

Entropie ist Licht

Die unvollendete Geschichte der Quantentheorie – und wie sie sich durch eine These zur Substanz von Entropie immerhin abrunden ließe

Hinweise wie [E 123] beziehen sich auf das Buch „Entropie“ des Autors [Blöss 2010], welches zu diesem Thema jüngst erschienen ist.

Einführung

Vor 145 Jahren fasste Rudolf Clausius die wichtigsten Erkenntnisse der mechanischen Wärmetheorie in zwei „Grundgesetzen des Weltalls“ zusammen [Clausius 1865, 400]:

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

Obwohl diese Sätze in einer längst vergangenen, dem mechanistischen Weltbild verpflichteten Epoche geprägt wurden, bilden sie nach wie vor die eherne Grundlage jedes wissenschaftlichen oder naturphilosophischen Diskurses. Insbesondere die Quantenrevolution der Physik, die sich 35 Jahre nach dieser furiosen Einlassung zu entfalten begann, scheinen beide unbeschadet überstanden zu haben. Das muss beim „Zweiten Hauptsatz“ verwundern. Schließlich hat dieser mit der Entropie eine physikalische Größe hervorgebracht, die prädestiniert gewesen wäre, in den Kanon quantisierter Mengengrößen aufgenommen zu werden.

Eine Quantisierung hätte der Entropie auch gut zu Gesicht gestanden, wäre sie dadurch doch endlich direkt messbar geworden. Doch ein solches revolutionsbedingtes Revirement hat es an der Basis der Wärmelehre niemals gegeben. Und so muss man sich weiterhin auf den „Zweiten Hauptsatz“ – sowie auf weitere unverzichtbare, jedoch unbemerkt gebliebene Hilfsannahmen [E 232] – stützen, um wenigstens mittelbar auf die Entropie eines Systems schließen zu können. Da sich diese Hilfsannahmen nur bei direkter Messbarkeit der Entropie überprüfen lassen, wurde auf diese Weise auch noch die bewährte Gewaltenteilung

in der Wissenschaft – nur mit überprüfbaren Annahmen zu operieren – außer Kraft gesetzt.

Tatsächlich ist aus der Geschichte der Quantentheorie kein Experiment bekannt, dessen Ergebnis die Quantisierung der Entropie erzwungen hätte. Dafür begegnet uns an der Wiege der Quantentheorie eine andere physikalische Mengengröße, die als solche unerkannt blieb, obwohl ihr Quant im Jahr 1900 postuliert worden ist, dieses sich fünf Jahre später auch nachweisen ließ und seine Existenz heute 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. Bei dem nun folgenden Streifzug durch die Geschichte der Quantenrevolution gilt es deshalb Ausschau zu halten nach dem Quant, das auch das der Entropie sein könnte.

Chronologische Übersicht

Die folgende Tabelle 1 gibt eine Chronologie der Schlüsselexperimente wieder, die jeweils zur Entdeckung des Quants einer bestimmten Mengensorte führten. Diese Schlüsselexperimente ließen sich entweder klassisch nicht erklären oder wurden gezielt entwickelt, um den Quantencharakter einer bestimmten Größe nachweisen zu können (insbesondere bei der elektrischen Ladung und dem Stoff).

| Jahr | Entdecker | Mengensorte | Experimenteller Befund |
|-------------|------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 1900 | Planck | Licht | Hohlraumstrahlung |
| 1905 | Einstein | Stoff | Brownsche Bewegung |
| | | Licht | Photoeffekt |
| 1907 | | Phononenmeer | Dulong-Petit bei tiefen Temperaturen |
| 1910 | Millikan | Ladung | Öltröpfchenversuch |
| 1911 | Debye | Phononenmeer | Universelle Festkörpereigenschaften |
| 1913 | Bohr | Bahndrehimpuls | Absorptionslinien des Wasserstoffs |
| | | Licht | |

| | | | |
|------|---------------|-------|--|
| 1920 | Stern | Stoff | Geschwindigkeit eines Silberatom-Strahls |
| 1922 | Stern/Gerlach | Spin | Aufspaltung eines Silberatom-Strahls |
| | Compton | Licht | Streuung von Röntgenstrahlung |

Tabelle 1: Chronologische Übersicht zur Entdeckung bzw. Postulierung der Quanten verschiedener Mengengrößen. Neuere Entdeckungen, etwa aus den Feldtheorien (Gluon, Graviton), bleiben dabei unberücksichtigt. Für die physikalische Menge, in die das Kristallgitter eines Festkörpers eingebettet ist, wurde der etwas bildhafte Ausdruck „Phononenmeer“ (analog zum „Photonenmeer“ für „Licht“) gewählt, weil unter dem „Phonon“ selbst ja das Quant dieser Menge verstanden wird.

