

## 2.8 Die Hauptsätze der Thermodynamik und der Treibhauseffekt

### Worum geht es (unter anderem)?

Im Gegensatz zu dynamischen Betrachtungen lassen sich elementare energetische Beschreibungen von Systemen nahezu ohne Nachteil verbal, also ohne Formeln formulieren: Dass z.B. mechanische Energie = kinetische Energie + potentielle Energie ist, (abgekürzt  $M=K+P$ ), oder dass Arbeit = Kraft mal Weg ist, weiß so gut wie jedes ältere Schulkind. Dass aber die Arbeit nicht mit dem Symbol  $A$  abgekürzt werden darf, sondern ein Symbol wie  $\delta A$  erhalten *muss*, wie im Haupt-Text erklärt wird, ist schon ein erster Hinweis darauf, dass eine einfache mathematische Struktur der Energetik mit einer kniffligen physikalische Struktur einher geht. Das setzt sich fort, wenn die mechanische Energie  $M$  durch die thermodynamische innere Energie  $U$  zur Gesamtenergie  $E$  ergänzt wird, also  $E = M+U = K+P+U$ .

Auch der Unterschied zwischen solchen **Energieformen** (auch **Energiearten** genannt) einerseits und **Energie-Prozessgrößen** wie Arbeit und Wärme andererseits ist nicht mit einem Satz zu erklären. Wie die Arbeit, so bekommt auch die Wärme nicht einfach ein Symbol wie  $Q$ , sondern wie  $\delta Q$ , wobei zur Begründung auch die schillernde Größe **Entropie** eine entscheidende Rolle spielen wird. Eine ausführliche Darstellung des Unterschieds zwischen **Energieformen** und **Energie-Prozessgrößen** ist notwendig, denn er ist entscheidend für die physikalische Natur des Antriebsmotors von Wetter und Klima. Was diese Darstellung auch nicht leichter macht, ist die Tatsache, dass Begriffe wie Wärme, Erwärmung und Entropiezunahme sehr oft nicht auseinander gehalten werden. Somit wird die Darstellung der hier vorliegenden Zusammenhänge zu einer Wanderung auf dem Grat, zu einem Kompromiss zwischen dem Streben nach Exaktheit der Darstellung unter Verwendung einer korrekten Terminologie, und dem Wunsch, trotz der ungeheuren, nicht mehr zu korrigierenden Verbreitung einer missverständlichen Terminologie von allen Leserinnen und Lesern verstanden zu werden. Auf Seite 142 hatte ich diese Problematik schon einmal unter dem Stichwort 'Wespennest' angesprochen.

Eine gründliche physikalische Diskussion der thermodynamischen Bezüge zwischen der Energie, der Entropie und der Hauptsätze ist auch eine Voraussetzung dafür, zu entscheiden, ob der berühmte atmosphärische Treibhauseffekt überhaupt stattfindet - oder nicht, wie z.B. in [GT-in] oder [Thü02] behauptet wird. Am Ende dieses Kapitels werden wir nicht nur erkennen, dass er stattfindet, sondern auch besser verstehen, wie er stattfindet. Die in diesem Buch geübte Kritik an der Klima-diskussion basiert *nicht* darauf, dass es einen Treibhauseffekt nicht gäbe, sondern darauf, dass man ihn sehr oft - die Komplexität des Klima- Systems missachtend - als *einzigsten* Grund für Klima-Veränderungen ins Feld führt. Allerdings wird eine solche Argumentation geschwächt durch eine ‚Unterstützung‘ von falscher Seite, wie durch eine fehlerhafte physikalische Beurteilung der Rolle der Treibhausgase.

Eine der wichtigsten Größen der gesamten Physik ist wohl die **Energie**. Mit ihr befasst sich der **erste Hauptsatz** der Thermodynamik. Wenn es einen ersten Hauptsatz gibt, muss es wohl auch einen **zweiten Hauptsatz** geben. (Gelegentlich wird auch von einem nullten und/oder einem dritten Hauptsatz berichtet, aber diese werden uns in diesem Buch nicht berühren). Der zweite Hauptsatz befasst sich mit der **Entropie**, und nicht wenige Physiker messen der Entropie *noch* mehr physikalische Bedeutung zu als der Energie: "Während die Energiegleichung 'nur' Bilanzierungen bei ablaufenden Prozessen vornimmt, gibt die Entropie vor, in welche Richtung diese Prozesse ablaufen müssen". So oder so ähnlich ist hier die Begründung.

Die zeitliche **Richtungs-Vorgabe** durch die Entropie verbindet man mit ihrer Eigenschaft, keine globale **Erhaltungsgröße** zu sein, sondern in allen **realen Prozessen** zuzunehmen. Man spricht von einer Entropie-**Quelle**. Da die Entropie nach dem zweiten Hauptsatz nie abnehmen kann - es gibt keine Entropie-**Senken** - kann man den realen Prozess auch nicht rückgängig machen. Er ist **irreversibel**, so dass die Richtungs-Vorgabe deutlich wird. Nur in idealisierten - fast immer **quasistatischen** - Prozessen nimmt die Entropie *nicht* zu, aber solche **reversiblen** Prozesse gibt es höchstens näherungsweise. *Das ist bereits die Kern-Aussage des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik!* Die Energie hingegen ist eine solche Erhaltungsgröße, *das besagt der erste Hauptsatz!* M.a.W., nach dem **ersten** Hauptsatz gibt es weder Energie-Quellen noch Energie-Senken, eine Richtungs Vorgabe für Prozesse enthält der erste Hauptsatz also nicht. Nach dem **zweiten** Hauptsatz gibt es aber Entropie-Quellen, und zwar bei allen irreversiblen Prozessen - und das sind streng genommen alle **realen** Prozesse.

Na, das ging ja schnell! Sind wir mit dem Thema Energie, Entropie und Hauptsätze etwa schon durch? Natürlich nicht, es gibt noch sehr viel zu sagen, auch wenn wir das Allerwichtigste schon in 'trockenen Tüchern' haben.

Zu allererst die Frage: Was ist überhaupt Energie? Vielleicht ist es die in der Physik am häufigsten verwendete Größe. Aber wenn man fragt, was Energie *ist*, weiß man keine Antwort. Ich auch nicht. Man hat sich offenbar schon so sehr an sie gewöhnt, dass man vergessen hat, danach zu fragen, was Energie *ist*. Von Richard Feynman (1918-1988), Physiker und Nobelpreisträger und Autor *des* dreibändigen Lehrbuches 'Lectures on Physics', [Feyn64], (aus dem ich persönlich hauptsächlich Physik gelernt habe), stammt das Zitat aus dem ersten Band:

*"Es ist wichtig, einzusehen, dass wir in der heutigen Physik nicht wissen, was Energie ist".*

Andererseits gibt uns das Noether-Theorem (s.u. Seite 162), auf das auch Feynman oft hingewiesen hat, den Hinweis, dass die Energie eine Größe ist, deren Konstanz mit der Zeit-Symmetrie der Naturgesetze zusammenhängt. Genauer: Wenn gestern, heute und morgen die Naturgesetze die gleichen sind, dann ist auch der kosmisch-globale Gehalt der Größe 'Energie' immer der gleiche. Aber weiß man deswegen, was Energie *'ist'*?

Im 'Schülerlexikon-Physik' [SchL-in] findet man zwar auch nicht, was Energie *'ist'*, aber doch etwas über sogenannte **Energieformen**:

*"Energie kann in unterschiedlichen Formen existieren. Wichtige Energieformen sind die chemische Energie, die thermische Energie, die Kernenergie, die potentielle und die kinetische Energie sowie die Energie, die in elektrischen und magnetischen Feldern gespeichert ist"*

Hier haben wir immerhin einen Anknüpfungspunkt an die Begriffe 'potentielle' und 'kinetische' Energie, die wir in diesem Buch schon benutzt haben. Auf Seite 134 haben wir diese allerdings nicht **Energieformen**, sondern **Energiearten** genannt, und außerdem haben wir dort noch eine dritte Energieart ins Spiel gebracht, die **innere Energie**, die in der Auflistung der Energieformen im Schüler-Duden wiederum *nicht* enthalten ist. *Aber alle dort neben der kinetischen und der potentiellen erwähnten Energieformen sind gerade Erscheinungsformen dieser inneren Energie!*

Liebe Leserin, lieber Leser, sollten Sie sich ein wenig in meinem Buch [Lan02] umgesehen haben, oder bestimmte Downloads von [Lan-in] gelesen haben, werden Sie sich vermutlich wundern, denn dort habe ich mit dem Begriff **Energieformen** das bezeichnet, was ich in diesem Buch **Energie-Prozessgrößen** nenne. Meine Entschuldigung lautet, dass ich mich in [Lan02] der Bezeichnungsweise des damals sehr populären Thermodynamik-Lehrbuchs [FR76] von G.Falk und W.Ruppel angelehnt hatte. Inzwischen aber finde ich das Wort Energieformen im Sinne von Erscheinungsformen der Energie logischer, und ich weiß mich damit im Einklang nicht nur mit dem genannten Schülerlexikon, sondern mit der gesamten *neueren* Literatur zu diesem Thema.

Also: Man weiß zwar nicht, was Energie *'eigentlich'* für eine Größe ist, aber man weiß, dass sie eine globale **Erhaltungsgröße** ist: Wichtig ist hier: Das Wort 'global' bedeutet eine Bilanz nicht nur auf unserem Globus, (wie sonst oft in der Klimatologie), sondern innerhalb des gesamten Universums!

Wie bitte? Man *'weiß'*, dass die Energie eine Erhaltungsgröße ist? Habe ich hier nicht ständig betont, dass die Methode der Physik erst erfolgreich wurde, als man auf-

hörte, etwas *wissen* zu wollen? Als man sich einigte, mit Hypothesen, mit Theorien zu arbeiten statt mit 'Tatsachen' und 'Fakten'? (So gesehen ist der Buchtitel 'Klimafakten' der Autoren Plöger und Böttcher [PB13] ein Rückschritt)!

Immerhin werden Theorien sofort fallen gelassen, wenn sie Experimenten widersprechen. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass diese Theorien eine gewisse 'Geltung' erhalten, wenn Experimente im *Einklang* mit ihnen sind. Auch *viele* solche 'unterstützenden' Messungen ergeben zwar noch immer keine *bewiesene* Theorie, aber eine gut **evaluierte Theorie**, wie man sagt. Der Energie-Erhaltungssatz ist sehr, sehr oft evaluiert worden, aber 'eigentlich' ist dadurch die obige Bemerkung "man '*weiß*' dass die Energie eine Erhaltungsgröße ist", noch immer nicht gerechtfertigt, da haben Sie Recht, liebe Leserin, lieber Leser. Aber ich habe noch eine zweite Ausrede:

In Kap. 3.1 werde ich die wenig beachtete Tatsache thematisieren, dass die häufig zitierte *experimentelle* Validierung von Theorien (die Evaluierung durch fehlgeschlagene **Falsifizierungen** nach *Popper* [Popp35]) nicht die einzige mögliche Methode ist. Das ist natürlich eine gute Nachricht für Klima-Theoretiker, da man - jedenfalls nach meiner bescheidenen Meinung - technische Experimente mit der Atmosphäre so weit wie möglich lieber vermeiden sollte. (Hundertprozentig geht das jedoch nicht, denn schon jedes menschliche und tierische Ausatmen vermehrt den CO<sub>2</sub>-Eintrag in die Atmosphäre, so dass die gegenwärtige Bevölkerungsexplosion auch ein solches Experiment ist).

Vorab eine kurze Vorwegnahme entsprechender Gedanken aus Kap. 3.1: Die zweite Validierungs-Methode ersetzt die mit einer Theorie in Einklang stehenden Messergebnisse durch eine mit der Theorie in Einklang stehenden allgemeineren (übergeordneten) Theorie. In unserem Fall kann man den ersten Hauptsatz, also die Theorie der Energie-Erhaltung, nach dem **Noetherschen Theorem** [Noe18] *herleiten* aus der 'Theorie', dass alle Naturgesetze zeitlich unveränderlich seien. M.a.W., wenn es *nicht* nötig ist, ständig neue, nur für den jeweiligen Augenblick gültige physikalische Gesetze annehmen zu müssen - genau dann spricht man von einer **Zeitsymmetrie** der Naturgesetze - dann ist die Energie eine Erhaltungsgröße! Nun dürfen Sie, liebe Leserin, lieber Leser, selbst entscheiden, ob der Satz, "wir *wissen* um die Energieerhaltung", erlaubt ist oder nicht. Wie ich in Kap. 3.1 in einer 'spannenden' Geschichte auch schildere, wäre der Energieerhaltungs-Satz tatsächlich 28 Jahre experimentell falsifiziert gewesen, wenn man *nur* der Popper'schen Methode vertraut hätte, was Wolfgang Pauli zum Glück nicht getan hat (→ Seite 222).

Noch einmal die Frage: Ist der Energieerhaltungs-Satz, physikalisch gesehen, ein Fakt oder nicht? Antwort: Nein! Physik schafft keine Fakten. Es *könnte* sein, dass der

Energieerhaltungssatz nicht gilt. Aber seit 1918 wissen wir durch Emmy Noether, dass wir dann auch aufhören könnten, Physik zu betreiben, denn dann wäre kein einziges physikalische Messergebnis reproduzierbar, weil sich ja das zu überprüfende Gesetz bei jeder neuen Messung schon wieder geändert hat.

Mir kommt es hier sehr darauf an, den riesigen Unterschied des Validitäts-Grades zwischen der Energieerhaltung einerseits und andererseits der AGW-Theorie - den sogenannten 'Klimafakten' nach [PB13], [RS06] und vielen anderen - zu betonen. Also dürfen wir mit 'sehr viel Recht' sagen: Was auch immer in der Welt passiert, was auch immer sich verändert, rechnet man vor und nach diesem Geschehen die Energie in allen ihren Erscheinungsformen global zusammen - *bilanziert* man sie kosmisch-global - dann hat sich an der Gesamtsumme nichts geändert.

Wenn man allerdings die Betrachtung auf ein **isoliertes System** beschränkt, auf ein isolierte Teilsystem des Universums also, welches keinerlei Austausch mit der Umgebung zulässt, dann kann man sich auf die Energiekonstanz auch in dem **lokalen System** verlassen, ohne Bilanzierung aller Energien im ganzen Universum vornehmen zu müssen. Allerdings ist ein solches isoliertes System eine Idealisierung. Es verkörpert schon wieder *nicht* die Wirklichkeit, sondern es ist nur ein *Modell* eines Teiles der 'wirklichen' Welt. Ein solches isoliertes System nennt man auch ein **abgeschlossenes System**. Dieser Begriff ist allerdings leicht zu verwechseln mit dem Begriff **geschlossenes System**, welches etwas anderes bedeutet: Nur ein *abgeschlossenes, isoliertes System* verfügt weder über einen **Stoff-Austausch** noch über einen **Energie-Austausch**. Ein *geschlossenes System* hingegen tauscht zwar keine Stoffe aus, es ist aber dennoch *'halboffen'*: es kann Energien mit der Umgebung austauschen. Wenn ein System mit seiner Umgebung sowohl Energien als auch Stoffe austauschen kann, nennen wir es ein **offenes System**.

