

## NDB-Artikel

**Clausius**, *Rudolf* Julius Emanuel Physiker, \* 2.1.1822 Köslin (Pommern), † 24.8.1888 Bonn. (evangelisch)

### Genealogie

Aus urspr. kursächsischem Pfarrergeschlecht;

V Carl Ernst Gottlieb (1781–1855), Theol., Regierungsschulrat, S des Ernst Gottlieb (1745–91), Oberpfarrer in Woldenberg, u. der Wilh. Charl. Dienemann, aus Pastorenfamilie;

M Charl. Wilh. (1793–1840), T des Pastors Gottfr. Imman. Schultze (1757–1840) in Glasow b. Soldin u. der Christina Wilh. Senfft;

◉ 1) Zürich 1859 Adelh. (1833-75), T des →Justus Rimpau (1782–1840), Großkaufmann in Braunschweig, u. der Mathilde Fritze, *Cousine* des Getreidezüchters Wilh. Rimpau (1814-92 [s. NDB II, 347\*, ADB LIII]), 2) 1886| Sophie, T des Otto Sack, Justizrat in Essen, u. der Joh. Budde;

2 S, 4 T aus 1) u. a. Helene (1863-1919, ◉ 1885 →Karl Budde [† 1935], ev. Theol., s. NDB II), 1 S aus 2).

### Leben

C., das sechste unter achtzehn Kindern, studierte von 1840 an an der Universität Berlin; um seine jüngeren Geschwister zu unterstützen, wurde er für einige Zeit Hauslehrer, dann Lehrer am Friedrich-Werderschen Gymnasium in Berlin. Er promovierte daher erst 1848, und zwar mit einer Dissertation über den Regenbogen und verwandte atmosphärische Erscheinungen. 1850 wurde er Physikdozent an der Artillerie- und Ingenieurschule, gleichzeitig Privatdozent an der Universität Berlin. 1855 ging er als Professor der Physik an die ETH Zürich, 1867 nach Würzburg, 1869 nach Bonn. C. war Träger der Friedensklasse des Pour le mérite und Mitglied fast aller in- und ausländischen wissenschaftlichen Akademien.

Zwei Leistungen von eminenter geschichtlicher Größe haben seinen Namen in den Naturwissenschaften unsterblich gemacht: die scharfe, mathematische Formulierung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik und die Begründung der kinetischen Gastheorie.

Daß der Wärmeübergang von höherer zu tieferer Temperatur die notwendige Voraussetzung für die Arbeitsleistung der Dampfmaschine ist, daß man aber umgekehrt nicht Wärme von tieferer Temperatur auf höhere schaffen kann, ohne daß eine kompensierende Veränderung in den beteiligten Körpern

zurückbleibt, hatte 1824 S. Carnot, 1834 B. Clapeyron klar ausgesprochen. Da sie aber mit ihren Zeitgenossen die Wärme für eine unerschaffbare und unzerstörbare Substanz hielten, vermochten sie nicht, die richtigen Schlüsse daraus zu ziehen. Nachdem jedoch das Energieprinzip und damit die Äquivalenz von Wärme und Energie sichergestellt war, wandte C. 1850 diese neue Erkenntnis auf den umkehrbaren Kreisprozeß an, der als Gedankenversuch schon bei Clapeyron vorkommt. Er kam zu der Folgerung, daß die Umsetzung von Wärme in mechanische Arbeit (Energie) nicht von der den Kreisprozeß durchlaufenden Substanz abhängt, sondern in universeller Beziehung steht zu den beiden Temperaturen, bei denen Wärme aufgenommen und abgegeben wird. Dies ermöglichte die Definition einer absoluten, von den Sondereigenschaften des Quecksilber- oder Gasthermometers und so weiter unabhängigen Temperaturskala, die im Prinzip jetzt alle anderen verdrängt hat. 1865 schuf er im Anschluß daran den Begriff der „Entropie“, einer Zustandsfunktion, deren Gesamtwert in einem abgeschlossenen System nie abnimmt, vielmehr stets wächst und nur in dem idealen Grenzfall eines umkehrbaren Vorganges konstant bleibt. Alle wirklichen Vorgänge sind mit Entropiezunahme verknüpft, daher unumkehrbar; ihre Umkehrung bedeutete nämlich Entropieabnahme. - Dies ist der allgemeinste Ausdruck für den „Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik“. Zusammen mit dem Energieprinzip, das man auch als den Ersten Hauptsatz bezeichnet, und dem 1906 von Walter Nernst entdeckten Dritten Hauptsatz, begründet er die ganze Thermodynamik. Der Entropiebegriff ist, namentlich durch →Max Planck, zum Mittelpunkt dieses Zweiges der Physik geworden.

Die kinetische Gastheorie geht, wenn man von bald wieder vergessenen Ansätzen zum Beispiel bei Daniel Bernoulli absieht, zurück auf A. Krönig (1856) und C. (1857). Ihr Kennzeichen, durch das sie sich von allen früheren physikalischen Theorien unterscheidet, ist, daß sie nicht nach der Bewegung des einzelnen Gasmoleküls fragt, sondern nach mittlerer Energie, dem mittleren Impuls, der mittleren freien Weglänge aller Moleküle. C. stellt diese Energie in eine enge, weit über die Gastheorie hinaus gültige Beziehung zur absoluten Temperatur, er eröffnete das Verständnis für die Reibung, die Wärmeleitung und die Diffusion der Gase, er leitete die Zustandsgleichung der Gase ab, und wenn wir heute die Masse des einzelnen Atoms in Grammen seine Dimensionen in Zentimetern und die Zahl der Moleküle in Grammmolekül anzugeben vermögen, so geht dies alles auf C. zurück. Die kinetische Gastheorie ist der Prototyp für die ganze physikalische Statistik, deren Bedeutung immer mehr wächst. Beide Leistungen stehen in engem Zusammenhang miteinander. Die statistische Deutung des Zweiten Hauptsatzes fand Ludwig Boltzmann noch zu Lebzeiten von C.

