrfach umgeladen, und die Energieträger erfahren einen Widerstand beim Transport. Dadurch entsteht Entropie, die man in der Bilanz mit berücksichtigen muss, auch wenn ein isoliert betrachteter Energieträger keine Entropie transportiert.

¹Speziell für Erdgas wurde das direkte Umladen auf elektrischen Strom durch Brennstoffzellen vorgeschlagen und in kleinen Anlagen demonstriert; allerdings ist wegen der Dissipation in der Brennstoffzelle die relative Entropieaufnahme im nachfolgenden Nutzungsprozess nicht größer als bei der Verbrennung in Wärmekraftmaschinen, so dass dieser Fall nicht gesondert behandelt werden muss.

Der Energie- und Entropiestrom für einen beispielhaften irreversiblen Vorgang ist in Abbildung 3 dargestellt. Ziel sei ein gebohrtes Loch in einem Stück Holz. Dazu wird eine elektrische Bohrmaschine verwendet. Die elektrische Energie stammt aus einem Kohlekraftwerk. Der Primärenergieträger ist der fossile Brennstoff Kohle (FB). Durch Verbrennen wird Entropie erzeugt, und zwar bei einer Temperatur von rund 800K. Diese Entropie strömt durch die Wärmekraftmaschine WKM; dabei wird ein Teil der Energie auf den Träger Elektrizität umgeladen. Die elektrische Energie strömt in den Elektromotor M. Die aus dem Kraftwerk herausströmende Entropie transportiert weniger Energie als die hineinströmende Entropie, da die Temperatur niedriger ist. Im Elektromotor wird Energie auf den Träger Drehimpuls umgeladen, dabei entsteht auch etwas Entropie, die Energie aus dem nutzbaren Strom entfernt (gestrichelt eingezeichnet). Die Entropieentstehung im Bohrloch dominiert den ganzen Prozess und bestimmt die Energie, die in den Verbraucher V einströmen muss. Die gesamte erzeugte Entropie verteilt sich und strömt letztlich durch Abstrahlung ins Weltall.

4.3 Gespeicherte Brennstoffe

Der größte Teil des zur Zeit genutzten Primärenergiestroms ist an fossile und nukleare Brennstoffe gebunden. Das erste Umladen der Energie erfolgt stets auf einen Entropiestrom sehr hoher Temperatur.¹ Für die weitere Verwendung, die schließlich in einen Entropiestrom bei Umgebungstemperatur mündet, kann der Energiestrom noch erhebliche Mengen an Entropie aufnehmen.

Prinzipiell erhöht die Freisetzung von Energie und Entropie aus fossilen und nuklearen Brennstoffen die mittlere Temperatur der Erde, weil sich ein neues Fließgleichgewicht einstellt. Dieser Effekt ist - global gesehen - von geringer Bedeutung. Würde man für eine zukünftige Bevölkerung von 20 Milliarden Menschen den heutigen Primärenergieumsatz in Deutschland in Höhe von 5500W pro Einwohner bereitstellen, so würde der zusätzliche Entropiestrom die Tempera-

tur um 0,035K erhöhen.

Alle gespeicherten Brennstoffe sind nur begrenzt verfügbar. Konflikte um die begrenzten Ressourcen werden sich mit der Abnahme der Vorräte verschärfen.

4.3.1 Fossile Brennstoffe

Die Verbrennung der fossilen Brennstoff Kohle, Erdöl und Erdgas verändert den CO_2 -Gehalt der Atmosphäre. Solche Veränderungen hat es im Verlauf der Erdgeschichte vielfach gegeben, und die augenblicklichen Schwankungen sowohl in Hinblick auf die Konzentration als auch die Auswirkungen durch den verstärkten Treibhaus-Effekt können auf geologischen Zeitskalen als normal betrachtet werden. Für die Zivilisation ist die Verstärkung des Treibhauseffekts allerdings sehr problematisch, da die Menschen nicht mehr frei wandern können und durch den Verlust von Lebensräumen zusätzliche Konflikte entstehen. Im Verlauf der letzten 30 Jahre hat sich die Einschätzung der ökologischen Auswirkungen durch Verwendung fossiler Brennstoffe grundlegend geändert. Die Emission von toxischen Begleitgasen wie Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid und Stickoxiden ist inzwischen durch verbesserte Filtertechnik auf ein weniger problematisches Maß reduziert worden, während die Emission von CO_2 erst seit rund 10 Jahren als Hauptproblem gesehen wird.

