

Christian Blöss

Crashkurs

Entropie

EDITION
WISSEN UND HANDELN

**Universelle Aspekte
einer physikalischen
Mengengröße**

Ein Beiheft

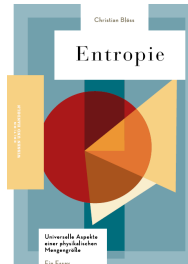
Nachgereichte Vorrede zu
einer bereits erschienenen
Würdigung der Prinzipie der
Wärmelehre

Christian Blöss

Crashkurs Entropie

Nachgereichte Vorrede zu einer bereits
erschienenen Würdigung der Prinzipie
der Wärmelehre

Eine kleine Einführung zu



ISBN 978-3-8391-6620-8

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; über <http://dnb.d-nb.de> sind detaillierte bibliografische Daten abrufbar.

Sappho (*allein*) ... Ach die Gewohnheit ist
Ein lästig Ding, selbst an Verhasstes fesselt sie!
– Franz Grillparzer, Sappho (1818) –

Aktualisierungen und Zusatzmaterial auf www.cbloess.de/entropy/de
© Christian Blöss, Berlin (www.cbloess.de)
Herstellung und Verlag: Books on Demand GmbH, Norderstedt
(www.bod.de)
Umschlaggestaltung: Roman Bittner (www.apfelzet.de)
Version 1 / Nov 10
ISBN 978-3-8423-3145-7

Inhaltsverzeichnis

1. VORWORT	5
2. DIE „HAUPTSÄTZE“ DER WÄRMELEHRE	7
2.1 Ursprung der „Hauptsätze“	7
2.2 „Zweiter Hauptsatz“ und die Folgen	9
2.3 Eine Verwunderung mit Folgen	11
3. ENERGIE-KONZEPT	13
3.1 Was ist Energie?	13
3.2 Energiewandlung	16
3.3 Quantenumwandlung	18
3.4 Energie und Impuls	19
4. STANDARD-DEFINITION DER ENTROPIE	21
4.1 Konzept oder Prinzip?	21
4.2 Pensum und Potential	22
4.3 Wärmeströme	25
4.4 Gastemperatur	28
5. DIE FRAGE DER UNIVERSALITÄT	31
5.1 Mechanistische Wurzeln	31
5.2 Jonglieren mit Bilanzen	34
5.3 Unsinnige Entropie-Reservoirs	37
5.4 Unnötige Entropie-Erhaltung	41
5.5 Wenn die Gewaltenteilung aufgehoben ist	44
5.6 Alternativer Definitionsansatz	46
6. KLEINE GESCHICHTE DER QUANTENTHEORIE	49
6.1 Geburt der Quantentheorie	51
6.2 Ein Entrepreneur	53
6.3 Schlag auf Schlag	55
6.4 Entropiequanten	58

7. QUANTENNATUR DER ENTROPIE	61
7.1 Plancks Quanten	61
7.2 Entropie- und Lichtquantendichte	63
7.3 Vollendung der planckschen Quantenrevolution	65
7.4 Konsequenzen	69
8. DAS ENDE DES „ZWEITEN HAUPTSATZES“	73
8.1 Bedeutung	73
8.2 Verifizierbarkeit	77
8.3 Entropieproduktion	79
8.4 Eine abschließende Überlegung	82
9. ANHÄNGE	85
9.1 Literatur	85
9.2 Abbildungen	86
9.3 Danksagung	86
9.4 Ihre Notizen	87

Dieses Büchlein ist dem
Andenken meines Freundes
Hans-Ulrich Niemitz
gewidmet

1. Vorwort

Eigentlich sollte es nur ein Artikel angemessenen Umfangs über Entstehen und vor allem Vergehen des „Zweiten Hauptsatzes“ für die Zeitschrift „Zeitensprünge“ werden [Blöss 2010a]. Binnen kurzem entwickelte sich dieser Text jedoch zu einer Kurzfassung des Buches, von dem er abstammt: „Entropie. Universelle Aspekte einer physikalischen Mengengröße“ [Blöss 2010].

Dieses Büchlein erscheint gut ein viertel Jahr nach dem Hauptwerk. Es zeichnet dessen Argumente, warum die Grundlagen unserer Wärmelehre nicht von universeller Gültigkeit sein können, kurz und bündig nach:

- Entropie als quantisierte Mengengröße ist auch „reversibel“ quellfähig.
- Ohne Erhaltungseigenschaften hat die Definition der Entropie als $dS = \delta Q/T$ keinen Bestand.
- Bisher als universell gültig erachtete wesentliche Einschränkungen für die Energietechnik entfallen.

Ein Blick in die Geschichte der Physik zeigt, dass die plancksche Quantenhypothese zwar die Quantenrevolution der Physik auslöste, in ihrer ursprünglichen Stoßrichtung jedoch unverstanden blieb.

Deshalb blieb unberücksichtigt, dass Licht – welches selbst im einfachsten System der Wärmelehre anwesend ist (also auch in einem gasgefüllten Zylinder mit Arbeitskolben) – energetisch genauso berücksichtigt werden muss wie alle anderen physikalischen Mengen.

Die Vermutung, sich dieser Aufgabe mit Einführung der Entropie schon längst entledigt zu haben, wäre schon damals nicht von der Hand zu weisen gewesen.

Angenommen, die Quanten des Lichts sind auch die der Entropie. Dann wird diese zentrale Größe der Physik nach einer Ära chimärenhaften Daseins endlich direkt messbar, nämlich aus der Photonendichte eines Systems und der Elementarmenge der Entropie, die auf ihre Entdeckung gewartet hat, seit Ludwig Boltzmann die Entropie der Hohlraumstrahlung ableitete.

Damit würde der „Zweite Hauptsatz“ – dessen Rücken-deckung als unverzichtbar gilt, solange man wegen der Unmessbarkeit der Entropie mit dem Rücken zur Wand steht – überflüssig werden. Überrascht es noch, dass die aktuelle Entropie-Definition mit Zusatzannahmen erschlichen wird, die nur deswegen unangreifbar erscheinen, weil die Entropie keiner direkten Messung zugänglich ist?

Eine Würdigung der Wärmelehre, die diese Erkenntnisse miteinbezieht, erlaubt es schließlich auch, einige für unüberwindlich gehaltene Restriktionen in der Energietechnik neu zu bewerten – eine interessante Ausgangssituation, um dringend benötigte Konzepte zur Energieversorgung zukunftssicherer gestalten zu können.

Berlin, 13. November 2010

Literaturhinweise des Formats [E 123] verweisen auf das Buch „Entropie“ des Autors [Blöss 2010, 123].

2. Die „Hauptsätze“ der Wärmelehre

2.1 Ursprung der „Hauptsätze“

Es ist mittlerweile 145 Jahre her, dass Rudolf Clausius die Erkenntnisse der damals noch jungen mechanischen Wärmetheorie in zwei „Grundgesetzen des Weltalls“ zusammenfasste [Clausius 1865, 400]:

- Die Energie der Welt ist konstant.
- Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.

Diese Sätze stammen aus einer Zeit, in der wissenschaftliche und gesellschaftliche Elite gleichermaßen von unbegrenztem technischem und damit ökonomischem Fortschritt in einer restlos entzifferbaren Natur ausging [Neswald 2006] – hüben (libertär) wie drüben (sozialitär).

Der paradigmatische Charakter dieses epochalen Modells ist schon längst Geschichte. Die beiden „Hauptsätze“ dagegen haben von ihrer Legitimität nichts eingebüßt. Was Wunder, könnte man meinen, wo sie doch tiefer gehen als alles, was Zeitgeist aus ihnen herauszulesen vermag.

Was aber, wenn die Bedingtheit der mit ihnen verbundenen Konzepte nur deswegen verborgen geblieben ist, weil man sich von ihrem Zauber (bzw. vom Zauber der mit ihnen verbundenen Interpretationen) nicht lösen konnte?