### **Werke**

Üb. d. bewegende Kraft d. Wärme u. d. Gesetze, welche sich daraus f. d. Wärmelehre selbst ableiten lassen, in: Poggendorffs Ann. d. Physik u. Chemie, 1850, Neudr., hrsg. v. M. Planck, in: Ostwalds Klassiker d. exakten Wiss. 99, 1921;

Üb. d. Wesen d. Wärme verglichen mit Licht u. Schall, Zürich 1857;

Die Potentialfunktion u. d. Potential, 1859, <sup>4</sup>1885;

Die mechan. Wärmetheorie, 2 Bde., 1864/67, 2. Aufl. u. d. T. Abhh. üb. d. mechan. Wärmetheorie, 1876/79, Bd. 1, <sup>3</sup>1888, hrsg. v. M. Planck u. C. Pulfrich;

Üb. d. zweiten Hauptsatz d. mechan. Wärmetheorie, 1867;

Üb. d. Zusammenhang zw. d. großen Agentien d. Natur, 1885;

Üb. d. Energievorräte in d. Natur u. ihre Verbreitung z. Nutzen d. Menschheit, 1885.

### **Literatur**

ADB LV;

E. Riecke, in: Abhh. d. Ges. d. Wiss. Göttingen, Math.-phys. Kl. 35, 1888 (*vollst. W- | Verz.*);

W. Nernst, Zu C.s 100. Geburtstag, in: Gedenkfeier d. Univ. Bonn f. einstige Mitgl., 1922 (*P*);

R. Anschütz, Aug. Kekulé I, 1929 (*P*);

Lb. Pommern I, 1934, S. 208-11 (*W, L, P*);

Pogg. I, III, IV (*vollst. W-Verz.*); hs. wiss. Nachlaß im Dt. Mus. München.

### **Portraits**

Aus d. Gesch. d. Berliner Physik, 1935, Bild 5;

Gem. (im Bes. v. Frau Marg. Wempe-Hagemann, Essen-Bredeney);

Phot. (*P*-Slg. d. Dt. Mus. München);

Gipsbüste v. A. Küppers, 1888 (Phys. Inst. d. Univ. Bonn), Abb. in: Gr. Deutsche im Bild, 1936, S. 363.

### **Autor**

Max von Laue

### **Empfohlene Zitierweise**

, „Clausius, Rudolf“, in: Neue Deutsche Biographie 3 (1957), S. 276-278 [Onlinefassung]; URL: <http://www.deutsche-biographie.de/html>



## ADB-Artikel

**Clausius** Zu Bd. XLVII, S. 500.: *Rudolf* Julius Emanuel C. wurde am 2. Januar 1822 in Köslin in Pommern geboren als eines der jüngeren von achtzehn Kindern des Regierungsschulrathes Clausius dortselbst. Seine Erziehung erhielt er in der Privatschule seines Vaters in Uckermünde, wohin sich dieser zurückgezogen hatte, um eine Ruhestelle als Pfarrer und Superintendent zu übernehmen. Die beiden letzten Gymnasialjahre verbrachte Rudolf C. auf dem Gymnasium zu Stettin. Schon hier zeichnete er sich in Mathematik und Physik aus, und er wurde, sowohl was seine Begabung wie seine hervorragenden Charaktereigenschaften anbetraf, von seinen Lehrern richtig gewürdigt. 1840 bezog er die Universität Berlin. Anfangs schwankend in der Wahl seines Studiums, da ihn die historischen Vorlesungen Ranke's sehr fesselten, gewann doch die Neigung für Mathematik und Naturwissenschaft die Oberhand. Er hörte die Vorlesungen von Dirksen, Ohm, Dirichlet, Steiner, Dove und Magnus. Schon vor Beendigung des Studiums übernahm er 1843 eine Hauslehrerstelle in Berlin, um dem Vater die Unterstützung der jüngeren Geschwister zu erleichtern; von 1844—1850 wirkte er dann als Lehrer der Physik am Friedrich Werder'schen Gymnasium in Berlin. In dieser Zeit entstanden seine ersten Publicationen; auch faßte er damals die Ideen zu seinen hervorragendsten Arbeiten. 1847 promovirte er in Halle. Im Jahre 1850 erhielt C. die Stelle als Physiklehrer an der Artillerie- und Ingenieurschule in Berlin und konnte sich so noch besser der wissenschaftlichen Thätigkeit widmen; auch habilitirte er sich im selben Jahre an der Universität. 1855 folgte er einem Rufe an das Eidgenössische Polytechnikum in Zürich, wo er zwölf Jahre lang, seit 1857 zugleich an der dortigen Universität, segensreich wirkte. Er vermählte sich 1859 mit Adelheid Rimpau, eine Ehe, der sechs Kinder entsprossen. Nachdem er mehrere Anerbieten an andere technische Hochschulen ausgeschlagen hatte, folgte er 1867 einem Rufe an die Universität Würzburg, die er jedoch schon 1869 mit einer Universität seines engeren Vaterlandes, und zwar mit Bonn vertauschte. Hier wirkte er bis zu seinem Lebensende 1888; alle weiteren, zum Theil sehr verlockenden Anerbietungen schlug er aus. Seine Pflichten als Staatsbürger nie über der Wissenschaft vergessend, nahm C. am Feldzug 1870 als Führer eines Nothhelfercorps Bonner Studenten theil. Auf dem Schlachtfelde von Gravelotte am Knie verwundet, hatte er an den Folgen der Verletzung dauernd zu leiden. Seine Gattin wurde ihm 1875 durch den Tod entrissen; um so rührender widmete er sich sodann seinen Pflichten als Familienvater. 1886 vermählte er sich zum zweiten Male mit Sophie Sack, doch erkrankte er 1888 an einer perniciosen Anämie und erlag derselben sanft und schmerzlos am 24. August desselben Jahres. So lange es ging, hielt er an seinen Docentenpflichten fest und war|bis zu seinem Ende mit der Herausgabe der neuen Auflage seiner „Mechanischen Wärmetheorie“ beschäftigt. C. war Mitglied der angesehensten Akademien und gelehrten Gesellschaften Europas. Persönlich war er das Muster eines deutschen Gelehrten von schlichter Gediegenheit des Wesens und natürlicher Wärme der Gesinnung. So einfach, äußerlich betrachtet, sein Leben verlief, so bedeutend sind seine Leistungen.