Für die Betrachtung des grundsätzlichen Mechanismus der Entropieabstrahlung wie in Abschnitt 3.3 reicht die Näherung des schwarzen Strahlers völlig aus, während der Treibhauseffekt nur mit den spezifischen Absorptions- und Emissionsspektren von Atmosphäre und Erdoberfläche erklärt werden kann [13]. Ohne auf diese Details einzugehen, soll hier herausgestellt werden, dass die Temperaturerhöhung durch antropogenes CO_2 rund zwei Größenordnung stärker ist, als die direkte Temperaturerhöhung durch Erzeugung von Entropie aus gespeicherten Brennstoffen.

4.3.2 Kernspaltung

Bei der Kernspaltung von Uran und Plutonium werden keine Gase emittiert, so dass diese Energiequelle nicht zum Treibhauseffekt beiträgt. Dieser Vorteil ist heute das wesentliche Argument der Befürworter der Kernspaltung. Die Risiken werden unterschiedlich bewertet. Unbestrittene Tatsache ist, dass in jedem Reaktor durch Neutroneneinfang Plutonium entsteht, welches auf chemischen Wege abgetrennt und zum Bau von Atombomben verwendet werden kann. Mittelfristig ist sogar eine optimierte Herstellung von Plutonium durch sogenanntes Brüten von U-238 notwendig, um die sehr begrenzten Vorräte an U-235 zu strecken [15]. Aktuelle Kriegsdrohungen gegen Staaten, die an der Schwelle zur Verfügbarkeit von waffenfähigem Material stehen, demonstrieren die große

Gefahr für den Weltfrieden, die von dieser Technologie ausgeht. Das Unfallrisiko kommt davon unabhängig noch hinzu.

4.3.3 Geologische Wärme

Die Nutzung der Erdwärme als Ersatz für Brennstoffe gilt heute als ökologisch unbedenklich. Konzeptionell ist die Erdwärme keine regenerative Energiequelle, auch wenn sie oft so bezeichnet wird, denn der Energievorrat ist begrenzt. Die Möglichkeit der Nutzung wird oft überschätzt. Der Primärenergieumsatz in Deutschland beträgt $1,3\text{W}/\text{m}^2$. Demgegenüber ist der mit dem Wärmestrom verbundene Energiestrom aus dem Erdinnern an die Oberfläche von der Größenordnung $0,1\text{W}/\text{m}^2$. Dieser Wert ergibt sich sofort als Abschätzung aus der Wärmeleitfähigkeit von Granit ($3,5\text{W}/\text{mK}$) und dem mittleren Temperaturgradienten in der Erdkruste ($0,03\text{K}/\text{m}$). Wollte man einen größeren Teil des Primärenergiebedarfs aus Erdwärme nutzen, so müsste man Bereiche der Kruste abkühlen, weil die Wärme aus dem Erdkern nicht schnell genug nachströmen kann. Die Abkühlung um 1K einer 1000m mächtigen Schicht mit der Grundfläche Deutschlands entspricht dem Primärenergieumsatz von nur 56 Jahren. Diese Überschlagsrechnung gibt auch nur eine obere Grenze für die Nutzbarkeit an; tatsächlich wäre es technisch unmöglich, die Kruste homogen abzukühlen, weil die Wärmeleitfähigkeit der Kruste zu klein ist und der Wärmetransport durch Konvektion von Wasser, z.B. durch elektrisch betriebene Pumpen, auf die Nähe zum Bohrloch beschränkt ist. Die Temperatur des aufsteigenden Wassers ist auf etwa 400K-500K beschränkt; deshalb ist die Aufnahmefähigkeit dieses Energiestroms für zusätzliche Entropie relativ klein.

Die Geothermie ist eine gute Quelle für Entropieströme mit niedriger Temperatur zum Zwecke der Heizung an Standorten mit außergewöhnlichen geologischen Bedingungen und geringer Bevölkerungsdichte, z.B. auf Island.