Als Beispiel für diese Begriffe können wir die in Kapitel 2.7 oft strapazierte Luftpumpe verwenden (und dabei sogar noch etwas Neues lernen): Die Kolben-Bewegungen, also die Kompressionen oder Expansionen der Luft, und die Erwärmungen oder Abkühlungen der Luft von außen entsprechen ja einem Energieaustausch mit der Umgebung, wie wir auf Seite 145 besprochen haben. Dort haben wir auch berichtet, dass dieser Energieaustausch durch **Arbeit** und **Wärme** bewirkt werden kann! Die *Symbole*  $\delta A$  für Arbeit und  $\delta Q$  für Wärme haben wir erst in der Einleitung 'Worum geht es?' zum aktuellen Unterkapitel vergeben, jedoch noch immer ohne nähere Erläuterungen. Nur wissen wir jetzt, dass die Prozesse  $\delta A$  und  $\delta Q$  dafür verantwortlich sind, dass unsere Experimentier-Luftpumpe aus Kapitel 2.7 kein isoliertes System ist, dass sie also, obwohl wir ihr Ventil stets geschlossen hielten, kein *abgeschlossenes System* ist, sondern 'nur' ein *geschlossenes System*, das ja 'noch' Energie mit

ihrer Umgebung austauschen kann. Ein *isoliertes* System wäre diese Luftpumpe, wenn wir den Kolben fixieren würden und wenn die Wände 'Wärme'-undurchlässig, also adiabatisch wären (→ Seite 146 oder 151). Ein *offenes* System wäre diese Luftpumpe, wenn wir das Ventil *nicht* verschließen würden, sondern auch einen Stoffaustausch, den Luftaustausch, zusätzlich zum Energieaustausch mit der Umgebung, zuließen.

Können auch die atmosphärischen Luftpäckchen, die ja *nicht* in einer Luftpumpe eingesperrt sind, isoliert - geschlossen oder offen sein? Isolierte Luftpäckchen gibt es *nicht*, wegen der allgegenwärtigen atmosphärischen Wechselwirkungen. Lagrange'sche Luftpäckchen indessen hatten wir gerade so *definiert*, dass sie keinen Luftaustausch durchführen, sie bestehen ja immer aus den gleichen Luftmolekülen. Aber auch sie sind zwar geschlossene System, aber keine abgeschlossenen (isolierten) Systeme, denn sie stehen in Arbeits-Wechselwirkung mit der Umgebung (wenn die Strömung konvergent oder divergent ist), und sie stehen in Wärme-Wechselwirkung mit der Umgebung (wenn die Umgebungsluft wärmer oder kälter ist). Einen Sonderfall stellt ein Luftpäckchen in einer 'regnenden' Wolke dar. Dies kann man im Lagrange'schen massenkonstanten Bild offenbar gar nicht beschreiben, diese Situation erfordert ein Studium *offener Systeme*.

Und wie sieht es energetisch aus bei den Eulerschen Luftpäckchen, die ja schon per Definition für Massenaustausch offen sind? An ihnen gibt es ja keine Kompressions- oder Expansions-Arbeit, weil *diese* Luftpäckchen eine Bündelung aller Luftmoleküle darstellen, die sich 'gerade' in einem ortsfesten Raumgebiet befinden. Andererseits erfahren sie in Gebieten einer konvergenten Strömung einen Stoffimport und in Gebieten einer divergenten Strömung einen Stoffexport. Die Energie, die einem Lagrange-Teilchen bei konvergenter Strömung durch Kompressions-Arbeit zugeführt wird, wird dem Euler-Teilchen durch Stoff-Import zugeführt, denn die zusätzlich gewonnenen Moleküle sind ja Träger von Energie! Es sieht fast so aus, als wären die Eulerschen Luftpäckchen Vertreter einer neben isolierten, geschlossenen und offenen Systemen bestehenden vierten Möglichkeit, nämlich offen zu sein für Stoff-Austausch, aber nicht für Energie-Austausch. Das stimmt aber so nicht, es ist einmal mehr *noch* komplexer: Zwar gibt es keinen Energieaustausch über Arbeit  $\delta A$ , aber eben doch über Wärme  $\delta Q$ : Da es *gar* keine Wände zwischen den Euler-Teilchen und ihren Umgebungen gibt, gibt es auch keine adiabatische Wände, die ja als einzige den Energieaustausch  $\delta Q$  verhindern könnten. Sie merken, liebe Leserin, lieber Leser, dass die Terminologie kaum noch mit der Kniffligkeit der Thermodynamik mithalten kann. Welchen Fachterminus könnte man hier eigentlich verwenden? Es ist sozusagen ein 'ziemlich offenes' System, offen zwar für Stoff- und Ener-

gieaustausch, letzteres allerdings nur über die Prozessgröße  $\delta Q$ , nicht über  $\delta A$ . Dafür ist mit kein zusammenfassender Fachbegriff bekannt.

Sowohl bei Kompression eines Lagrange-Teilchens als auch bei konvergentem Massen-Zufluss in ein Euler-Teilchen hinein nimmt natürlich die Massendichte  $\rho = dm/dV$  zu ( $\rightarrow$  Seite 132), nur wird das bei Kompression des Lagrange-Teilches durch Verkleinerung von  $V$  bewirkt, ( $dV < 0$ ), und bei Massenzufluss in das Euler-Teilchen hinein durch Vergrößerung von  $m$ , ( $dm > 0$ ). In beiden Fällen vergrößert sich ja der Quotient  $dm/dV$ . ( $\rightarrow$  Auch entsprechende Interpretationen der Skizzen in Kap. 2.6).

Was hat das alles mit dem ersten Hauptsatz zu tun? Denken wir daran, das die **Gesamtenergie** durch

$$E = K + P + U$$

gegeben ist, und dass die Gleichung  $dE = dK + dP + dU$  die Änderung dieser Energie innerhalb eines lokalen Systems wiedergibt, so können wir schreiben:

erster Hauptsatz im isolierten (abgeschlossenen) System:  $dE = 0$

erster Hauptsatz im geschlossenen System:  $dE = \delta A + \delta Q$

erster Hauptsatz im offenen System:  $dE = -dE_{SU}$

( $dE_{SU}$  steht für die gesamte Energieänderung in der System-*Umgebung*). - Für den ersten Hauptsatz im *offenen* System haben wir uns mit einer Formulierung der Energie-Erhaltung begnügt, die so allgemein ist, dass sie für *alle* Systeme gilt, also auch für isolierte und auch für geschlossene Systeme: Wenn die Energie-Änderungen  $dE_{SU}$  außerhalb des Systems und die Änderungen  $dE$  innerhalb des Systems den gleichen Betrag haben, sich aber im Vorzeichen unterscheiden, dann ist *natürlich* in jedem denkbaren Fall für die globale Erhaltung der Energie gesorgt, denn die 'globale' Welt besteht ja nur aus dem, was sich innerhalb und außerhalb eines Systems befindet, Im Sonderfall 'isoliertes System' ist einfach  $dE_{SU} = -dE = 0$ . (Null ist sozusagen die einzige Zahl, die gleich ihrem negativen Wert ist). Im Sonderfall 'geschlossenes' (also energetisch offenes) System kann man entsprechend

$$dE = \delta A + \delta Q = -dE_{SU}$$

schreiben. Auf Seite 143 haben wir gesagt, dass Arbeit  $\delta A$  beim idealen Gas nichts anderes ist als eine mit dem negativen Druck multiplizierte Volumenänderung  $dV$ , als Formel also  $\delta A = -pdV$ . Und Wärme  $\delta Q$  ist eine mit der Temperatur  $T$  multiplizierte Entropieänderung  $dS$ , also  $\delta Q = TdS$ . Da die Energieänderungen infinitesimal klein

sein sollen, haben wir in diesen Formeln auch nur infinitesimale Volumen- und Entropie-Änderungen zugelassen. Aber Achtung: Die Thermodynamik wäre keine knifflige Theorie, wenn ich Ihnen hier nicht mitteilen müsste, dass sich in anderen Situationen als der Gas-Kompression die Arbeit auch formelmäßige anders darstellt. Die Beziehung  $TdS$  ist hingegen 'endgültig'. Ein allgemeinverständlicher anschaulicher Hintergrund für diese Behauptungen wird noch in diesem Kapitel geboten. 'Fortgeschrittene' Leserinnen und Leser können auch detailliertere Begründungen in [Lan02] bzw. in [Lan-in] erhalten, jeweils in [Kap.01 Thermodynamische Grundlagen.pdf](#) und in Formel (1-10) der dortigen Seite 11.

Die bisherige Formel  $dE = -dE_{SU} = \delta A + \delta Q$  spezifiziert sich in unserem Sonderfall der Gaskompression zu

$$dE = -dE_{SU} = \delta A + \delta Q = -pdV + TdS$$

Das Minuszeichen vor  $pdV$  sorgt dafür, dass bei Volumenexport (also Volumenverkleinerung  $dV < 0$ ) des Systems die Größe  $\delta A$  und damit  $dE$  positiv wird, weil ja dann die Umgebung Arbeit am System leistet, und nicht umgekehrt. Das haben wir bereits auf Seite 145 ausführlich diskutiert, wenn auch nur in verbaler Form.

Hier aber sieht man an der Formel sofort, dass z.B.  $E$  bei  $dV > 0$  abnimmt und  $E_{SU}$  zunimmt, und dass bei Entropie-Import, also bei  $dS > 0$ ,  $E$  zunimmt und  $E_{SU}$  abnimmt. Spezifisch geschrieben - also nach Division der Gleichung durch die Masse - erhält man

$$de = -de_{SU} = \delta a + \delta q = -pdv + Tds$$

Mit der spezifischen Form der Anteile  $E = K+P+U$  der Gesamtenergie ( $\rightarrow$  Seite 165) können wir diese Gleichung, die ja noch immer den ersten Hauptsatz für geschlossene (energetisch offene) Systeme wiedergibt, noch einmal erweitern:

$$de = -de_{SU} = dk + d\phi + du = \delta a + \delta q = -pdv + Tds$$

(Weil der sehr übliche Begriff 'geschlossene Systeme' für energetisch offene Systeme ungeschickt und missverständlich ist, werde ich noch einige Male in diesem Buch - wie soeben - den Zusatz 'energetisch offen' in Klammern hinzufügen. Hoffentlich nervt das nicht zu sehr, aber einem Missverständnis zu erliegen und geschlossene mit isolierten Systemen zu identifizieren, wäre noch ärgerlicher, weil dann mein geplantes weitere Geschreibe zu entsprechenden Themen oder zu Nachbar-Themen völlig unverständlich würde).



Die Gleichungskette beschreibt nach dem *zweiten* Gleichheitszeichen die kleine Änderung  $de$  der Gesamtenergie als Zusammenfassung der Änderungen von Energie-Formen, (auch Energie-Arten genannt) - die ihrerseits Zustandsgrößen sind - und nach dem *dritten* Gleichheitszeichen als Zusammenfassung der Prozess-Größen Arbeit und Wärme. Nun müssen wir noch einmal verinnerlichen, dass man infinitesimal kleine Änderungen von Zustandsgrößen durch Differentiale 'd' kennzeichnet, wie hier bei den spezifischen Energie-Arten  $k$ ,  $\phi$  und  $u$  geschehen. Arbeit und Wärme sind aber *keine* Zustandsgrößen: Sie beschreiben ja den **Prozess** des Austausches von Zustandsgrößen, aber nicht die Zustandsgrößen selbst, so dass ihre 'Kleinheit' auch *nicht* durch Differentiale 'd' ausgedrückt werden dürfen. Man verwendet für solche 'Nicht-Differentiale' häufig das auch hier verwendete griechische ' $\delta$ '.

Andererseits sind, wie das vierte Gleichheitszeichen zeigt, Arbeit und Wärme Produkte der Zustandsgrößen Druck bzw. Temperatur mit der *Änderung* von Zustandsgrößen Volumen bzw. Entropie, und die letzteren sind *eben doch* durch Differentiale  $d\nu$  und  $ds$  gegeben! Offenbar gilt die 'Regel', dass Produkte eines Differentials mit einer Zustandsgröße *keine* Differentiale sind. Die Leserinnen und Leser, die schon einmal Differentialrechnung kennengelernt haben - einen 'Hauch' davon werden wir auch hier ab Kapitel 3.2 kennenlernen - werden sich daran erinnern, dass diese 'Regel' im Einklang mit der 'Produktregel'  $Tds = d(Ts) - sdT$  der Differentialrechnung ist. Hier ist zwar der Term  $d(Ts)$  ein Differential, die beiden anderen Terme aber *nicht*. Daher *muss* man  $Tds$  mit einem Symbol wie  $\delta q$  abkürzen. (Übrigens sollte der Begriff *spezifische Wärme* für  $\delta q$  nicht verwechselt werden mit der sogenannten spezifischen *Wärmekapazität*, welche angibt, groß die Temperatur-Erhöhung bei gegebenem Entropie-Austausch ist).

Neben der soeben angedeuteten abstrakten mathematischen Begründung für die Notwendigkeit von Nicht-Differentialen gibt es eine handfeste physikalische Begründung mit der Quintessenz, dass z.B. dem Klimasystem *ein Antrieb für Veränderungen komplett fehlen würde*, wenn Arbeit und Wärme Differentiale *wären*. Die Begründung hierfür, die ja hundertprozentig zur Thematik dieses Buches gehört, heben wir uns für Kapitel 4 auf, wo sie dann auch überraschend einfach zu verstehen sein wird.

Leider stecken in der Gleichungskette  $de = -de_{SU} = dk + d\phi + du = \delta a + \delta q = -pd\nu + Tds$  noch immer 'Ungereimtheiten': Offenbar bedienen die nach dem vierten Gleichheitszeichen stehenden Terme  $-pd\nu + Tds$  keine Änderungen  $dk$  der **kinetischen Energie** oder  $d\phi$  der **potentiellen Energie**, sondern nur Änderungen  $du$  der **inneren Energie**! Unsere bisherigen Ausführungen zum System 'Ideales Gas in der Luftpumpe' liefen jedenfalls darauf hinaus, dass sich sowohl durch Volumen- als auch durch

Entropie-Austausch ( $dv \neq 0$ ,  $ds \neq 0$ ) 'nur' die Temperatur ändert, was wir im Falle von  $dv < 0$  (also  $-pdv > 0$ ) **Kompressionswärme** genannt haben, im Falle von  $dv > 0$  (also  $-pdv < 0$ ) **Expansionsabkühlung**. Für den Fall  $ds \neq 0$  verwendeten wir die Begriffe **diabatische Erwärmung** bzw. **Abkühlung**. In diesem Kapitel haben wir aber dazu gelernt, dass  $ds \neq 0$  auch auf Irreversibilität zurückgeführt werden kann, dann aber nur im Sinne von  $ds > 0$ . Aber alle diese Vorgänge verändern die **thermische Energie**, und diese ist ein Bestandteil (bei idealem Gas der einzige Bestandteil) der **inneren Energie**. Irreversibles  $ds > 0$  geschieht auch in isolierten Systemen, wo die Energieerhöhung durch  $\delta q = Tds$  aber nicht durch  $\delta a = -pdv$  kompensiert werden kann, obwohl doch der erste Hauptsatz  $de=0$  einfordert! Genau das habe ich gemeint, als ich vor etwa zwei Seiten sagte, dass sich „in anderen Situationen als der Gas-Kompression die Arbeit auch formelmäßige anders darstellt“, anders als durch  $\delta a = -pdv$ . Schon die Erweiterung der Arbeit und der Wärme von  $\delta a + \delta q = -pdv + Tds$  auf

$$\delta a + \delta q = -pdv + \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} + Tds$$

(hier ist der  $\mathbf{r}$  der Ortsvektor und  $\mathbf{f}$  der Vektor einer Kraft pro Masse - d.h. einer Beschleunigung) hilft weiter, weil *ohne* diese Erweiterung der Arbeit um den (eigentlich *ursprünglichen* Arbeitsterm)  $\mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$  eine Änderungen  $dk$  der **kinetischen Energie** oder  $d\phi$  der **potentiellen Energie** nicht hätte bedient werden könnten, sondern nur eine Änderung  $du$  der **inneren Energie** - was uns in Kapitel 2.7 noch 'ausreichte', denn in unserer 'Luftpumpen-Veranschaulichung' wollten wir nur den thermischen Anteil der inneren Energie plausibel machen. Hier nun muss aber das irreversible  $\delta q = Tds > 0$  wegen der Bedingung  $de = dk + d\phi + du = 0$  im isolierten System kompensiert werden, und das 'funktioniert' nun auch, denn ein reibungsbedingtes  $Tds > 0$  wird ja kompensiert durch  $dk < 0$ .