Seine erste Arbeit erschien 1847 und behandelte die Lichtzerstreuung in der Atmosphäre und die Intensität des reflectirten Sonnenlichts. Dies war auch das Thema seiner Inauguraldissertation. C. griff hier eine wichtige, sich einem Jedem aufdrängende Frage, die nach den Ursachen der Himmelsbläue und der Morgen- und Abendröthe, zum ersten Male systematisch und in vollem Umfange an. Zunächst zeigte er — und das ist auch jetzt noch die herrschende Ansicht —, daß es sich um in der Luft befindliche freie Theilchen als Ursache handeln müsse. Kamen nun die Erscheinungen allein durch die gewöhnliche Reflexion und Brechung zu Stande, etwa wie der Regenbogen, so bewies er weiter, sich mit den Methoden der theoretischen Optik wohl vertraut zeigend, daß es sich weder um feste undurchsichtige Theilchen, noch um compacte Wassertröpfchen handeln konnte. Das Ganze mußte ein Phänomen sehr dünner Blättchen sein, da diese das Blau stärker als Roth reflectiren. Da nun solche planparallelen Blättchen in der Atmosphäre nicht gut vorgestellt werden konnten, so nahm er sie als zu Bläschen gekrümmt an — glaubte doch z. B. de Saussure, solche hohlen Nebelbläschen wirklich beobachtet zu haben. Nur einige Bläschen im Glanz eines Lichtstrahls genügten übrigens, um die Farbe des klaren Himmels zu erklären. Hieraus ergab sich denn befriedigend die Farben- und Intensitätsvertheilung des Himmelslichts. Es war begreiflich, daß diese eigenartige Theorie vielfach angegriffen wurde, C. konnte sie jedoch stets erfolgreich gegen alle Einwände vertheidigen. Als jedoch nach etwa neunzehn Jahren Erscheinungen bekannt wurden, wonach äußerst feine in Luft suspendirte undurchsichtige Partikeln durch das Phänomen der Beugung dieselben Erscheinungen hervorriefen, da hat er bereitwillig die Gleichberechtigung einer hierauf beruhenden Theorie anerkannt. Hatte er doch in bewußter Weise diejenigen Erklärungsmöglichkeiten aus dem Rahmen seiner Theorie weggelassen, die nicht auf gewöhnlicher Brechung und Reflexion beruhen. Die neuere Anschauung von der Himmelsbläue, von Lord Rayleigh entwickelt, beruht in der That auf dem Phänomen der Beugung und zwar an den Lufttheilchen selbst; C. aber bleibt das Verdienst, die Frage des Himmelslichtes überhaupt zum ersten Male systematisch in Angriff genommen zu haben.

Auch über die Elasticitätslehre veröffentlichte er in jener Zeit eine bemerkenswerthe Arbeit; wirklich aufmerksam wurde man jedoch auf ihn erst durch die im Februar 1850 der Berliner Akademie vorgelegte Abhandlung: „Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärme selbst ableiten lassen“. Damit betreten wir das Gebiet, auf dem, wie man ruhig sagen kann, Clausius' unsterbliche Verdienste liegen.

Betrachten wir zunächst den Stand der Wärmelehre zu jener Zeit. Die Anschauung, daß Wärme ein Stoff, ein Fluidum sei, machte damals wenigstens bei einem Theil der hervorragendsten Köpfe der Anschauung Platz, Wärme als eine Energieform anzusehen. Im J. 1842 hatte J. R. Mayer in einer zunächst wenig beachteten Schrift diese neue Lehre aufgestellt und das mechanische Aequivalent der Wärme zu bestimmen gelehrt, Joule verfolgte in England seit 1843 die gleichen Anschauungen, und 1847 fand die Anschauung eine classische Darstellung in Helmholtz' Erhaltung der Kraft. Dennoch standen| der allgemeinen Anerkennung des Satzes von der Aequivalenz von Wärme und Arbeit gewichtige Gründe entgegen. Es war dies die durchaus auf dem

alten Boden der Fluidumlehre stehende Theorie von Carnot (*Réflexions sur la force motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, 1824), welche damals noch dauernd die schönsten Ergebnisse für die Wissenschaft zeitigte und daher nicht gut verlassen werden konnte. Carnot setzt das Wärmefluidum, das er noch annahm, in einem hochtemperirten Körper mit einer Flüssigkeit in einem hochgelegenen Behälter in Parallele, den Wärmestoff in einem niedrigtemperirten Körper mit einer Flüssigkeit in einem niedriggelegenen Behälter. Durch Uebergang des Fluidums zum Körper von tieferer Temperatur konnte daher ganz entsprechend den Gesetzen der potentiellen Energie einer Flüssigkeit — nur daß der Temperaturunterschied an Stelle des Höhenunterschiedes trat — Arbeit gewonnen werden, und zwar ohne Verlust an Wärmestoff. Aus dieser Vorstellung hatte Clapeyron seine berühmte Gleichung der Verdampfungswärme ableiten können; William Thomson erhielt nach derselben Methode noch 1849 die Veränderlichkeit des Schmelzpunktes von Wasser mit dem Druck und konnte so die Theorie von Carnot an den Versuchen seines Bruders James glänzend bestätigen. So hielt dieser berühmte englische Physiker noch 1849 an der Fluidumtheorie der Wärme fest, bezeichnete es jedoch als eine der verwickeltesten, nur durch neue Experimente zu lösenden Aufgaben der Zukunft, die neue Anschauung der Aequivalenz von Wärme und Arbeit, deren Werth ihm natürlich nicht entging, mit den Ergebnissen der Carnot'schen Theorie in Einklang zu bringen.

