

Die bewegende Kraft der Wärme

Zum 200. Geburtstag von Rudolph Clausius (1822 – 1888)

Dieter Hoffmann, Dieter Meschede und Johannes Orphal

Der Name Clausius lässt heute am ehesten an die Clausius-Clapeyron-Gleichung über den Zusammenhang von Dampfdruck und Temperatur von Flüssigkeiten denken oder an die Clausius-Mossotti-Gleichung, welche die makroskopische und mikroskopische Polarisierung fester Körper verknüpft. Sicher finden dann auch der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik und der bis heute schwierige Entropie-Begriff Erwähnung. Rudolph Clausius selbst scheint dagegen heute weitgehend vergessen zu sein. Dabei gibt es Gründe genug, sein Leben und Werk und sein weit über die Grenzen der Physik hinaus wirkendes Erbe in ein helleres Licht zu rücken.

Rudolph Julius Emmanuel Clausius wurde am 2. Januar 1822 im pommerschen Köslin (heute Koszalin, Polen) als Sohn eines Schulrats und Pfarrers geboren. 1834 zog die Großfamilie – Clausius hatte 14 Geschwister – nach Ueckermünde. Sechzehnjährig verließ er das Elternhaus, um in das Marienstiftsgymnasium in Stettin einzutreten. Dort unterrichteten hochqualifizierte und engagierte Lehrer wie Justus Günther Graßmann, ein bekannter Naturforscher und Vater des Pioniers der Vektor- und Tensorrechnung Hermann Graßmann. Schon

als Gymnasiast interessierte sich Clausius auch für die Funktionsweise der damals im Mittelpunkt der öffentlichen Aufmerksamkeit stehenden Dampfmaschine (**Abb. 1**). Nach dem Abitur immatrikulierte er sich zum Wintersemester 1840/41 an der Berliner Friedrich-Wilhelms-Universität, der heutigen Humboldt-Universität. Dort belegte Clausius nicht nur Physik-, Mathematik- und andere naturwissenschaftliche Vorlesungen, sondern pflegte auch seine ausgeprägten Interessen für Geschichte und Philosophie.

Der frühe Tod seiner Mutter im Jahre 1840 zwang Clausius aus ökonomischen Gründen zu einem zügigen Studienabschluss. Bereits nach sechs Semestern nahm er im Herbst 1843 im Haus des jüdischen Bankiers Louis Riess für dreieinhalb Jahre eine Hauslehrerstelle an und legte im Herbst

1844 an der Universität die Prüfungen für das höhere Lehramt ab. Trotz aller Einschränkungen

verfolgte er das Ziel einer akademischen Karriere. So erbat er sich neben seiner Tätigkeit als Hauslehrer von anderen Studenten ihre Vorlesungsmitschriften zur Nacharbeit, unter anderem zur Statistik beim Mathematiker Peter-Gustav Lejeune Dirichlet, bei dem er auch selbst Vorlesungen gehört hatte. Seine physikalischen Kenntnisse vertiefte er durch die intensive Lektüre der einschlägigen Fachliteratur, insbesondere der französischen mathematischen Physiker, wie Cauchy, Fourier, Laplace und Poisson, aber auch der Arbeiten von Gauß und Green. Wichtige Anregungen und Unterstützung erhielt er dabei durch Gustav Magnus und seinen Kreis, zu denen damals auch Hermann Helmholtz, Emil du Bois-Reymond

Rudolph Clausius (um 1860) und die eine Arbeit von 1865, in der er die Entropie einführt.

„[Es] waren [...] die Schriften von Rudolph Clausius, die mich durch ihre schlichte Klarheit und die Schärfe ihres Ausdrucks so begeisterten, dass ich bei ihnen stehen blieb und mich nun ganz diesen Gesetzen, dem Studium dieser Gesetze widmete. Insbesondere interessierte mich der von Clausius eingeführte Begriff der Entropie“, erinnerte sich Max Planck 1942.



