

R u d o l f C l a u s i u s

(geb. 2. Januar 1822, gest. 24. August 1888).

R e d e

gehalten in der öffentlichen Sitzung der K. Gesellschaft der Wissenschaften

am 1. December 1888

von

Eduard Riecke.

Göttingen,

Dieterichsche Verlags-Buchhandlung.

1888.

Ein Jahr ist verflossen, seit der Schmerz um den Verlust von Kirchhoff an dieser Stelle einen warmen und beredten Ausdruck gefunden hat. Wiederum legen wir einen Kranz nieder auf das Grab eines Mannes, welcher durch epochemachende Arbeiten in den Gang der Wissenschaft eingegriffen, welcher eine tiefe Furche gezogen hat, auf der eifrige Arbeit noch lange bemüht sein wird, die Früchte einer weite Gebiete umspannenden Erkenntniss zu ernten. Rudolf Clausius ist am 24. August dieses Jahres einem bedeutenden und gesegneten Wirkungskreise entrissen worden in einem Alter, in welchem nach menschlicher Voraussicht noch Jahre rüstigen Schaffens ihm beschieden sein konnten. Seit dem Jahre 1866 hat der Verstorbene unserer Gesellschaft als eine ihrer ersten Zierden angehört; wohl ziemt es uns, in Dankbarkeit dessen zu gedenken, was er seiner Wissenschaft gewesen ist. In diesem Gefühle habe ich es übernommen, an dem heutigen Tage das Andenken an Clausius in unserem Kreise zu erneuen, ein Bild von der Arbeit zu entwerfen, welche das Werk seines Lebens gewesen ist, die Bedeutung zu würdigen, welche seine Schöpfungen für die Wissenschaft besitzen. Möge es mir gelingen, der Aufgabe, deren Schwierigkeiten ich in ihrem ganzen Umfange empfinde, wenigstens in einem bescheideneren Sinne gerecht zu werden.

Rudolf Julius Emanuel Clausius wurde am 2. Januar 1822 in Köslin geboren als eines der jüngeren unter 18 Kindern des Regierungsschulrathes Clausius. In Uckermünde, wo sein Vater eine Ruhestelle

als Pfarrer und Superintendent erhalten hatte, besuchte er die Privatschule desselben, darauf die beiden obersten Classen des Gymnasiums zu Stettin. Seine besondere Begabung für Mathematik und Physik trat schon damals hervor. In Berlin, wo er 1840 an der Universität immatrikulirt worden war, schwankte seine Neigung zu Anfang zwischen jenen Fächern und der Geschichtswissenschaft. In dieser fesselten ihn die täglich besuchten Vorlesungen von Rank e, in jenen waren Dirksen, Ohm, Dirichlet, Steiner, Dove und Magnus seine Lehrer. Im Jahr 1843 übernahm er, um den jüngeren Geschwistern nicht die Unterstützung des Vaters zu verkürzen, eine Hauslehrerstelle; von 1844—50 wirkte er als Lehrer an dem Friedrich-Werderschen Gymnasium in Berlin; 1848 promovirte er in Halle mit einer Abhandlung »de iis atmosphära particulis, quibus lumen reflectitur«. Im Jahre 1850 bot ihm eine Anstellung als Lehrer der Physik an der Königlichen Artillerie- und Ingenieurschule grössere Musse zu eigenen wissenschaftlichen Arbeiten; er habilitirte sich im gleichen Jahre an der Berliner Universität und verblieb in beiden Wirkungskreisen bis zum Jahr 1855, wo er als ordentlicher Professor an das neugegründete Polytechnikum in Zürich berufen wurde.

Die Lehrjahre von Clausius fallen in eine Zeit, wo auf dem Gebiete der Wärmelehre ein Umschwung der Anschauungen sich vollzog, der durch das ganze Gebiet der Naturwissenschaften eine Kette der tiefsten Wirkung gezogen hat. Von da entsprangen die Anregungen, welche Clausius zu der Entdeckung eines der fundamentalsten Sätze der neueren Physik geführt haben und so dürfen wir es nicht unterlassen, auf die wissenschaftliche Constellation, unter welcher Clausius die eigene Arbeit begann, einen orientirenden Blick zu werfen.

Unter den mannigfachen Eigenschaften der Wärme schien für die Deutung ihres Wesens kaum eine wichtiger zu sein als die einfache Thatsache, dass bei der Berührung verschieden warmer Körper die Wärme stets übergeht von den Körpern mit höherer zu den Körpern mit tieferer Temperatur. Daraus entwickelte sich die Anschauung dass Wärme etwas sein muss, was bei gleichbleibender gesammter Menge