Das Entropie-Konzept, das sich aus dem „Zweiten Hauptsatz“ ableiten lassen soll, wird für genauso bedingungslos wahr gehalten wie dieser selbst. Doch wenn ein Konzept nicht mit falsifizierbaren Annahmen und Schlussfolgerungen verbunden ist, wie kann es sich dann um ein naturwissenschaftliches Konzept handeln?

Bei der immensen Bedeutung, die den beiden „Hauptsätzen“ für die Energietechnik und damit für den Wohlstand der Nationen zuwächst, muss es deshalb als ein gefährliches Missverständnis bezeichnet werden, wenn die Stimmigkeit eines Konzeptes für selbstverständlich gehalten wird, nur weil die verbale Aussage, der es entstammt, selbstverständlich zu sein scheint.

Dieses Missverständnis steht im Schutze eines höfischen Zeremoniells, auf dessen Einhaltung im Umgang mit den beiden „Hauptsätzen“ strengstens geachtet wird. Und zwar nicht nur im inneren Zirkel der Physik, sondern – strenger noch! – in ihrer Peripherie, der „Populärwissenschaft“. Dieses Zeremoniell verlangt, dass jegliche Kritik der Elementarannahmen der Wärmelehre – auch wenn sie tatsächlich einem falsifizierbaren naturwissenschaftlichen Konzept gilt – als Symptom mangelnden Fachwissens bloßgestellt¹ und so im Keim erstickt wird.

1 So hat etwa Klaus Knizia, bis 1992 Vorstandsvorsitzender der VEW (heute zur RWE gehörig), maßgebliche Beiträge für den „Knigge“ im Umgang mit dem „Zweiten Hauptsatz“ geliefert. In der Vision, vermehrt erneuerbare Energien nutzen zu wollen, sah er einen Verstoß gegen den „Zweiten Hauptsatz“, den sich der wissenschaftlich-technische Berufsstand – und mit ihm auch alle informationell nachgeschalteten Berufsstände (insbesondere die Politik) – aus Gründen der Ethik und aus Gründen der Vernunft nicht leisten könne und nicht leisten dürfe [Knizia 1986].

Aus dieser (Selbst)Blockade der kreativen Energie zahlreicher Wissenschaftlergenerationen hat sich ein massiver „Kritikstau“ ergeben, dessen Auflösung einige Überraschungen mit sich bringen wird.

Eine Kritik² des Energie-Konzeptes, welches mit dem „Ersten Hauptsatz“ verbunden ist, mündet in der Aufforderung, zugunsten neuer Energietechniken nach bisher unbekanntem Quanten zu suchen, die sich mit gewissen bereits bekannten Quanten quantitativ umwandeln können. Dieser Ansatz soll allerdings nur soweit gestreift werden, wie es für die Kritik des Entropie-Konzeptes erforderlich ist. Diese wiederum mündet in der Aufforderung, die Eigenschaften der längst bekannten Quanten der Entropie besser zugunsten bestehender Energietechniken auszunutzen.

Alle Aufmerksamkeit wird sich hier auf die Frage richten, ob zu Recht oder zu Unrecht davon ausgegangen wird, dass das aktuelle Entropie-Konzept universell gültig ist.

2.2 „Zweiter Hauptsatz“ und die Folgen

Ursprünglich brach sich der „Zweite Hauptsatz“ als ein *memento mori* der Menschheit Bahn, da am Ende aller Zeiten offenbar jeglicher Spielraum für Vielfalt und Leben verschwunden sein würde.

Diese Interpretation ist mittlerweile in den Hintergrund getreten. Einmal, weil selbst die Vergangenheit des Kosmos nicht hinreichend sicher aufgeklärt werden konnte. Und dann auch, weil die Dynamik von Zerfall

2 Kritik würdigt ihr Objekt nicht herab, sondern fragt nach den Bedingungen, unter denen es zur Erkenntnisgewinnung beiträgt.

und Nivellierung in einer modernen Physik offener Systeme nur einen vergleichsweise uninteressanten Grenzfall darstellt.

Nichtsdestotrotz ist der Satz, dass die Entropie (und nach statistischer Lesart damit auch die Unordnung) eines abgeschlossenen Systems nur zunehmen könne, zur stehenden Redensart geworden und hat sich tief in das kollektive Gedächtnis der Menschheit eingegraben. Ihn umgibt eine Aura der Evidenz, von der sowohl der „Zweite Hauptsatz“ der Wärmelehre als auch das mit ihm verbundene Entropie-Konzept umfänglich profitieren. Dieser Umstand ist bemerkenswert und bedauerlich zugleich.

Bemerkenswert ist er, weil sich der Satz von der zunehmenden Entropie im Kontext der Wärmelehre gar nicht herleiten lässt (Kapitel 8.3) und dem „Zweiten Hauptsatz“ deshalb weder zugeschrieben noch angelastet werden kann. Bedauerlich ist er, weil so die eigentliche Herausforderung an den „Zweiten Hauptsatz“, nämlich eine Definition der Entropie zu ermöglichen, völlig in den Hintergrund gedrängt wird.

Die tatsächliche Reichweite des aktuellen Entropie-Konzeptes zu ergründen, ist schon deswegen alle Anstrengung wert, weil es mit Folgerungen verbunden ist, die schon immer niederschmetternd gewesen sind und die die Bewältigung der heraufziehenden energiepolitischen Herausforderungen keineswegs leichter machen. Diese Folgerungen betreffen insbesondere den thermischen Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen, der in einer Weise temperaturabhängig sein soll, dass sich vertretbare Werte erst durch die Verbrennung bzw. Spaltung fossiler Rohstoffe erzielen ließen [E 16].

Dies gilt als so selbstverständlich, dass sich keines der Konzepte zur Sicherstellung der zukünftigen Energieversorgung [EWI et al. 2010; FVEE 2010], die jüngst von der Bundesregierung in Auftrag gegeben worden sind, mit folgender Frage aufhält:

- Ließe sich die als maßgeblich erkannte Energieeffizienz auch durch eine Kraftwerkstechnik erhöhen, die sich aus einem tieferen Verständnis von Entropie ableitete?

Woraus könnte ein solches tieferes Verständnis der Entropie erwachsen, das mit der Erkenntnis, sie sei ein Maß für die Unordnung eines Systems, seinen Gipfel doch bereits erreicht haben soll?

2.3 Eine Verwunderung mit Folgen

Das tiefere Verständnis von Entropie könnte aus einer Verwunderung erwachsen, die sich bei unbeirrter Bemühung um eine saubere Begründung der Grundlagen der Wärmelehre früher oder später einstellen muss:

- Warum ist die Quantenrevolution der Physik komplett an der Wärmelehre vorbei gegangen?

Diese Verwunderung wurzelt in der Tatsache, dass der „Zweite Hauptsatz“ mit der Entropie eine physikalische Größe hervorgebracht hat, die prädestiniert gewesen wäre, „im selben Abwasch“ wie Stoff, Ladung und Drehimpuls in den Kanon quantisierter Mengengrößen aufgenommen zu werden. Dass sich die Entropie am Ende sogar als dienstälteste quantisierte Mengengröße der Physik herausstellen wird, unterstreicht nur die Legitimität der Forderung, ihre aktuelle Definition unter allgemeineren Gesichtspunkten auf den Prüfstand zu stellen.

Eine Quantisierung hätte der Entropie auch gut zu Gesicht gestanden, wäre sie dadurch doch endlich direkt messbar geworden. Doch ein solches Revirement hat an der Basis der Wärmelehre nie stattgefunden. Offenbar fühlte man sich mit dem „Zweiten Hauptsatz“ stets so sicher aufgehoben, dass die Tatsache, mit ihm nur mittelbar auf die Entropie eines Systems schließen zu können, nicht als Nachteil empfunden wurde.