4.4 Elektromagnetische Strahlung der Sonne

Der globale Zustrom an solarer Energie übersteigt den Primärenergiebedarf um mehrere Größenordnungen, vgl. Abschnitt 3.3. Die direkte oder indirekt Gewinnung von Primärenergie aus der elektromagnetischen Strahlung der Sonne ist regenerativ, da die Kraftwerke lediglich für eine lokale Umverteilung der Energie- und Entropieströme sorgen und keine Vorräte verbraucht werden. Die solare Strahlung ist die einzige Quelle für Primärenergie, die langfristig den Energiebedarf zur Sicherung des Lebensstandards decken kann. Die Verfügbarkeit von Solarenergie im weiteren Sinne ist sehr gleichmäßig verteilt, so dass Konflikte um diese Ressourcen weniger zu befürchten sind.

4.4.1 Direkte Quellen

Photovoltaik Die Solarzelle überträgt einen Teil der Energie aus dem Sonnenlicht direkt auf einen elektrischen Energiestrom. Der restliche Teil wird absorbiert; dabei entsteht Entropie, wie sie auch durch Absorption des nicht umgesetzten Lichts im natürlichen Boden entstanden wäre.

Solarthermie Durch Absorption des Sonnenlichts in Flachkollektoren wird Entropie bei einer Temperatur von rund 370K erzeugt. Damit können eine Vielzahl von Prozessen sinnvoll versorgt werden, die aus technischen Gründen keine höheren Temperaturen vertragen, z.B. Papierherstellung, Holz Trocknung oder Brauchwassererwärmung. In diesen Fällen wird der Energiestrom optimal ausgenutzt.

Höhere Temperaturen sind mit Flachkollektoren nicht erreichbar, da die vom heißen Kollektor abgestrahlte Leistung - in der Näherung des Schwarzen Strahlers - bei einer Temperatur von 370K bereits 1kW/m^2 beträgt, also der maximalen Energiestromdichte der Sonne bei senkrechtem Einfall entspricht. Durch Fokussierung des Sonnenlichts erreicht man Temperaturen bis ca. 1300K [16].

Bei Aufwindkraftwerken wird durch Absorption von Sonnenlicht ein Luftstrom angetrieben, d.h. es liegt eine solar beheizte Wärmekraftmaschine vor. Die Leistungsdichte ist wegen des geringen Temperaturunterschieds von aufgewärmter und nachströmender Luft sehr klein.

4.4.2 Nutzung der meteorologischen Wärmekraftmaschine

Solarthermie und Photovoltaik erfordern Sonnenschein oder zumindest einen nennenswerten Lichtstrom. Von Kritikern wird die diskontinuierliche Einstrahlung der Sonne besonders hervorgehoben. Tatsächlich sind es besonders die Energieträger Wind und Regen, die heute den größten Anteil an regenerativen Energiequellen bilden, und diese stehen kontinuierlich zur Verfügung, so lange man ein hinreichend großes Areal betrachtet.

Wind Rund 2% des solaren Energiestroms wird auf den Impulsstrom der Winde in der Atmosphäre umgeladen. Die technisch erreichbare mittlere Energiestromdichte in Bodennähe beträgt nach vorsichtiger Schätzung $0,25\text{W/m}^2$ [17]. Bei Windkraftwerken wird Energie vom Impuls der Luftströmung auf den Träger Elektrizität umgeladen. Der Wind wird also etwas gebremst und die geringere Entropieerzeugung durch Reibung kann ersatzweise durch Dissipation der gewonnenen elektrischen Energie aufgebracht werden.

Wasser Durch Verdampfen, Konvektion und Abregnen im Gebirge gelangen große Mengen Was-

ser auf hohes Gravitationspotential. Natürlicherweise entsteht Entropie beim Herabströmen des Regens in Flüssen. Der Bau von Staustufen verringert die Reibung aufgrund des größeren Querschnitts und ermöglicht die Gewinnung elektrischer Energie in Turbinen. Laufwasserkraftwerke basieren ebenfalls auf dem Stauen von Wasser, hier ist die Wasserstromstärke sehr groß und die Differenz des Gravitationspotentials sehr klein. Bei Verwendung der elektrischen Energie für den Antrieb irreversibler Prozesse wird die Entropiemenge erzeugt, die durch Verringerung der Reibung im Fluss eingespart wurde.