In der **Mechanik** kennt man sogar *nur* die Bewegungsenergie - die **kinetische Energie**  $k$  - und die Energie der Lage - die **potentielle Energie**  $\phi$ . Je schneller z.B. ein fallender Stein nach unten fliegt, desto größer ist seine kinetische Energie, je kleiner sein Abstand von der Erdoberfläche ist, desto kleiner ist seine potentielle Energie. Wir beobachten also einen Energie-Umwandlungsprozess  $\phi \rightarrow k$ . Vorher hatte man den Stein nach oben geworfen, verbunden mit Umwandlung  $k \rightarrow \phi$  während der Aufstiegsphase. Die **Gesamtenergie**  $e = k + \phi$  in dieser 'mechanischen Welt' ändert sich dabei aber nicht, sie bleibt 'erhalten'. Das ist der **Energieerhaltungssatz der Mechanik**, in Formeln  $k + \phi = \text{const}$  oder auch  $dk + d\phi = 0$ .

Das gilt so allerdings nur für einen Steinwurf im luftleeren Raum, genauer gesagt *nur dann*, wenn das System Erde+Stein ein isoliertes System ist. Andernfalls wird wegen

der Luft-Reibung die kinetische Energie der Fallgeschwindigkeit langsamer zunehmen, als es für die Kompensation der abnehmenden potentiellen Energie erforderlich wäre. Andererseits sind der Stein und die Umgebungsluft etwas wärmer geworden, ihre thermischen *inneren* Energien  $u$  haben etwas zugenommen. Beim **idealen Gas** hängt  $u$  sogar *ausschließlich* von der Bewegungsenergie der ungeordneten Wärme-Bewegungen der Gasmoleküle ab. Dort ist  $u$  proportional zu  $T$ , d.h. die thermische Energie ist hier die *einzig*e Form der inneren Energie!

Wäre also das etwas *größere* System Erde+Lufthülle+Stein vom Rest der Welt isoliert, müsste der Energieerhaltungssatz  $de = dk + d\phi = 0$  durch  $de = dk + d\phi + du = 0$  ersetzt werden. Und hierbei würde der Energieerhaltungssatz der Mechanik durch den dem **Energieerhaltungssatz der Thermodynamik** ersetzt werden! Nach dem Hochwerfen des Steines, während der Aufstiegs-Phase, beobachten wir *nun* die Umwandlungsprozesse  $k \rightarrow \phi$  und  $k \rightarrow u$ , und in der Fall-Phase die Umwandlungsprozesse  $\phi \rightarrow k$  und  $k \rightarrow u$ . Interessant ist, dass sich die Aufstiegs- und die Fall-Phase des Steines darin unterscheiden, dass einmal die Umwandlung  $k \rightarrow \phi$  und einmal die Umkehrung  $\phi \rightarrow k$  stattfindet, während in *beiden* Phasen die Umwandlung  $k \rightarrow u$  stattfindet, und *nicht* umgekehrt. Dies ist durchaus ein anschaulicher Hinweis darauf, dass die Umwandlung  $k \rightarrow u$  **irreversibel** ist. Stets aber bleibt die Summe  $k + \phi + u$  konstant, und genau das kommt für isolierte Systeme durch  $de = dk + d\phi + du = 0$  zum Ausdruck.

Als isoliert hatten wir hier das System Erde+Lufthülle+Stein angesehen. Wir bleiben nun bei der Isolation *dieses* Systems, betrachten aber dennoch nur ein Teilsystem hiervon, nämlich allein den Stein in seinem Flug durch die Luft. Frage: Ist dieses Teilsystem offen oder geschlossen oder isoliert? Da der Stein keine Masse mit der Erde oder der Luft austauscht, wohl aber einen Energieaustausch mit der inneren Energie der Luft und dem irdischen Schwere  $\phi$  vollzieht, den wir durch die Kürzel  $\phi \rightarrow k$ ,  $k \rightarrow \phi$  und  $k \rightarrow u$  charakterisiert haben, ist der Stein ein geschlossenes (energetisch offenes) System, wie auch das Gas in der Luftpumpe ein solches ist.

Aber es gibt auch einen Unterschied zwischen diesen beiden Systemen, und dieser beseitigt die 'Ungereimtheiten', die wir darin gesehen hatten, dass in der Gleichungskette für das Gassystem

$$de = -de_{SU} = dk + d\phi + du = \delta a + \delta q = -pdv + Tds$$

Die Terme  $\delta a = -pdv$  und  $\delta q = Tds$  nur Änderungen  $du$  hervorriefen, aber keine Änderungen  $dk$  oder  $d\phi$ . Diese Einschränkung ist beim Steinwurf offenbar aufgehoben, allerdings kann hier  $\delta a$  nicht mehr durch  $-pdv$  ausgedrückt werden: Schon mehrmals

haben wir betont, dass Arbeit im Sinne von Arbeit = - Druck · Volumenänderung nicht der 'ursprünglichen' Formulierung entspricht, sondern aus dieser erst abgeleitet wurde. Die oben schon vorweggenommene, aber auch schon in der Schule gelernte Formulierung lautet ja, s.o.:

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg} = \text{Kraft} \cdot \text{Ortsänderung} = \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r}$$

Das führt natürlich auf eine entsprechend *erweiterte* Gleichungskette:

$$de = - de_{\text{SU}} = dk + d\phi + du = \delta a + \delta q = -pdv + \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} + Tds$$

Wegen der Beziehung

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung}$$

ist grundsätzlich jede spezifische Kraft (als Kraft geteilt durch die Masse) eine **Beschleunigung**. In unserem Beispiel steht  $\mathbf{f}$  für die Schwerebeschleunigung, kann aber in anderen Beispielen auch für chemische Kräfte (spezielle elektrische Kräfte, welche chemische Verbindungen zusammenhalten), oder für 'andere' elektrische Kräfte und sogar für Kernkräfte. Warum sind chemische Kräfte 'auch nur' elektrische Kräfte? Positive Ladungen ziehen ja negative Ladungen an, und zwar umso stärker, je geringer die Entfernung zwischen diesen beiden Ladungen ist. Dicht beieinander sind natürlich die positiv geladenen Atomkerne und die zum gleichen Atom gehörenden negativen Elektronen.

Aber ein bestimmter Atomkern zieht natürlich auch ein wenig die etwas weiter entfernten Elektronen eines *benachbarten* Atoms an, und der umgekehrt auch der Atomkern des benachbarten Atoms die Elektronen des ersten Atoms. Und genau das ist das Prinzip der chemischen Bindungskräfte. Man sagt, die letzteren sind residuale elektrische Anziehungskräfte. Genau so entstehen auch die großen und komplexen Moleküle von Pflanzen, Tieren und Menschen, was auf [http://www.particleadventure.org/german/frameless/answer\\_life.html](http://www.particleadventure.org/german/frameless/answer_life.html) fast wörtlich so formuliert wurde: "Alle stofflichen Strukturen der Welt existieren nur deshalb, weil Protonen und Elektronen entgegengesetzt elektrisch geladen sind! Also ist auch 'Leben' bloß ein hübsches Beispiel für die Auswirkungen der elektromagnetischen Kraft!". - Auf *bewegte* Ladungen kann man übrigens auch mit *Magneten* Kräfte ausüben. Wegen dieser und anderer Verzahnungen von elektrischen und magnetischen Kräften spricht man auch von **elektromagnetischen Kräften**.

Im Zusammenhang mit dem Vorangegangenen ist die chemische Energie - die Arbeit der chemischen Kräfte - auch deswegen interessant, weil sie als 'Muskelenergie' unseres Werfers das Steinwurf-Experiment ermöglicht hat. Die Muskelarbeit von Tier und Mensch kann also ebenfalls zurückgeführt werden auf eine Arbeit in der ur-

sprünglichen Form 'Kraft·Weg', wobei die Kraft die 'ganz normale' elektrische Anziehungskraft in residualer (chemischer) Form ist. Aber diese elektrischen Kräfte haben ja sogar die bloße Existenz des Werfers (und der Leserinnen und Leser und des Autors dieses Buches) ermöglicht, indem sie Atomkerne und Elektronen zu stabilen Atomen dieser Menschen gebündelt haben, und als Residualkräfte dann auch noch diese Atome zu den organischen Molekülen. Und nicht zuletzt ist die elektrische bzw. die elektrochemische Energie ein Beispiel für eine Energieform, die *neben* der thermischen Energie zur inneren Energie gehört.

Die **Kernkraft** in der Form der sogenannten **starken Wechselwirkung** und deren Arbeit vermittelt eine dritte Umwandlungsform der inneren Energie, wie man an Atombomben erkennen kann. Sie wird aber ebenfalls benötigt, den Steinwerfer und andere Lebewesen 'zusammenzuhalten': So wie die elektrische Kraft Protonen und Elektronen zu Atomen zusammenhält, und die residuale ('restliche') elektrische Kraft die Atome zu Molekülen, so hält die starke Wechselwirkung die Quarks zu Nukleonen (Protonen und Neutronen) zusammen, und ein residualer Anteil auch hier die Nukleonen zu Atomkernen. 'Stark' muss diese Wechselwirkung tatsächlich sein, denn immerhin muss sogar ihr residualer 'Rest' stärker sein als die elektrische Kraft der sich *abstoßenden*, weil gleichnamig geladenen positiven Protonen im engen Atomkern. (Die Neutronen sind ja elektrisch neutral). Und in uns Menschen sollten besser nicht nur unsere Atome und Moleküle beieinander bleiben, sondern auch die Atomkerne *in* unseren Atomen und Molekülen!

Von all diesen Kräften war bei den Experimenten mit dem idealen Gas nicht die Rede, obwohl ja auch hier ein Experimentator erst seine chemische Energie zur Verfügung stellen musste, um z.B. den Kolben in die Luftpumpe hinein drücken zu können und so das Gas zu komprimieren. *Sobald* sich aber die Kolbenfläche bewegt, haben sich die die nach dem Prinzip  $\mathbf{f} \cdot d\mathbf{r}$  arbeitenden chemischen Kräfte  $\mathbf{f}$  auf den Gegendruck  $-p$  'übertragen', und die Ortsveränderungen  $d\mathbf{r}$  von Punkten auf Verschiebung der ganzen Kolbenfläche, die ja die Volumenänderung  $dv$  bewirkt, ( $\rightarrow$  Seite 144). Zudem ist wohl auch klar geworden, dass diese Umformung nur im Umfeld von Situationen sinnvoll ist, in denen - wie in der Luftpumpe - Luftpäckchen komprimiert oder expandiert werden.

Die chemischen und die elektrischen Kräfte sind auch für Meteorologie und Klimatologie wichtig, spielen sie doch auch eine entscheidende Rolle in der so wichtigen **Wolkenphysik**, insbesondere in der Physik der Bildung von **Kondensations-Keimen** und von **Tröpfchen**, die ja ebenfalls durch Kräfte zusammengehalten werden müssen. Ohne diese gäbe es nicht die abkühlende Wirkung des Regens, und z.B. auch nicht das mit dem Regen verbundene Auswaschen von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  und anderen

Luft-Beimengungen aus der Atmosphäre, die Speicherung dieser Substanzen in den Ozeanen und schließlich in den Sedimenten der Lithosphäre, bis hin zu ihrer Wiederfreisetzung durch Vulkane und Erdbeben.

Mit chemischen Kräften in den Muskeln des Steinwerfers kann auch das Steinwurf-Experiment angefangen haben. Die chemische Energie des Werfers ist in kinetische Energie des Steines umgewandelt worden! *Das ist etwas Neues*: Ein chemischer Anteil der inneren Energie kann also - anders als der *thermische* Anteil - *doch* in kinetische Energie umgewandelt werden! Bisher hatten wir nur die Energetik des geworfenen Steines besprochen. Wenn dabei Reibung im Spiel ist, kann sich kinetische in inneren Energie umwandeln, aber nicht umgekehrt! Auch hatten wir nichts darüber gesagt, welche energetischen Prozesse am Anfang, (oder auch am Ende) des Steinwurfes stattfinden.

Der Verlust der biochemischen 'Muskel'-Energie des Werfers an die kinetische Energie des Steines wiederum wird durch Aufnahme von Nahrung ausgeglichen, einer Biomasse, die vor dem Verdauungs-Prozess einen höheren chemischen Energiegehalt hat als danach. Diese Verringerung der chemischen Nahrungs-Energie - zugunsten der Energie-Zunahme des Verzehrerers - beruht darauf, dass Verdauungsenzyme die Nahrung in nieder-energetische Einzelteile zerlegen. Dabei gehen chemische Bindungen in andere über, in denen die Bindungskräfte schwächer geworden sind, und damit auch ihre Arbeitsleistungen bei weiteren biochemischen Veränderungen.

Wenn der Steinwerfer Vegetarier ist, so profitiert er davon, dass während des Wachstums der verzehrten Pflanzen eine Energie-Umwandlung - hier **Assimilation** genannt - von  $CO_2$  und Wasser (die so gut wie keine biochemische Energie enthalten) *und der **Energie des Sonnenlichtes*** in die Nahrungsenergie des Werfers stattgefunden hatte. Wenn er *kein* Vegetarier ist, so hat vorher ein *Tier* die durch Kohlenstoff-Assimilation mit solarer Unterstützung entstandenen Pflanzen verzehrt. Also hätte der Experimentator ohne Sonne, Wasser und  $CO_2$  den Stein gar nicht werfen können! Übrigens treibt die Sonne nicht nur den Experimentator an, sondern auch das gesamte atmosphärische Geschehen, also auch das Klima. Wir haben uns hier thematisch *nicht* verirrt! Doch dazu später mehr.

Vielleicht lässt man ja den Stein nicht von einem menschlichen Experimentator hochwerfen, sondern von einer elektrisch arbeitenden Wurfmaschine. Hier hat es vorher offenbar Umwandlungen von irgendwelchen Energiearten in **elektrische Energie** gegeben. Sie könnte aus potentieller Energie stammen, z.B. der potentiellen Energie des Wassers in einem Stausee, welches dann durch die Turbine eines Generators geflossen ist, (verbunden mit einer Umwandlung von potentieller in kinetische Ener-

gie des Wassers, wie auch beim fallenden Stein). Der so angetriebene **Generator** verwandelte dann die kinetische in elektrische Energie. Und das alles, damit der **Elektromotor** in der Wurfmaschine später diese elektrische Energie wieder in kinetische Energie zurückverwandelt, in die kinetische Energie des geworfenen Steins.

Der hydrodynamisch angetriebene Stromgenerator arbeitet prinzipiell ebenso wie ein Fahrrad-Dynamo, der die kinetische Rotationsenergie des Vorderrades in elektrische Energie umwandelt. Eine Verlangsamung der Fahrt wird verhindert, indem der Radfahrer gegensteuert durch den Einsatz seiner chemischen Muskelenergie, die er aus der energiereichen Nahrung erworben hat, die nun in der Fahrradlampe noch einmal umgewandelt wird, und zwar in elektromagnetische Energie der Lichtwellen. Und diese Lichtwellen-Energie wird wieder in thermische Energie umgewandelt, wenn sie von der beleuchteten Materie absorbiert wird. So ist also aus dem Sonnenlicht, ohne das es für den Radfahrer keine Nahrung gegeben hätte, das Licht einer Fahrradlampe geworden, und dann eine Erwärmung der Erde und der Atmosphäre. Wieder wurde ein kleiner Teil der Sonnenenergie erst verzögert für die Erwärmung des Systems Erde-Atmosphäre verwendet. Und die Energie des Sonnenlichtes *selbst* war übrigens durch Umwandlung aus **Kernenergie** hervorgegangen.