Hier griff nun C. 1850 ein und löste ohne neue Experimente durch Aufstellung eines zweiten Wärmesatzes das vorhandene Problem, und es gelang ihm in der That, das Wesentliche der Carnot'schen Theorie in die neue Auffassung von der Wärme herüber zu retten.

Suchen wir diese erste Hauptleistung von C. zu verstehen, so sei voraus bemerkt, daß es sich dabei nur um einen Theil des Zieles handelte, das er verfolgte. Von vornherein ging C. auf die Ausbildung einer anschaulichen Vorstellung vom Wesen der Wärme aus. Doch stellte er Veröffentlichungen hierüber noch bis 1857 vor der strengen Einbeziehung des Carnot'schen Satzes in die neue Wärmelehre zurück, wandte sich also zuerst einer Aufgabe zu, bei der alle hypothetischen Vorstellungen ausgeschlossen werden konnten, ein Gebiet, das man jetzt als reine Thermodynamik bezeichnet.

Das Carnot'sche Problem war eine Aufgabe der Praxis, und zwar der Theorie der Dampfmaschine entsprungen. Jede „Maschine“ ist eine Vorrichtung, die behufs Arbeitsleistung oder Arbeitsgewinnung irgendwelche Veränderungen der Anordnung ihrer Theile so durchläuft, daß sie immer wieder zu der Ausgangsanordnung zurückkehrt. Die Thätigkeit einer Maschine besteht daher aus einer Summe hinter einander folgender „Kreisprocesse“. Für Wärmemaschinen hatte nun Carnot einen eigenen Kreisproceß erdacht, welcher die maximale Arbeit lieferte, die man bei gegebenen Temperaturverhältnissen erhalten kann, und mit Hülfe seiner Fluidumvorstellung leitete er für seinen Kreisproceß in einfacher Weise ein Gesetz ab, das wir in folgende Sätze zerlegen können: 1. Es gehört ein Wärmegefälle dazu, um bei einem Kreisprocesse einer Wärmemaschine überhaupt Arbeit gewinnen (etwa potentielle Energie schaffen) zu können; 2. die Arbeit, die man bei seinem Kreisprocesse erhält, ist direct proportional der Temperaturdifferenz, mit der

gearbeitet wird, und ferner proportional der Wärmemenge, die hierbei von dem Behälter hoher Temperatur zu dem niedriger überfließt. Indem C. in seiner oben genannten Arbeit diesen Kreisproceß zunächst ins Unendlichkleine übertrug und ihn so den Methoden der theoretischen Physik bequem zugänglich machte, konnte er in der That auch bei Voraussetzung des Mayer-Helmholtzschen Satzes der Aequivalenz von Wärme und Arbeit ein dem Carnot'schen analoges Gesetz ableiten, sofern er nur noch einen zweiten, neuen Grundsatz hinzuzog: Wärme kann nie von selbst von einem kälteren zu einem wärmeren Körper übergehen. Dies besagt: Wärme kann sich wohl allein von einem warmen zu einem kalten Körper ausgleichen (wie bei der gewöhnlichen Wärmeleitung), bei jeder Uebertragung im umgekehrten Sinne muß aber stets eine Arbeit geleistet werden, d. h. es geht irgendwo eine vorhandene potentielle Energie verloren, es tritt — außer dem Wärmeübergang selbst — noch eine bleibende Veränderung in der Natur ein. Mit Zuhülfenahme dieses wohl annehmbaren Grundsatzes, des sogenannten zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie, gelang es C. zunächst die folgende, von der Carnotschen nur wenig verschiedene Beziehung abzuleiten: beim Carnot'schen Kreisproceß ist die gewonnene Arbeit der Temperaturdifferenz und ferner der übertragenen Wärmemenge — letzterer aber nur, soweit sie nicht in Arbeit verwandelt ist — proportional. Aus dieser Beziehung ließen sich nun in der That alle jene Resultate der Theorie Carnot's wiederfinden, welche dieser aus der Abnahme der potentiellen Energie einer Wärmeflüssigkeit abgeleitet hat. Einer der ersten, welche sich der neuen Theorie anschlossen, war William Thomson. Eine Reihe der fruchtbarsten Anwendungen folgte, woran sich neben C. besonders dieser englische Physiker betheiligte. Es sei auch erwähnt, daß neben C. der Engländer Rankine ähnliche Ideen verfolgte, jedoch nicht annähernd die Klarheit von C. erreichte.

In der aus dem Carnot'schen Kreisproceß durch C. abgeleiteten Proportionalität blieb nun noch zunächst ein Factor unbestimmt, der selbst eine Function der Temperatur sein konnte. Allerdings gelang es C. schon in seiner ersten Arbeit, denselben auszuwerthen, indem er den Kreisproceß auch auf ein ideales Gas anwandte, für das gewisse Vereinfachungen gelten. Trotzdem schien eine Vertiefung und Verallgemeinerung der Ableitung erwünscht. Diese leistete er im J. 1854 in der Abhandlung: „Ueber eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie.“ In dieser Arbeit zeigt sich C. als Meister einer Begriffsphysik von gänzlich neuen und fruchtbaren Methoden. Obwohl bei dem Carnot'schen Proceß nach jedesmaligem Ablauf eine Veränderung in der Natur insofern übrig bleibt, als nämlich Arbeit gewonnen und Wärme auf tiefere Temperatur übertragen wird und umgekehrt, fragte sich jetzt C.: Können wir jeder dieser einzelnen Veränderungen einen Verwandlungswerth so zuschreiben, daß die Summe der beim Kreisproceß eingetretenen „Verwandlungen“ Null ergibt? Durch einen neu erdachten complicirten Kreisproceß, der mit drei Temperaturen arbeitet, fand er in der That eine Function, deren Aenderung bei jedem umkehrbar geleiteten Kreisproceß wieder den alten Werth annimmt, daher die Verwandlungswerthe in dem geforderten Sinne darstellt. (Umkehrbare Vorgänge sind solche, die unter größtmöglicher Arbeitsgewinnung und kleinstmöglichem Arbeitsaufwande vor sich gehen, die daher eigentlich unendlich langsam stattfinden und nur eine Aufeinanderfolge von Gleichgewichtszuständen sind. Dieser ideale