Der Wert einer jeden in Tabelle 1 unter „Mengensorte“ aufgeführten physikalischen Mengengröße ist prinzipiell proportional zur Anzahl entsprechender Elementarteilchen bzw. Quanten, die in dem zu beschreibenden System angetroffen werden. Dabei waren Stoffmenge und Ladungsmenge schon lange vor der Quantenrevolution bekannt, weil man ihre Quanten konzentrieren und „verströmen“ konnte, ohne über sie bereits konkret Bescheid wissen zu müssen.

Auf andere Mengengrößen war man dagegen noch gar nicht aufmerksam geworden, da makroskopische Effekte¹, die sich aus einer Anhäufung der entsprechenden Quanten ergeben hätten, unbekannt waren. Insbesondere treten unter den üblichen Bedingungen neben Elektron und Photon keine weiteren Elementarteilchen mengenartig in Erscheinung, weil sie sich normalerweise sofort zu Stoff vereinigen. Deshalb wird auf die Entdeckung von Proton (1914), Neutron (1932) usw. auch nicht näher eingegangen.

Die Geburt der Quantentheorie

Trotz aller glänzenden Erfolge befand sich die Physik an der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert doch in einer tiefen Krise: Nach zahlreichen Vorarbeiten von Otto Lummer und Ernst Pringsheim konnten Ferdinand Kurlbaum und Heinrich Rubens schließlich zweifelsfrei nachweisen, dass die spektrale Energiedichte des Lichts in einem „Hohlraum“ – der sog. „Hohlraumstrahlung“² – jenseits eines temperaturabhängigen Strahlungsmaximums offenbar gegen Null ging [E 204]. Dage-

1 So konnte aus den omnipräsenten Drehimpulsen gebundener Elektronen erst mit dem Experiment von Albert Einstein und Wander Johannes de Haas (1915) ein makroskopischer Effekt abgeleitet werden, nämlich die Kompensation einheitlich in einem Magnetfeld ausgerichteter mikroskopischer Drehimpulsquanten durch eine messbare makroskopische Drehimpulsmenge.

gen sagte die klassische Theorie der elektromagnetischen Strahlung voraus, dass sich die spektrale Energiedichte mit der Frequenz immer weiter steigern sollte, was im übrigen mit einem unendlich großen Energieausstoß verbunden gewesen wäre. Auch ein alternativer Ansatz von Wilhelm Wien, den Max Planck aus thermodynamischer Sicht zu begründen versucht hatte, konnte nur für einen Teil des Spektrums richtige Vorhersagen machen.

Während die klassisch vorhergesagte „Ultraviolett-Katastrophe“ ganz offenbar nicht stattfand, wurde das Versagen der klassischen Physik bei der Ableitung dieser Hohlraumstrahlungskurve zunehmend als Katastrophe im übertragenen Sinne empfunden. Schließlich gelang es Max Planck, die gemessene Strahlungskurve korrekt zu modellieren³, indem er – in einem „Akt der Verzweiflung“ [Hoffmann 2008, 61] – das klassische Modell des Strahlungskontinuums aufgab, und stattdessen eine begrenzte Menge an Trägern von Lichtenergie postulierte. Diese These war so befremdlich, dass Planck sie nur als „rein formale Annahme“ gelten ließ und (vorerst) keinen Anlass sah, diese anschaulich, womöglich noch im Wortsinne zu interpretieren.

Verteilte sich nun die Lichtenergie eines Hohlraums auf eine endliche Zahl von Trägern nach den bewährten Gesetzen der statistischen Physik, so stimmten die vorhergesagte und die gemessene Verteilung der spektralen Energiedichte des Lichts endlich im gesamten Frequenzspektrum vollständig überein. So wird heutzutage der 14. Dezember 1900, an dem Planck sein Referat mit dem Titel „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum“ auf einer turnusmäßigen Sitzung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Berlin gehalten hatte, als „Geburtsstunde (sic!) der Quantentheorie“ [Ingold 2008, 16] gefeiert. Bis die eingangs noch „rein formale“ Annahme Plancks schließlich als konzeptioneller Durchbruch verstanden und auch gefeiert werden sollte, mussten allerdings noch einige Jahre ins Land gehen.