Wenn alsbald klar geworden wäre, dass selbst das nicht ohne Annahmen zu haben ist, die sich bei genauerem Hinsehen als unnötig oder sogar als unsinnig herausstellen müssen, dann wären gewisse Überlegungen zur Quantennatur der Entropie vielleicht schon früher in Gang gekommen.

In der Geschichte der Quantentheorie selbst taucht kein Experiment auf, dessen Ergebnis die Quantisierung der Entropie nahegelegt oder sogar erzwungen hätte. Dafür begegnet uns an der Wiege der Quantentheorie eine physikalische Mengengröße, die als solche unerkannt blieb, obwohl ihr Quant im Jahr 1900 postuliert wurde, es sich fünf Jahre später direkt zu erkennen gab und seine Existenz mittlerweile als selbstverständlich gilt. Einiges spricht dafür, dass es sich bei dieser Mengengröße tatsächlich um die Entropie und ihr Quant handelt.

Sollte dies zutreffen, dann wäre der gordische Knoten der Wärmelehre – weder die Substanz von Entropie zu kennen, noch sie in Unkenntnis ihrer Quanten direkt messen zu können – mit einem Schlage durchhauen, und dies auch noch mit erheblichen Konsequenzen für die Energietechnik.

7. Quantennatur der Entropie

7.1 Plancks Quanten

Unter Physikern besteht die einhellige Meinung, dass Planck die Energie quantisiert bzw. „diskretisiert“ [Ehlotzky 2004, 2] habe: Elektromagnetische Strahlung würde in „Energiepaketen“ absorbiert oder emittiert [Schwister ³2008, 27]. Selbst Einstein sprach von „diskreten Energie-Elementen“ [1917, 121], aus denen sich die elektromagnetische Strahlung zusammensetzen würde.

Diese Interpretation ist physikalisch gesehen jedoch haltlos. Tatsächlich tritt Energie nur dann „quantisiert“ d.h. mit diskreten Werten auf, wenn die Größe, aus der sie sich ableitet, quantisiert ist. So drückt sich der Wechsel eines Bindungselektrons zwischen zwei Bahnen letztlich nur deswegen in diskreten Emissions- bzw. Absorptionslinien eines Spektrums aus, weil dessen Bahndrehimpuls quantisiert ist. Und ein kontinuierliches Spektrum kommt dann zustande, wenn sich die zugrundeliegende Größe in beliebigem Maße ändern kann, wie es beispielsweise beim Impuls ungebundener Teilchen offenbar der Fall ist.

Wäre die Energie selbst eine quantisierte Größe, so müssten sich auch entsprechende Quanten bzw. Elementarteilchen nachweisen lassen, die jeweils die Elementarmenge der Energie repräsentierten. Dafür gibt es jedoch keinerlei Anzeichen. Die Wärmelehre errechnet die Energie eines Systems ja auch nicht aus der An-

zahl von „Energieteilchen“, sondern bezieht sie auf sein Inventar an „substanziellen“ physikalischen Mengen bzw. auf *deren* Quanten [E 57].

Der Konsens über die vermeintliche Stoßrichtung der planckschen Quantenhypothese, nämlich auf die Energie gerichtet zu sein, ist schon deswegen unverständlich, weil ausgerechnet der experimentelle Befund zur Hohlraumstrahlung ja „Energiepakete“ beliebigen Ausmaßes anzeigt. Von diskreten Eigenwerten der Energie kann gerade hier also gar keine Rede sein.

Wenn die plancksche Quantenhypothese also nicht der Energie galt, an welche physikalische Größe richtete sie sich stattdessen? Diese Frage muss folgendermaßen beantwortet werden:

- Indem Planck das Modell des Strahlungskontinuums aufgab und dafür eine begrenzte Menge an Trägern von Lichtenergie postulierte, formulierte er eine Quantisierungsbedingung an die physikalische Menge „Licht“.

Damit stellte Planck Licht auf dieselbe Stufe wie Ladung, Stoff sowie den Bahn- und Eigendrehimpuls von Elementarteilchen: „Licht“ bezeichnet eine physikalische Menge, die sich aus einer Anzahl entsprechender Elementarteilchen – hier den Photonen – zusammensetzt und sich auch entsprechend berechnen lassen muss, nämlich als Vielfaches einer Lichtelementarmenge.

Dass der Begriff „Lichtelementarmenge“ noch nie gefallen ist, darf als klares Indiz gewertet werden, dass die Geburt der physikalischen Menge „Licht“ vor nunmehr 110 Jahren an den Physikern komplett vorbeigegangen ist.

7.2 Entropie- und Lichtquantendichte

Obwohl sich die Quantisierungsbedingung Plancks also eindeutig an Licht richtete, kommt deren Menge in der Wärmelehre, die sämtliche physikalischen Mengengrößen nach einem einheitlichen Schema zu behandeln hat [E 57], definitiv nicht vor.

Zu dieser Verwunderung passt natürlich die bereits virulente Verwunderung, dass im Kanon quantisierter physikalischer Mengengrößen ausgerechnet diejenige Größe fehlt, die das Wesen der Wärmelehre bestimmt, nämlich die Entropie. Eine denkbar einfache Auflösung erführe diese „Doppelverwunderung“, sollte sich am Ende herausstellen, dass Entropie- und Lichtmenge identisch sind.

Die in Tabelle 2 aufgeführten Größen – Menge, Elementarmenge und Anzahl – stehen für ein gewisses universelles Schema, nach dem sich eine jede physikalische Menge M als Produkt aus der Anzahl N der enthaltenen Quanten und der jeweiligen Elementarmenge k darstellen lässt (wobei es sein kann, dass sich alles zu Null addiert, obwohl die einzelne Quanten jeweils einen endlichen Beitrag liefern; davon kündigt auch das häufiger auftretende \pm -Zeichen vor der Anzahl in Tabelle 2):

$$\text{Menge } M = \overbrace{N}^{\text{Anzahl der Quanten}} \cdot k \quad \text{Elementarmenge (Naturkonstante)}$$

Dabei sind die Elementarmengen als Naturkonstanten aufzufassen, was für das plancksche Wirkungsquantum h (als Elementarmenge des Drehimpulses) und die Elementarladung e (als Elementarmenge der elektrischen

Ladung) geläufig ist, für die weniger vertraute Stoffelementarmenge k_A (also für den Kehrwert der avogadro-schen Konstante [E 170]) aber ebenso gelten muss.

Während die Photonendichte („Anzahl“ an Photonen je Volumeneinheit) eines Systems als physikalisch sinnvolle Größe gilt – und zum Beispiel bei Hohlraumstrahlung gemäß Gleichung (11) auch modellhaft berechnet werden kann –, wurde weder die Menge σ noch die Elementarmenge k_P von Licht systematisch untersucht.

Umgekehrt beschäftigt sich die Wärmelehre natürlich mit der Entropiemenge S eines Systems, ohne aber etwas zur Elementarmenge k_C der Entropie bzw. der Anzahl N ihrer Quanten sagen zu können (bzw. sich dazu veranlasst zu sehen).

Mengengröße	Menge	Elementarmenge	Anzahl
Spin	s	\hbar	$\pm 1/2$
Stoff	n	k_A	N
Bahndrehimpuls	L	\hbar	$\pm N$
Ladung	Q	e	$\pm N$
Licht	σ	k_P	N
Entropie	S	k_C	N

Tabelle 2: Zusammenstellung quantisierter Mengengrößen mit ihren jeweiligen Elementarmengen. Die Indizes an den Elementarmengen für Stoff, Licht und Entropie beziehen sich aus historischen Gründen auf Avogadro, Planck bzw. Clausius (oder auch Carnot, je nach Vorliebe). Die Größen in den grau hinterlegten Bereichen haben bisher entweder kein Interesse erfahren oder wurden in ihrer Bedeutung gar nicht wahrgenommen.