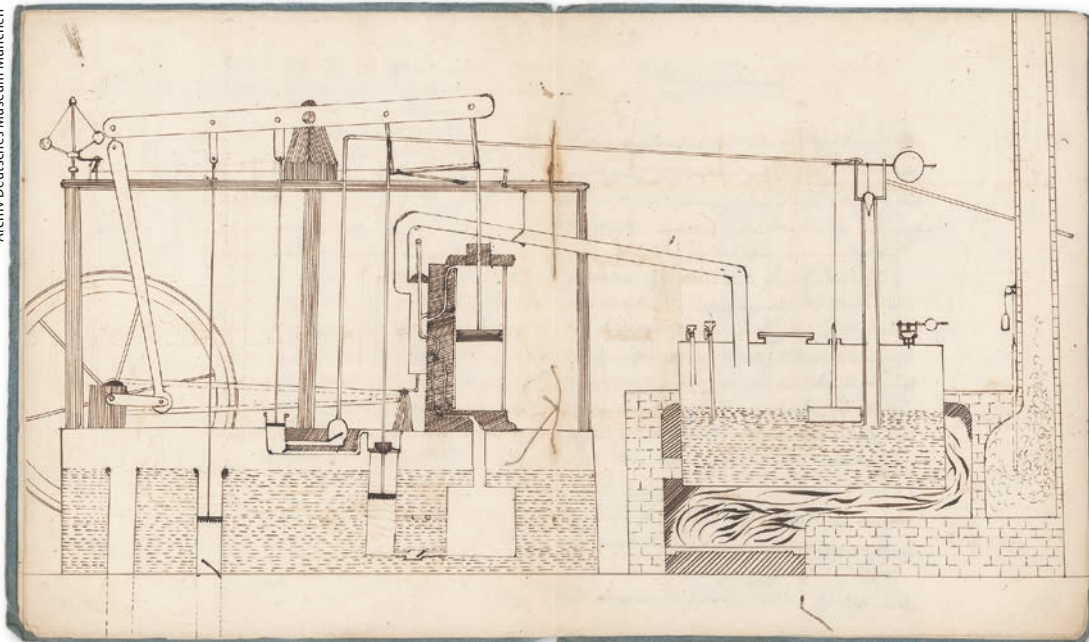


Abb. 1 Diese Zeichnung einer Dampfmaschine fertigte Clausius um 1839 als Schüler am Stettiner Marienstiftsgymnasium an.

und Gustav Wiedemann gehörten, die Magnus seit 1843 in seinem Privathaus am Kupfergraben in Berlin um sich versammelte, und zu dessen innerstem Zirkel Clausius gehörte. Seit 1843 fand dort ein „Physikalisches Kolloquium“ als neuartige Form der Wissensvermittlung statt. Unter Anleitung von Magnus wurde die aktuelle Fachliteratur vorgestellt und diskutiert. Clausius, der von Anfang an teilnahm, referierte bereits 1844 über Emile-Benoît Clapeyrons Arbeit von 1834 über die „bewegende Kraft der Wärme“ („Mémoire sur la puissance motrice du feu“, **Abb. 2**) und fand damit ein Thema, das ihn mit seinen bahnbrechenden Arbeiten von 1850 und 1865 zum Begründer des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik und Entdecker der Entropie machen sollte. Im Juli 1848 promovierte er an der Universität Halle mit theoretischen Untersuchungen zur Lichtstreuung in der Atmosphäre. Dass er seine Promotionsschrift in Halle und nicht in Berlin einreichte, war wohl darin begründet, dass er dort seine bereits erschienenen und auf Deutsch verfassten Artikel als Dissertation verwenden konnte; an der Berliner Universität wurden hingegen noch in den 1860er-Jahren lateinische Promotionsschriften gefordert. Bereits zwei Jahre später folgte die Habilitation, diesmal in Berlin, wobei sein Habilitationsvortrag dem Magnus-Effekt gewidmet war.

Zwar hatte Clausius damit die Grundvoraussetzungen für eine akademische Karriere erworben, doch änderte sich an seiner Lebenssituation zunächst nicht viel, denn er hatte am Gymnasium weiterhin ein Deputat von mindestens sechs Wochenstunden zu erfüllen – mehrfach beantragte er beim Ministerium eine Reduktion seiner Lehrverpflichtung. Magnus, Dirichlet und Johann Christian Poggendorff, Physiker und Herausgeber der „Annalen der Physik und Chemie“, unterstützten den jungen Clausius nicht nur bei der Veröffentlichung seiner ersten Arbeiten. So erhielt der frischgebackene Privatdozent 1850 zudem einen besoldeten Lehrauftrag an der „Königlichen Vereinigten Artillerie- und Ingenieurschule“ in Berlin. Dort lehrten im Nebenamt auch Professoren der Berliner Universität. Das bescherte diesen

nicht nur willkommene Nebeneinkünfte, sondern sicherte den Fachschulen ein hohes fachliches Niveau. Trotz der nicht allzu üppigen Besoldung konnte Clausius immerhin den ungeliebten Schuldienst verlassen und sich ganz auf Forschung und Hochschulkarriere konzentrieren. Für letztere war die Privatdozentur zwingend, sodass er parallel zu seiner Lehrtätigkeit an der Artillerieschule auch Lehrveranstaltungen an der Universität anbot. Anfang 1851 schrieb er zuversichtlich an seinen Bruder Robert: „[I]ch lasse mir wenigstens wegen