2 Unter „Hohlraumstrahlung“ versteht man elektromagnetische Strahlung im thermischen Gleichgewicht mit einem Hohlraum, der sie einschließt.

3 Das plancksche Strahlungsgesetz ist unabhängig von den Eigenschaften des Hohlraums, was als unmittelbare Konsequenz des kirchhoffschen Strahlungsgesetzes gilt. Dieses Gesetz würde eine Revirement an der Basis der Wärmelehre, in die die Entropie nunmehr als eine quantisierte, zumal „reversibel“ quellfähige Mengengröße einginge, jedoch nicht überleben können und von daher wäre auch das plancksche Strahlungsgesetz nur als Grenzfall zu verstehen. Diese Aussichten sind für die hier dargelegten historischen Betrachtungen nicht von Belang. Von daher soll dieses Fass hier auch gar nicht erst aufgemacht werden [siehe dazu E 117 sowie E 228].

Der Entrepreneur

Das Jahr 1905 sah gleich zwei Quantenrevolutionen: Albert Einstein erklärte die „brownsche Bewegung“⁴ mit der Existenz kleinster Stoffteilchen und den „Photoeffekt“⁵ mit der Existenz kleinster Lichtteilchen. Dass er mit letzterem die plancksche Quantenhypothese erneuerte, wurde weder von ihm noch von irgendeinem anderen Mitglied der Gemeinde der Physiker wahrgenommen.

Die Stoffteilchen-Hypothese zur (statistischen) Erklärung der brownischen Bewegung vermochte zahlreiche Skeptiker – insbesondere Wilhelm Ostwald und Ernst Mach – von der Realität der Atome zu überzeugen [Schilpp 1979, 18]. Der direkte Nachweis des Quantencharakters einer Stoffmenge gelang 1920 mit der Messung der Geschwindigkeiten einzelner Atome durch Otto Stern, wodurch ebenfalls die universelle Gültigkeit der avogadroschen Konstanten bzw. der Elementarmenge des Stoffs belegt wurde [E 168].

Dagegen sollte Einsteins Lichtteilchen-Hypothese ihren Durchbruch erst 1922 erleben, nachdem Arthur Compton zeigen konnte, dass sich Röntgenlicht, das an Graphit gestreut wurde, wie ein Strom aus Teilchen verhält. Diese enorme zeitliche Verzögerung unterstreicht jedoch nur, wie unverstanden die ursprüngliche plancksche Quantenthese geblieben war, die ja selbst nichts anderes als die Existenz von Lichtteilchen voraussetzte und sich experimentell doch so glänzend bewährt hatte (nicht anders die einsteinsche Erklärung des Photoeffekts).

Das wohl stärkste Indiz, dass die tatsächliche Stoßrichtung der planckschen Quantenhypothese nicht vollends verstanden worden war, liefert uns Max Planck selbst: In seinem 1913 gestellten Antrag zur Aufnahme von Albert Einstein in die Preußische Akademie der Wissenschaften nahm er diesen dafür in Schutz, mit seiner Lichtquanten-Hypothese

-
- 4 Der schottische Botaniker Robert Brown beobachtete im Jahre 1827 unter dem Mikroskop, wie Pollen in einem Wassertropfen unregelmäßig zuckende Bewegungen machten. Albert Einstein konnte mit einer Gleichung für die mittlere quadratische Verschiebung (pro Zeiteinheit) einer solchen Bewegung den universellen Wert der Stoffelementarmenge nachweisen [E 167].
 - 5 Reine Metalloberflächen geben im negativ geladenen Zustand Elektronen ab, wenn ihre Oberfläche mit Licht bestrahlt wird. An der Erklärung dieses „Photoeffekts“ scheiterte die klassische Theorie des Elektromagnetismus, weil für den Effekt nicht die Intensität des Lichts, sondern seine Frequenz entscheidend ist. Dagegen korrelierte Einsteins von Planck übernommener Ansatz „ $h\nu$ “ für die Energie eines Lichtteilchens einwandfrei mit der kinetischen Energie der herausgeschlagenen Elektronen.

wohl „über das Ziel hinausgeschossen zu haben“. Man dürfe ihm dies nicht allzu sehr anrechnen, denn „ohne einmal ein Risiko zu wagen, lässt sich auch in der exaktesten Wissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen“ [Pietschmann 2003, 18].