In Anbetracht der Tatsache, dass Licht (als Ensemble von Photonen) einerseits ein selbstverständlicher – und für alle Umwandlungsvorgänge auch unverzichtbarer – Bestandteil jedes Systems der Wärmelehre ist, andererseits als Menge bei allen Bilanzen jedoch unberücksichtigt bleibt, muss logischerweise folgende Frage in den Raum gestellt werden:

- Handelt es sich bei der Entropiemenge tatsächlich um die Menge des Lichts?

Falls ja, dann wären die Quanten des Lichts mit denen der Entropie identisch und müsste das Verhältnis aus Entropiemenge und Photonenanzahl eines beliebigen Systems (wie immer man auch die Entropiemenge zu bestimmen vermag) stets denselben Wert ergeben. Als Naturkonstante repräsentierte dieser Wert die Elementarmenge des Lichts bzw. der Entropie.

Tatsächlich gibt es ein System, für das die universelle Konstanz des Verhältnisses aus Entropie- und Photonendichte schon längst nachgewiesen wurde, ohne dass diese Tatsache ein kritisches Maß an Aufmerksamkeit hervorgerufen hätte. Dabei handelt es sich um dasselbe System, dessen Charakteristik einst die Quantenrevolution der Physik ausgelöst hatte, nämlich um „Hohlraumstrahlung“.

7.3 Vollendung der planckschen Quantenrevolution

Aus dem planckschen Strahlungsgesetz für die spektrale Energiedichte von Hohlraumstrahlung kann die damit verbundene Photonendichte $N(T)$ direkt abgeleitet werden [E 223]. Damit lässt sich berechnen, wie viele

Lichtteilchen sich bei einer bestimmten Temperatur in dem Hohlraum befinden. Dabei wächst die Anzahl der Lichtteilchen (je Volumeneinheit) mit T^3 :

$$N(T) = \frac{16\pi \cdot \zeta(3) \cdot k_B^3}{h^3 \cdot c^3} \cdot T^3 \quad (11)$$

Die Ähnlichkeit zum Stefan-Boltzmann-Gesetz, welches die gesamte Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers in einer T^4 -Abhängigkeit beschreibt, ist dabei kein Zufall.

Bereits im Jahre 1884 hatte Ludwig Boltzmann die Entropiedichte $s(T)$ der Hohlraumstrahlung berechnet und damit eine „wahre Perle der theoretischen Physik“ [E 221] erschaffen. Diese Entropiedichte der Hohlraumstrahlung wächst nun ebenfalls mit T^3 :

$$s(T) = \frac{32\pi^5 \cdot k_B^4}{45 \cdot h^3 \cdot c^3} \cdot T^3 \quad (12)$$

Daher ergibt sich das Verhältnis³³ aus Entropie- und Photonendichte der Hohlraumstrahlung als Naturkonstante, nämlich als ein gewisses Vielfaches der boltzmannschen Konstanten k_B :

$$k_C = \frac{s(T)}{N(T)} = \frac{2\pi^4}{45 \cdot \zeta(3)} \cdot k_B = 3,601576 \cdot k_B \quad (13)$$

Dass gerade die boltzmannsche Konstante in die Elementarmenge der Entropie eingeht, ist am Ende keine riesengroße Überraschung. Schließlich sind die Einhei-

³³ Das setzt voraus, dass das thermische Potential der Hohlraumstrahlung als Gastemperatur angesetzt werden darf und von daher selbst nur einen Grenzfall darstellen kann. Siehe auch die Fußnote 26 in Kapitel 6.1.

ten von boltzmannscher Konstante und Entropie identisch, weswegen erstere ohnehin als Kandidat für die Entropieelementarmenge³⁴ in Frage gekommen wäre [E 224].

Sollte die gesuchte, über die Photonendichte bestimmbare Lichtmenge tatsächlich mit der bereits bekannten, als unmessbar geltenden Entropiemenge identisch sein, so würde im wahrsten Sinne des Wortes ganz neues Licht auf die Entropie als dem „Wärmestoff“³⁵ der Physik fallen. Auch die Entropie ließe sich nunmehr grundsätzlich an jedem Zustand bestimmen, nämlich ebenfalls aus der Anzahl der im System enthaltenen Photonen bzw. Lichtteilchen.

Das thermodynamische Modell der Hohlraumstrahlung bezieht sich dabei keineswegs auf „reines Licht“. Es bezieht sich vielmehr auf jedes System, dessen Inventar (ausschließlich) in den Mengengrößen Licht und Impuls veränderlich ist, wobei der Impuls von Licht(teilchen) getragen sein muss. Mithin kann das System (rein gegenständlich betrachtet) auch Stoff enthalten, solange

34 In seiner Abhandlung „Was ist eigentlich Atomistik? Oder: die physikalische Größe »Menge« deutete Gottfried Falk an [1978, 7], dass die Entropie zu den universell quantisierten Größen mit der boltzmannschen Konstante als Elementarmenge zu rechnen wäre, vertröstete seine Leser jedoch auf eine gesonderte Untersuchung zu diesem Thema, die mir bisher jedoch nicht bekannt geworden ist. Wundern würde es mich nicht, wenn Gottfried Falk die hier dargelegten Überlegungen selbst angestellt hätte, da er den Erhaltungs- und Umwandlungseigenschaften physikalischer Mengengrößen große Aufmerksamkeit schenkte.

35 Es ist nicht ohne Ironie, dass die als „mittelalterlich“ empfundenen und letztlich überwunden geglaubten Wärmestofftheorien im Hinblick auf ihre Unterstellung, dass Wärme eine Substanz sei (Phlogiston, Caloricum), zu rehabilitieren sein werden.



Abbildung 7.1: Beim Bau des neuen Rathauses von Schilda wurden die Fenster vergessen. Der Versuch es taghell zu machen, indem man Licht wie Wasser mit Eimern in das Rathaus trug, schlug nur fehl, weil man vergessen hatte, die Entropiedichte in den Eimern zu optimieren, etwa durch eine angemessene Temperierung ihrer Wandungen. Über Absorptions- und Reflexionseigenschaften der Zimmerwandungen für Licht hätte man sich allerdings auch einige Gedanken machen müssen.

sich weder dessen Menge noch die Menge des Impulses ändert, der von Stoff(teilchen) getragen wird. Zum Beispiel darf die Hohlraumwandung, die mit der Strahlung wechselwirkt, zum System hinzugezählt werden, solange Übergänge zwischen den Anregungszuständen der Hohlraumwandungs-Elemente nur auf der Umverteilung des Drehimpulses der gebundenen Elektronen beruhen [E 165].

Die spektrale Energiedichte der Hohlraumstrahlung konnte von Albert Einstein schließlich auch durch ein Quantenmodell der Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlung abgeleitet werden [Einstein 1916]. Damit wies er letztlich auch einen Weg, wie die Entropie eines Systems zukünftig modellhaft bestimmt werden kann. Andererseits werden natürlich verfeinerte Methoden zur Messung der Photonendichte eines Systems benötigt, um die Entropie eines Systems direkt messen zu können.

7.4 Konsequenzen

Das thermische Pensum beziffert also in letzter Konsequenz die Änderung der Energie der enthaltenen Photonen, die sich wiederum aus der Änderung ihrer spektralen Verteilungsdichte bzw. ihrer spektralen Impulsdichte ableitet. Die kinetische Energie der ruhemassebehafteten Teilchen des Systems steht damit zwar im engen Zusammenhang, doch bildet sich ihre Änderung im mechanischen Pensum ab.