Kann man die thermische Energie der vom Licht der Fahrradlampe getroffenen Materie wieder in Kernenergie verwandeln? Nein, werden Sie sagen, das ist ja paradox! Aber wenn Sie das sagen, geben Sie zu, dass Sie den *zweiten* Hauptsatz schon wieder etwas besser verstanden haben, der ja von **Irreversibilität**, also von Nicht-Umkehrbarkeit von Prozessen spricht. Und zwar sind genau die Prozesse irreversibel, die mit **Entropie-Zunahme** einhergehen. Deswegen sprachen wir ja vom irreversiblen  $Tds > 0$ . Wir kommen schon bald darauf zurück.

Übrigens ist die Sonne auch dafür verantwortlich, dass sich potentielle Energie in angestautem Wasser ansammeln konnte. Das Wasser in der **Talsperre** hat sich nicht dadurch angesammelt, dass es von der Meeresmündung ausgehend flussaufwärts bis hinter die Sperrmauer geflossen wäre: Die *Sonne* erst musste das Wasser verdunsten und dann heben, so dass der Dampf zu Wolken kondensieren und als Regen die Flüsse speisen konnte, die *dann erst* die Talsperre füllten.

Man muss aber nicht unbedingt auf die so entstandene potentielle Energie des angestauten Wassers zurückgreifen, man kann auch die kinetische Energie des Windes direkt verwenden. Diese wird z.B. von **Windkraftwerken** in elektrische Energie umgewandelt, die dann z.B. unsere Wurfmaschine antreibt. Oder man greift auf eine **Brennstoffzelle** zurück. Das ist im Wesentlichen eine Membran, die so fein ist, dass sie zwar die Kerne von Wasserstoffatomen (positiv geladene Protonen) hindurch

lässt, die negativ geladene Elektronhüllen aber nicht. So entwickelt sich auf der einen Seite der Membran eine negative auf der anderen Seite eine positive Ladung. Durch die so entstandene Spannung wird ein elektrischer Strom um die Membran herum angetrieben, der also letztlich durch Umwandlung der Energie entstanden ist, die in den *elektrischen Bindungskräften* steckt, und die bei der Ladungstrennung überwunden werden mussten.

Ferner könnte man *statt* der **chemischen Bindungsenergie** - als **residuale** Spielart von Kräften zwischen Atomen - auch die **Kernenergie** nutzen - eine Spielart der Kräfte zwischen den Nukleonen (Protonen und Neutronen), die den Atomkern zusammenhalten, insbesondere die sich dort elektrisch abstoßenden gleichnamig geladenen Protonen. Auch diese Kernkraft ist ja eine residuale Kraft, eine 'Restkraft' der sogenannten **starken Wechselwirkung**, deren 'Hauptaufgabe' es ist, die Quarks zu Nukleonen zusammenzuhalten. Eine Nutzung der Kernenergie als Spielart der Kräfte zwischen den Quarks wird es wohl nie geben, wie Physiker Ihnen, liebe Leserin, liebe Leser, unter Benutzung von Begriffen wie 'Farbladungen' oder 'Confinement' erklären könnten. Wahrscheinlich sollten wir die Nutzung der Kernenergie sowieso lieber der Sonne überlassen, deren lebenswichtiges Licht durch Umwandlung aus Fusionsenergie - einer noch einmal anderen Spielart der Kernenergie - entstanden ist.

'Natürlich' gibt es auch eine **schwache Wechselwirkung**, auch schwache Kernkraft genannt, die uns in diesem Buch nicht weiter beschäftigen wird. Sie spielt eine Rolle, wenn sehr massenreiche Sterne ihr Leben in Form einer **Supernova** beenden. Übrigens sind die Gravitationskraft, die elektromagnetische Kraft, sowie die starke und schwache Kernkraft die einzigen Kräfte, die die heutige Physik kennt.

Um den Kontext von all dem zu unseren bisherigen und kommenden Darstellungen des Klimasystems zu vertiefen, verweise ich zusammenfassend noch einmal auf Seite 144, wo es hieß, dass Arbeit = Kraft · Weg sei. Grundsätzlich erhöht ja jede Arbeit an einem System dessen Energie, und eine Arbeit des Systems erniedrigt sie. Ein 'direktes' Beispiel für diese Auswirkung der Kraft haben wir aber erst beim Prozess des durch die Luft fliegenden Steines kennengelernt. Bis dahin kannten wir nur eine Form dieser Arbeit, die der Umrechnung des Produktes 'Kraft · Weg' in das Produkt 'minus Druck · Volumenänderung' entsprach, (→ Seite 144), und in der sich diese Arbeit in einer Veränderung des Anteiles **thermische Energie der inneren Energie** auswirkte.

Beim herunterfallenden Stein kommt die Form Arbeit = Kraft · Weg 'endlich' direkt zum Einsatz: Hier wirkt die Arbeit Gravitationskraft · Weg des Steines nach oben oder



nach unten, und die daraus resultierende Energieänderung des Steines entspricht nicht mehr der Zunahme einer inneren Energie, sondern einer Ab- oder Zunahme der kinetischen Energie des sich nach oben oder unten bewegenden Steines. Und die *anfängliche* kinetische Energie des Steines kam z.B. aus der 'Muskelenergie' eines Werfers, also aus chemischer Energie - einer speziellen elektrischen Energie - als Anteil der inneren Energie.

Nach der Besprechung der Energetik des Wurfes des Steines und seines anschließenden Fluges fehlt nun noch die Besprechung des Endes dieses Experimentes. Am oberen Umkehrpunkt war die Gesamtenergie  $e$  des Steines noch in  $\phi$  und  $u$  gebündelt, dort war ja  $k=0$ . Unmittelbar vor dem Aufschlag unten ist die - stets gleichgroß gebliebene - Gesamtenergie  $e$  in  $k$  und  $u$  gebündelt, am Boden ist ja  $\phi=0$ . Aber *nach* dem Aufschlag ist nicht nur  $\phi=0$ , sondern auch  $k=0$ ! Die Fallbewegung wird ja gestoppt! Nun ist tatsächlich die *gesamte* Energie des Steines in  $u$  gebündelt, in der **thermischen Energie**. Diese war ja wegen der Reibung in der Luft schon während des Fluges 'ein wenig' irreversibel angewachsen, aber nun, da der Stein nach dem Aufprall nicht mehr weiter fallen kann, ist er 'richtig' heiß geworden: die *gesamte* geordnete Bewegungsenergie des fallenden Steines ist in die *ungeordnete*, nicht mehr gleichgerichtete Bewegungsenergie seiner Moleküle (und der Moleküle des Aufschlag-Geländes, also einem irdischen Teil des Systems Erde-Atmosphäre) übergegangen, was deren Temperatur und innere Energie lokal *sehr* stark erhöht hat.

Die damit verbundene Irreversibilität wird überaus anschaulich, wenn man sich klar macht, wie unwahrscheinlich es ist, dass alle - vielleicht  $10^{23}$  - ungeordneten molekularen Bewegungen der Moleküle rein 'zufällig' einmal gleichgerichtet nach oben weisen und so den ganzen Stein wieder nach oben fliegen lassen, was ja dem Umwandlungsprozess  $u \rightarrow k$  entsprechen würde, und was einer Verletzung des vom zweiten Hauptsatz ausgesprochenen Verbotes von Entropie-Senken wäre: Auch wenn er zufällig entsteht, enthält der Zustand der geordneten Molekularbewegung nun einmal weniger Entropie als der Zustand der ungeordneten Molekularbewegung.

Oft wird in der populärwissenschaftlichen Literatur ein ähnliches Beispiel diskutiert, wie unwahrscheinlich es doch sei, dass ein heruntergefallener Dachziegel zufällig wieder an die alte Stelle auf dem Dach zurückfliegt. Ich gebe aber zu, dass ich sowohl bei unserem Stein als auch beim Dachziegel bei solchen Überlegungen physikalische Bedenken habe: Da es sich hier beide Male um Festkörper handelt, kann der Zufall bei den molekularen Bewegungen nicht die gleiche Rolle spielen wie in einem zu einem Luftpäckchen zusammengefassten Gas: In Festkörpern sind nämlich die Atome und Moleküle aneinander gebunden, die 'Zufallsbewegungen'

können nur zufällige Schwingungszustände um gewisse Gleichgewichtslagen sein. Daher besteht hier - nach meinem Verständnis - keine Gefahr für eine zufällige Verletzung des Verbotes von Entropiesenken durch den zweiten Hauptsatz. Mir wäre daher wohlher, wenn ich Ihnen die Wahrscheinlichkeit für *zufällige* Verletzungen des zweiten Hauptsatzes am Beispiel eines Lagrange'schen Luftpäckchens vorrechnen dürfte, zumal dies für das System Atmosphäre auch sowieso relevanter wäre als die Festkörperphysik. Das Luftpäckchen wird zwar nicht von einem Menschen nach oben geworfen, es wird aber beispielsweise während einer Horizontalströmung durch ein 'im Weg' liegendes Gebirge nach oben gelenkt. Es kann auch nach unten 'fallen', etwa weil es kälter und schwerer ist als die Umgebungsluft.

Das ist alles im Einklang mit dem zweiten Hauptsatz, und wir stellen nun noch einmal die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit es zu einer zufälligen *Verletzung* des Verbotes einer Entropie-Abnahme kommen kann, weil sich die (nun *wirklich* zufälligen)  $10^{23}$  atomaren und molekularen Bewegungen auch einmal rein zufällig ordnen und in eine Richtung fliegen, *ohne dafür durch ein Strömungshindernis oder durch ein Gewichts-Unterschied zur Umgebung eine physikalische Veranlassung dazu zu haben*, nach dem Motto "alles was rein zufällig passieren könnte, passiert auch irgendwann. Man muss nur lange genug warten". Aber wie lange? Wenn man z.B. länger warten müsste als die 10-15 Milliarden Jahre, die wir noch haben, bevor die Sonne als roter Riese die Erde verschluckt, dann wird dieses Ereignis ja doch nicht stattfinden. Und dennoch - so ist es nun mal beim Zufall könnte das Ereignis 'zufällig' auch sofort passieren können.

Liebe Leserin, lieber Leser, wenn Ihre geistige Frische noch ein weiteres 'ja, aber' verarbeiten kann, dürfen Sie diesen Absatz zu Ende lesen, sonst überspringen Sie ihn besser. - Mein Grund für das Einbringen einer weiteren Komplexifizierung besteht darin, dass bei aller Zufälligkeit der molekularen Bewegungen auch der sogenannte Impuls-Erhaltungssatz mitreden muss. Wenn z.B. das Molekül Nr. 28546446 mit dem Molekül Nr. 934704763548 zusammenstößt, dann *können* sie sich hinterher gar nicht in eine Richtung bewegen, denn der Impuls-Erhaltungssatz fordert, dass sich die beiden betroffenen Moleküle nach dem Zusammenstoß relativ voneinander *entfernen* müssen. Das müssten dann andere zufälligen Stoßpartner wieder in 'Ordnung' bringen - im wahrsten Sinne des Wortes. Vor allem solche vom benachbarten Luftpäckchen sollten 'zufällig' Impulse in die richtige Richtung erfolgen. Die dadurch verursachte weitere Verringerung der Wahrscheinlichkeit einer zufälligen Verletzung des zweiten Hauptsatzes ist in meiner nun kommenden Rechnung *nicht* enthalten.

Ich habe von den  $10^{23}$  Molekülen des Luftpäckchens zunächst nur *zwei* betrachtet. Das erste Molekül möge zufällig nach oben fliegen. Aber schon das zweite Molekül

fliegt mit der Wahrscheinlichkeit Null haargenau in die gleiche Richtung, denn es gibt ja *unendlich viele* Richtungen! Man muss schon einen kleinen Raumwinkel-Bereich um die erste Flugbahn herum zulassen, um nichtverschwindende Wahrscheinlichkeiten zu erhalten. Ich habe einen Öffnungswinkel vorgegeben, der einem Tausendstel der gesamten Umgebungskugel entspricht. (Das wäre ein Kegel, der, vom Erdmittelpunkt ausgehend, an der Erdoberfläche die Fläche von Spanien ausschneidet). Die Wahrscheinlichkeit, dass das erste Molekül in diesen Kegel hinein geflogen ist, ist also ein Tausendstel. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das zweite Molekül in den gleichen Richtungs-Kegel hinein fliegt, ist nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung gleich dem Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten, also ein Tausendstel mal ein Tausendstel = ein Millionstel =  $1/1000000$ . Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass auch ein drittes Molekül in den gleichen Richtungs-Kegel hinein fliegt, ist ein Millionstel mal ein Tausendstel = ein Milliardenstel =  $1/1000000000$ . Die Wahrscheinlichkeit, dass die Flugrichtung auch eines vierten Moleküls zur gleichen Richtungsklasse gehört, ist demnach ein Billionstel. 5 Moleküle fliegen mit der Wahrscheinlichkeit ein Billionstel =  $1/1000000000000000$  in den gleichen Richtungskegel, usw.

Oh je, es sollen ja  $10^{23} = 100000000000000000000000$  Moleküle zufällig dorthin fliegen, und wir sind erst bei 5 angekommen! Bei *jedem* der 9 999 999 999 999 999 999 995 verbliebenen Moleküle erhöht sich der jetzt schon gigantische Wahrscheinlichkeits-Nenner um weitere 3 Nullen! Das ergibt eine derart kleine Wahrscheinlichkeit, einen derart großem Wahrscheinlichkeits-Nenner, dass man ihn ausgeschrieben noch nicht einmal in einem Buch mit 1000 eng bedruckten Seiten unterbringen kann. Man braucht viele Fortsetzungsbücher, alle mit 1000 Seiten, die nur mit Nullen gefüllt sind. Die größte Bibliothek der Welt, die British Library, hütet stattliche 30 Millionen Bücher. Hätten alle den Umfang von 1000 Seiten, und enthielten sie alle nur Nullen (bis auf das erste Buch, welches ja mit einer Eins beginnt), so hätte man den Nenner noch immer nicht vollständig aufgeschrieben. Vielmehr benötigte man nach meiner Rechnung etwa fünf Milliarden solcher Bibliotheken (mit je 30 Millionen Büchern).

Warum, liebe Leserin, lieber Leser, mute ich Ihnen einen solchen abstrusen Gedankengang zu? Wie gesagt, *wird* irgendwann alles passieren, was per Zufall passieren *kann*. Unter diesem Gesichtspunkt scheint es gewagt zu sein, im Sinne des zweiten Hauptsatzes zu behaupten, dass Entropie global nie abnehmen kann. 'Eigentlich' können Entropie-Senken also *doch nicht* verboten sein! Aber bei dem Versuch, die entsprechende absurd kleine Wahrscheinlichkeit dafür mental zu realisieren, reduzieren sich alle Bedenken auf null. Man wird wohl niemals genug Zeit zum Warten zur Verfügung haben. Also sagen wir einfach 'Der zweite Hauptsatz gilt'. Auch hier können wir einen riesigen Unterschied des Validitäts-Grades zweier Theorien feststellen.

Hatten wir auf Seite 163 den Validitäts-Grad des ersten Hauptsatzes mit dem der AGW-Theorie verglichen, so schränken wir diesmal den Validitäts-Grad der letzteren gegenüber dem des zweiten Hauptsatzes gewaltig ein.