Ende 1906 legte Einstein schließlich auch noch eine (dann 1907 veröffentlichte) quantenhypothetische Erklärung vor für die systematische Abweichung, die die Wärmekapazität von Festkörpern bei tiefen Temperaturen gegenüber dem Dulong-Petit-Gesetz aufwies. Diese Erklärung beruhte auf der Annahme, dass sich die Schwingungsenergie der Bausteine eines Festkörpers nur in diskreten Beträgen ändern kann. Die Träger dieser „Energiepakete“ wurden 1932 von Jakow Frenkel in Analogie zu den Schwingungsquanten des elektromagnetischen Feldes als „Phononen“ bezeichnet. Einsteins Modell wurde 1912 von Peter Debye zu einer tragfähigen Theorie der spezifischen Wärme von Festkörpern ausgearbeitet.

Schlag auf Schlag

Die Zerlegbarkeit einer Stoffportion in Atome, also in unteilbare identische Stoffelementarmengen, legte es nahe, auch von der Quantisierung der Ladung auszugehen, zumal die Faradayschen Gesetze der Elektrolyse (1834) schon immer einen entsprechenden Zusammenhang zwischen der Natur des Stoffs und der von elektrischer Ladung nahegelegt hatten. So unternahm Robert Millikan 1910 seine „Öltröpfchenversuche“⁶ mit dem erklärten Ziel, die Existenz elektrischer Elementarladungen direkt nachzuweisen. Ähnlich wie bei der Brownschen Bewegung wurde die Quantisierung einer Größe hier nicht durch einen experimentellen Befund erzwungen. Vielmehr wurde nach einem Beleg gesucht, um die vermutete Quantisierung nachweisen zu können.

Mit der wohl folgenschwersten Quantenthese wartete Niels Bohr 1913 auf. Er leitete die schon länger bekannte Systematik in den Linien des Absorptionsspektrums von Wasserstoffgas (Balmer 1885) aus einer Quantisierung des Bahndrehimpulses ab, den das Elektron eines Wasserstoffatoms innehat. Im Widerspruch zu den Grundgesetzen der klas-

6 Robert Millikan maß die Steig- bzw. Sinkgeschwindigkeit elektrisch geladener Öltröpfchen, die in das ein- und ausgeschaltete elektrische Feld eines Kondensators geleitet wurden, und konnte so nachweisen, dass die jeweilige Ladung der Öltröpfchen ein ganzzahliges Vielfaches einer gewissen Elementarladung betragen müsse.

sischen Elektrodynamik sollten die so ausgezeichneten Elektronenbahnen stabil sein.

Entsprechend wurde diese Quantenthese anfangs von vielen als ein Schlag ins Gesicht empfunden. Max von Laue reagierte so: „Das ist Unsinn. Die maxwellschen Gleichungen gelten unter allen Umständen, ein Elektron auf Kreisbahn muss strahlen“ [Simonyi ³2001, 437]. Doch die Übereinstimmung zwischen experimentellem Befund und der quantentheoretischen Vorhersage war zu signifikant, um sie einfach ignorieren zu können. So avancierte das bohrsche Atommodell sehr rasch zum Ausgangspunkt aller weiteren theoretischen Überlegungen über den Bauplan der Atome, der sich immer detaillierter aus den atomaren und molekularen Spektrallinien ableiten lassen sollte.

Bohr hatte nicht nur die Quantisierung des Bahndrehimpulses eines Bindungselektrons postuliert, sondern mit seinem 2. Postulat auch die Quantisierung des Lichts: Der Übergang zwischen zwei stabilen Bahnen müsse mit der Emission bzw. Absorption eines Lichtquants⁷ einhergehen. Dies macht einmal mehr deutlich, dass die Lichtquantenhypothese auch 13 Jahre nach ihrem so überaus erfolgreichen Einstand immer noch nicht im Gebäude der Physik angekommen war.

Die Quantisierung des Eigendrehimpulses der Elementarteilchen, ihres „Spins“, bildete den Höhepunkt und vorläufigen Endpunkt der Quantisierungswelle, die zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts die physikalischen Mengengrößen erfasst oder überhaupt erst hervorgebracht hatte. Der Stern-Gerlach-Versuch⁸ erbrachte einen experimentellen Befund, der sich jeder klassischen Deutung entzog, in deren Rahmen physikalischen Größen ein kontinuierlicher Wertevorrat zusteht. Das Ergebnis dieses Versuchs ließ sich erst ableiten, nachdem der Wertevorrat des Eigendrehimpulses für das Bindungselektron (5s-Elektron) von Silber auf „Spin Down“ und „Spin Up“ beschränkt wurde.