Grenzfall ist auch im Carnot'schen Kreisproceß stets angenommen.) Führen wir eine neue „absolute“ Temperatur ein, indem wir die gewöhnliche statt vom Schmelzpunkt des Eises von  $-273^{\circ}$  Celsius an rechnen, so zeigte C.: die aufgenommene Wärmemenge dividirt durch die hierbei herrschende absolute Temperatur ist der Verwandlungswerth eines Vorganges oder, mit einem späteren Ausdrucke von C., die Entropieänderung des Systems. Es ergab sich weiter: bei einem nichtumkehrbaren Kreisproceß — und alle wirklichen Kreisproceße sind ja nicht umkehrbare, da sie mit endlicher Geschwindigkeit vor sich gehen — hat die Entropie am Schluß stets zugenommen. Bei einem umkehrbar geleiteten Theil eines Kreisprocesses kann die Entropie je nach dem Sinne des Processes natürlich zu- oder abgenommen haben, sie verhält sich ja ganz etwa wie ein Energieinhalt. Beziehen wir nun aber in den Begriff der „Maschine“ alle Körper der Umgebung mit ein, soweit sie am Wärmeaustausch theilnehmen, so fällt naturgemäß jede Wärmeabgabe und Wärmeaufnahme nach „außen“ fort, das System wird ein sogenanntes adiabatisches. Gehen also innerhalb des neuen Systems umkehrbar geleitete Vorgänge vor, so ergibt sich: die Entropie bleibt bei beliebigen umkehrbaren Processen in einem adiabatischen System constant, da die hierbei aufgenommene und abgegebene Wärmemenge stets Null ist. Waren die Vorgänge im System jedoch nicht umkehrbare, wie es ja stets der Fall ist, so nimmt die Entropie desselben stets zu. Das letzte Ergebniß erweiterte nun William Thomson in interessanter Weise auf das gesammte Weltall, das wir ja auch als ein adiabatisches System auffassen können, da es von außen weder Wärme erhalten noch nach außen abgeben kann. Er stellte den Satz auf: Die Entropie des Weltalls nimmt zu. Es schien somit eine bestimmte Tendenz in dem Weltgeschehen aufgefunden, zum ersten Male wohl auf physikalischer Grundlage.

Obwohl also die Ueberlegung C. zu den weittragendsten Folgerungen führte, so vernachlässigte er doch nie die Bedürfnisse der Praktiker. Im J. 1856 gab er die Anwendung der mechanischen Wärmetheorie auf die Dampfmaschine und legte damit die Grundlage zur modernen technischen Thermodynamik. Namentlich die Frage der specifischen Wärme der Dämpfe, von der er zeigte, daß sie sowohl positiv wie negativ sein kann, klärte er unabhängig von Rankine und in weiter gehendem Maße auf. 1865 erfolgte noch eine neue Darstellung der Hauptsätze der Thermodynamik in mathematisch veränderter, zur Anwendung besonders geeigneter Form.

Im J. 1857, nachdem C. schon nach Zürich übergesiedelt war, begann die zweite Periode seiner wissenschaftlichen Thätigkeit, und zwar erschienen seine Publicationen über die Vorstellungen, die ihm den Ausgangspunkt zur Beschäftigung mit der Wärmelehre gegeben hatten, d. h. über die sogenannte kinetische Gastheorie. Die äußere Veranlassung war eine im J. 1856 erschienene Abhandlung von Krönig über die Erklärung des Gasdruckes aus der Molekularbewegung, die sich im wesentlichen mit den bisher unveröffentlichten Resultaten von C. deckte, ohne sie aber zu erreichen. So wollte auch C. nicht mehr länger mit denselben zurückhalten. Uebrigens haben C. sowohl wie Krönig, wie sich später zeigte und wohl verständlich ist, mehr oder weniger unvollkommen schon ihre Vorgänger gehabt. Das thut seinem Verdienste natürlich keinen Abbruch. In seiner ersten Abhandlung, betitelt „Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen“ (Poggendorff's Annalen 1857) steht

im Mittelpunkte die Erklärung der Expansivkraft eines Gases. Die Moleküle eines solchen bewegen sich nach C. im wesentlichen unabhängig von einander, daher gradlinig. Die Wege erleiden aber auf zwei Arten Unterbrechungen und Richtungsänderungen: einerseits im Innern des Gases. Nähert sich ein Molekül beträchtlich einem zweiten, so treten gegenseitige Kräfte auf, zunächst Anziehungskräfte, welche die Centren der Moleküle noch näher aneinanderbringen; da sich dieselben aber nicht durchdringen können, so stoßen sie sich von einer gewissen Entfernung an wieder ab. Die ganze Wirkung wird in erster Annäherung durch den Stoß zweier elastischer Kugeln ersetzt. Sodann treten noch Richtungsänderungen der Moleküle an dem Rande des Gases, d. h. an den Wänden auf. Jedes Molekül, welches, da keine Energie im ganzen verloren geht, im Mittel nach den Gesetzen des elastischen Stoßes an der Wand reflectirt werden muß, übt hierdurch eine kleine Druckkraft auf diese aus. Die Summe aller dieser äußerst zahlreichen Druckkräfte ergibt die Expansivkraft des Gases, welcher im Gleichgewicht der gleich große äußere Druck gegenübersteht. Die Berechnung der Stoßzahl auf die Wand läßt sich bei hinreichender Verdünnung des Gases verhältnißmäßig einfach ausführen, wenn nämlich das Eigenvolumen der Moleküle klein gegen das ganze Volumen des Gases ist. Man kann dann die Stöße im Innern vernachlässigen. Es ergibt sich die Expansivkraft proportional zur Zahl der Moleküle in der Volumeneinheit, d. h. eine Erklärung des Boyle-Mariotte'schen Gesetzes folgt unmittelbar. Gay-Lussac's Gesetz der Temperaturabhängigkeit des Druckes, und gleichzeitig auch die bekannte Regel von Avogadro, folgen ferner, wenn man die lebendige Kraft der Schwerpunktsbewegung der Moleküle als proportional der absoluten Temperatur betrachtet. Damit sind alle Gasgesetze erklärt, und die Temperatur ist auf kinetische Energie der Moleküle zurückgeführt.