Obwohl vieles schon bekannt sein dürfte, sollte man vielleicht noch einmal auf Unterschiede zwischen dem Steinwurf und der Bewegung von Lagrange'schen Luftpäckchen eingehen, und sei es nur zur Befestigung von schon erworbenen Kenntnissen: Wenn ein kaltes und schweres Lagrange'sches Luftpäckchen nach unten 'fällt', wird es von der Umgebungsluft komprimiert, denn der Luftdruck nimmt nach unten zu. Also ist dann  $d\nu < 0$ , d.h.  $\delta a = -pd\nu > 0$ . Der so beschriebene Energiegewinn des Luftpäckchens besteht in einem Anwachsen von **innerer Energie** in Form von **thermischer Energie**, was wir auch **Kompressionswärme** genannt haben. Dies haben wir in vielen Luftpumpen-Experimenten in Kapitel 2.7 so gesehen. Der fallende Stein erfährt einen solchen Energiegewinn allerdings nicht, weil er 'starr' (**inkompressibel**) ist, so dass sich trotz des zunehmenden Außendruckes sein Volumen *nicht* verringert. Nicht die Außenluft arbeitet 'an ihm' zur dissipationsfreien Erhöhung der thermischen inneren Energie, sondern das Schwerfeld der Erde zur Erhöhung der kinetischen Energie. (Allerdings arbeitet das Schwerfeld auch am 'schweren' Luftpäckchen ein wenig, sonst würde es ja nicht absinken).

Die Kompressionswärme entfällt also für den Stein. Und dennoch wird er - als Folge der Reibung mit der Luft - etwas wärmer. (Allerdings erfährt auch das Lagrange'sche Luftpäckchen etwas Reibungswärme, als Folge der 'inneren laminaren' Reibung, die mit jeder realen hydrodynamischen Strömung verbunden ist. Nur das Modell 'ideales Gas' kennt keine innere Reibung). Die **Kompressionswärme** entsteht durch **Entropie-Austausch** mit der Umgebung, die **Reibungswärme** jedoch durch **Entropie-Erzeugung** 'aus dem Nichts'. Eine - reversibel entstandene - Kompressions-Wärme kann durch Expansions-Kälte wieder beseitigt werden, die Reibungswärme aber durch keinen denkbaren Prozess: Insbesondere nach dem Aufprall des Steines 'geht nichts mehr'. Mit der nun *vollkommen* ungeordneten kinetischen Energie der Moleküle kann man nichts mehr anfangen, man kann sie z.B. nicht dazu verwenden, den Stein wieder nach oben zu befördern. (Dass die thermische innere Energie des Luftpäckchens dafür auch nicht zufällig verwendet wird, hat die obige Wahrscheinlichkeits-Abschätzung ergeben).

Unsere Überlegungen zur Rolle der chemischen inneren Energie beim Steinewerfen, beim Fahrradfahren oder bei der Nahrungsaufnahme eines Menschen zeigen aber, dass innere Energie u nicht *grundsätzlich* 'wertlos' für den Antrieb von Prozessen ist, sondern nur ihr **thermischer Anteil**. Dass dieser Anteil 'wertlos' ist, liegt jedoch 'nur' an der - oben abgeschätzten - geradezu irrsinnigen Unwahrscheinlichkeit dafür, das

*zufällig* aus Unordnung Ordnung entstünde, dass also *zufällig* eine relevante Entropiesenke entstünde, dass also *zufällig* Entropie vernichtet würde, dass also *zufällig* der zweite Hauptsatz verletzt würde. Und doch *gibt* es in der nichtlinearen, vernetzten Welt spontane Strukturbildungen, wie ich sie schon mehrfach betont und in der Klimaforschung als zu wenig beachtet kritisiert habe.

Diese Selbstorganisations-Prozesse verletzen den zweiten Hauptsatz *deshalb* nicht, weil sie nicht mit Entropie-Senken verbunden sind, nicht mit der Vernichtung von Entropie, sondern mit einer lokalen (örtlichen) Entropieverringerng auf Kosten einer Entropieerhöhung in der Umgebung. Mit anderen Worten, diese Entropieverringerngen sind verbunden mit einem *Transport* von Entropie vom Ort der Strukturbildung in die Umgebung dieses Ortes. Wohl am genauesten ist dieser Prozess von I. Prigogine und G. Nicolis [NP77] beschrieben worden, und I. Prigogine hat für diese Strukturbildungs-Theorie den Nobelpreis bekommen. Es gibt noch weitere Strukturbildungstheorien, z.B. die Theorie der **Hyperzyklen** von M. Eigen [SE79], die Theorie der **Synergetik** von H. Haken [Hak82], und die Theorie der selbstorganisierten **Kritizität** von P. Bak [Bak97]. Während Prigogine vor allem die Vereinbarkeit von Strukturbildungen mit der Thermodynamik betont, insbesondere mit ihrem zweiten Hauptsatz, versuchen Eigen, Haken und Bak in ihren Theorien physikalisch-dynamische Mechanismen ausfindig zu machen, welche *zwangsläufig* zu geordneten Strukturen führen.

Keine der Theorien widerspricht den physikalischen oder mathematisch-statistischen Gesetzen, aber das ist auch schon fast die einzige Gemeinsamkeit dieser Theorien. Keine lässt sich in irgendeine der anderen überführen. Auch hat sich keine dieser Theorien gegenüber den Konkurrenten 'durchgesetzt'. Die Vielfalt *unterschiedlicher* Erklärung von Strukturbildungen steht sicher im Zusammenhang mit der Komplexität *der* Systeme, die der spontanen Selbstorganisation fähig sind, und die durch eine Kombination von Nichtlinearität und Vernetzung vieler Variablen geprägt sind.

Bekanntlich ist auch das atmosphärische Wetter- und Klimasystem ein solches System. Aber der riesige physikalisch-mathematische Aufwand, mit dem die genannten Theorien ein physikalisches Verständnis dieser Komplexität anstreben, steht in einem höchst merkwürdigen Kontrast zur Behauptung einer Theorie unserer Tage, welche behauptet, dass die Auswirkungen der komplexen nichtlinearen **Wechselwirkungen** zwischen *sehr vielen* Variablen keine Rolle spielen im Vergleich mit der monokausalen, einseitig gerichtete **Wirkung** einer einzigen Variablen, dem atmosphärischen CO<sub>2</sub> - Gehalt.

Ein physikalischer Mechanismus, welcher *zwangsläufig* zu geordneten Strukturen im System Atmosphäre führen muss, und den man auch ohne Kenntnisse der Theorien

von Prigogine, Haken & Co verstehen kann, ist zweifellos die **differenzielle Erwärmung**. Mit diesem Schlagwort bezeichnen wir eine Situation, in der Teilgebiete der Atmosphäre, die sowieso schon wärmer als im Durchschnitt sind, 'weiter' erwärmt werden, und in der kältere Teile der Atmosphäre sogar Wärme nach außen abgeben müssen. Der so verstärkte Temperatur-Gegensatz ist ja *auch* eine Strukturbildung, wenn auch keine intern-spontane, wie sie Gegenstand der genannten Theorien sind, sondern eine von außen aufgezwungene Strukturbildung.

Nun ist die Frage, ob die Atmosphäre tatsächlich differenziell erwärmt wird, und wenn ja, wie sie das verwirklicht. Bei der in Kapitel 2.7 beschriebenen Erwärmung des idealen Gases in der Luftpumpe war das ja nicht der Fall, dort waren wir davon ausgegangen, dass der Experimentator das Gassystem *gleichmäßig* durch die diabatische Wand hindurch erwärmt. Aber dass die Atmosphäre ein bisschen komplexer ist, war uns ja schon klar. In Kapitel 4 werden wir genauer erfahren, wie die atmosphärische differenzielle Erwärmung realisiert wird. *Hier* gebe ich einen kleinen Vorgriff, der 'erst einmal' das Prinzip der für Wetter und Klima unglaublich wichtigen *differenziellen* Erwärmung verdeutlichen soll, und der hoffentlich dennoch ein bisschen Neugierde auf Kapitel 4 übrig lässt.

Wo ist eigentlich der 'Experimentator', der das System Erde/Atmosphäre - das sogenannte **terrestrische System** - erwärmt? "Das macht die Sonne" werden Sie sagen. Und natürlich haben Sie Recht. Aber liegt zwischen Sonne und Erde nicht ein ziemliches Vakuum, und isoliert Vakuum nicht ebenso wie eine adiabatische Wand, nach dem Prinzip der Thermosflasche? Das wäre nur dann so, wenn wir von der Sonne einen materiellen 'Wärmefluss' zu erwarten hätten - wie '**Wärmeleitung**' oder '**Wärmekonvektion**' - aber Sie wissen sicher schon, dass die Erwärmung der Erde durch '**Wärmestrahlung**' erfolgt, und dass diese elektromagnetischen Wellen auch den luftleeren Raum überbrücken. Die Sonne *emittiert* diese Strahlung und verliert dabei Energie, die Atmosphäre und der Erdboden absorbieren diese Energie und werden dabei erwärmt. Wenn man nun noch daran denkt, dass ja die Sonne am Äquator und in dessen Nachbarschaft viel steiler am Himmel steht als in der Nähe der beiden Pole, wo ja die Sonne höchstens wenig über den Horizont aufsteigt, sind wir der differenziellen Erwärmung schon auf der Spur: Äquator-nahe Gebiete erhalten eine stärkere 'Heizung' als Pol-nahe Gebiete. Und so passt es auch, dass die sowieso schon wärmeren Gebiete stärker beheizt werden als die sowieso schon kälteren Gebiete - das war ja eine Zusatz-Bedingung für die differenzielle Erwärmung.

Aber das ist noch nicht alles! Da *jeder* Körper aufgrund seiner Temperatur elektromagnetische Strahlung emittiert, muss auch das terrestrische System Strahlungs-

Energie abgeben, was ja auch gut ist, denn sonst würde das System Erde/Atmosphäre unentwegt aufgeheizt werden. Aber: nicht nur die Absorption der Solarstrahlung, sondern auch die Emission der terrestrischen Strahlung ist umso größer, je höher die Temperatur ist: Äquator-nahe Gebiete z.B. erhalten zwar eine stärkere 'Heizung' als Pol-nahe Gebiete, sie müssen aber auch mehr Wärme abgeben!

Allerdings sind die Gesetze, welche die Ein- und die Ausstrahlung bestimmen, nicht die gleichen: Der Energiegewinn durch die Einstrahlung wird vom sogenannten Lambert'schen Kosinusetz geregelt, der Energieverlust durch die Ausstrahlung vom Stefan-Boltzmann Gesetz. Die Details sind im hier zu diskutierenden Zusammenhang unwichtig, es kommt hier nur darauf an, dass im Zusammenspiel von Ein- und Ausstrahlung nach diesen *unterschiedlichen* Gesetzen in kalten Pol-nahen Gebieten die Ausstrahlung größer ist als die Einstrahlung, und dass in den warmen Äquator-nahen Gebieten die Einstrahlung größer ist als die Ausstrahlung, wie wir in Kapitel 4 näher beschreiben werden. Im irdisch-globalen Mittel halten sich der Energieverlust und der Energiegewinn mehr oder weniger die Waage, die globale Bilanz zwischen Ein- und Ausstrahlung - zwischen der terrestrischen Absorption und Emission - ist also ausgeglichen.

Und dennoch bleibt die Temperatur nicht überall gleich: *lokal* ist die Strahlungsbilanz *nicht* ausgeglichen, wo es warm ist, wird es noch wärmer, bewirkt die Strahlungsbilanz durch überschüssigen Energie-Import eine weitere Erhöhung der thermischen Energie. Wo es kalt ist, wird es noch kälter, senkt die Strahlungsbilanz die Temperatur *noch* mehr. Folglich muss sich die Atmosphäre etwas einfallen lassen, wie sie ein *unentwegtes* Anwachsen des Temperaturgegensatzes zwischen den Polen und dem Äquator verhindern kann. Und sie *hat* etwas erfunden, um das zu verhindern: Das Wetter und das Klima! Das Wetter und das Klima bewirken in der Summe all ihrer Tätigkeiten einen '*Wärmetransport*' vom Äquator zu den Polen. (Sie erinnern sich noch, dass es eigentlich '*ein mit T multiplizierter Entropie-Transport*' heißen müsste?)

Wir wollen noch einmal auf die auf Seite 170 nach mehrfachen 'Erweiterungen' entstandene Gleichungskette

$$de = -de_{SU} = dk + d\phi + du = \delta a + \delta q = -pdv + \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} + Tds$$

für Energieänderungen  $de$  zurückkommen. Konzentrieren wir uns auf das letzte Gleichheitszeichen: Stände hier nur  $de = \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r}$  (oder besser  $dE = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ , nach Multiplikation mit der Masse  $m$ ), dann wäre das die Formel-Fassung dessen, was ich persönlich vor etwa 60 Jahren von meiner Physiklehrerin gelernt hatte: "Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten" *und* "Arbeit ist Kraft mal Weg". Etwas präziser könnte

man sagen:  $dE = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$  beschreibt, dass eine kleine Energieerhöhung  $dE > 0$  eines Systems eine Arbeit  $\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$  der Umgebung *am* System darstellt in der Form Kraftvektor  $\mathbf{F}$  mal vektorielle Ortsänderung  $d\mathbf{r}$ . (Ein Weg *ist* ja eine Ortsänderung!). Der Bezug auf ein *lokales* System und ihrer Umgebung ist wichtig, denn wenn man das *kosmisch-globale* System im Auge hätte, hätte man ja wegen der Energieerhaltung einfach  $dE = 0$ . In diesem Sinne ist auch die *irdisch-globale* Atmosphäre ein lokales System, welches an ihrer Umgebung (am Erdboden) Arbeit leisten kann, z.B. wenn der Wind Dünen wandern lässt. Dass aber  $dE = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$  nur die *halbe* Wahrheit ist, wurde mir damals nicht gesagt. (Vielleicht erinnere ich mich auch falsch. Immerhin hat diese Lehrerin mein Interesse an der Physik sehr befeuert). Die *ganze* Wahrheit - jetzt wieder spezifisch formuliert - ist ja mit  $de = \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r}$  noch nicht gesagt, sondern erst mit  $de = -pdv + \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} + Tds$ . Nun haben wir aus dem Satz "Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten" den (vollständigen?) Satz gemacht:

*Eine Energieänderung  $de > 0$  eines Systems wird bewirkt von einer Arbeit  $-pdv$  und/oder  $\mathbf{f} \cdot d\mathbf{r}$  der Umgebung am System, oder von einer 'Wärmezufuhr'  $Tds$  aus der Umgebung, (richtiger von einem mit  $T$  multiplizierten Entropie-Import), oder von beiden Prozessen.*

Wenn beide Prozesse aktiv sind, muss nur der 'stärkere' von ihnen für  $de > 0$  sorgen, der schwächere kann durchaus eine Arbeit *des* Systems am Umgebungssystem oder ein Entropie-Export des Systems sein. Eine Auflistung der möglichen Alternativen für das Endresultat  $de < 0$  schaffen Sie, liebe Leserin, lieber Leser, nun auch allein.

Aber wahrscheinlich haben Sie längst gemerkt, dass der obige Satz unsere Formel  $de = -pdv + \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} + Tds$  sowieso nicht vollständig beschreibt: wir haben noch nicht gesagt, dass Entropie nicht nur importiert oder exportiert werden kann, sondern auch im Inneren des Systems von allein entstehen kann, wie es bei allen irreversiblen Prozessen der Fall ist, also bei allen *realen* Prozessen. Daher sollten wir den dritten Term in  $de = -pdv + \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} + Tds$  noch einmal entsprechend aufspalten in die durch Austausch vergrößerte oder verringerte lokale Entropie einerseits und in die durch interne Erzeugung *immer vergrößerte* Entropie andererseits. Mein Vorschlag für die formelmäßige Erfassung dieser Aufspaltung ist

$$Tds = Td_{as} + Td_{is}$$

wobei die Symbole 'a' für 'ausgetauschte' und 'i' für 'intern erzeugte' Entropie stehen. Wer mag, kann den Index 'i' auch als Symbol für 'irreversibel erzeugte' Entropie an-



sehen. In der Literatur wird leider oft das Symbol 'e' verwendet. Ich rate davon ab, denn wenn man z.B. die Formel  $\delta_e q = T d_e s$  vorfindet, ist die Aussage zunächst nicht eindeutig: Man muss zumeist erst recherchieren, ob dieser Index für 'extern' steht (was unserem  $d_{a,s}$  entspricht), *oder* ob er für 'erzeugte' Entropie steht (was unserem  $d_{i,s}$  entspricht)!