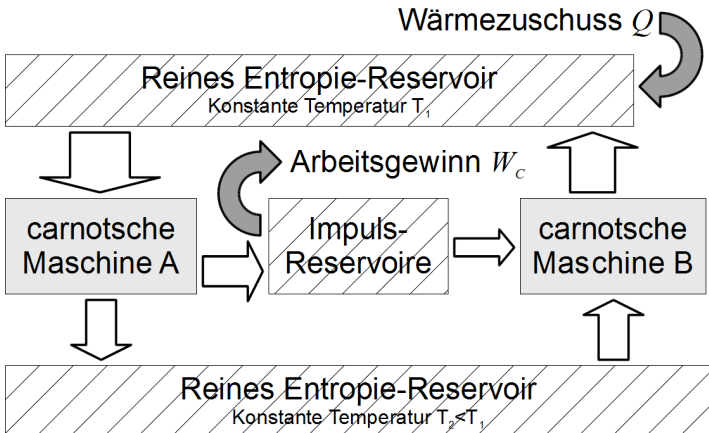
Da die Elementarteilchen des Lichts, die Photonen, innerhalb eines Systems permanent durch Absorption vernichtet bzw. durch Emission erzeugt werden, liegt die Vermutung nahe, dass sich die (mittlere) Anzahl von Photonen eines Systems verringern bzw. erhöhen lässt, ohne dass dieses dafür Licht bzw. „Wärme“ austauschen muss. Sollte diese Vermutung zutreffen, dann darf die Entropie nicht mehr wie bisher als Erhaltungsgröße behandelt werden.

Da die Standard-Definition der Entropie mit der Annahme steht oder fällt, dass sich Entropie „reversibel“ weder erzeugen noch vernichten lässt [E 255], müsste sie

Abbildung 7.2: *Perpetuum mobile* zweiter Art

Das Bild zeigt das „Energieflussdiagramm“ eines *Perpetuum mobile* zweiter Art, das durch zwei gegenläufig arbeitende Carnotsche Maschinen realisiert wird, die unterschiedliche Wirkungsgrade aufweisen. Arbeitet die Maschine mit dem niedrigeren Wirkungsgrad als Wärmepumpe, so ließe sich der „Arbeitsgewinn“ W_C mit Hilfe eines „Wärmezuschusses“ Q ohne Zustandsänderung des Wärme-Reservoirs mit der niedrigeren Temperatur T_2 erzielen. Auf diesem Wege ließe sich Wärme vollständig in Arbeit verwandeln, ohne wie üblich auf ein Temperaturgefälle angewiesen zu sein, das (etwa durch Verbrennung) aufrechterhalten werden muss.

In realiter gibt es keine isothermen Entropie-Reservoirs, d.h. Wärme-Reservoirs, die bei konstanter Temperatur Entropie austauschen können, ohne dafür Ströme weiterer Mengensorten zu benötigen und ohne dass weitere (dann ebenfalls zu bilanzierende) Penssa aufgrund entsprechender Inventaränderungen in ihnen anfallen. Diese Konstruktion demonstriert allenfalls die Folgen unreflektierten Umgangs mit physikalischen Theorien.



dann einem allgemeineren Ansatz weichen. Dementsprechend mutierte das thermische Potential der Wärmelehre, welches bisher universell mit der Gastemperatur T identisch zu sein hatte, zu einer systemspezifischen Funktion τ . Davon wäre dann automatisch auch der Faktor $1/k_B T$ in der Boltzmanverteilung betroffen, da dieser direkt aus dem thermischen Potential abgeleitet wird (nämlich durch einen Vergleich zwischen phänomenologischer und statistischer Entropie [E 288]).

Wenn das thermische Potential doch eine systemspezifische Funktion ist, dann entfielen damit auch eine entscheidende Randbedingung für die Konstruktion von Wärmekraftmaschinen: Die direkte theoretische Begrenzung ihres thermischen Wirkungsgrades durch die Temperaturen der beiden Wärmeübertrager, die für ihren Betrieb benötigt werden [E 18].

Mit anderen Worten: Rein theoretisch sollte es dann möglich sein, selbst Niedertemperaturwärme mit ökonomisch interessantem, hohem Wirkungsgrad in nutzbare Energie zu verwandeln – eine nicht unbedeutende Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz, wie sie auch von höchster politischer Stelle als Beitrag zur Sicherung der zukünftigen Energieversorgung gefordert wird [BMWI/BMU 2010, 11].

Damit aber nicht genug, denn es steht nunmehr auch im Raum, dass die Konstruktion eines *Perpetuum mobile* zweiter³⁶ Art möglich wäre. Schließlich hat bislang

36 Eine „normale“ Wärmekraftmaschine benötigt zwei Wärme-Reservoirs, um mechanische Arbeit leisten zu können – eines um Wärme (bei hoher Temperatur) zu empfangen und eines um diese (bei niedrigerer Temperatur) abgeben zu können. Ein *Perpetuum mobile* zweiter Art dagegen leistet mechanische Arbeit, indem es lediglich einem Reservoir Wärme entzieht. Weil dieses

die Standard-Definition der Entropie dafür garantieren müssen, dass es ein reines Gedankenexperiment bleiben muss und niemals realisierbar sein würde. Ist diese Definition umgekehrt nicht mehr gewährleistet, dann scheint die Logik zu gebieten, dass die Konstruierbarkeit eines *Perpetuum mobile* zweiter Art nicht mehr ausgeschlossen werden kann.

Doch so einfach ist die Sache (leider) nicht, denn es muss auch ein Preis für die Erkenntnis, dass eine Theorie fehlerhaft bzw. zu einschränkend formuliert ist, entrichtet werden: Deren Schlussfolgerungen – und seien sie noch so verlockend – können nicht mehr ohne weiteres in Anspruch genommen werden (Abbildung 7.2). Deshalb wird uns die Vision vom *Perpetuum mobile* zweiter Art möglicherweise in dem Moment aus den Händen gleiten, in dem wir die Fehlerhaftigkeit derjenigen Theorie erkennen, die sie hervorgebracht hat (wenn auch nur zu dem einzigen Zweck, diese Vision mit Abscheu belegen zu können).

Dieser bedauerliche Verlust wird voraussichtlich durch ein tieferes Verständnis der Substanz von Wärme bzw. dem „Stoff“, aus dem sie erwächst, wettgemacht. Eine Physik der Lichtkraftmaschinen, die die bisherige Physik der Wärmekraftmaschinen als Grenzfall beinhaltet, wird dann nicht lange auch sich warten lassen.

grundsätzlich eine beliebige Temperatur haben kann, würde es ohne Einsatz von Primärenergie, nur unter Ausnutzung der Umgebungswärme wirken können.

8. Das Ende des „Zweiten Hauptsatzes“

Zum Abschluss betrachten wir den „Zweiten Hauptsatz“ der Wärmelehre, dem soviel Huldigung entgegengebracht wird und der für die zentrale Herausforderung an die Wärmelehre – die Substanz zu erkennen, aus der „Wärme“ hervorgeht – doch keinen Erkenntnisgewinn beisteuern kann.

8.1 Bedeutung

Die Physik leitet die als nötig erachtete Entropie-Definition nicht etwa aus dem „Zweiten Hauptsatz“ ab. Diese erwächst vielmehr – entsprechend Gleichung (10) – aus folgender „Elementarannahme“ [E 252]:

- Der thermische Wirkungsgrad einer Carnotschen Wärmekraftmaschine ist von den Eigenschaften ihres Arbeitsstoffs unabhängig.

Da sich dieser Satz nicht von selbst versteht (und mehr ist in diesem Zusammenhang auch nicht wichtig), muss er aus einem anderen wahren Satz abgeleitet werden. Einzig diese Aufgabe wird dem „Zweiten Hauptsatz“ im Rahmen der Physik aufgebürdet, der da lautet (in einer von mehreren Fassungen) [E 259]:

- Es ist unmöglich eine zyklisch arbeitende Maschine zu konstruieren, deren einzige Wirkung darin besteht, ein Wärme-Reservoir abzukühlen und ein anderes zu erwärmen.

Auch dieser Satz versteht sich nicht eben von selbst, weshalb auch er aus einem anderen wahren Satz abgeleitet werden muss. In diesem Fall geht es endlich um einen Satz, der sich von selbst versteht, nämlich um folgende „Elementargewissheit“ [E 260]:

- Wärme fließt von allein stets von einem wärmeren zu einem kälteren Reservoir.