4.4.3 Biomasse

Bei der Absorption von Sonnenstrahlung durch Pflanzen wird Energie auf den Träger Biomasse übertragen, wie hier am Beispiel Holz erläutert werden soll. Wegen der Photosynthese entsteht weniger Entropie bei Absorption des Sonnenlichts, als dies bei einer toten Fläche mit gleicher Reflexionsfähigkeit der Fall wäre. Bei konstantem Waldbestand entsteht zusätzliche Entropie durch Verrotten abgestorbener Bäume. Es ist möglich, einen Teil der abgestorbenen Bäume zu ernten und das Verrotten durch Verbrennung zu ersetzen. Im Fließgleichgewicht ist die CO_2 -Bilanz ausgeglichen, d.h. der aktiv genutzte Wald erfährt den gleichen Verlust an Holz, wie es der natürlichen Verrottung entspricht. Unter dieser Voraussetzung kann das Verfahren als regenerative Energiequelle bezeichnet werden. Das Verbrennen von Vorräten hingegen steigert den CO_2 -Gehalt der Atmosphäre in ähnlichem Maße wie bei fossilen Brennstoffen.

Bei der Verrottung von landwirtschaftlichen Abfallprodukten entsteht nicht nur CO_2 , sondern auch Methan (CH_4). Aufgrund seiner optischen Eigenschaften ist Methan ein stärkeres Treibhausgas als CO_2 . Zwar oxidiert Methan in der Atmosphäre, aber die Verweildauer beträgt mehrere Jahre. Die kontrollierte Vergärung landwirtschaftlicher Abfälle und die Verbrennung von Methan zu CO_2 zum Ersatz fossiler Brennstoffe trägt doppelt zur Begrenzung des Treibhauseffekts bei.

4.5 Gezeitenströmung

Gezeitenkraftwerke gewinnen Energie aus dem Drehimpuls des Systems Erde-Mond. Diese Quelle ist nicht regenerativ im strengen Sinne. Da bevorzugt nur Resonanzen von Meeresströmungen durch elektrische Generatoren gedämpft werden, scheinen die Auswirkungen auch bei großtechnischer Nutzung vertretbar gering zu sein.

5 Effizienzsteigerung

Jegliche Art von Energiegewinnung ist mit Aufwand, Gefahr und ökologischer Beeinträchtigung verbunden. Bei regenerativen Energiequellen steht der ho-

he Bedarf an Kapital und Platz im Vordergrund, welche die ausschließliche Nutzung dieser Quellen verzögert. Zur Minderung der Energiekrise sind daher auch Sparmaßnahmen notwendig. Fordert man den Erhalt des Lebensstandards, so muss die Gewinnung und Nutzung von Energieströmen mit weniger unnützen irreversiblen Prozessen belastet sein, damit mehr Entropie aus gewünschten irreversiblen Prozessen aufgenommen werden kann.

5.1 Vermeidung nutzloser Irreversibilität

5.1.1 Entropieerzeugung bei alltäglichen Vorgängen

Wenig Sparpotential bieten Vorgänge, die intrinsisch irreversibel sind. Als Beispiel wird eine Person betrachtet, die sich auf einer 20m hohen Brücke befindet und den Wunsch hat, zum Bach unterhalb der Brücke herabzusteigen, um Fische zu betrachten. Gemäß der Voraussetzung wird nicht in Frage gestellt, ob der Abstieg notwendig oder sinnvoll sei. Steigt die Person zu Fuß ab, so wird ihre potentielle Energie vollständig auf den Träger Entropie übertragen. Beim Springen mit einem Bungee-Seil könnte die potentielle Energie auf dem Träger Impuls zwischengespeichert und zurückgewonnen werden, aber diese Möglichkeit kommt für eine kontemplative Betrachtung der Fische nicht in Frage. Man könnte wohl daran denken, beim Abseilen von der Brücke eine Last anzuheben; dieser Prozess wird aber erst im Grenzfall beliebig kleiner Geschwindigkeit reversibel. Außerdem ist das Fertigen und Transportieren von Seil und Last ein irreversibler Vorgang. Die Entropieerzeugung ist also nicht vermeidbar. Entsprechende Argumente gelten prinzipiell für Verkehr: Wer sich bewegen will, muss Entropie erzeugen.