Unsere Formel ermöglicht sehr kompakte Formulierungen der thermodynamischen Hauptsätze: Wenn man die Aufspaltung  $ds = d_{a,s} + d_{i,s}$  der Entropie auch für die Energie übernimmt,  $de = d_{a,e} + d_{i,e}$ , kann man den ersten Hauptsatz in der Form

$$\begin{aligned} d_e = 0 & \quad \text{für das kosmisch-globale Gesamtsystem bzw.} \\ d_e = -pdv + f \cdot dr + Tds & \quad \text{für ein lokales System mit seiner Umgebung} \end{aligned}$$

auch ohne Fallunterscheidung sehr sinnfällig formulieren:

$$d_{i,e} = 0$$

Diese Gleichung ist natürlich gleichwertig mit der Gleichung  $de = d_{a,e}$ . Für den **zweiten Hauptsatz** schreiben wir nun einfach

$$d_{i,s} \geq 0$$

' $\geq$ ' ist das Zeichen für 'größer oder gleich', wobei im Falle 'größer' **irreversible**, im Falle 'gleich' **reversible** (umkehrbare) Prozesse beschrieben werden. Eine *Austausch*-Bilanz  $d_{a,e} = \dots$  der Energie ist also immer identisch mit der *vollständigen* Energiebilanz, d.h.  $d_{a,e} = de$ , weil ja keine Energieerzeugung  $d_{i,e}$  hinzukommen kann. Auch so kann man den **ersten Hauptsatz** formulieren! Hingegen ist eine *Austausch*-Bilanz  $d_{a,s} = \dots$  der Entropie in keinem **realen Prozess** identisch mit der vollständigen Entropiebilanz  $ds = \dots$ . Auch so kann man den **zweiten Hauptsatz** formulieren, der ja besagt, dass bei realen Prozessen nicht nur der Austausch  $d_{a,s}$  von Entropie ins Spiel kommt, sondern auch eine Erzeugung  $d_{i,s} \geq 0$ , so dass  $ds \geq d_{a,s}$ .

Wie gesagt, ist  $d_{i,s} \geq 0$  ein statistisches Gesetz, welches - *sehr* streng genommen - nicht exakt gilt, sondern mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit 1/1000... auch verletzt sein könnte. Allerdings hatten wir auf Seite 177 ausgerechnet, dass diese Wahrscheinlichkeit *dermaßen klein* ist - dass ihr Nenner 1000... *dermaßen groß* ist - dass sein bloßes Hinschreiben in Fortsetzungs-Büchern fünf Milliarden Bibliotheken füllen würde, die alle so groß sein müssten wie die größte der Welt. Der Übergang von statistischen zu exakten Aussagen ist also 'fließend', und hier ist wohl die Grenze zum sogenannten 'Exakten' weit, weit überschritten. Hier sollte die Behauptung, die Ungleichung sei Fakt, keine Bedenken hervorrufen, (ganz im Gegensatz zur Behauptung, anthropogenes CO<sub>2</sub> verursache eine Klimakatastrophe).

Dieses thermodynamisch 'weltfremde', weil abgrundtief unwahrscheinliche Ereignis  $d_s < 0$  würde ja beschreiben, dass sich spontan aus der molekularen Zufallsbewegung ein Ordnungszustand gebildet hätte. Sowohl Ordnung *als auch* Entropiesenken sind unwahrscheinlich! Das ist der Grund für die vorläufige Beschreibung von **Entropie** durch Unordnung (oder die Beschreibung der sogenannte **'Negentropie'** durch Ordnung). Die physikalische Deutung der Entropie über den Ordnungsbegriff ist allerdings nicht die 'beste', weil es nicht immer augenfällig ist, was 'geordnet' ist und was nicht. Aber Besserung ist in Sicht: In Kapitel 3 werden wir den Ordnungsbegriff durch den damit verwandten, aber universeller anwendbaren Begriff **Information** ersetzen, der wiederum mit dem Begriff der Wahrscheinlichkeit zusammen hängt. Da wir uns mit dieser schon hier befasst haben, haben wir auch schon etwas Vorarbeit auf dem Wege zum Informationsbegriff geleistet.

Und doch gibt z.B. die Verbindung der Entropie-Produktion mit der Reibungswärme einen Hinweis darauf, dass Entropie auch etwas mit dem Verlust von **Ordnung**, von Gleichförmigkeit zu tun hat: Die Temperatur-Erhöhung bei Reibung geht ja einher mit einer Zunahme der kinetische Energie der *ungeordneten* Bewegungen der Moleküle, und der Preis dafür ist eine Verringerung der kinetische Energie des ganzen Steines, d.h. der *gleichgeschalteten, geordneten* Geschwindigkeiten aller Moleküle. Ordnung wird auch durch eine **differenzielle Erwärmung** hergestellt (→ Seite 180). Weil das so ist, und weil Unordnung mit der Entropie zusammenhängt, *muss* natürlich die differenzielle Erwärmung mit einer Absenkung der Entropie verbunden sein. *Dass* es so ist, können wir nun leicht bestätigen.

Dazu benötigen wir lediglich die obige Formel  $de = \delta a + \delta q = -pdv + \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} + Tds$ . Eigentlich benötigen wir sogar nur den Anteil  $\delta q = Tds$  dieser Formel, denn wie auf Seite 180 besprochen, erfolgt die differenzielle Erwärmung ausschließlich durch eine strahlungsbedingte Wärme-Wechselwirkung  $\delta q$ , und nicht durch eine Arbeit  $\delta a$ . Stellen wir den hier relevanten Teil  $\delta q = Tds$  der Formel nach  $ds$  um, dann haben wir

$$ds = \delta q/T$$

Nun hatten wir gerade die differenzielle Erwärmung so charakterisiert: Wo es wärmer ist als im Durchschnitt, ist die Einstrahlung größer als die Ausstrahlung, wird es also noch wärmer. Man spricht von einer **Netto-Einstrahlung**  $\delta q > 0$ . Wo es kälter ist als im Durchschnitt überwiegt aber die Ausstrahlung, haben wir eine **Netto-Ausstrahlung**  $\delta q < 0$ . Hier wird es also noch kälter.

Unsere obige Formel  $ds = \delta q/T$  besagt also, dass bei gleichen Beträgen von Netto-Einstrahlung und Netto-Ausstrahlung, also bei *gleichgroßen* Import- und Export-

Beträgen von **Energie**  $\delta q$  *weniger Entropie* ds importiert als exportiert wird! Der größere Nenner T in den (warmen!) Importgebieten und der kleinere Nenner in den (kalten!) Exportgebieten macht es möglich. Somit hat sich bestätigt, dass unter den Voraussetzungen der differentiellen Erwärmung der Entropie-Export überwiegt. Und so muss es ja auch sein, der durch differentielle Erwärmung entstandene Temperatur-Gegensatz stellt ja einen Ordnungszustand, also einen Zustand geringerer Entropie dar, und da der zweite Hauptsatz unerbittlich  $d_i s < 0$  verbietet, konnte die Entropie nicht einfach verschwinden, sie *musste* also exportiert worden sein.

Allerdings wird dieser Netto Entropie-Export nicht *nur* dazu verwendet, eine *Temperatur-Ordnung* (einen Temperatur-Gegensatz) aufzubauen. Wir sagten schon, dass das Wettergeschehen danach trachtet, diese Temperatur-Gegensätze wieder *abzubauen*. Aber das geschieht nicht einfach durch Wärmeleitung. Vielmehr werden in unserer *komplexen* Atmosphäre erst einmal *weitere* Strukturen gebildet, also weitere lokal entropiearme Gebilde, die den meridionalen Temperatur-Ausgleich noch effektiver bewerkstelligen. Das sind vor atmosphärische allem Wirbelströmungen, und ozeanische ausgleichende Transportbänder von warmen Oberflächen-Wasser und von kaltem Tiefen-Wasser. Der berühmte Golfstrom ist nicht das einzige Beispiel für solche spontanen Strukturbildungen.

Wohl gemerkt, der 'primär' entstandene Temperaturgegensatz zwischen Äquator und den Polen ist ein strahlungsbedingter, also von *außen* aufgezwungener Ordnungszustand. Die dann erst entstehenden *internen* Strukturen sind aber Beispiele für **Selbstorganisations-Prozesse**, die noch immer etwas rätselhaft sind. Wie schon auf Seite 179 berichtet, gibt es zwar mehrere Theorien hierzu, die aber alle verschiedene Erklärungsmuster vorschlagen, die sich kaum wechselseitig erklären können. Schon deswegen ist die Behauptung problematisch, man verstünde das Klimasystem so gut, dass man Klimaprognosen machen könne, welche in Verbindungen mit Messungen in der Gegenwart Faktenlagen gleich kämen.

Und es kommt eine weitere Erhöhung der Komplexität hinzu: Die Prozesse, die die differentielle Erwärmung wieder rückgängig machen wollen - das Wetter und das Klima also - sind *irreversible* Prozesse, d.h. sie stellen Entropie-*Quellen* dar und sie erhöhen daher - zur Beibehaltung stationärer Verhältnisse - den Bedarf an Entropie-Export durch die Netto-Strahlungsbilanz ein weiteres Mal.

Aber hat es eine solche Stationarität in der geologischen Vergangenheit überhaupt immer gegeben? Untersuchungen zeigen, dass es alle aus der jüngeren Zeit der messenden Klimatologie bekannt gewordenen klimatischen Wechsel auch schon in der paläoklimatischen Vergangenheit gegeben hat, und zwar mit den unterschied-

lichsten Geschwindigkeiten. - auch in einer von anthropogenen CO<sub>2</sub> nicht beeinflussten Atmosphäre - Wenn man also anthropogen verursachte Klimaschwankungen modellieren möchte, muss man erst einmal diese - mit der oben angedeuteten Komplexität versehenen - *natürlichen* Abweichungen vom stationären Zustand berechnen, und *dann erst* die anthropogen begründeten Abweichungen *von diesen Abweichungen!*

Als wir auf Seite 177 an einem Beispiel die Wahrscheinlichkeit für die zufällige Verletzung des zweiten Hauptsatzes  $d_i s \geq 0$  berechnet hatten, sind wir deswegen auf einen aberwitzig niedrigen Wert gekommen, weil wir sehr oft (im Beispiel  $10^{23}$  Mal) die Wahrscheinlichkeit 1/1000 miteinander multiplizieren mussten. (Es war die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich das jeweils betrachtete Molekül in den gleichen Raumkegel hinein bewegt wie alle anderen zuvor). Hätten wir ein ganzes Mol (also  $6 \cdot 10^{23}$  Moleküle) betrachtet, so hätten wir diese Multiplikationen noch  $5 \cdot 10^{23}$  weitere Male durchführen müssen, und jedes Mal hätte sich die Wahrscheinlichkeit, die ja mit der Entropie zusammenhängt, um ein Tausendstel weiter verkleinert.

Je mehr Teilchen man also betrachtet, desto mehr Entropieerniedrigung ergibt irgendeine regelmäßige Anordnung der Teilchen. Der Normalfall ist aber die nieder-entropische, geordnete Bewegung der Gasmoleküle nicht, sondern ihre hoch-entropische Zufallsbewegung. Und daher können wir im Umkehrschluss behaupten, dass ein Teilchensystem umso mehr Entropie beinhaltet, aus je mehr Teilchen es zusammengesetzt ist.

Was hat das alles mit unserem Thema notwendiger Entropie-Export zu tun? Sehr viel, wie wir gleich sehen werden. Apropos Teilchen - Irgendwie muss man ja auch im Teilchenbild den so dringend notwendigen Entropie-Export verstehen können. Vielleicht wissen Sie schon, dass es neben dem **Wellenbild** der Strahlung, das uns die Begriffe **kurzwellige Einstrahlung** und **langwellige Ausstrahlung** ermöglicht, auch ein quantenmechanisches **Teilchenbild** gibt. Die Teilchen (die 'Quanten') der Strahlung heißen **Photonen**. Sehr wichtig ist, dass jedes solare Photon mehr Energie trägt als jedes Photon der terrestrischen langwelligen Strahlung. Falls es interessiert: Dahinter steckt die quantenmechanische Formel  $E = h\nu$ , wobei  $E$  die Energie des Photons ist,  $h$  die Planck'sche Konstante - das 'Wirkungsquantum' - und  $\nu$  die Frequenz der Welle, d.h. die Anzahl der Wellen-Perioden, die pro Zeit an einem Ort 'vorbeiziehen'.  $\nu$  ist also umso größer, je kurzwelliger die Welle ist, (die Lichtgeschwindigkeit ist nämlich konstant), und desto größer ist folglich auch  $E = h\nu$ , die Energie der Strahlungsteilchens.

Somit kann man die Energiebilanz des Erdsystems auch beschreiben als eine Bilanz zwischen den von der Sonne kommenden absorbierten *hochenergetischen* und den

ins All emittierten *niederenergetischen* Photonen. Wenn aber diese Energiebilanz ausgeglichen sein soll, müssen selbstverständlich *mehr* terrestrische Photonen emittiert werden, als solare Photonen absorbiert worden sind! Während also das Erdsystem 'wenige' hochenergetische Photonen empfängt, gibt es 'viele', aber niederenergetische Photonen zurück. Das Erdsystem arbeitet gewissermaßen als *Spaltungseinrichtung für Photonen!* Etwas unkonventionell, aber prinzipiell richtig, kann man sagen, die hochenergetischen Photonen dienen der Atmosphäre als energiereiche Nahrung, die sie befähigt, 'sich zu bewegen'.

Das entspricht einer Nahrung für sich ebenfalls bewegendende Menschen und Tiere, die ja eine hochenergetische Biomasse sein muss. Und die Emission der gespaltenen, niederenergetischen Photonen entspricht dem Ausscheiden der verdauten, niederenergetischen Biomasse. Man weiß ja, dass Verdauungsenzyme die Nahrung ebenfalls in niederenergetische Einzelteile zerlegen! Es muss mehr **chemische Energie** mit der Nahrung aufgenommen werden, als mit der verdauten Biomasse wieder abgegeben wird. Diese Energie-Differenz benötigt der Mensch z.B. zum Holzhacken, zum Komprimieren der Luft in der Luftpumpe oder zum Marathon-Lauf, und die Atmosphäre z.B. zur Erzeugung vom Wind und Sturm. Eine - vielleicht als kleinlich empfundene - Richtigstellung (oder Detaillierung) sollte allerdings noch erfolgen, zumal sie auch eine berechtigte Gegenfrage beantwortet:

Offenbar benötigen Mensch und Tier eine energetisch hochwertige Nahrung, um die Differenz zur niederenergetischen Ausscheidung nutzen zu können, 'Arbeit' zu verrichten, und sei es 'nur', sich selbst zu bewegen. Die berechtigte Frage lautet nun: Die Atmosphäre hat ja diese 'Energiereserve' für *ihre* Bewegung gar nicht, wenn die ausgeschiedenen Photonen zwar energieärmer, dafür aber auch entsprechend zahlreicher sind, so dass die Energiebilanz - anders(?) als bei Mensch und Tier - genau ausgeglichen ist. Die Antwort lautet wie so oft "ja, aber...": Ja, tatsächlich darf die Atmosphäre nicht *so viele* niederenergetische Photonen emittieren, dass keinerlei Energie mehr für ihre eigenen Bewegungen übrig bleibt. Aber: *wenn* die Atmosphäre den zurückgehaltenen Energiebetrag für ihre Bewegung benutzt, kommt sie genauso ins Schwitzen wie der Mensch beim Marathon-Lauf: Die bewegte Luft wird ja wärmer, weil es keine reale Bewegung ohne Reibungswärme gibt. Als Folge dieser Erwärmung durch Bewegung senden die bewegten Luftmassen im Rahmen *ihrer* Emissionen etwas höherenergetische - etwas kurzwelligere Photonen aus, wenn auch noch immer sehr langwellige im Vergleich mit den von der Sonne ausgestrahlten Photonen.