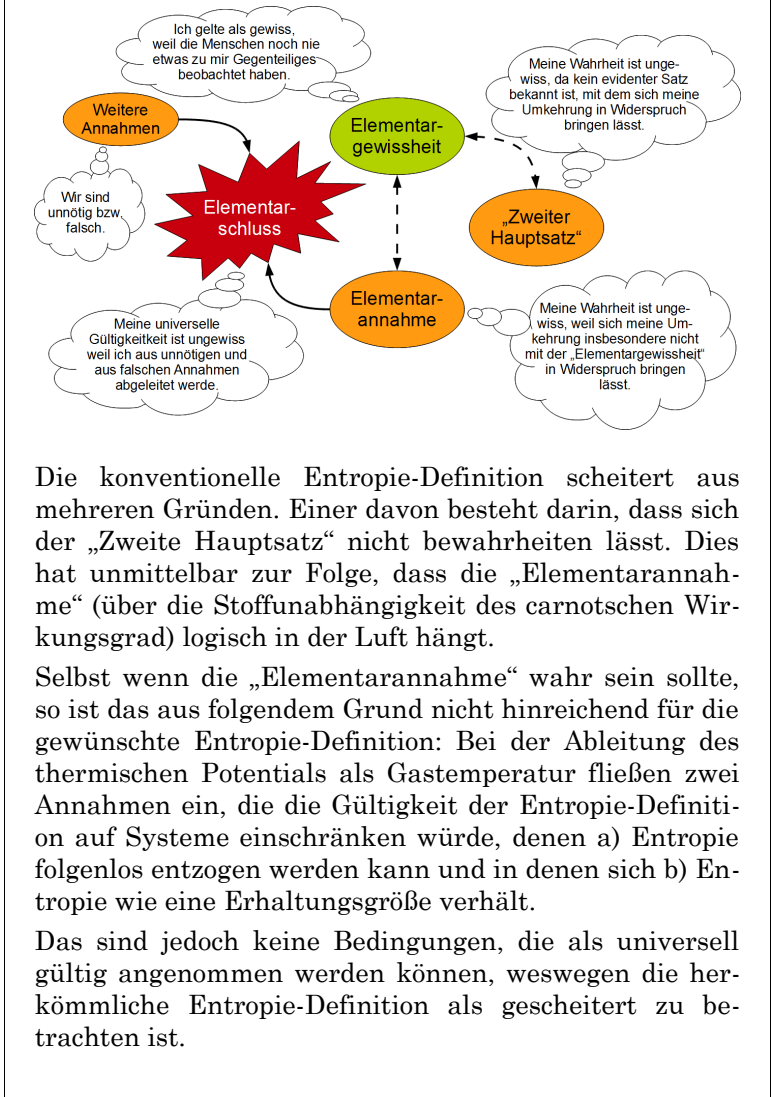
In physikalischer Hinsicht kann diesem Satz allerdings keine Evidenz zugebilligt werden, da das physikalische Objekt „Wärme“ seine Definition ja erst noch bekommen soll.

Der Weg zur Entropie-Definition ist offenbar ziemlich komplex (siehe Abbildung 8.1):

- Zuerst muss sich die Wahrheit des (keineswegs evidenten) „Zweiten Hauptsatzes“ mit Hilfe der (in gewisser Hinsicht evidenten) „Elementargewissheit“ erweisen.
- War das erfolgreich, dann muss sich in einem nächsten Schritt die Wahrheit der (keineswegs evidenten) „Elementarannahme“ mit Hilfe des „Zweiten Hauptsatzes“ ableiten lassen.
- Und erst wenn dem Erfolg beschieden war, kann in einem letzten Schritt versucht werden, eine universelle Entropie-Definition aus der „Elementarannahme“ abzuleiten.

Bislang haben wir nur diesen letzten Schritt untersucht: Im Ergebnis muss die „Elementarannahme“ durch zusätzliche Annahmen flankiert werden, um die gewünschte Ableitung der Entropie-Definition überhaupt erst möglich zu machen.

Abbildung 8.2: Das Scheitern der konventionellen Entropie-Definition



Die konventionelle Entropie-Definition scheitert aus mehreren Gründen. Einer davon besteht darin, dass sich der „Zweite Hauptsatz“ nicht bewahrheiten lässt. Dies hat unmittelbar zur Folge, dass die „Elementarannahme“ (über die Stoffunabhängigkeit des Carnotschen Wirkungsgrad) logisch in der Luft hängt.

Selbst wenn die „Elementarannahme“ wahr sein sollte, so ist das aus folgendem Grund nicht hinreichend für die gewünschte Entropie-Definition: Bei der Ableitung des thermischen Potentials als Gastemperatur fließen zwei Annahmen ein, die die Gültigkeit der Entropie-Definition auf Systeme einschränken würde, denen a) Entropie folgenlos entzogen werden kann und in denen sich b) Entropie wie eine Erhaltungsgröße verhält.

Das sind jedoch keine Bedingungen, die als universell gültig angenommen werden können, weswegen die herkömmliche Entropie-Definition als gescheitert zu betrachten ist.

Unter „ökonomischen“ Aspekten war diese Vorgehensweise völlig angemessen, da es sich bei diesen zusätzlichen Annahmen um zweifelhafte bzw. unbewiesene sowie unnötige Prämissen handelt.

Somit ist das ursprüngliche Ziel der Physik, die universelle Gültigkeit der Identität zwischen thermischem Potential τ und Temperaturfunktion T des Idealen Gases zu beweisen, ohnehin außer Reichweite geraten. Mit anderen Worten: Ob die „Elementarannahme“ aus dem „Zweiten Hauptsatz“ nun als bedingungslos wahr, als bedingt wahr oder sogar als falsch erwächst, oder ob am Ende sogar überhaupt kein logischer Schluss möglich sein sollte, das spielt angesichts dieses Scheiterns keine Rolle mehr (Abbildung 8.2).

Mithin spielt der „Zweite Hauptsatz“ eine weitaus unbedeutendere Rolle, als ihm normalerweise zugeschrieben wird – würde er doch selbst dann, wenn eine korrekte Ableitung der „Elementarannahme“ möglich wäre, keinen entscheidenden Beitrag mehr für die Erreichung des eigentlichen Zieles leisten können.

Nichtsdestotrotz nehmen wir ihn abschließend unter die Lupe. Von der Not befreit, dem „Zweiten Hauptsatz“ jenen entscheidenden Beitrag zur Entropie-Definition abringen zu müssen, kann seine Unbrauchbarkeit für die Wärmelehre mühelos erkannt werden.

8.2 Verifizierbarkeit

Der „Zweite Hauptsatz“ scheint evident zu sein, weil der von ihm beschriebene Vorgang entweder wie die Umkehrung eines natürlichen Temperatúrausgleichs (siehe seine Fassung in Kapitel 8.1) oder wie die Um-

kehrung eines Reibungsvorgangs³⁷ klingt, so oder so also einen (gewiss) unmöglichen Vorgang zu beschreiben scheint. Möchte man den „Zweiten Hauptsatz“ jedoch im Kontext der Wärmelehre zur Anwendung bringen, so muss ein von ihm beschriebener Vorgang zwingend als „reversibler“³⁸ mithin umkehrbarer Prozess verstanden werden.

Das kostet den „Zweiten Hauptsatz“ allerdings sofort seine Evidenz: Da der Vorgang in umgekehrter Richtung logischerweise wieder in die Nähe eines natürlichen Vorgangs rückt, klingt er eben auch nicht mehr „unmöglich“. Tatsächlich handelt es sich auch gar nicht um einen umkehrbaren Vorgang, sondern um eine Zustandsfolge neutralen Charakters, für deren Nichtexistenz ein physikalischer Grund erst noch gefunden werden müsste. Ohne Bezug auf etwas evident Unmögliches kann dem „Zweiten Hauptsatz“ im Rahmen der Wärmelehre jedoch keinerlei Bedeutung zuwachsen.