der Zukunft jenseits des Oktobers keine grauen Haare wachsen.“

Professur und Familiengründung

Über fünf Jahre verbrachte Clausius im akademischen Wartestand – zwei Bewerbungen um eine Physikprofessur in Breslau waren erfolglos geblieben. Aber im Sommer 1855 erging dann der lang ersehnte Ruf: Am neugegründeten Eidgenössischen Polytechnikum Zürich (heute ETH Zürich) sollte er zu den Gründungsprofessoren gehören. Er vertrat dort die theoretische Physik, lehrte aber auch technische Physik und die „Theorie der Dampfmaschinen“. Zu seinen Hörern in Zürich gehörten unter anderem Wilhelm Conrad Röntgen und Carl Linde. Allerdings galt damals die Berufung an eine Technische Hochschule eher zweitklassig, nicht nur, weil das Polytechnikum damals noch nicht über jenen herausragenden wissenschaftlichen Ruf verfügte, der es heute auszeichnet, sondern weil Technische Hochschulen damals ein Novum waren und hinter den traditionsreichen Universitäten zurückstanden. So erhielten sie in Deutschland erst 1899 das Promotionsrecht. Clausius legte deshalb auch großen Wert darauf, im Nebenamt an die Universität Zürich berufen zu werden, was 1857 geschah.

Inzwischen war sein Name in der Wissenschaftswelt bekannt, hatte er doch 1850 endlich mathematisch präzise erklärt, wie Energieerhaltung und das Prinzip der Umwandlung von Wärme in Arbeit verbunden sind. Seine grundlegenden thermodynamischen Ansätze wurden sehr erfolgreich auf verschiedenste Phänomene angewandt, zunächst auf elektrische und später auf chemische Prozesse.

Die Berufung nach Zürich verdankte Clausius nicht nur seiner Reputation als theoretischer Physiker, sondern vor allem seinen thermodynamischen Arbeiten, die für die technische Thermodynamik essenziell waren.¹⁾ Diese gehörte in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts mit dem Siegeszug der Dampfmaschine und des Dynamos zu den

Hotspots der technischen Wissenschaften und wurde am Polytechnikum besonders gepflegt. Clausius legte höchsten Wert darauf, die Theorie der Dampfmaschinen zu vollenden, und publizierte dazu mehrere Artikel, wobei er großes technisches Wissen auch in vielen Details bewies.

Clausius profilierte sich in Zürich zum führenden Thermodynamiker seiner Zeit: Neben seiner wegweisenden Arbeit 1857 „Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen“ trugen dazu die Monographien „Die Potentialfunktion und das Potential. Ein Beitrag zur Mathematischen Physik“ (1859) und „Die Mechanische Wärmetheorie“ (1864) bei. Später folgten zwei weitere Bände der „Mechanischen Wärmetheorie“. Clausius' Bücher gehörten bis ins 20. Jahrhundert zu den Standardwerken der theoretischen Physik und speziell der Thermodynamik.

Für Clausius war Zürich nicht nur hinsichtlich seiner akademischen Karriere ein großer Schritt, sondern auch für sein persönliches Leben. Der bürgerliche Kodex setzte für die Ehe ein auskömmliches Einkommen des Mannes voraus. Im Sommer 1859 heiratete Clausius die 26-jährige Adelheid Rimpau, Waise aus einer Braunschweiger Kaufmannsfamilie. Aus der Ehe gingen sechs Kinder hervor, von denen die älteste Tochter Mathilde (geb. 1861) nach dem überraschenden Tod der Mutter im Jahre 1875 dem Vater den Haushalt führte und die Erziehung ihrer jüngeren Geschwister in die Hand nahm. Erst im Juni 1886 heiratete Clausius zum zweiten Mal, diesmal die 30-jährige Sophie Sack aus Essen, die seit längerem bei der Erziehung der Kinder geholfen hatte.

Für Clausius sollte Zürich keineswegs der Höhe- und Endpunkt seiner akademischen Karriere werden, zumal er dort den Status eines „Ausländers“ nie los wurde und weiterhin den prestigeträchtigen Status eines deutschen Universitäts-Ordinarius anstrebte. Nach zwölf Jahren und mehreren ausgeschlagenen Angeboten anderer Technischer Hochschulen wechselte er 1867 an die Universität Würzburg – allerdings auf eine Professur für Mathematik. Doch schon 1869 folgte er einem Ruf an die Universität Bonn (nachdem Helmholtz die Stelle abgelehnt hatte), was seinem wissenschaftlichen Renommee und Forschungsprofil viel besser entsprach; das Direktorat eines Physikalischen Instituts, das er nun bekleidete, bedeutete damals das „Nonplusultra“ einer Physikerkarriere. Neben seiner Forschung und regen Publikationstätigkeit erfüllte Clausius sehr zuverlässig seine Lehrverpflichtungen. Dabei organisierte er auch Woche für Woche ein Seminar, in dem

die Studenten über aktuelle physikalische Publikationen vortrugen, ganz nach Vorbild des Magnus-Kolloquiums.