C. zeigte nun aus der Größe der specifischen Wärme weiter, daß nicht die ganze Wärmeenergie eines Gases aus dieser Schwerpunktsbewegung allein bestehen könne, wie Krönig vorausgesetzt hatte, sondern daß je nach der Complicirtheit des Moleküls noch drehende oder schwingende Bewegungen relativ zum Schwerpunkt statthaben müssen, deren lebendige Kraft auch der absoluten Temperatur proportional ist. So schloß er aus der specifischen Wärme von Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff mit Sicherheit auf die Zweiatomigkeit dieser Gase, eine Ansicht, die zwar schon vereinzelt von französischen Chemikern vertreten war, aber so eine Bestätigung von ganz neuen Gesichtspunkten erhielt. Für das einatomige Quecksilber fand man in der That später den kleinsten nach der Theorie möglichen Werth der specifischen Wärme, was eine sehr willkommene Bestätigung der Theorie bildete. Die mittleren Geschwindigkeiten der Moleküle ließen sich ebenfalls unmittelbar berechnen, und zwar ergab sich für Sauerstoff 461 m, Stickstoff 412 m und Wasserstoff 1844 m in der Secunde bei 0° C. Sodann gab C. andeutungsweise den Weg an, wie man von den idealen Gasgesetzen zu den von Regnault beobachteten Abweichungen von denselben gelangen kann. Hier kommt in Betracht, daß der von den Molekülen eingenommene Raum nicht mehr klein gegen den Gesamttraum ist, sodann, daß sich die gegenseitigen Anziehungen der Moleküle bei mittleren Entfernungen derselben von einander nicht mehr vernachlässigen lassen. Bekanntlich führte J. D. van der Waals diese Theorie später auf Grund des noch zu besprechenden Clausius'schen Virialsatzes in glücklicher Weise aus. Die Theorie der unvollkommenen Gase führt nun auf

diejenige des flüssigen Zustandes. Auch hier haben wie im gasförmigen nach C. die Moleküle keine festen Gleichgewichtslagen, doch ist die gegenseitige Anziehung so groß, daß sie der Expansivkraft der Molekularbewegung allein das Gleichgewicht zu halten vermag. Dem Vorgang der Verdampfung widmet er eine längere Betrachtung. Hat die Flüssigkeit eine freie Oberfläche, so genügt zwar die mittlere kinetische Energie der Moleküle nicht, um dieselben aus der Flüssigkeit zu entfernen. Wenn jedoch ein Molekül in der Nähe der Oberfläche durch geeignete vorangegangene Stöße eine besonders große Geschwindigkeit senkrecht zur Flüssigkeitsoberfläche erhalten hat, so kann es aus derselben in den Gasraum herausfliegen. Die hierbei zu leistende Arbeit, die gleich dem eintretenden Verlust an kinetischer Energie ist, bildet die Verdampfungswärme. Ist der Dampfraum begrenzt, so wird er sich so lange mit Molekülen anfüllen, bis die Zahl der durch die Flächeneinheit in die Flüssigkeit zurücktretenden gleich der sie in derselben Zeit verlassenden ist, dann haben wir gesättigten Dampf über der Flüssigkeit. Ein indifferentes Gas im Dampfraum stört das Gleichgewicht offenbar nicht, solange das Eigenvolumen seiner Moleküle den Dampfraum nicht wesentlich verkleinert. Das Dichteverhältniß von Dampf und Flüssigkeit kann ferner nach dieser Theorie nur von der Temperatur, nicht aber von den Volumina von Flüssigkeit und Dampf abhängen. So ergibt sich eine befriedigende Auskunft über alle wesentlichen Erscheinungen der Verdampfung. Auch den festen Zustand bezieht C. in den Kreis seiner Theorie ein. Auch hier stellt er sich die Moleküle und Atome in dauernder Bewegung vor, doch sind sie an feste mittlere Plätze gebunden. Speciell der Gaszustand wurde von ihm mathematisch am weitgehendsten verfolgt.