Dass dieser in einem Absatz beschreibbare Umstand noch nie zum Stein des Anstoßes geworden ist (und das nicht einmal bei irgendeinem frustrierten Physik-Studenten ...), bedarf einer gesonderten Erklärung. Respekt vor den ehernen Fundamenten der Wärmelehre und eine gewisse Arroganz der „Wissenden“ werden dabei gleichermaßen eine Rolle spielen.

37 Wenn es darum geht, eine bestimmte Entropiemenge zur Freisetzung eines Impulses zu nutzen.

38 Ein „reversibler Prozess“ ist die geläufige, jedoch irreführende Bezeichnung für eine Menge zusammenhängender Gleichgewichtszustände bzw. für eine „prozessuale Zustandsmenge“ [E 149], die grundsätzlich auch „irreversibel“ auseinander hervorgehen können.

Um seinen Einsatz zugunsten der Entropie-Definition dennoch sicherzustellen, ließe sich die Wahrheit des „Zweiten Hauptsatzes“ noch begründen, wenn er Gleichgewichtszustände beschriebe, die ebenso auch durch einen natürlichen Ausgleichsvorgang auseinander hervorgehen würden. Denn es wäre unsinnig zu verlangen, dass zwei Gleichgewichtszustände einmal für sich existieren, und einmal durch einen Ausgleichsvorgang auseinander hervorgehen können. Doch für die vom „Zweiten Hauptsatz“ beschriebenen Zustände lassen sich keine spontanen Ausgleichsvorgänge finden, zumal sich diese einmal mehr auf reine Entropie-Reservoirs beziehen [E 263].

Mit dem „Zweiten Hauptsatz“ operiert das klassische Entropie-Konzept also mit einer Annahme, die zwar als selbstverständlich richtig gilt, die sich bei genauerem Hinsehen jedoch nicht nur als unbeweisbar, sondern sogar als unsinnig herausstellt. Ein schlechteres Zeugnis kann man einer Aussage, die ein physikalisches Prinzip hervorbringen soll, nicht ausstellen.

8.3 Entropieproduktion

Die essentielle Bedeutung des „Zweiten Hauptsatzes“ für die Entropie-Definition verliert sich meist völlig im Schatten einer anderen, mit seiner Unterstützung abgeleiteten Schlussfolgerung, nach der die Entropie eines abgeschlossenen Systems nur zunehmen könne.

Während die klassische Entropie-Definition – logisch betrachtet – immerhin noch richtig sein *kann* (was für einen universellen Anspruch natürlich zu wenig wäre) und in weitreichenden Zusammenhängen ja offenbar auch richtig ist, beruht die Schlussfolgerung über die

Entropiezunahme auf einer Fehlinterpretation des abgeleiteten Formelwerkes und muss deshalb sogar als unsinnig bezeichnet werden. Der Grund hierfür ist vergleichsweise einfach herauszuarbeiten.

Die Formel, die der fraglichen Schlussfolgerung zugrunde liegt [E 252], vergleicht die Entropien zweier Gleichgewichtszustände eines Systems, die ohne Entropieaustausch mit der Umgebung – also „entropie-adiabat“ – auseinander hervorgehen sollen:

$$S_B > S_A \quad (14)$$

Während solche Entropiewerte klassischerweise natürlich gleich sein müssen (die Entropie wird ja als Erhaltungsgröße behandelt), ergeben sie sich hier aufgrund entsprechender Voraussetzungen als ungleich. Interpretiert wird dies, als würde die Entropie eines sich selbst überlassenen Systems immer dann zunehmen, wenn (unter Wärmeisolierung) noch eine Art Ausgleichsprozess innerhalb des Systems stattfinden würde [E 274].

Diese Interpretation ist falsch, weil es sich bei den beiden Zuständen mit den Entropien S_B bzw. S_A natürlich um Gleichgewichtszustände handelt, die sich definitionsgemäß nicht ändern, geschweige denn spontan ineinander übergehen würden. Vielmehr *muss* voraussetzungsgemäß ein „reversibler Prozess“ existieren, der die beiden fraglichen Zustände miteinander verbindet. Präziser ausgedrückt: Es muss eine Menge zusammenhängender Gleichgewichtszustände existieren, in der die beiden fraglichen Zustände – mit je unterschiedlichem Entropieinventar – enthalten sind. Tatsächlich handelt es sich dabei um eine Zustandsmenge, für die das thermische Potential τ nicht mit der Gastemperatur T identisch sein kann [E 278].

Demgemäß hängt insbesondere die vielbeschworene Aussage in der Luft, dass die Entropie der Welt einem Maximum zustreben würde, da diesem Bild inhärent ist, dass sich die Welt „im Anfang“ nicht in einem Gleichgewicht befunden habe (anderenfalls sie sich nicht hätte entwickeln können).

Mithin handelt es sich bei dem klassischen „Beweis“, dass die Entropie eines thermisch isolierten Systems nur zunehmen könne, lediglich um eine knallharte Randbedingung an das thermische Potential eines Systems, das einem Mengenaustausch ausgesetzt ist, aufgrund dessen Entropie in ihm produziert wird [E 280].

Bisher war es der Wärmelehre versagt, dies als „reversiblen Prozess“ zu behandeln, weil ihre Entropie ja sowohl ausdrücklich als auch implizit als Erhaltungsgröße auftritt. Folglich mussten entsprechende Zustandsfolgen als „irreversible Prozesse“ aus dem eigentlichen Zuständigkeitsbereich der Wärmelehre ausgelagert werden. Muss die Entropie dagegen nicht als Erhaltungsgröße betrachtet werden, dann sind diejenigen Zustandsfolgen, die der Randbedingung thermischer Isolierung genügen und dabei ein unterschiedliches Entropieinventar beinhalten, nunmehr ebenfalls als „reversible Prozesse“ zu behandeln.

Das klingt widersprüchlich, weil ein Vorgang, bei dem eine Flüssigkeit gerührt und dadurch erwärmt wird, natürlich „irreversibel“ in dem Sinne ist, dass er sich ohne gewisse zusätzliche Maßnahmen nicht rückgängig machen lässt. Doch im besten Sinne kümmert das die Wärmelehre nicht, bildet sie doch lediglich eine systemspezifische Menge an Gleichgewichtszuständen, die der Flüssigkeit zur Verfügung stehen (genauer: die ein physikalisches Modell der Flüssigkeit bilden), auf einen sol-

chen „realen“ Prozess ab. Bei dieser Abbildung handelt es sich um eine Untermenge – an anderer Stelle auch „prozessuale Zustandsmenge“ genannt [E 149] –, die von gewissen zusammenhängenden Gleichgewichtszuständen gebildet wird.

In der Wärmelehre werden solche prozessualen Zustandsmengen immer als „reversible Prozesse“ bezeichnet. Durch diese Begriffswahl – die im Rahmen einer letztlich mechanistisch verstandenen Wärmetheorie leider ohne Alternative geblieben ist – wird natürlich die Frage provoziert, wie und wodurch diese Zustände auch durchlaufen werden. Für die „reine Lehre“ der Wärme ist diese Frage irrelevant und kann von ihr auch gar nicht beantwortet werden.

In dem Moment, in dem die Entropie den Status einer Erhaltungsgröße verliert, kann es sich bei einer „entropie-adiabaten prozessualen Zustandsmenge“ also selbstverständlich auch um eine Untermenge zusammenhängender Gleichgewichtszustände handeln, die durch unterschiedliche Entropieinventare ausgezeichnet sind.

8.4 Eine abschließende Überlegung

Mit einer Entropie, die keinem Erhaltungssatz genügt, werden also auch diejenigen Zustandsfolgen für die Wärmelehre relevant, deren Elemente *in realiter* durch unterschiedliche kompensatorische Maßnahmen auseinander hervorgehen würden. Dies widerspricht der gewohnten Vorstellung von einem „reversiblen Prozess“. Ein Blick auf die physikalische Menge „Stoff“ hilft uns, diesen scheinbaren Widerspruch besser zu verstehen.