7 Der damit einhergehende Massendefekt des Atoms legt es nahe, dass dies auch mit der Absorption bzw. Emission von Quanten des Gravitationsfeldes verbunden ist.

8 Beim Stern-Gerlach-Versuch durchläuft ein Strahl aus Silberatomen ein inhomogenes Magnetfeld und erzeugt auf einem Schirm nicht den klassisch erwarteten zusammenhängenden, sondern zwei voneinander getrennte „Silberflecken“. Dieses Phänomen konnte nur durch die Richtungsquantelung des Eigendrehimpulses des Bindungselektrons eines Silber-Atoms erklärt werden.

Wieso blieb die Entropie von der Quantenrevolution verschont?

Diese Frage mag im Kontext des konventionellen Verständnisses der Wärmelehre ungewöhnlich oder sogar illegitim erscheinen. Doch sie verlangt eine stichhaltige Antwort, weil es sich bei den (bereits) quantisierten Größen und bei der Entropie gleichermaßen um sogenannte „physikalische Mengengrößen“ handelt, d.h. um Größen, deren Wert sich jeweils mit dem Ausmaß des Systems ändert. Was an der Entropie sollte anders sein als bei den „Anderen“? Oder was hat verhindert, dass diese Frage überhaupt gestellt wurde? Hier lassen sich verschiedene Antworten entwickeln.

Zum Beispiel wird selbst im Rahmen dieser kurzen Entdeckungsgeschichte deutlich, dass sich mit der Entdeckung der Elementarteilchen ein völlig neues Forschungsgebiet auftat, nämlich die Atom- und Kernphysik. Und hier scheint Wärme im herkömmlichen Sinne gar keine Rolle zu spielen. Ohnehin hatte man sich mit dem Konsens, dass Wärme nichts anderes sei als die kinetische Energie aus der ungeordneten Bewegung von Atomen oder Molekülen [E 197], den Weg für eine Suche nach den Quanten der Entropie allein von der Anschauung her gründlich verbaut.

Weiterhin hatte sich die statistische Interpretation der Entropie schon längst durchgesetzt, als die Quantenrevolution jenes Stadium erreicht hatte, in dem man aus der anfänglichen Not bereits eine Kardinaltugend der Physik gemacht hatte und bereit war, „Alles und Jedes“ als aus Quanten zusammengesetzt zu denken. Warum sollte sich eine Größe, die für etwas so Abstraktes wie die Unordnung eines Systems stand, auf eine Ansammlung letzten Endes substanzieller Quanten zurückführen lassen?

Eine gewisse Rolle spielte vielleicht auch der Reflex, sich gegenüber all jenen „mittelalterlichen“ Theorien abzugrenzen, die einen Substanzcharakter der Wärme vorausgesetzt hatten, dabei in unauflösbare Widersprüche mit bestimmten experimentellen Ergebnissen gekommen waren und deswegen – nicht zuletzt in Konkurrenz zu konsequent erfolgreichen „modernen“ Ansätzen – aufgegeben werden mussten. Entsprechende Stichworte sind: „Phlogiston- vs. Oxidationstheorie“ [E 36] bzw. „Kalorische vs. mechanische Theorie der Wärme“ [E 37]. Nach den Quanten der Entropie zu fragen, hätte durchaus den Vorwurf des Revisionismus nach sich ziehen können.

Nicht zuletzt muss auch berücksichtigt werden, dass die Wärmelehre von den meisten Physikern als ausgesprochen unanschauliche Theorie wahrgenommen wird, die sich entweder erfolgreich meiden lässt oder in ihrer Abstraktheit (um das Wort „Unverständlichkeit“ zu vermeiden) hingenommen werden muss. Der Drang, dem Lehrgebäude der Wärmelehre ein befriedigendes Maß an Verständlichkeit und Anschaulichkeit abzurufen – auch durch einen einheitlichen Quantisierungs-Ansatz für die physikalischen Mengengrößen – ist entsprechend wenig ausgeprägt.

Was genau hatte Max Planck eigentlich quantisiert?