Obwohl nun C. auf das Vorhandensein von Stößen und Ablenkungen im Innern eines Gases ausdrücklich hingewiesen hatte, jedoch dieselben bei der Berechnung des Gasdruckes vernachlässigen konnte, so wurde dieser Umstand doch zunächst mehrfach übersehen, und die großen molekularen Geschwindigkeiten in Gasen, die er berechnete, erregten Widerspruch und Befremden. So schien es, als müßte Chlor, in der Ecke eines Raumes entwickelt, infolge der großen molekularen Geschwindigkeit nahezu momentan sich im ganzen Zimmer ausbreiten, während dies doch ein verhältnißmäßig langsamer Vorgang ist. Dieser Einwand veranlaßte C., im folgenden Jahre 1858 die Frage der Größe der freien Weglänge, d. h. der ohne Ablenkung im Innern zurückgelegten Wege, noch näher zu erörtern, und er löste dieses scheinbar so verwickelte Problem in der von seinen früheren Arbeiten her bekannten genialen Weise. Es ergab sich: um die mittlere Weglänge eines Gases sind die wirklichen Weglängen nach einem Exponentialgesetz so vertheilt, daß weit mehr kürzere als längere Wege vorkommen. Ferner leitete er den einfachen Satz ab: die mittlere Weglänge eines der kugelförmig angenommenen Moleküle ist gleich seinem Radius dividirt durch das vierfache Volumen, welches alle Moleküle der Volumeneinheit wirklich einnehmen. Aus der Compressibilität läßt sich nun schließen, daß bei Atmosphärendruck die Moleküle eines Gases jedenfalls nicht mehr als den tausendsten Theil des vorhandenen Volumens wirklich erfüllen. Der Radius eines Moleküls ist aber eine Größe, die weit unter der mikroskopischen Beobachtbarkeit liegt, ja fast unvorstellbar klein ist. Die mittlere Weglänge wäre also nur etwa 250 Mal größer als diese ungeheuer kleine Größe, daher selbst noch mikroskopisch klein, und die Bahnen der Moleküle sind Zickzacklinien, deren gerade Strecken äußerst kurz sind. So

erklärt sich die im Verhältniß zur molekularen Geschwindigkeit langsame Diffusion der Gase. Maxwell, der die Theorie von C. weiter verfolgte, lehrte sodann die Bedeutung der mittleren Weglänge für Reibung, Diffusion und Wärmeleitung eines Gases quantitativ erkennen, und die mittlere Weglänge zahlenmäßig berechnen. An dem Ausbau der Theorie und zwar speciell derjenigen der Wärmeleitung hat sich wieder C. hervorragend beteiligt. Noch kurz vor seinem Lebensende bereicherte er in dem dritten Bande seiner „Mechanischen Wärmetheorie“ die Lehre von der mittleren Weglänge um werthvolle Resultate, die sich auf den Fall stärker comprimierter Gase erstrecken. Eines der großartigsten Ergebnisse der theoretischen Physik beruht auf der Theorie der mittleren Weglänge, nämlich die Berechnung der Absolutzahlen der Moleküle in der Volumeneinheit eines Gases. Diese schönste Frucht durfte Loschmidt ganz auf Grundlage der Clausius'schen Theorie im J. 1865 pflücken.

Während so C. eine neue molekulare Vorstellungswelt erschloß, suchte er| auch seit 1857 seinen zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie, von dem er bisher absichtlich alle nicht rein erfahrungsgemäßen Elemente ferngehalten hatte, auf dieselbe molekularkinetische Grundlage zu stellen. Den ersten Ansatz hierzu machte er 1862 durch Einführung des Begriffes der Disgregation oder des „Vertheilungsgrades“ der Moleküle. Wärme sucht die Disgregation zu vergrößern, die „wirksame Kraft“ der Wärme hierbei wird — zunächst vermuthungsweise — proportional der absoluten Temperatur (und nur abhängig von dieser) gesetzt. Bei dieser Voraussetzung zeigte sich, daß innere plus äußere Arbeit dividirt durch die zugehörige absolute Temperatur eine den Zustand charakterisirende Größe ist, analog wie die Entropie, und auch merkwürdigerweise ganz von derselben Form. Diese Function nennt C. die Disgregation. Diesen zunächst in ihrer Tragweite nicht leicht zu überblickenden Betrachtungen konnte er im J. 1870 durch den von ihm gefundenen Virialsatz eine genauere mechanische Deutung geben. In der Virialgleichung steht auf der linken Seite die Summe aller fortschreitenden Energie, rechts stehen Producte von Coordinaten mit den im System wirkenden Kräften d. h. Arbeitsgrößen: also ist die Arbeitsfähigkeit des Systems gegen die in ihm wirkenden Kräfte der Summe seiner lebendigen Kräfte proportional, und damit, nach den Vorstellungen von C., proportional der absoluten Temperatur. Dies ist der Sinn des Clausiusschen Satzes: die wirksame Kraft der Wärme ist der absoluten Temperatur proportional. Es sei bemerkt, daß es die neuere statistische Mechanik in der That sehr wahrscheinlich macht, die lebendige Kraft nur als Function der Temperatur und unabhängig vom Aggregatzustand zu betrachten. Weiter gelang ihm im selben Jahre durch ähnliche begriffliche Zusammenfassungen, wie sie im Satz der Disgregation enthalten sind, und Betrachtung in sich zurücklaufender Bewegungen der Massenpunkte bei langsamer Veränderung der äußeren Kräfte den Entropiesatz direct als eine Folgerung der mechanischen Vorstellungen von der Wärme nachzuweisen. Eine ähnliche, jedoch nicht so umfassende Ableitung hatte schon 1866 Ludwig Boltzmann gegeben, sie war von C. übersehen worden, was sich durch seine doppelte Uebersiedlung in jenen Jahren nach Würzburg und Bonn erklärte. Doch ist die Ableitung von C. noch allgemeiner. 1884 konnte er ferner zeigen, daß die Betrachtungen von Helmholtz über die Beziehungen der cyklischen Systeme zum zweiten Hauptsatz der Wärmelehre in seinen

und Boltzmann's früheren Untersuchungen schon viel weitergehend enthalten waren. Er gab aber auch in dieser Arbeit zu, daß das Wesen des zweiten Hauptsatzes durch jene Entwicklungen noch nicht erschöpft sei. In der That: der Energieausgleich zwischen den einzelnen Theilen des Systems und die Gültigkeit einer mittleren Vertheilung ist in denselben eigentlich schon vorausgesetzt, aber in dem Vorgange des Energieaustausches liegt nach den Forschungen von Boltzmann gerade das Wesen des zweiten Hauptsatzes, das C. früher in dem Satze ausgedrückt hatte: Wärme kann von selbst nur von höherer zu tieferer Temperatur strömen. Der zweite Hauptsatz ist vor allem ein Wahrscheinlichkeitssatz und besagt: alle Vorgänge gehen bei der ungeheuren Zahl der Theilchen, um die es sich handelt, in Richtung einer wahrscheinlicheren Vertheilung vor sich. Die Entropie speciell ist quantitativ gleich einer universellen Constanten, multiplicirt mit dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit der betreffenden Zustandsvertheilung.