Beim Stoff kann man unterscheiden zwischen a) chemischen Gleichgewichten für gewisse Stoffkomponenten und b) Gemischen aus umwandlungsgehemmten Stoffkomponenten, wie sie zum Beispiel von Produkten einer „quantitativ abgelaufenen“ chemischen Reaktion dargestellt werden.

Bei ersterem liegen Randbedingungen vor, unter denen sich das chemische Gleichgewicht und damit die chemische Zusammensetzung unmittelbar verschieben lässt: Jede noch so kleine Veränderung in den Randbedingungen führt zu einer Veränderung in der chemischen Zusammensetzung. Die Abfolge solcher Gleichgewichtszustände bildet einen „reversiblen Prozess“, und zwar völlig unabhängig von der Frage, ob und wie sie sich reversibel steuern lässt.

Bei einem Gemisch aus umwandlungsgehemmten Stoffkomponenten sieht es grundsätzlich anders aus: Auch stärkere Veränderungen in den Randbedingungen müssen nicht dazu führen, dass sich die chemische Zusammensetzung verändert (d.h. dass die chemische Hemmung aufgehoben wird). Entsprechend würden chemische Reaktionen, aus denen diese „irreversibel“ hervorgegangen sein können, so oder so quantitativ ablaufen.

Gleichwohl werden Randbedingungen existieren, unter denen deren Produkte wieder in die Umwandlung gehen und damit ein Reaktionsgleichgewicht ausbilden, welches dann ebenfalls verschiebbar wird.

In diesem Sinne muss mit Blick auf die Entropie gefragt werden, ob und unter welchen Randbedingungen sich klassisch „irreversible“, einseitige Übergänge zu „reversibel“ verschiebbaren Gleichgewichten mutieren lassen. Während diese Frage nach dem üblichen Ver-

ständnis von Entropie nur beweisen würde, dass der Fragende ein grundlegendes Naturprinzip nicht verstanden hat, sollten wir dieser Frage mit der These im Hintergrund, dass Licht- und Entropiemenge identisch sind, nicht ganz so geharnischt gegenüberreten.

Zwar tritt Licht nicht in „chemisch“ unterscheidbaren Komponenten auf, aber immerhin in zwei unterschiedlichen Aggregatzuständen. So gibt es in einer Lichtmenge sowohl Photonen, die ohne Phasenbeziehung zu anderen Photonen sind, als auch solche Photonen, die untereinander in einer Phasenbeziehung stehen (zueinander „kohärent“ sind) und damit eine Art „Lichtmolekül“ bilden [E 226]. Der Anteil sogenannter „kohärenter“ Photonen ist bei den üblichen Lichtquellen bedeutungslos, bei Lasern wird er gezielt gesteuert und nutzbar gemacht.

So wäre zu untersuchen, unter welchen Randbedingungen sich Umwandlungsgleichgewichte herbeiführen lassen, in denen physikalische Mengen, die normalerweise irreversibel unter Entropie/Licht-Produktion dissipieren, allein durch eine Verschiebung des Gleichgewichtes zurückgewonnen werden können.

Vielleicht sind hier Möglichkeiten verborgen, die denen eines *Perpetuum mobile* zweiter Art nicht meilenweit nachstehen müssen.

9. Anhänge

9.1 Literatur

- Blöss, Christian (2010): „Entropie. Universelle Aspekte einer physikalischen Mengengröße“; Books on Demand (Norderstedt)
- Blöss, Christian (2010a): „Entropie ist Licht. Die unvollendete Geschichte der Quantentheorie – und wie sie sich durch eine These zur Substanz von Entropie immerhin abrunden ließe“; Zeiteinsparungen (Gräfelfing) Jahrgang 22, Heft 3, Dezember 2010
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“; <http://www.bmwi.de> bzw. <http://www.bmu.de>
- Clausius, Rudolf (1865): „Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie“; Annalen der Physik CXXV, 7
- Ehlotzky, Fritz (2004): „Quantenmechanik und ihre Anwendungen“; Springer Verlag (Berlin etc.)
- Einstein, Albert (1916): „Strahlungs-Emission und -Absorption nach der Quantentheorie“; Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 18: 318–23
- Einstein, Albert (1917): „Zur Quantentheorie der Strahlung“; Physikalische Zeitschrift XVIII, 121-128 (zuerst abgedruckt in den Mitteilungen der Physikalischen Gesellschaft Zürich Nr. 18 von 1916).
- EWI / GWS / Prognos (2010): „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung (Projekt Nr. 12/10)“; <http://www.bmu.de>
- Falk, Gottfried (1978): Was ist eigentlich Atomistik? – oder: Die physikalische Größe „Menge“. Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts Heft 2: Thermodynamik – nicht Wärmelehre, sondern Grundlage der Physik, 2. Teil: Das Größenpaar Menge und chemisches Potential. Schroedel Verlag (Hannover)
- Falk, Gottfried und Wolfgang Ruppel (1976): „Die Physik des Naturwissenschaftlers: Energie und Entropie“; Springer Verlag (Berlin etc.)
- ForschungsVerbund Erneuerbare Energien FVEE (2010): „Energiekonzept 2050. Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% erneuerbaren Energien“; <http://www.fvee.de/>

Herrmann, Friedrich (1997): „Physik III (Thermodynamik). Skripten zur Experimentalphysik“; Studentendienst der Universität Karlsruhe (Karlsruhe)

Hoffmann, Dieter (2008): „Max Planck: Die Entstehung der modernen Physik“; Verlag C.H. Beck (München)

Knizia, Klaus (1986): „Das Gesetz des Geschehens. Gedanken zur Energiefrage“; Econ (München)

Neswald, Elizabeth R. (2006): „Thermodynamik als kultureller Kampfplatz. Zur Faszinationsgeschichte der Entropie 1850-1915“; Rombach Verlag KG (Freiburg i.Br. etc.)

Nolting, Wolfgang (2010): „Grundkurs theoretische Physik Band 4: Spezielle Relativitätstheorie, Thermodynamik“; Springer Verlag (Berlin etc.)

Pietschmann, Herbert (2003): „Quantenmechanik verstehen: Eine Einführung in den Welle-Teilchen-Dualismus für Lehrer und Schüler“; Springer Verlag (Berlin etc.)

Schilpp, Paul Arthur (1979): „Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher (Philosophen des 20. Jahrhunderts)“; Kohlhammer Verlag (Stuttgart)

Schwister, Karl (2008): „Kleine Formelsammlung Chemie“; Hanser Verlag (München)

Simonyi, Károly (2001): „Kulturgeschichte der Physik: Von den Anfängen bis heute“; Verlag Harri Deutsch (Thun etc.)

9.2 Abbildungen

Die beiden Grafiken in Abbildung 4.1 und 4.2 wurden mit freundlicher Genehmigung von Peter Whitehead aus einer Vorlage abgeleitet, die auf dessen Website www.pittdixon.go-plus.net zu finden ist.

Die Vorlage für die Grafik in Abbildung 6.2 wurde dem Buch „So wird man ein Genie“ von Marius Ebert mit freundlicher Genehmigung des Autors entnommen.

Die Grafik in Abbildung 7.1 wurde auf www.labbe.de gefunden und wird hier mit freundlicher Genehmigung des Labbé-Verlages als Copyright-Inhaber verwendet.

9.3 Danksagung

Meinem früheren Physiklehrer Heinz Sander (Eutin) möchte ich für seine freundschaftliche und geduldige kritische Begleitung danken. Auch wenn ihm keine der hier aufgeführten Argumente und Überlegungen anzulasten ist, so hat er mit der Auswahl des Themas für meine Studienarbeit vor rund 35 Jahren einen der Keime für meine Überlegungen zur Entropie gelegt.

9.4 Ihre Notizen