Ein überzeugter Atomistiker

In seinen frühen Forschungen ab 1845 hatte sich Clausius mit der atmosphärischen Lichtstreuung und mit der elastischen Nachwirkung beschäftigt. In beiden Gebieten versuchte er, anhand mikroskopischer Hypothesen und den dazu passenden physikalischen Gesetzen die beobachteten makroskopischen Phänomene herzuleiten, um die Hypothesen auf diese Weise zu überprüfen. Die Ansätze in beiden Gebieten gleichen sich methodisch sehr und enthalten bereits grundlegende Konzepte, auf die er später zurückgreifen sollte, darunter statistische Methoden bei der Lichtstreuung – die konzeptuell auch heute noch gelten – und die Einführung von „Wirkungssphären“ sowie einer Anisotropie der mikroskopischen Kräfte zwischen den Molekülen bei der Elastizität. Hervorzuheben sind außerdem seine exzellenten mathematischen Fähigkeiten. Seine frühen Arbeiten zur Lichtstreuung publizierte er, vermutlich vermittelt durch seinen Mentor Dirichlet, in Crelles „Journal für die reine und angewandte Mathematik“.

Der Zusammenhang zwischen mikroskopischen Modellen und makroskopischen Messgrößen hat Clausius sein ganzes Leben lang beschäftigt. Er berechnete 1857 erstmalig korrekt die (mikroskopischen) mittleren Geschwindigkeiten v von Sauerstoffmolekülen in der Luft aus den (makroskopischen) messbaren Größen Druck p und Dichte ρ ($v = (3p/\rho)^{1/2}$) zu $v = 460$ m/s, vollkommen im Einklang mit der heutigen Vorstellung von Gasen. Dazu schrieb er: „Diese Zahlen sind die **mittleren** Geschwindigkeiten ... dabei ist es aber möglich, dass die wirklichen Geschwindigkeiten der einzelnen Moleküle²⁾ sehr bedeutend von dem mittleren Werthe abweichen.“ (Hervorhebung der Autoren). Er

bewies in dieser Arbeit auch Avogadro Vermutung von 1811, dass alle Gase bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl von Molekülen enthalten. 1858 führte Clausius als erster die mittlere freie Weglänge



Abb. 2 Clausius' allererste Skizze des Carnot-Prozesses als p - V -Diagramm entstand 1844 für seinen Vortrag über Clapeyrons Arbeit im Kolloquium bei Magnus.

- 1) So ging der Begründer der chemischen Thermodynamik August Horstmann nach seiner Promotion 1865 eigens nach Zürich, um dort die Vorlesungen von Clausius zu hören; zudem wirkte an der Seite von Clausius der Maschinenbauingenieur und Wegbereiter der technischen Thermodynamik Gustav Zeuner.
- 2) Avogradro prägte den Begriff „Molecul“ (neulateinisch „kleine Masse“), der sich bis zu der noch heute gebräuchlichen Bezeichnung „Molekularstrahl“ fortsetzt, selbst wenn es sich dabei um einen Strahl aus Atomen handelt. Für Clausius, der auch über das Ozon und die Struktur anderer Gase publizierte, waren Moleküle offenbar eine Realität, inklusive ihrer inneren Freiheitsgrade und der Möglichkeit der Dissoziation.

ein, als die Strecke, die ein „Molecül“ im Durchschnitt geradlinig zurücklegt, bevor es mit einem anderen Molecül zusammenstößt. Er betrachtet dabei die Molecüle als Objekte mit einer „Wirkungssphäre“ (heute: Stoßquerschnitt), und nimmt an, dass diese mit ihren Wirkungssphären etwa 1/1000 des tatsächlichen Gasvolumens einnehmen. So konnte er abschätzen, dass die freie Weglänge etwa das 60- bis 80-Fache des Radius' der Wirkungssphären beträgt. Damit lässt sich das langsame Diffundieren von Rauchwolken ebenso verstehen wie die Gültigkeit des Gesetzes von Gay-Lussac.

Clausius untersuchte schon vor 1850 (und bis in seine späten Jahre immer wieder) die Abweichungen des Verhaltens der realen Gase vom idealen Gasgesetz³⁾ und versuchte, daraus Eigenschaften wie Molekülgrößen und intermolekulare Kräfte abzuleiten. Seine Definition eines idealen Gases von 1857 ist daher mit der heutigen absolut identisch. Ebenfalls sehr früh (spätestens um 1849) war ihm klar, dass Moleküle auch Rotationen und Schwingungen⁴⁾ als innere Freiheitsgrade besitzen müssen (was die Wärmekapazitäten der verschiedenen Gase erklärte) und er postulierte 1857, dass durch die translatorische Bewegung „nicht ausgeschlossen ist, daß jedes Massenatom noch mit einer Quantität eines feineren Stoffes begabt, und dieser, ohne sich vom Atom zu trennen, doch in seiner Nähe beweglich seyn könne“ – man könnte dies vielleicht als eine frühe Vision der Elektronen sehen. Auch 1857 bewies er in „Über die Elektrizitätsleitung in Elektrolyten“ die Notwendigkeit der Dissoziation von Molekülen in Flüssigkeiten und die Existenz von Ionen, allein aufgrund von makroskopischen Beobachtungen.