Fazit: die zurückgehaltene Energie wird *doch noch* emittiert, wenn auch *zeitverzögert!* Auch der **Treibhauseffekt** ist nichts anderes als eine verzögerte Ausstrahlung,

eine vorübergehende Zwischenspeicherung eines Teiles der absorbierten solaren Energie, welche wie die Reibungswärme eine 'Erwärmung' darstellt, die *nicht* im Konflikt mit dem zweiten Hauptsatz steht. Schließlich haben wir ja die hier diskutierten Zusammenhänge aus dem ersten *und dem zweiten* Hauptsatz *abgeleitet!*

Anderer Meinung sind z.B. G. Gerlich und R.D. Tscheuschner, [GT-in], oder auch W.Thüne, [Thü02], wobei die letzte Veröffentlichung ein ausführliches Vorwort von G. Gerlich enthält. In einer Pressemitteilung der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG) wurde darauf hingewiesen, dass etliche Behauptungen von W.Thüne 'einer fachlichen Richtigstellung bedürfen', → [Thü-in].

Im englischsprachigen Wikipedia erfolgt in [GT-in/engl] aus vier US-Universitäten und vom DWD der Hinweis: "G. Gerlich and R. D. Tscheuschner claim to have falsified the existence of an atmospheric greenhouse effect. Here, we show that their methods, logic, and conclusions are in error".

Erhellend für die Argumentations-'Methoden' von G. Gerlich könnte auch ein Zitat aus einem Interview sein, welches in [Ger-in] nachzulesen ist: *'Die behaupteten Klimafolgen sind im echten Sinn ... von den Menschen erzeugt, nämlich von diesen Betrügern, Lügern und Spesenrittern des IPCC ausgedacht, für die sonst die Geldquellen versiegen würden. Viele geistig etwas unterbelichtete Mitläufer - Politiker und Journalisten - schlachten diese Sache aus, bei der alle die Leute mitreden können, die nichts gelernt haben müssen.'* - Meine persönliche Meinung hierzu geht schon aus dem Untertitel 'Katastrophe der Klimadiskussion' des Buches hervor, in dem Sie gerade lesen. Wer sich derartig in persönlichen Verunglimpfungen verliert, verwendet - möglicherweise unbewusst - diese Methode, um sachliche Schwächen der inhaltlichen Argumentation zu kompensieren.

Zu beachten ist vielleicht auch, *von wem* sich G. Gerlich hier interviewen ließ, nämlich vom Internetportal der 'deutschsprachigen Muslime für gottesehrfürchtige Leser'. Nichts liegt mir ferner als eine Verunglimpfung irgendeiner Religion, und das nicht nur deshalb, weil ich selbst zwei von mir sehr geschätzte Pfarrer im engsten Familienkreis habe. Ich wehre mich aber - ebenso wie die beiden Pfarrer und viele andere nachdenkliche Leute - entschieden dagegen, wenn man den vermutlich von *allen* Religionen dieser Welt ermöglichten Gewinnung von seelischer Bereicherung und Erfüllung damit verwechselt, 'von höchster Stelle' objektive Wahrheiten erhalten zu haben. Diese Verwechslung hat sicherlich die meisten der Kriege dieser Welt ausgelöst, und sie tut das in schlimmster Weise auch noch heute. Daher sollte auch Herr Professor G. Gerlich in seinen Formulierungen solche aggressiven Entgleisungen, die auf mich wie 'kriegerische Vorstufen' wirken, nicht verwenden! Und diese dring-

liche Empfehlung gilt völlig unabhängig von der Frage, ob die sachinhaltlichen Aussagen stimmen oder nicht.

Fassen wir noch einmal die beiden 'Methoden' einer verzögerten Energierückgabe vergleichend zusammen:

1) Ein Teil des energetischen Einstrahlungs-Gewinns wird, wie besprochen, *vorerst* durch Umwandlung in Bewegungsenergie zurückgehaltenen - das ergibt die 'Energie der Stürme' - bevor er dann doch noch nach einer reibungsbedingten Erwärmung abgestrahlt werden muss. (Das Strahlungs-Gesetz von Stefan-Boltzmann, das wir in Kapitel 4 besprechen werden, besagt nämlich im Wesentlichen, dass die Ausstrahlung eines jeden Körpers mit der Temperatur stark zunimmt, sogar mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur).

2) Beim Treibhauseffekt wird ebenfalls ein Teil des energetischen Einstrahlungs-Gewinns zurückgehalten, diesmal nicht durch vorübergehende Umwandlung in Bewegungsenergie, sondern dadurch, dass ein Teil der durch die 'Photonen-Spaltung' entstandenen niederenergetischen langwelligen Strahlung zwar emittiert wird, aber *noch in der Atmosphäre* von CO<sub>2</sub> (und anderen sogenannten Treibhausgasen) gleich *wieder* absorbiert wird, was die Luft erwärmt und sie daher auch auf diese Weise - und nicht durch Reibung - zur Emission etwas höherenergetische Photonen veranlasst, usw. Dieses Wechselspiel von langwelligen Re-Absorptionen und Re-Emissionen wiederholt sich mehrfach. Zwar entweicht auch jedes Mal ein Teil der jeweils re-emittierten Strahlung ins Weltall, aber eine damit verbundene endgültige Abkühlung kommt nie zum 'Abschluss', weil die nächsten Absorptionen der solaren Photonen 'schneller' geschehen als die - verzögerten - kompensierenden Emissionen. Somit stellt sich ein sogenanntes **Strahlungsgleichgewicht** bei einer höheren Temperatur ein, als es sich ohne diese verzögernden, 'stotternden' Energie-Abgaben einstellen würde. Und all das steht selbstverständlich in vollem Einklang mit den Hauptsätzen.

Ein zweiter Einwand gegen den atmosphärischen Treibhauseffekt ist der, dass der zweite Hauptsatz einen Entropiefluss - häufig 'Wärmefluss' genannt - vom Kalten zum Warmen verbiete. Aber eben *den* würde die Treibhausgas-begründete AGW-Theorie benötigen, denn die langwelligen atmosphärischen Emissionen erfolgen hauptsächlich aus kalten Höhen herunter in die wärmeren bodennahen Bereiche, was man auch mit dem Fachbegriff **atmosphärische Gegenstrahlung** bezeichnet - die es also auch nicht geben soll.

Ein Beispiel dafür, dass es eine 'Wärmestrahlung' von Kalt nach Warm in der Realität *doch* gibt - (die 'Hochkommata' sollen wie immer daran erinnern, dass es sich eigent-

lich um einen mit der Temperatur multiplizierten Entropie-Transport handelt) - hat schon Max Planck vor etwa 100 Jahren in einem Gedankenexperiment gegeben (später neu aufgelegt in [Pla66]): Eine aus Eis geformte Sammellinse kann die Sonnenstrahlung so fokussieren, dass sogar ein Feuer entfacht wird. Die 'Wärmestrahlung' gelangt also vom kalten Eis zum sehr warmen Feuer. Und dennoch darf dieser Aspekt des Strahlungs-'Wärmestroms' keine entropische Relevanz haben, darf er den zweiten Hauptsatz nicht verletzen. Und das, *obwohl* 'Wärmeströme' von kalt nach warm offensichtlich Temperaturgegensätze vergrößern, also Ordnung schaffen und somit - dem zweiten Hauptsatz widersprechend - die Entropie erniedrigen.

Wie also kommen wir aus dieser Nummer heraus? Auch die schon besprochene differenzielle Erwärmung schafft eine Temperatur-Ordnung, allerdings nicht durch irgendwelche 'Wärmeflüsse' von kalt nach warm, sondern durch Entropie-Export, wobei, wie besprochen, die von ihr selbst geschaffenen Temperaturunterschiede geschickt ausnutzt werden: Diese Temperaturunterschiede bedingen ja unterschiedliche *Umrechnungen* von Energie-Austausch in Entropie-Austausch, so dass ein Netto Entropie-Export bei verschwindendem Netto Energie-Austausch möglich wird. Diese Art der 'Rettung' des zweiten Hauptsatzes steht uns aber bei der Entropieverringering durch Strahlungs-'Wärmeströme' von kalt nach warm *nicht* zur Verfügung. Hier ist kein Entropie-Export in Sicht, m.a.W., auch bei Vergleich mit der differenziellen Erwärmung kommt keine Entsorgung als Rechtfertigung für die verbotene Senke der Entropie in Sicht.

Die Lösung des Problems ergibt sich aus der von U. Callies und F. Herbert [CH84] gegebenen eindrucksvollen, allerdings nicht für Laien gedachte Beschreibung der Thermodynamik der Strahlungsprozessen. Den Laien-Leserinnen und Lesern des vorliegenden Buches kann diese Lösung vielleicht so erklärt werden: Eine Alternative für die Erklärung der Entropie-Senke durch Entropie-*Export* hätte man gefunden, wenn sich Entropie an einer 'unvermuteten' Stelle des Systems ansammeln würde, so dass sie an den 'vermuteten' Stellen verringert würde. Zunächst ist allerdings leicht einzusehen, dass der reine Strahlungs-'Wärmefluss' die Entropie 'leider' überhaupt nicht verändert, er ist reversibel (also umkehrbar), denn man *kann* ja jeden Strahlungsweg mithilfe von Spiegeln ganz einfach umkehren! Wo bleibt also die Entropie, die durch die Verstärkung von Temperaturgegensätzen erst einmal verloren gegangen ist, die aber wegen des ersten Hauptsatzes nicht verloren gehen darf?

Die dringlich gesuchte Irreversibilität, also die Entropiezunahme und damit auch die Verträglichkeit des Treibhauseffekts mit dem zweiten Hauptsatz, sind erst dadurch gegeben, dass der reine, *reversible* Strahlungs-'Wärmefluss' gekoppelt ist mit irre-



versiblen **Emissions- Absorptions-** und **Streuprozessen**. Erst solche Wechselwirkungs-Prozesse zwischen den Photonen des Strahlungsfeldes und den Molekülen der Materie erhöhen die Entropie und machen so die entstehende Temperatur-Ordnung thermodynamisch möglich. *Diese Entropie-Quelle ist unabhängig von der Richtung des 'Wärmestroms': Das also macht auch Strahlungsflüsse von kalt nach warm möglich!*

Ein dritter Einwand gegen den atmosphärischen Treibhauseffekt hat seine Quelle darin, dass man - wieder einmal - die Komplexität der Atmosphäre unbeachtet lässt und glaubt, man könne den atmosphärischen Treibhauseffekt vergleichen mit demjenigen in einen aufgeheizten Auto oder in einem Glashaus. 'Wenn man das Schiebedach des Autos öffnet, oder das Glasdach des Gewächshauses entfernt, ist der ganze Treibhaus-Effekt verschwunden'. 'Ohne Blech- oder Glasdach kein Treibhaus-effekt, aber in der Atmosphäre gibt es ein solches Dach nicht'. So oder so ähnlich lauten die Begründungen.

Der vom Begriff 'Treibhauseffekt' suggerierte Vergleich mit dem langwellige Photonen-absorbierenden Glas des Gewächshaus oder dem Photonen-absorbierenden Blechdach eines Autos ist zugegebenermaßen missverständlich, es sei denn, man antwortet: "Doch! Wir haben ein solches Dach! Wir können es nur nicht öffnen, weil wir mitten *in* diesem Dach wohnen". Dieses Dach ist nämlich die hochkomplexe Atmosphäre selbst, denn diese enthält ja Komponenten wie CO<sub>2</sub> und andere Gase, welche die langwellige Ausstrahlung re-absorbieren und re-emittieren können.

Der Einwand mancher AGW-Skeptiker, es gäbe einen solchen Treibhauseffekt gar nicht, ist sehr schädlich, nicht nur, weil man mit dieser Behauptung falsch liegt, sondern auch deshalb, weil es von den *wirklich* stichhaltigen Begründungen einer trotz Treibhauseffekt sehr notwendigen AGW-Skepsis ablenkt. Die Widerlegbarkeit der Argumente gegen den Treibhauseffekt als Klimafaktor wertet natürlich die Aussagen der AGW-Vertreter auf, macht sie scheinbar 'glaubwürdiger', und es trägt vielleicht auch dazu bei, dass es die abartigen und unappetitlichen Entgleisungen auch von AGW-Vertretern gibt, wie z.B. in [MM-in], der 'Hass-Seite' auf Bücher von Dirk Maxeiner und Michael Miersch. (Lesen Sie bitte dort selbst - oder besser nicht). Und die dortigen entsetzlichen Bemerkungen sind noch nicht einmal die schlimmsten: In [Spiegel-in] oder in [Parn-in] kann man tatsächlich nachlesen, dass für einflussreiche 'Leugner' der anthropogen verursachen Erderwärmung die Todesstrafe angemessen sei. Ein Professor für Musikwissenschaften an der Universität Graz hält die Aussagen der AGW-Vertreter bereits für dermaßen 'glaubwürdig', dass diese Bestrafung der Vertreter einer anderen Meinung angemessen sei, eine Bestrafung übrigens, die für den Norweger Anders Breivik, der 77 Menschen tötete, *nicht* angemessen sei, weil

das viel weniger Menschen sind als Hunderte Millionen von Menschen, die als Folge eines - wegen der AGW-Skeptiker nicht aufgehaltenen - Klimawandels sterben würden.

Dennoch kehren wir beherzt zurück zu unseren analytisch-sachlichen Überlegungen, auch wenn diese uns zu einer AGW-skeptischen Haltung zwingen. Wir sahen, dass Mensch und Tier energiereiche und entropiearme Nahrung benötigen um Arbeit zu verrichten, z.B. einen Marathonlauf oder eine Jagt auf Tiere zu machen, und dass der 'Export' einer energieärmeren, von den Verdauungsenzymen gespaltenen, also entropiereicheren Biomasse auch dazu da ist, die bei dieser Arbeit erzeugte Entropie zu exportieren, d.h. den 'Wärmetod' abzuwehren. Wir sahen auch, dass dieses Prinzip fast wörtlich auch auf die komplexe Atmosphäre zutrifft, nur besteht hier die Nahrung nicht aus hochenergetischer Biomasse, sondern aus hochenergetischen Photonen (die im Wellenbild der Kurzwelligkeit der Solarstrahlung entspricht). Die ausgeschiedene Biomasse entspricht hier den niederenergetischen Photonen, die durch 'Photonenspaltung' entstanden sind (und die im klassischen Wellenbild der emittierten langwelligen terrestrischen Strahlung entspricht).

Den Begriff 'Photonenspaltung' sollte man nicht allzu wörtlich nehmen. Durch Absorption und Emission entstehen Photonen mit geringerer Energie, vermehrt sich also - wegen der vom ersten Hauptsatz verordneten Energiekonstanz - *tatsächlich* die Anzahl der Photonen, aber nicht durch 'Teilung mit dem Messer' in mehrere Teile. Entsprechend reißen die Verdauungsenzyme die biologische Nahrung auch nicht in Stücke, sondern sie bilden neue Bio-Moleküle, die energieärmer und zahlreicher sind und daher eine höhere Entropie verkörpern.