5.1.2 Technisch unnötige Entropieerzeugung

Zu den unnötigen irreversiblen Vorgängen gehören Reibungsvorgänge, die auf dem gegenwärtigen Stand der Technik verringert werden können, sowie Maschinen, die in Betrieb sind, ohne im Gebrauch zu sein, d.h. im stand-by Modus laufen. Zahlreiche Beispiele für nutzlose Entropieerzeugung findet man auch im Haushalt. Eine Zeitschaltuhr im Herd braucht bis zu 5W elektrischer Energiestromstärke (entsprechend rund 15W Primärenergiestromstärke), während ein batteriebetriebener Wecker aufgrund optimierter Elektronik mit weniger als 1mW auskommt. Da beide Uhren Schaltvorgänge auslösen können und von vergleichbarer Genauigkeit sind, kann man feststellen, dass 99,98 % der Entropieerzeugung in der Zeitschaltuhr vermeidbar sind.

²Der Wärmedurchgangskoeffizient gibt den Wärmestrom pro Flächeneinheit bei 1K Temperaturdifferenz an. In diese Größe gehen im Wesentlichen die Wärmeleitfähigkeit und die Dicke der Schicht ein.

5.1.3 Wohnraumheizung

Die Regelung der Wohnraumtemperatur auf ein konstantes, behagliches Niveau ist aus physikalischer Sicht kein intrinsisch irreversibler Prozess, weil der Zustand des Systems Wohnhaus nicht verändert wird. Das Heizen, d.h. die Erzeugung von Entropie im Inneren des Hauses ist nur deshalb nötig, weil Entropie durch die Wände strömt, wenn der Innenraum eine höhere Temperatur hat als die Umgebung. Unerwünschte Entropieströme können jedoch mit einfachen Mitteln wirksam verringert werden, wie im nächsten Abschnitt ausgeführt wird.

5.2 Passiv-Haus als Entropiefänger

Bei sachgerecht geplanten Einfamilienhäusern kann der Energiebedarf für Raumheizung auf weniger als 10% im Vergleich zu den aktuellen Bauvorschriften reduziert werden; solche Gebäude heißen Passiv-Häuser. Auch im Vergleich mit dem gesamten Wohnungsbestand ergibt sich ein Bedarf an Heizwärme pro Einwohner unterhalb von 10% des Durchschnittswertes bei gleichzeitig weit überdurchschnittlichem Wohnkomfort. Der Anteil des Energiebedarfs für Raumwärme in Privatwohnungen beträgt in Deutschland 22% des Primärenergieumsatzes [18]; man könnte also mittelfristig den Primärenergieumsatz um 20% senken, wenn bei Neubauten und Sanierungen die verfügbare Technologie konsequent eingesetzt würde.

Ein Passiv-Haus hat drei wesentliche Komponenten, die unten erläutert werden. Oft haben solche Häuser zudem Kollektoren für solare Trinkwassererwärmung und Photovoltaik; damit kann bei konsequenter Auslegung der Primärenergiebedarf im Jahresmittel auf Null reduziert werden.

5.2.1 Rückhaltung intern erzeugter Entropie

Wände und Decken von Passivhäusern haben geringe Wärmedurchgangskoeffizienten² von typisch kleiner als 0,1W/m²K. Dieser Wert wird entweder durch eine rund 30cm dicke Styroporschicht auf einer konventionellen Stein- oder Betonwand, oder durch eine Wand in Holzrahmenbauweise mit rund 40cm Füllung von Steinwolle oder Zellulosewerkstoffen realisiert. Der Wärmestrom durch die Wand so gering, dass die interne Erzeugung von Entropie durch die Bewohner, elektrische Geräte und Verwendung von warmen Wasser, sowie der im nächsten Abschnitt erläuterte Eintrag von solarer Wärme ausreicht, um die Innentemperatur auf wohnlichem Niveau zu halten. Lediglich für eine kurzen Zeitraum im Winter ist eine zusätzliche Heizung erforderlich, deren Energieumsatz die bereits erwähnten 10% des Durchschnittswertes nicht übersteigt.