Grundlegende Beiträge zur Thermodynamik

Bereits mit seiner ersten Arbeit „Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen“ gelang es ihm im Januar 1850, große Klarheit in die bis dahin herrschende Verwirrung über Energieerhaltung und die Äquivalenz von Wärme und Arbeit zu bringen. Er begründete damit seinen späteren Weltruhm und etablierte gleich in dieser ersten Schrift neben dem 1. Hauptsatz (der Äquivalenz von Wärme und Arbeit) auch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik: das „Carnot-Prinzip“, dass bei der „Erzeugung“ von Arbeit

aus Wärme unbedingt auch Wärme von einem heißeren zu einem kälteren Reservoir übergehen muss, als eigenständiges Gesetz. Hier sind vor allem sein extrem strukturiertes Herangehen – wie das Aufgreifen des Carnot-Kreisprozesses (Abb. 2) – und sein streng logisches Argumentieren beeindruckend. Zudem ist wichtig, dass Clausius in dieser Arbeit programmatisch von jeglichen atomistischen Hypothesen absah und nur „thermodynamisch“ makroskopisch bzw. phänomenologisch argumentierte und damit insbesondere auch Planck und Einstein für seine Konzepte einnahm. Allerdings war diese Arbeit damals mathematisch für viele Zeitgenossen nicht leicht zu verstehen, weil Clausius

darin mit den partiellen Differentialgleichungen der Thermodynamik operierte sowie komplizierte Berechnungen und Tabellen zum Vergleich mit experimentellen Studien (unter anderem von Gustav Magnus und Henri Victor Regnault) zum gesättigten Dampfdruck vorlegte. Hier führte Clausius auch den 1. Hauptsatz in mathematischer Form exakt so ein, wie wir ihn heute noch kennen, sogar mit den gleichen Symbolen: dQ für die Wärme und dU für die innere Energie – er wies von Anfang an darauf hin, dass dQ kein vollständiges Differential sei. In den folgenden Jahren gab es etliche Physiker, zu denen auch Helmholtz gehörte,⁵⁾ die seine Ansätze nicht sofort verstanden, sodass

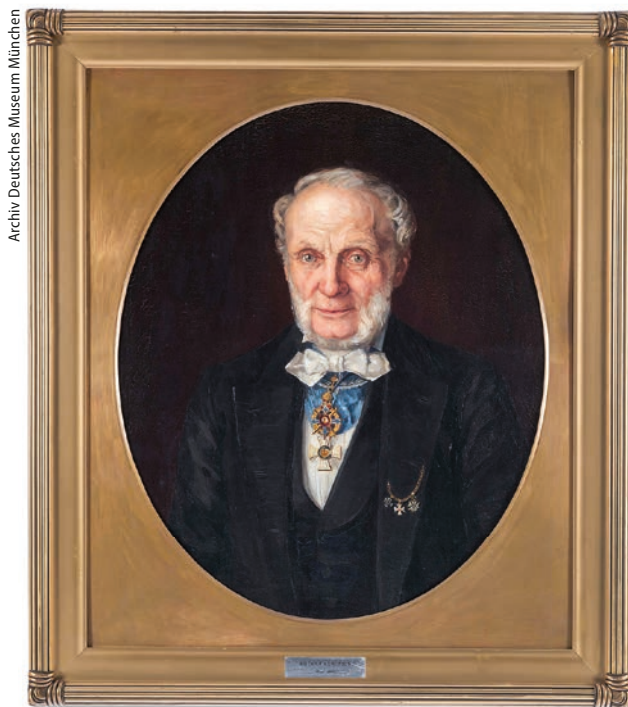


Abb. 3 Das Porträt von Adeline Jaeger (um 1885, Original im Besitz des Urenkels, R. Budde, Genf) zeigt den älteren Rudolph Clausius ordengeschmückt als Professor in Bonn.

Clausius ab 1864 in seinen Büchern zur Thermodynamik ein „mathematisches Vorwort“ vorschaltete. William Thomson (der spätere Lord Kelvin), der 1849 noch die Probleme der Thermodynamik als derzeit unlösbar bezeichnet hatte, war von Clausius' Arbeiten sofort beeindruckt und erkannte dessen Leistung in seinen Publikationen uneingeschränkt an.