Unter Physikern besteht die einhellige Meinung, dass Planck die Energie „diskretisiert“ [Ehlotzky 2004, 2] bzw. quantisiert habe: Elektromagnetische Strahlung würde in „Energiepaketen“ absorbiert oder emittiert [Schwister ³2008, 27]. Selbst Einstein sprach von „diskreten Energie-Elementen“ [1917, 121], aus denen sich 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. Ein kontinuierliches Spektrum kommt zustande, wenn sich die zugrundeliegende Größe in beliebigem Maße ändern kann, wie es beispielsweise beim Impuls ungebundener Teilchen 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 auch nicht aus der Anzahl 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 Quantenthese, nämlich auf die Energie gerichtet zu sein, ist umso unverständlicher, als der experimentelle Befund zur Hohlraumstrahlung

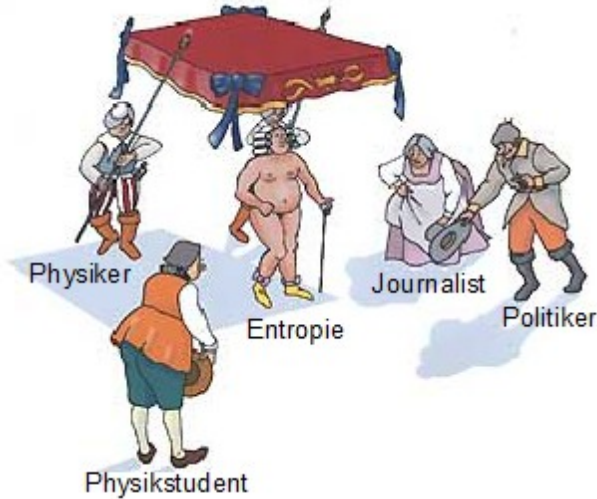


Abbildung 1: Während erste und vierte Gewalt im Staate der Entropie ihren tiefempfundenen Respekt erweisen, wirkt der Physikstudent noch etwas unentschlossen ...

ja „Energiepakete“ *beliebigen* Ausmaßes anzeigt. Von diskreten Eigenwerten der Energie kann gerade hier also gar keine Rede sein.

Wenn die plancksche Quantentheorie 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 damit 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.

Die Vollendung der planckschen Quantenrevolution

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 der quantisierten physikalischen Mengengrößen ausgerechnet diejenige Größe fehlt, die das Wesen der Wärmelehre bestimmt, nämlich die Entropie.

Eine denkbar einfache Auflösung erfähre diese „Doppelverwunderung“, sollte sich am Ende herausstellen, dass Entropie- und Lichtmenge identisch sind. In diesem Falle wären die Quanten des Lichts, also die Photonen, auch als Quanten der Entropie zu betrachten. Ein massiver Hinweis, dass wir uns mit dieser Vermutung auf der richtigen Fährte befinden, ist mit folgendem Umstand verbunden:

- Die Physik kennt von Entropie nur seine Menge, von Licht dagegen nur die Anzahl seiner Teilchen.

Dabei muss sich die Menge einer quantisierten Größe (= Entropie) aus der Anzahl der enthaltenen Quanten (= Photonenanzahl) mal ihrer Elementarmenge ergeben, wobei die Elementarmenge eine universelle Konstante ist.

Handelte es sich bei der Entropiemenge also tatsächlich um die Menge des Lichts, dann müsste das Verhältnis aus Entropiemenge einerseits und der Anzahl enthaltener Photonen bzw. Entropiequanten andererseits für beliebige Systeme stets eine Naturkonstante⁹ ergeben, die dann die Elementarmenge des Lichts bzw. der Entropie repräsentierte.

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“.

⁹ Entsprechend leitet sich auch die Elementarmenge des Stoffs (der Kehrwert der avogadroschen Konstante) für ein beliebiges System aus dem Verhältnis seiner Stoffmenge und der Anzahl der in ihm enthaltenen Atome ab.



Abbildung 2: 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).

Aus dem Strahlungsgesetz für die spektrale Energiedichte von Hohlraumstrahlung, das Max Planck 1900 gefunden hatte, leitet sich ab, dass die Anzahl ihrer Lichtteilchen (je Volumeneinheit) mit T^3 wächst [E 223]. Bereits im Jahre 1884 hatte Ludwig Boltzmann die Entropiedichte dieser Hohlraumstrahlung berechnet und dieselbe Temperaturabhängigkeit gefunden [E 224]. So ergibt sich das Verhältnis aus Entropie- und Photonendichte der Hohlraumstrahlung tatsächlich als Naturkonstante, nämlich als ein gewisses Vielfaches der boltzmannschen Konstanten¹⁰ k_B [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 völlig neues Licht auf die Entropie als dem „Wärmestoff“¹¹ der Physik fallen. Vor allem ließe sie sich nunmehr grundsätzlich am Zustand bestimmen, nämlich aus der Anzahl der im System enthaltenen Photonen bzw. Lichtteilchen.