5.2.2 Trennung von Luft- und Entropieströmung

Zur Vermeidung von Wärmeverlusten durch Konvektion, also unerwünschte Luftströmungen zwischen Innenraum und Umwelt, muss das Passivhaus weitgehend luftdicht abgeschlossen sein. Der zum Leben notwendige Luftaustausch erfolgt durch eine kontrollierte Lüftung mit elektrischen Ventilatoren. Die Wärme der verbrauchten Luft wird durch einen Gegenstromwärmetauscher mit einem Wirkungsgrad von bis zu 95% auf die Frischluft übertragen. Der Vorgang ist ein übrigens ein gutes Beispiel dafür, dass Entropie nicht fest mit einem Stoffstrom verbunden ist, sondern eine eigenständige physikalische Entität ist. Die zum Betrieb der Lüftungsanlage notwendige elektrische Energie beträgt im Winter nicht mehr als 5% der zurückgehaltenen Wärmemenge.

5.2.3 Einfang und Speicherung solarer Strahlung

Moderne Fenster mit Dreifach-Verglasung haben einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $1\text{W/m}^2\text{K}$, wobei die Schwachstelle in der Regel der Rahmen ist. Dieser Wert ist zehnmal größer als bei der Wand des Passivhauses; daher wird die Zahl der Fenster im Norden reduziert. In südlicher Richtung sind große Fenster trotz des höheren Wärmedurchgangskoeffizienten von Vorteil, da direkte oder diffuse Sonneneinstrahlung netto einen Gewinn an Entropie bedeutet. Im Winter ist der Gewinn erheblich größer als im Sommer, denn die Sonnenstrahlung fällt im Winter mit einem kleineren Winkel zum Einfallslot des Fensters ein. Fenster in Ost- und West-Richtung tragen ebenfalls positiv bei und werden mit Rolläden versehen, damit es im Sommer nicht zu einer übermäßigen Aufheizung kommt. Da der Wärmestrom durch Sonnenlicht nur tagsüber vorhanden ist, muss die Wärmekapazität des Hauses so groß sein, dass eine spürbare Auskühlung in Zeiten der Dunkelheit nicht statt findet. Bei Steinhäusern ist die intrinsische Wärmekapazität ausreichend, bei Holzhäusern wird ein Isoliermaterial auf Zellulosebasis mit hoher Wärmekapazität sowie Lehmputz und andere mineralische Füllstoffe verwendet. Passivhäuser haben bei gleicher Wärmekapazität eine erheblich längere Zeitkonstante der Innentemperatur als konventionelle Häuser, da die Hülle einen viel größeren Wärmewiderstand hat. Deshalb ist der Komfort von Passivhäusern auch an heißen Sommertagen sehr hoch.

5.3 Das GuD-Kraftwerk als zweistufige Entropiemühle

Für die Elektrizitätserzeugung aus Biomasse, insbesondere aus reinen Produkten wie Methanol und Erdgas, sind konventionelle Großkraftwerke mit gekoppelten Gas- und Dampfturbinen (GuD) geeignet. Zukünftig kommt auch Wasserstoff als Brennstoff in

Frage, der in vielen Szenarien als bevorzugtes Speichermedium für Energie vorgeschlagen wird.

GuD-Kraftwerke werden seit einiger Zeit für die Verbrennung von Erdgas gebaut und können ohne weiteres Methan aus Biomasse (mit-)verbrennen. Durch optimierte Turbinentechnik kann mehr als 50% der eingesetzten Primärenergie in elektrische Energie umgewandelt werden. Dieser hohe Wirkungsgrad wird ermöglicht durch eine sehr hohe Temperatur der in der Gasturbine erzeugten Gase von bis zu 1400K auf der Eintrittseite sowie eine Kühlung der Abgase durch eine nachgeschaltete Dampfturbine von 820K auf 300K auf der Austrittseite. Die hohe Abgastemperatur der Gasturbine ist typisch für Wärmekraftmaschinen (auch Kolbenmaschinen), die mit einem offenen Durchstrom von Luft bei Atmosphärendruck arbeiten, anders ist wegen der geringen Wärmekapazität der Abgase der notwendige Entropiestrom nicht zu realisieren. Für Details wird auf die Spezialliteratur verwiesen, z.B. [19]. Bei der Dampfturbine hingegen wird dem Prozessmedium Wasser Entropie auch durch Kondensation entzogen, dadurch kann bei niedriger Temperatur und extrem niedrigem Druck viel Entropie transportiert werden. Die obere Temperatur des Dampfes ist durch die verwendeten Materialien und Konstruktionen auf ca. 830K begrenzt, sie liegt zufällig in der Nähe der Abgastemperatur der Gasturbine. Kurz gesagt: Es gibt Entropiemühlen für hohe und für niedrige Temperaturen, aber keine Entropiemühle, die den gesamten technisch nutzbaren Temperaturbereich abdeckt. Eine große Ausbeute an elektrischer Energie ist möglich, wenn zwei Entropiemühlen unterschiedlicher Bauart in Serie verwendet werden.