Clausius hat später immer wieder betont, wie wichtig es für ihn war, diese erste thermodynamische Arbeit so auszuführen, dass sie keiner mikroskopischen Hypothesen bedurfte, was auch Basis für ihre große Allgemeinheit wurde. Das war ihm offenbar 1850 sehr bewusst – genau wie Sadi Carnot 1824 seinen (idealen) Kreisprozess unabhängig von jeglicher praktischen Umsetzung formuliert hatte. Im gleichen Sinne unterschied Clausius schon 1850 sehr deutlich zwischen (idealen) reversiblen und (realen) irreversiblen Vorgängen. Dieses sehr strukturierte konzeptuelle, logische Vorgehen mit idealisierten „Gedankenexperimenten“, zusammen mit seiner sehr großen mathematischen Begabung

und Ausbildung, waren die Grundlagen für seinen Erfolg – sodass er als einer der ersten „reinen“ theoretischen Physiker im Sinne der Moderne gelten kann.

Nach 1850 hat Clausius weiter intensiv am Verständnis und Konzept des 2. Hauptsatzes gearbeitet. Er übernahm dabei von William Thomson den Energiebegriff, der uns heute so selbstverständlich scheint: Dieser ersetzte fortan veraltete Begriffe wie „lebendige Kraft“ für die kinetische Energie oder „Spannkraft“ für die potentielle Energie. Noch bedeutender war seine Einführung der Entropie S als neue Zustandsgröße thermodynamischer Systeme. Lange schon, spätestens seit 1854, war ihm klar, dass man dQ/T als vollständiges Differential ansehen musste, aber es fiel ihm offenbar schwer, dessen Bedeutung zu verstehen sowie die Unterschiede von reversiblen und irreversiblen Prozessen mathematisch korrekt zu formulieren. Dazu schrieb er 1865: „Sucht man für S einen bezeichnenden Namen, so könnte man, ähnlich wie von der Größe U gesagt ist, sie sey der Wärme- und Werkinhalt des Körpers, von der Größe S sagen, sie sey der Verwandlungsinhalt des Körpers. ... , damit sie unverändert in allen neuen Sprachen angewandt werden könne, so schlage ich vor, die Größe S nach dem griechischen Worte η τροπή, die Verwandlung, die Entropie des Körpers zu nennen. Das Wort Entropie habe ich absichtlich dem Worte Energie möglichst ähnlich gebildet, ...“. Seine endgültigen Schlussfolgerungen in diesem berühmten Aufsatz lassen an Klarheit und Allgemeinheit nichts zu wünschen übrig (Abb. 4).

In den Jahren ab 1869 bemühte sich Clausius, eine mathematische Verbindung zwischen seinen phänomenologischen Ansätzen zur Entropie und seinen atomistischen Vorstellungen zu finden, insbesondere suchte er nach einer mechanischen Erklärung für den 2. Hauptsatz (die 1877 Ludwig Boltzmann in der statistischen Begründung fand) und entdeckte dabei 1870 den Virialsatz. Zum Standardkanon jeder theoretischen Physikvorlesung gehörend, hat das Virial heute eher den Ruf einer Kuriosität, doch veranlasste es etwa Fritz Zwicky, aus den Beobachtungen am Coma-Galaxienhaufen frühe Vermutungen über die Existenz der „Dunklen Materie“ anzustellen; in Form der „Virialkoeffizienten“ ist es heute immer noch in Thermodynamik und technischer Physik gebräuchlich.

Ansätze zur Vereinheitlichung der Physik

Bereits 1851 untersuchte Clausius die Wärmeeffekte bei der elektrischen Leitung und schrieb 1859 das erste deutschsprachige Buch über die Potentialtheorie (eine Aktualisierung und Weiterentwicklung der Theorien von Green

Vorläufig will ich mich darauf beschränken, als ein Resultat anzuführen, dass, wenn man sich dieselbe Grösse, welche ich in Bezug auf einen einzelnen Körper seine Entropie genannt habe, in consequenter Weise unter Berücksichtigung aller Umstände für das ganze Weltall gebildet denkt, und wenn man daneben zugleich den anderen seiner Bedeutung nach einfacheren Begriff der Energie anwendet, man die den beiden Hauptsätzen der mechanischen Wärmetheorie entsprechenden Grundgesetze des Weltalls in folgender einfacher Form aussprechen kann.

- 1) Die Energie der Welt ist constant.
- 2) Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.

Abb. 4 Die Schlussfolgerungen von Clausius am Ende seiner Arbeit von 1865, in der er den Energiebegriff in die deutsche Sprache übernimmt und die Entropie einführt.

und Gauß) – ein „Bestseller“, der bis zu Clausius' Tod 1888 vier Auflagen erlebte. Nach der Wärmetheorie war für ihn insbesondere die Elektrodynamik ein weiteres spannendes Forschungsgebiet.