10 Dass gerade die boltzmannsche Konstante in die Elementarmenge der Entropie eingeht ist am Ende keine riesengroße Überraschung. Schließlich sind die Einheiten von boltzmannscher Konstante und Entropie identisch, weswegen erstere ohnehin als Kandidat für die Entropieelementarmenge in Frage gekommen wäre [E 224].

11 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.

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 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.

Konsequenzen

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 Erhaltungsgröße¹² behandelt werden.

Das hätte zur Folge, dass die Standard-Definition der Entropie nicht mehr aufrechtzuerhalten wäre, bzw. einem allgemeineren Ansatz weichen müsste – steht oder fällt diese doch mit der impliziten Annahme, dass sich Entropie „reversibel“ weder erzeugen noch vernichten lässt [E 255]. Das wiederum bedeutete, dass damit auch eine entscheidende Randbedingung für die Konstruktion von Wärmekraftmaschinen entfiel: 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

12 Die Entropie eines Systems wird für alle seine „reversiblen Prozesse“ als Erhaltungsgröße behandelt. Dies nicht etwa aufgrund evidenter empirischer Befunde (wie auch, wenn sich Entropie gar nicht direkt bestimmen lässt), sondern implizit, weil jede Änderung im Entropie-Inventar eines Systems mit einem äußeren Entropiestrom gleichgesetzt wird. Alle Änderungen des Entropie-Inventars eines Systems ohne Abgabe oder Aufnahme eines Entropiestroms werden deshalb als „irreversible Prozesse“ aus der Wärmelehre ausgelagert. Diese schizophrene Situation [E 280] endete, wenn der Entropie dieselbe „Quellfähigkeit“ wie dem Stoff zugebilligt würde.

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“¹³ zweiter Art möglich wäre. Schließlich hat bislang nur die Standard-Definition der Entropie dafür garantieren können, dass es ein reines Gedankenexperiment bleiben muss. 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 ist, entrichtet werden: Deren Schlussfolgerungen – und seien sie noch so verlockend – können nicht mehr ohne weiteres in Anspruch genommen werden. 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 sich gewiss durch ein tieferes Verständnis der Substanz von Wärme bzw. dem „Stoff“, aus dem sie erwächst, wettmachen lassen. Auf eine Physik der Lichtkraftmaschinen, die dann die bisherige Physik der Wärmekraftmaschinen als Grenzfall beinhaltet, wird man hoffentlich nicht lange warten müssen.

Berlin, 9. November 2010
post@cbloess.de

Dieser Aufsatz ist aus meinem kürzlich erschienenen Buch „Entropie“ [Blöss 2010] hervorgegangen; zusätzliches Material finden Sie unter <http://www.cbloess.de/entropy/de/>.

13 Eine „normale“ Wärmekraftmaschine benötigt zwei Wärme-Reservoir, um mechanische Arbeit leisten zu können – eines um Wärme (bei hoher Temperatur) zu empfangen und eines um Wärme (bei niedrigerer Temperatur) abgeben zu können. Ein „Perpetuum mobile zweiter Art“ dagegen leistet mechanische Arbeit, indem es lediglich einem Reservoir Wärme entzieht. Weil dieses grundsätzlich eine beliebige Temperatur haben kann, würde es an einem beliebigen Ort ohne Einsatz von Primärenergie, nur unter Ausnutzung der Umgebungswärme wirken können.

Literatur

Blöss, Christian (2010): „Entropie. Universelle Aspekte einer physikalischen Mengengröße“; Books on Demand (Norderstedt)

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

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)

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

Ingold, Gert-Ludwig (2008): „Quantentheorie: Grundlagen der modernen Physik“; Verlag C.H. Beck (München)

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 (³2008): „Kleine Formelsammlung Chemie“; Hanser Verlag (München)

Simonyi, Károly (³2001): „Kulturgeschichte der Physik: Von den Anfängen bis heute“; Verlag Harri Deutsch (Thun etc.)