6 Wärmelehre in der Schule

Wir kennen allgemeine Bildungsziele, die im Kern konsensfähig sind. Insbesondere ist man sich darüber einig, dass Kinder und Jugendliche lernen sollen, den gesellschaftlichen, wissenschaftlichen und technischen Fortschritt aktiv mitzugestalten, jeder nach seinen Veranlagungen.

KLAFKI [20] nennt die Lösung epochaltypischer Probleme ein vorrangiges Bildungsziel. Die oben genannten Krisen und Konflikte um Energieressourcen sowie die globale Veränderung des Strahlungshaushaltes der Erde sind ein epochaltypisches Problem, vielleicht sogar das einzige, welches primär durch physikalischen Sachverstand gelöst werden kann. Wärmelehre müsste demnach den Schwerpunkt im Physikunterricht bilden, und zwar in allen Schulformen. Für unser Wohlergehen ist es von Bedeutung, dass alle Mitglieder unserer Gesellschaft ihren bewussten Beitrag leisten, Energieströme sinnvoll und effizient zu nutzen, sei es als Arbeiter, Ingenieur oder Konsument.

Tatsächlich enthalten die meisten aktuellen Phy-

sikbücher Kapitel zur technischen Energiegewinnung und zur Energiekrise; leider lernt man daraus wenig über Physik und endet mit der schon vorher bekannten pauschalen Verhaltensregel, dass Energiesparen notwendig sei. Wegen des sehr früh gelernten Energieerhaltungssatzes besteht ein Widerspruch zwischen dem Aspekt der Erhaltung von Energie als physikalische Größe und der Verschwendung von Energie im technischen oder ökonomischen Sinne, welche es zu vermeiden gilt. In der Regel wird dann mit Entwertung von Energie argumentiert, und der Wärmeenergie wird eine geringe Wertigkeit zugeordnet. Damit wird ein weiterer Widerspruch aufgebaut: Am Beginn jeder konventionellen Energiegewinnung, insbesondere der Erzeugung von Elektrizität, steht die Erzeugung von Wärme durch Verbrennung von Kohle, Öl oder Gas, oder durch kontrollierte Kernspaltung von Uran und Plutonium. Schließlich trägt auch der gelegentlich unternommene Versuch, die Entropieerzeugung als Maß der Irreversibilität einzuführen, nicht zum Verständnis bei, wenn die Abstrahlung von Entropie in den Weltraum nicht erwähnt wird. Dann entsteht der Eindruck, Entropie würde sich auf der Erde anhäufen, was aber der Beobachtung und den Tatsachen widerspricht.

7 Zusammenfassung

Gewalt und irreversible Umweltschäden sind die Folge der Energiegewinnung aus fossilen und nuklearen Brennstoffen. Der vermehrte Einsatz regenerativer Energiequellen sowie die Effizienzsteigerung bei Verbrauchern sind unabdingbar, um die Krise zu bewältigen. Didaktische Arbeiten zu regenerativen Energiequellen befassen sich bisher hauptsächlich mit Einzelaspekten [21–25]. In dieser Arbeit wurde vorgeschlagen, Energieströme global zu betrachten und den Entropietransport durch elektromagnetische Strahlung in den Mittelpunkt zu stellen. Die Aufnahmefähigkeit eines Energiestroms für erzeugte Entropie aus irreversiblen Prozessen ersetzt den widersprüchlichen Begriff der Energieentwertung. Der Abtransport von Entropie durch elektromagnetischen Strahlung in den Weltraum ist der entscheidende Prozess, welcher prinzipiell eine zeitlich unbegrenzte Nutzung der solaren Energie durch den Menschen ermöglicht, ohne dass der stationäre thermodynamische Zustand der Erde verändert wird.