1875 veröffentlichte Clausius sogar ein eigenes „neues elektrodynamisches Grundgesetz, in dem er versuchte, alle bisherigen Theorien zu vereinen. Dieses betrachtete absolute (und nicht nur relative) Geschwindigkeiten der bewegten Ladungen. Es wurde einige Jahrzehnte lang als das allgemeinste Gesetz betrachtet, waren doch die Schwierigkeiten von Maxwells Theorie für bewegte Ladungen damals nicht überwindbar. In seinen letzten Jahren versuchte er, mithilfe einer (mikroskopischen) „Äthertheorie“ das Gebäude der klassischen Physik zu vollenden. Doch damit stieß Clausius an seine Grenzen: In der Welt der Atome und Moleküle sollte es Max Planck sein, der 1900 mit seiner Quantenhypothese das Tor zu einem neuen Verständnis der Materiestruktur, ja einer grundlegend neuen Physik aufstieß; in der Elektrodynamik war es wenig später Albert Einstein, der 1905 den Äther endgültig über Bord warf und die Relativitätstheorie schuf. Beide waren mit den Methoden von Clausius bestens vertraut, sie benutzten die Entropie ganz selbstverständlich, um Gesetze von größter Allgemeinheit herzuleiten.

Ein führender Physiker seiner Zeit

Die Berufung von Rudolph Clausius an die Universität Bonn markierte den Beginn eines goldenen Zeitalters der Physik, wirkten doch in Clausius' Nachfolge ab 1888 so bedeutende Physiker wie Heinrich Hertz, Philipp Lenard, Heinrich Kayser und Heinrich Konen. Sie machten die Hochschule endgültig zu einem weltweit anerkannten Zentrum moderner physikalischer Forschung. Die Bonner Universität war im 19. Jahrhundert die zweitangesehenste Universität Preußens nach Berlin und zudem bevorzugter Studienort für den deutschen Hochadel und Fürstensöhne. Dazu gehörte auch der spätere deutsche Kaiser Wilhelm II.,

3) Diese Abweichungen waren ihm 1849 in den Messungen von Henri Victor Regnault schon vor seiner ersten Arbeit zur Wärmetheorie aufgefallen, wie er später immer wieder betonte; diese originalen frühen Berechnungen hat einer der Autoren (JO) in Clausius' Nachlass im Deutschen Museum tatsächlich gefunden.

4) In diesen ersten (unveröffentlichten) Berechnungen (ibid.) näherte er die „Moleküle“ als rotierende und schwingende Stäbe an – und all das schon vor 1850!

5) Siehe „Fortschritte der Physik“ 1851, Helmholtz berichtet dort auch über Clausius' Arbeit, offenbar ohne die volle Bedeutung zu erkennen – ähnlich wie Clausius auch Helmholtz' Arbeit von 1847, „Über die Erhaltung der Kraft“ zunächst nicht richtig eingeschätzt hatte, siehe Orphal und Hoffmann, 2020, S. 84.

der als Student durch Clausius „privatissime“ in die Grundlagen der Physik eingeführt wurde.

Politisch pflegte Clausius wie die große Mehrheit der deutschen Akademiker die Attitüde des vermeintlich apolitischen Gelehrten. Zwar hatte er sich im Revolutionsjahr 1848 einer Petition der jungen Physikalischen Gesellschaft angeschlossen, die eine Demokratisierung der Preußischen Akademie forderte, doch weitere vergleichbare politische Äußerungen in der Öffentlichkeit sind von Clausius nicht bekannt.

In seiner Bonner Zeit galt Clausius als damals führender deutscher Physiker – wohl nur übertagt vom „Reichskanzler der Physik“ Hermann Helmholtz – und war im In- wie Ausland ein höchst willkommener Gast und Mitglied aller deutschen und der führenden europäischen Akademien. Die Londoner Royal Society verlieh ihm 1879 die Copley-Medaille, was dem heutigen Nobelpreis entspricht. 1884 wurde er Rektor der Bonner Universität und 1887 gehörte er zu den ersten Kuratoren der neu gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin; schließlich wurde er wenige Monate vor seinem frühen Tod Ritter der Friedensklasse des Ordens „Pour le Mérite“ und war damit in den Olymp deutschen Geistes aufgenommen.

Clausius starb am 24. August 1888 in Bonn an einer „perniziösen Anämie“, einer damals nicht behandelbaren Blutkrankheit. Bis zuletzt nahm er vom Krankenbett aus Prüfungen ab und arbeitete am dritten Band seiner „Mechanischen Wärmetheorie“. Sein gewaltiger wissenschaftlicher Nachlass wurde in den 1920er-Jahren an das Deutsche Museum übergeben.