Auch auf die Wärmestrahlung wurde C. durch den zweiten Hauptsatz geleitet und leitete hier, zum Theil in Uebereinstimmung mit Kirchhoff, interessante Beziehungen ab.

Vom Beginn seiner wissenschaftlichen Thätigkeit ab war er auch auf dem Gebiete der Elektrizitätslehre außerordentlich thätig, wobei ihn zunächst die Beziehungen des galvanischen Stromes zur Wärme anzogen. Sein Interesse dehnte er bald auch auf rein elektrostatische Probleme aus. Obwohl C., bis auf seine Vorlesungen, experimentell nicht thätig war, zeigt er auch in Bezug auf die experimentelle Entwicklung der Elektrizitätslehre, wie der gesamten Physik überhaupt, außerordentliches Verständniß. Frühzeitig erkannte er auch die Proportionalität des galvanischen Widerstandes guter Leiter mit der absoluten Temperatur. Von der Jonisation der Elektrolyte hatte er richtige Begriffe und kann als Vorläufer für die für die neuere Chemie so wichtige Theorie von Arrhenius angesehen werden. Etwa von 1875 ab kann man bei C. direct von einer dritten elektrodynamischen Epoche sprechen. Seiner Theorie der Dampfmaschine stellte er 1883 eine Theorie der dynamo-elektrischen Maschine an die Seite, auch hier die Bedürfnisse der Praktiker erkennend. Um die Festsetzung der elektrischen und magnetischen Maßeinheiten machte er sich ebenfalls verdient und war z. B. Mitglied der Pariser Maßeinheitencommission.

Was die reine Theorie der Elektrizität betrifft, so erkannte er klar die Unzulänglichkeit des damals in Deutschland viel verbreiteten Weber'schen Elementargesetzes — zeigt sich dieselbe doch z. B. schon darin, daß dieses Gesetz mit der verschiedenen Wanderungsgeschwindigkeit positiver und negativer Elektrizität in Elektrolyten unvereinbar ist. Solche Ueberlegungen mögen wohl C. in erster Linie geleitet haben, dieses Gesetz zu verwerfen. Von Gauß angeregt, fanden zwar damals interessante Versuche statt, ein elektrisches Wirkungsgesetz aus der endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Kraft abzuleiten. Obwohl C. diesen Bestrebungen lebhaftes Interesse entgegenbrachte, konnten die in dieser Richtung gemachten Versuche seinen kritischen Geist nicht befriedigen. Er stellte 1875 ein neues elektrodynamisches Grundgesetz auf, das nicht wie das Weber'sche die relativen, sondern die absoluten Bewegungen der elektrischen Theilchen

enthielt, wobei er von der Ueberlegung ausging, daß es auf diese ankomme, falls, wie es wahrscheinlich war, die Kräfte durch Bewegung in einem ruhend gedachten Medium entstehen. Damit nähert sich C. beträchtlich der modernen Auffassungsweise der Elektronentheorie, mit der sein Gesetz auch das gemeinsam hat, daß das Princip von Action und Reaction für die Theilchen allein betrachtet nicht mehr gilt, was man damals als Einwand betrachtete. C. stand jedoch noch zu sehr auf dem Fernwirkungsstandpunkt. Hätte er mehr auf dem in England vertretenen Standpunkte der consequent durchgeführten Nahewirkung gestanden, so wäre es, wie der bekannte englische Physiker Fitzgerald in seinem Nachruf auf C. meint, seinem Genie wohl gelungen, der Theorie der Gase, die wir ihm verdanken, eine befriedigende Theorie des Aethers an die Seite zu stellen.

Betrachten wir die Summe dessen, was C. Bleibendes und Werthvolles für die Wissenschaft geleistet hat, so müssen wir ihn im besten Sinne des Worts zu den ersten Naturphilosophen der neueren Zeit rechnen. Seine Abhandlungen sind größtentheils in 57 Bänden von Poggendorff's und Wiedemann's Annalen der Physik und Chemie enthalten. Dazu kommen noch 44 weitere selbständige Abhandlungen in z. Th. ausländischen Zeitschriften. In den zahlreichen Aufsätzen mit polemischem Inhalt zeigt er stets vornehmes Anerkennen fremden Wirkens. Sieben Veröffentlichungen in Buchform liegen ferner von C. vor, von denen die „Mechanische Wärmetheorie“ in drei Bänden, Braunschweig 2. und 3. Auflage, weitaus die bedeutendste ist.

### **Literatur**

Eduard Riecke, Rudolf Clausius; Rede gehalten in der Göttinger Kgl. Gesellschaft der Wissenschaften am 1. December 1888. Göttingen 1888. Darin ein Verzeichniß sämtlicher Publicationen von Clausius. — G.F.F.G. (G. F. Fitzgerald), Rudolf Julius Emanuel Clausius. Notice of the Proceedings of the Royal Society. Vol. 48. — Rudolf Jul. Eman. Clausius. Excerpt minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Vol. 96, P. II. Session 1888—89. —

F. Folie, R. Clausius. Sa vie, ses travaux et leur portée métaphysique. (Extrait de la Revue des questions scientifiques.) Bruxelles, Pollonais et Ceuterick. 1890. — J. Willard Gibbs, Nachruf auf Clausius; enthalten in den Scientific papers London, Longmans, Green and Co. 1906.

### **Autor**

*Max Reinganum.*

### **Empfohlene Zitierweise**

, „Clausius, Rudolf“, in: Allgemeine Deutsche Biographie (1910), S. [Onlinefassung]; URL: <http://www.deutsche-biographie.de/html>

---

02. Februar 2024

© Historische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

---