Soviel zur Fauna. Aber wie machen das die Pflanzen, wie ernährt sich die Flora? Pflanzen machen bekanntlich keinen Marathon-Lauf. Sie leben auch *nicht* von einer energiereichen Biomasse, sondern sie *produzieren* diese! Wie kann das sein, zumal sie ja (nur) von H<sub>2</sub>O, von niederenergetischen anorganischen Mineralien aus dem Erdreich und dem in der Luft enthaltenen zu unrecht verteufelten CO<sub>2</sub> leben! Aus solchen Zutaten bauen sie ihre eigene organische Substanz auf, nämlich die hochenergetische Biomasse, die Nahrung von Mensch und Tier! Die Fauna benötigt diese Nahrung *unbedingt*, denn wenn Menschen und 'große' Tiere *ausschließlich* 'kleine' Tiere essen würden, dann gäbe es bald keine kleinen Tiere mehr, und bald auch keine größeren Tiere und schließlich auch keine Menschen mehr.

Aber wie ist das alles vereinbar mit dem ersten Hauptsatz, dem Verbot von Energie-Erzeugung (dem Verbot von Energie-**Quellen**) vereinbar? Wahrscheinlich wissen Sie schon, dass die Flora hierzu den Trick **Photosynthese** anwendet: Sie nutzt - wie die

Atmosphäre! - die elektromagnetische Energie der Sonnenstrahlen. Aber während die Atmosphäre diese Energie in die Energie der Stürme umwandelt, baut die Flora mit ihrer Hilfe die energiereiche Biomasse auf. Außerdem entsteht dabei der Sauerstoff, den die Fauna zum Atmen benötigt. Und das ausgeatmete CO<sub>2</sub> kann ja die Flora wiederum gut gebrauchen - ein perfektes Zusammenspiel, welches allerdings noch komplexer ist als ich es hier geschildert habe → z.B. [UniR-in].

Übrigens ist das von Mensch und Tier ausgeatmete CO<sub>2</sub> natürlich ebenso klimawirksam wie das CO<sub>2</sub> aus fossilen Brennstoffen. Meines Wissens ist die Quantität *dieser* CO<sub>2</sub>-Quelle noch nicht abgeschätzt worden. Rein 'gefühlsmäßig' würde ich sie nicht von vornherein als unbedeutend einstufen, wenn man z.B. bedenkt, dass es allein in Brasilien 70 000 *Arten* von Insekten gibt. Und jede dieser Arten hat eine hohe Population. Und es gibt ja auch viele andere Tierarten. Die Gesamtzahl aller Tiere wird auf eine Trillion ( $10^{18} = 1000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$ ) geschätzt [NK-in], das ist mehr als das das hundert-millionenfache der menschlichen Erdbevölkerung. Diese riesigen, CO<sub>2</sub>-produzierenden Populationen mit ihren zeitlichen Schwankungen und mit ihrem Zusammenspiel mit der ebenfalls schwankenden Flora spielen *ebenfalls* mit bei der Vernetzung *aller* Klima-Variablen. Auch die Pflanzenpopulationen hängen von einer Vielzahl unterschiedlichster, oft auch noch unbekannter Umweltfaktoren ab, → [UniR-in], die in der Klimadebatte nur selten zur Sprache kommen, und die schon gar nicht in Modellen korrekt modelliert werden können.

Am Schluss dieses Kapitels komme ich noch einmal auf einige schon bekannte (→ Seite 150) und auch auf einige neue Fachbegriffe zu sprechen. Diese sich nach und nach einzuprägen lohnt sich, weil dadurch nach und nach für zukünftige Erläuterungen eine Ballast-ärmere Sprache verwendet werden kann. Man tut der Fachsprache unrecht, wenn man sie als 'Slang' bezeichnet, der es Laien unmöglich mache, an naturwissenschaftlichen Erkenntnissen teilzuhaben. Fachbegriffe sind Zusammenfassungen von schon einmal Erklärtem, m.a.W., durch ihre Verwendung kann man 'ewige' Wiederholungen vermeiden. Selbstverständlich sind Wiederholungen ein sehr wichtiges didaktisches Mittel, aber wenn sie *zu oft* geschehen, wird das irgendwann auch dem 'blutigsten' Laien auf die Nerven gehen. Ich hoffe, hier einen akzeptablen Mittelweg zu finden, was natürlich nicht einfach ist, wenn man für ein 'Laien-Spektrum' schreiben möchte, welches vom 'blutigen' Laien bis hin zum 'Fast-Fachmann' oder zur 'Fast-Fachfrau' reicht. Liebe Leserin, lieber Leser, ich wäre höchst erfreut, wenn Sie mir unter 'met\_lange@yahoo.de' eine kurze diesbezügliche Rückkopplung geben könnten.

Wir starten unsere Ergänzung/Wiederholung der Fachwortsammlung zu den Hauptsätzen der Thermodynamik mit der Formel  $de = -pdv + f \cdot dr + Tds$ , die wir auf Seite 184

das letzte Mal angeschrieben hatten. Hier können wir einsetzen die kurz zuvor erläuterte Aufspaltung  $T_{ds} = T_{d_{as}} + T_{d_{is}}$  der Wärme  $\delta q = T_{ds}$  in einen ausgetauschten und in einen intern erzeugten Anteil. Die Arbeit  $\delta a = \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r}$  einer (vektoriellen) Kraft  $\mathbf{f}$ , multipliziert mit dem Weg (Ortsverschiebung  $d\mathbf{r}$ ) kann von jeder der drei in der heutigen Physik bekannten Kräfte leisten, also von der Gravitationskraft, der elektromagnetischen Kraft und der (starken oder schwachen) Kernkraft. Elektrische und magnetische Kräfte sind Sonderfälle der elektromagnetischen Kraft, und chemische Kräfte (Bindungskräfte in Molekülen) sind Sonderfälle der elektrischen Kraft. Elektrische Kräfte sind letztendlich auch wirksam, wenn eine Kolbenfläche in einer Luftpumpe von bewegten Molekülen bombardiert wird. Bezieht man die Summe dieser Kräfte auf die Kolbenfläche, so erhält man den Druck  $p$ . Als wir (z.B. in Kapitel 2.7) von der Arbeit  $\delta a = -p dV$  gesprochen haben, haben wir also Mittelwerte über chemische Kräfte im Auge gehabt, die auftreten, wenn sich Gasmoleküle und Moleküle der Kolbenfläche sehr stark annähern. Unter einem Term  $\mathbf{f} \cdot d\mathbf{r}$  einer Gleichung wie  $d_e = -p dV + \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} + T_{ds}$  hat man also eine beim jeweiligen Stand  $d\mathbf{r}$  Mittelungshierarchie (noch) *ungemittelte* Arbeit zu verstehen. - Nun also ersetzen wir die Wärme  $T_{ds}$  durch  $T_{d_{as}} + T_{d_{is}}$  (was natürlich auch  $ds = d_{as} + d_{is}$  bedeutet) und kommen auf die Gleichung

$$d_e = \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} - p dV + T_{d_{as}} + T_{d_{is}}$$

Die angekündigten 'zum Lernen empfohlenen' Fachbegriffe kennzeichnen Situationen, in denen jeweils einer der Terme dieser Gleichung verschwindet:

$d_e = 0$	isoenergetisch
$\mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} = 0$	Kraft-energisch ( <i>energisch bedeutet 'antriebslos'</i> )
$-p dV = 0$	Druck-energisch, <i>oder einfacher</i> isochor ( $\rightarrow$ Seite 138)
$T_{d_{as}} = 0$	adiabatisch
$T_{d_{is}} = 0$	quasistatisch, <i>auch</i> reversibel ( $\rightarrow$ Seite 150)
$ds = 0$	isentrop

Die letzte Definition, die des Begriffs 'isentrop', ergibt sich nicht aus der obigen Gleichung, sondern aus der Beziehung  $ds = d_{as} + d_{is}$  allein. In Analogie zum Begriff 'isoenergetisch' also  $d_e=0$  ist 'isentrop' nur eine Kurzform für 'isoentropisch', also  $ds=0$ . Wie auf Seite 150 schon beschrieben, kann Isentropie entweder erreicht werden durch gleichzeitige Adiabasie und Quasistasie, also  $d_{as}=0$  und  $d_{is}=0$ , oder durch eine Kompensation von diabatischem s-Export und irreversibler s-Erzeugung (Entropie-Quelle), also  $<0$  und  $d_{is}>0$ , sowie  $|d_{as}|=|d_{is}|$ . Eine Kompensation von diabatischem s-Import und einer s-Vernichtung (Entropie-Senke) zu  $ds=0$  ist jedoch nicht möglich! Auch so kann man den zweiten Hauptsatz formulieren.

## Zusammenfassungen - Verdichtungen - Ergänzungen

Zugegeben, die letzten Bemerkungen des Haupttextes hatten auch schon einen zusammenfassenden Charakter. Aber *noch grundsätzlicher* kann man folgendes sagen: Die Hauptsätze der Thermodynamik befassen sich mit der Energie  $E$  und der Entropie  $S$ . Sie verbieten Energie-Quellen und Energie-Senken (erster Hauptsatz) sowie Entropie-Senken (zweiter Hauptsatz). Beschreibt man diese Aussagen durch Sätze wie

*$E$  ist konstant, kann also weder zu- noch abnehmen, d.h.  $dE=0$ ,*

*$S$  kann nicht abnehmen, nimmt aber in realen (irreversiblen) Prozessen zu  
d.h.  $dS \geq 0$ ,  $dS = 0$  gilt nur in idealisierten (reversiblen) Prozessen*

so sind das Aussagen, die nur entweder für das komplette Universum gelten, oder für isolierte Systeme, (sozusagen Teilsysteme des Systems Universum), die man auch abgeschlossene Systeme nennt, die also weder Stoff noch Energie mit der Umgebung austauschen können. Umgebungs-Systeme sind ebenfalls Teilsysteme des Universums, sozusagen das System Universum 'minus' ursprüngliches Teilsystem). Natürlich ist ein Umgebungs-System ebenfalls isoliert bzw. geschlossen bzw. offen, wenn das Teilsystem die entsprechende Eigenschaft hat.

Die Frage, ob das Universum auch nur ein Teilsystem eines Multiversums ist, kann vielleicht als Denk-Anregung dienen, der wir hier aber nicht nachgehen wollen.

*Nicht* abgeschlossene Systeme sind entweder geschlossen oder offen. Die geschlossenen können Energie, aber keine Stoffe mit dem Umgebungssystem austauschen, die offenen auch Stoffe. Eine Regenwolke ist ein offenes System, denn sie gibt ja Masse in Form von Regentropfen nach außen ab. Unser Paradebeispiel für ein geschlossenes System war das in einer Luftpumpe eingesperrte Gas, welches mit der Umgebung Energie (aber keine Stoffe) austauscht, falls ein Experimentator von außen Arbeit  $\delta A$  und/oder Wärme  $\delta Q$  anwendet.

Die meteorologische Relevanz dieses Beispiels sahen wir darin, dass entsprechende Vorgänge auch in Lagrange'schen Luftpäckchen zu beobachten sind, die z.B. von konvergierend strömenden und anders temperierten Nachbar-Luftpäckchen umgeben sind.

In geschlossenen und in offenen Systemen gelten die Gleichungen

$$dE = \delta A + \delta Q = 0 \text{ (erster Hauptsatz) und } dS \geq 0 \text{ (zweiter Hauptsatz)}$$

nicht, denn Energie und Entropie können ja exportiert oder importiert werden. Allerdings verlangen die Hauptsätze, dass diese Gleichungen *doch* gelten, wenn man

die Summe der Bilanzen für das Teilsystem und für das Umgebungssystem (als 'Rest' des Universums) bildet.

Übrigens wird zur Unterscheidung einer Betrachtung eines Teilsystems oder des kosmisch-globalen Systems sehr oft von lokaler bzw. von globaler Betrachtung gesprochen. Das kann jedoch zu Missverständnissen führen, weil - gerade in der Meteorologie und in der Klimatologie - unter 'global' meist ein Bezug auf unseren 'Globus' gemeint ist, also auf die gesamte Atmosphäre oder auf das Erdsystem, also *nicht* im Sinne von 'kosmisch-global' verwendet wird..

Die Formel  $dE = \delta A + \delta Q = 0$  beschreibt also Energieänderungen, die sich 'kosmisch-global' zu Null kompensieren müssen. Die Formel  $dE = \delta A + \delta Q \neq 0$  besagt z.B., dass lokale Energieänderungen durch Importe oder Exporte geschehen. Hier werden also die Energie-Änderungen durch unterschiedliche Austauschprozesse beschrieben, denn  $\delta A = -p dV$  beschreibt ja die Arbeit als Volumenaustausch (die mit Kompression oder Expansion verbunden ist), und  $\delta Q = T dS$  beschreibt 'Wärme' als Austausch von Entropie. In diesem Zusammenhang haben wir auch erfahren, dass der *Volumenaustausch* nicht die einzig mögliche Arbeit ist, die an Luftpäckchen, Wassertröpfchen usw. geleistet werden kann. Aber auch all die anderen Arbeiten können auf die Grundform

$\delta A = \text{Kraft} \cdot \text{Weg} = \text{Kraft} \cdot \text{Ortsänderung}$  zurückgeführt werden, wie wir das auch im Falle  $\delta A = -p dV$  getan hatten.

Als Kraft tauchten Gravitations-Kräfte und elektromagnetische Kräfte auf, wobei die chemischen Bindungskräfte nur residuale elektromagnetisch Kräfte sind. Die Arbeit der chemischen Kräfte entspricht der Energiegewinnung bei der Nahrungsverwertung von Mensch und Tier, die es dem Experimentator an der Luftpumpe erst ermöglicht hat, die Kompressionsarbeit am idealen Gas zu leisten.

Aber die *Atmosphäre* muss bei der Kompressionsarbeit am Lagrange'schen Luftpäckchen die gleiche Arbeit leisten! Wir haben diese Parallelität noch fortgeführt, als wir im Strahlungshaushalt der Atmosphäre nichts anderes als eine 'Nahrungsverwertung' der Atmosphäre gesehen haben: Im Teilchenbild entspricht die solare Einstrahlung einer Absorption von hochenergetischen Photonen, und die terrestrische Ausstrahlung einer Emission von niederenergetischen Photonen - *aber in einer größeren Anzahl!* Energetisch entspricht diese 'Photonenspaltung' tatsächlich der Nahrungsaufspaltung durch die Verdauungsenzyme z.B. des Experimentators!

Soviel zum Prozess 'Arbeit' und seinen extrem weitreichenden und unerwarteten 'Betätigungsfeldern'. Was den Prozess 'Wärme' betrifft, so mussten wir ebenfalls neue Erfahrungen machen, hier sogar eine 'leidvolle': Wir mussten erfahren, dass

diese 'Wärme' nicht unbedingt mit 'Erwärmung' gleichzusetzen ist. Die auch hier wieder zum Ausdruck kommende 'Kniffligkeit' der Thermodynamik hatte einen schwierigen Lernprozess erfordert, der vielleicht noch nicht bewältigt ist. Aus diesem Grunde werde ich im letzten Unterkapitel 2.9 ein einziges, aber sehr lehrreiches Beispiel erörtern, welches das Potential haben könnte, diese Kniffligkeit in ein AHA-Erlebnis transformieren zu können. (Bei mir persönlich war es jedenfalls so).

Statt wie in  $dE = \delta A + \delta Q$  die lokale Energieänderung durch die Summe aller Prozessgrößen Arbeit und Wärme zu beschreiben - die man *nicht* durch *totale Differentiale* darstellen kann - kann man sie auch als Summe aller Änderungen der beteiligten Energiearten (Energieformen) beschreiben- die man durch *totale Differentiale* darstellen kann:

$$dE = dK + dP + dU$$

K, P und U bezeichnen die kinetische, die potentielle und die innere Energie. Als innere Energie hatten wir *vor* diesem Kapitel nur die thermische Energie gekannt. Hier aber haben wir weitere Anteile von U kennengelernt wie chemischer Energie, angesammelt durch Assimilation der Pflanzen, elektrischer Energie aus Generatoren oder Brennstoffzellen, elektromagnetische Energie des Lichtes und anderer elektromagnetischer Wellen, und die Kernenergie.