Seine – leider nur sehr unvollständig erhaltene – wissenschaftliche Korrespondenz zeigt einen höchst aktiven Gelehrten, der sich auch für gesellschaftliche und kulturelle Themen und den Fortschritt von Technik und Wirtschaft interessierte. Diese Weitsicht zeigt sich auch in seinen wissenschaftlichen Arbeiten und öffentlichen Vorträgen. So sprach er in seiner Rektoratsrede von 1885 über die „Energievorräthe der Natur und ihren Verwerthung zum Nutzen der Menschheit“ und plädierte für die Erschließung erneuerbarer Energien: „Die Menschen werden dann darauf angewiesen sein, sich mit der Energie zu behelfen, welche die Sonne im Verlaufe der ferneren Zeit noch fortwährend durch ihre Strahlen liefert“ – konkret schlägt er die Nutzung der Energie aus nachwachsenden Pflanzen (in heutiger Terminologie „Biomasse“) sowie von Wind- und Wasserenergie anstelle von Kohle vor. Aus heutiger Sicht, auch mit Blick auf die zentrale Rolle der Thermodynamik für die Meteorologie und Klimaforschung (kaum ein Begriff wird in den Berichten des Weltklimarates häufiger benutzt als „Wärme“), erscheint uns das Fazit seiner Rede nahezu prophetisch:

„[So] werden die folgenden Jahrhunderte die Aufgabe haben, in dem Verbrauch dessen, was uns an Kraftquellen in der Natur geboten ist, eine weise Oekonomie einzuführen, und besonders dasjenige, was wir als Hinterlassenschaft früherer Zeitepochen im Erdboden vorfinden, und was durch nichts wieder ersetzt werden kann, nicht verschwenderisch zu verschleudern.“

Literatur

- Bislang gibt es keine umfassende Biographie zu Clausius, ein erster unpublizierter Versuch ist *J. Orphal, Rudolph Clausius. Eine Studie zum Gedenken seines 100. Todestages*. Berlin (1987) [124 S.]
- Zu den Berliner Jahren: *W. Ebeling und J. Orphal, Die Berliner Jahre des Physikers Rudolph Clausius (1840 – 1855)*. Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin. Math.-Naturwiss. Reihe 39, 210 (1990); *J. Orphal und D. Hoffmann, Gustav Magnus, Rudolf Clausius und die Entstehung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik*, in: *D. Hoffmann (Hrsg.), Gustav Magnus und sein Haus*, GNT, Berlin (2020), S. 84; *J. Orphal und D. Hoffmann (Hrsg.), Rudolph Clausius und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik*. Texte, Heidelberg (2022) [in Vorb.]
- Zu den Züricher Jahren: *G. Ronge, Die Züricher Jahre des Physikers Rudolf Clausius*, Gesnerus 12, 73 (1955)
- Als zeitgenössische Quellen informativ sind die Nachrufe: *H. v. Helmholtz, Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin* 8, 1 (1889); *E. Riecke, Dieterichsche Verlags-Buchhandlung, Göttingen* (1888) [mit Schriftenverzeichnis], und *J. W. Gibbs, Proc. Am. Acad. Arts Sci.* 16, 458 (1889)
- Weiterführende Literatur zu Clausius: *S. Brush, Ann. Sci.* 14, 185 (1958); *E. Garber, Hist. Stud. Phys. Sci.* 2, 299 (1970), *Y. S. Kim, Arch. Hist. Exact Sci.* 33, 256 (1983); *I. Schneider, Arch. Hist. Exact Sci.* 14, 143 (1974), *S. Wolff, Sudhoffs Archiv* 79, 57 (1995), *E. Yagi*, in: *Collected Papers of Eri Yagi and Her Coworkers*, Internat. Publ. Inst., Tokyo (2002)
- Digitalisierte Versionen der Schriften von Clausius finden sich auf www.deutsche-digitale-bibliothek.de/person/gnd/116540486
- Quellenangaben und weitere Literaturangaben finden sich in der Online-Version des Artikels.

Die Autoren



Johannes Orphal (FV Umweltphysik und Geschichte der Physik und Arbeitsgruppe Philosophie der Physik) ist Professor für Physik und Bereichsleiter „Natürliche und gebaute Umwelt“ am KIT Karlsruhe. Seit dem Physikstudium an der Humboldt-Universität Berlin beschäftigt er sich mit Leben und

Werk von Rudolph Clausius. Seine wichtigsten Forschungsschwerpunkte sind die hochauflösende Molekülspektroskopie und Fernerkundung der Atmosphäre.

Dieter Meschede (FV Quantenoptik und Photonik) ist Professor für Physik am Institut für Angewandte Physik der Universität Bonn. Er beschäftigt sich mit Quantenoptik und Quantentechnologie und hat in jüngster Zeit viel Freude darin



gefunden, das Leben und Wirken von Rudolph Clausius gerade im Hinblick auf seine grundlegenden Arbeiten zur atomistischen Struktur der Materie zu studieren.

Dieter Hoffmann ist Mitarbeiter i. R. des MPI für Wissenschaftsgeschichte mit einem Forschungsschwerpunkt zur modernen Physikgeschichte in Berlin; er war lange Jahre Vorsitzender des FV Geschichte der Physik der DPG.



Prof. Dr. Johannes Orphal, KIT-Zentrum Bereich 4, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, **Prof. Dr. Dieter Meschede**, Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn, Wegelerstr. 8, 53115 Bonn, **Prof. Dr. Dieter Hoffmann**, Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Boltzmannstr. 22, 14195 Berlin