Danksagung

Ich danke Martin Hundhausen für zahlreiche Gespräche über regenerative Energiequellen und Passivhäuser sowie für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Literatur

- [1] Hans U. Fuchs. A surrealistic tale of electricity. *Am. J. Phys.*, 54 (10):907–909, 1986.

- [2] H. L. Callender. The caloric theory of heat and carnot's principle. *Proc. Phys. Soc. London*, 23:153–189, 1911.
- [3] Georg Job. *Neudarstellung der Wärmelehre*. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1972.
- [4] Gottfried Falk and Wolfgang Ruppel. *Energie und Entropie*. Springer, Berlin, 1976.
- [5] Hans U. Fuchs. *The Dynamics of Heat*. Springer, New York, 1996.
- [6] Udo Backhaus and Hans Joachim Schlichtig. Vom didaktischen wert physikalischer grundgrößen. *Physik und Didaktik*, 3:218–225, 1979.
- [7] Heiner Schwarze. Neue zugänge zur wärmelehre. *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, 49(2), 2000. Themenheft mit Beiträgen von J. Friederich, M. Pohlig und H. M. Strauch, K. Rincke, H. Schwarze und H. J. Schlichting.
- [8] Friedrich Herrmann and Georg Job. *Altlasten der Physik*. Aulis, Köln, 2002. articles available at <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/altlast/>.
- [9] Friedrich Herrmann. *Der Karlsruher Physikkurs*. Aulis, Köln, 1989.
- [10] Friedrich Herrmann. The karlsruhe physics course. *Eur. J. Phys.*, 21:49–58, 2000.
- [11] Erich Starauschek. Wärmelehre nach dem karlsruher physikkurs - ergebnisse einer empirischen studie -. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1/1:12–18, 2002.
- [12] Thomas Borer, Peter Frommenwiler, Hans U. Fuchs, Herrmann Knoll, Gabor Kopacsy, Werner Mauerer, Edy Schütz, and Kurt Studer. *Physik - Ein systemdynamischer Zugang für die Sekundarstufe II*. hep verlag, Bern, 2005.
- [13] Walter Roedel. *Physik unserer Umwelt - Die Atmosphäre*. Springer, Berlin, 2000.
- [14] Erwin Schrödinger. *Was ist Leben?* Piper, München, 1987. Übersetzung Original-Ausgabe *What is life*, Cambridge 1944.
- [15] Klaus Knizia. *Kreativität, Energie und Entropie*. ECON, Düsseldorf, 1992.
- [16] Norbert Pucker. *Physikalische Grundlagen der Energietechnik*. Springer, Wien, 1986.
- [17] M. R. Gustavson. Limits to wind power utilisation. *Science*, 204:13–17, 1979.

- [18] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V., Königin-Luise-Straße 5, 14195 Berlin. www.ag-energiebilanzen.de. Auf der homepage stehen ständig aktualisierte Tabellen über den Primärenergieverbrauch zum kostenlosen download bereit.
- [19] Günter Cerbe and Hans-Joachim Hoffmann. *Einführung in die Wärmelehre*. Carl Hanser Verlag, München, 1974.
- [20] Wolfgang Klafki. *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik*. Beltz, Weinheim und Basel, 1996.
- [21] Otto Ernst Berge, editor. *Energiesparen: Wärmeenergie*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik 10(53). Friedrich-Verlag, Seelze, 1999.
- [22] Ralph Hepp. Heizen mit der sonne. ein vorschlag zur behandlung des themas solarenergie in der klassenstufe 7. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 12(61):16–21, 2001.
- [23] Simone Starke and Hans-Joachim Wilke. Selbst gebaute messgeräte für die solarstrahlung. möglichkeiten zur projektorientierten gestaltung des themas regenerative energien im physikunterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 12(61):12–15, 2001.
- [24] German Hacker, Stefan Burzler, Micha-A. Matern, Cornelia Pantenburg, Jennifer Postupa, and Janina Reithmeier. Der luftwärmetauscher - ein thema für den physikunterricht aus der bauphysik. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1/3:20–27, 2004.
- [25] J. L. Brun and A. F. Pacheco. Reducing the heat transfer through a wall. *Eur. J. Phys.*, 26:11–18, 2005.