einer verschiedenen Vertheilung auf die im Raume zerstreuten Körper fähig ist. Schon die Zeit Newtons war sich darüber klar, dass das Etwas, welchem diese Eigenschaft zukommen konnte, entweder selbst ein Körper oder ein Zustand der Bewegung sein müsse. Im Laufe des folgenden Jahrhunderts hatte die stoffliche Theorie der Wärme mehr und mehr die allgemeine Anerkennung errungen; der Wärmezustand eines Körpers war nach ihr bedingt durch den Gehalt an einer feinen unwäg- baren Flüssigkeit, dem Caloricum; Aufnahme desselben machte sich als Erwärmung, Abgabe als Abkühlung bemerklich. Mit allen elementaren Körpern theilte das Caloricum die Eigenschaft unzerstörbar und unver- wandelbar zu sein. Noch in der Mitte unseres Jahrhunderts lastete diese Theorie mit der Schwere eines Dogmas auf den Gemüthern, die schüchternen Versuche einer anderen Erklärung, die gewichtigen Einwände, zu welchen die Erzeugung der Wärme durch Reibung Ver- anlassung gab, durch die Macht der Gewohnheit unterdrückend. Der Bann wurde erst gelöst durch den Satz von der Aequivalenz der Arbeit und Wärme ausgesprochen von Robert Mayer, Prescottt Joule und Hermann von Helmholtz in den Jahren 1842, 43 und 47. Nach die- sem ist die Wärme nicht mehr etwas Unzerstörbares und Unverwandel- bares; Wärme entsteht aus Arbeit; die lebendige Kraft eines bewegten Körpers verwandelt sich durch Reibung in Wärme; Wärme verschwin- det, wenn sie in unseren Maschinen zur Leistung von Arbeit benutzt wird. Wie schwer es aber dem menschlichen Geiste wird, sich den Fesseln einer gewohnten Denkweise zu entwinden, das zeigt die kühle Aufnahme, welche die neue Lehre fand, der Widerstand, der sich ihr verhältnissmässig lange Zeit entgegenstellte. Mayer hatte das Princip der Aequivalenz ausgedehnt auf den ganzen Kreis der physikalischen Kräfte, Joule hatte die Methoden seiner experimentellen Prüfung uner- müdlich verbessert, Helmholtz von allgemeineren mechanischen Princi- pien ausgehend hatte den Satz von der Erhaltung der Kraft, von der unveränderlichen Summe der lebendigen Kräfte und der Spannkkräfte als einen für alle Naturprocesse gültigen aufgestellt; die Anwendung desselben auf die Gebiete der Elektrizität und des Magnetismus hatte

ihn zu einer Reihe neuer und wichtiger Beziehungen geführt; aber noch im Jahre 1849 hielt selbst William Thomson an der alten Theorie der Wärme fest, zurückschreckend vor den unzähligen Schwierigkeiten, welche unüberwindlich schienen, ohne einen vollständigen Neubau der Wärmetheorie von Grunde auf. Hier nun ist der Punkt, an welchem Clausius mit so glücklicher Hand in die Entwicklung der Wissenschaft eingriff, indem er mit klarem Geiste die Consequenzen der neuen Lehre zog, mit sicherem Muthe die morschen Stützen der alten Theorie verwarf und mit genialem Scharfblicke die Spuren der Wahrheit in den Irrgängen derselben erkannte. Um aber zu verstehen, was Clausius geleistet, müssen wir noch einmal zurückgehen auf eine der Theorie des Caloricums entwachsene Arbeit, welche von Sadi Carnot im Jahre 1824 unter dem Titel: Betrachtungen über die bewegende Kraft der Wärme und über die zu der Entfaltung dieser Kraft geeigneten Maschinen veröffentlicht worden war. Die ungeheure Rolle, welche nach der Erfindung der Dampfmaschine der Wärme als bewegender Kraft zufallen musste, veranlasste Carnot zu einer Untersuchung der Fragen, ob diese Kraft durch irgend welche Bedingungen beschränkt, ob sie abhängig sei von den Körpern, deren Veränderungen durch die Wärme zur Leistung der Arbeit benutzt werden. Im Beginn seiner Abhandlung macht Carnot eine Bemerkung, durch welche das Wesen des Vorganges, der in den Wärmemaschinen zur Erzeugung der bewegenden Kraft dient, losgelöst von allen Besonderheiten der Einrichtung in ein neues und überraschendes Licht gestellt wurde. Bei der Dampfmaschine giebt die heisse Luft des Kesselraumes Wärme an das Wasser im Kessel ab und verwandelt dadurch das Wasser in Dampf; dieser dehnt sich in dem Cylinder der Maschine aus, indem er den Kolben vor sich her schiebt und dabei bewegende Kraft entwickelt oder Arbeit leistet. Nachdem er sich so expandirt hat, tritt er in Berührung mit dem kühlen Raume des Condensators, schlägt sich in diesem in flüssiger Form nieder und giebt die überschüssige Wärme an die Wände des Condensators ab. Das Wesentliche des Vorganges ist nun nach Carnot der Transport von Caloricum von dem heissen Kesselraum zu dem kühlen Condensator. Ebenso

wie bei einem Mühlrad der Sturz des Wassers von der Höhe der zuleitenden Rinne in die Tiefe des Mühlgrabens eine Quelle von bewegender Kraft ist, ebenso wird bei jeder Wärmemaschine die bewegende Kraft erzeugt durch den Sturz des Caloricums von einem Körper mit höherer zu einem Körper mit tieferer Temperatur, von einer oberen Wärmequelle zu einer unteren. Sind die Wärmequellen, mit welchen die Maschine arbeitet gegeben, so wird die Güte der Maschine, ihr Wirkungsgrad, bestimmt sein durch das Verhältniss der geleisteten Arbeit zu der disponibeln Wärmemenge. Hier erhebt sich nun eine Frage von fundamentaler Bedeutung. Zu dem Transport des Caloricums von der oberen Wärmequelle zu der unteren können wir alle möglichen Körper benutzen; ist nun der Wirkungsgrad einer Maschine abhängig von dem Körper, der zum Transport des Caloricums dient, oder ist er für alle möglichen hiezu verwandten Körper derselbe? Carnot entschied die Frage in dem letzteren Sinne, er bewies den Satz: die bewegende Kraft der Wärme ist unabhängig von den Stoffen, welche zu ihrer Realisirung gebraucht werden, ihr Betrag ist allein bestimmt durch die Temperaturen der Körper, zwischen welchen in letzter Instanz der Transport des Caloricums sich vollzieht. Dabei führte die Voraussetzung der materiellen Natur der Wärme mit Nothwendigkeit zu der weiteren Annahme, dass dieselbe Menge von Caloricum, welche von dem arbeitenden Körper an der oberen Wärmequelle aufgenommen worden war, an die untere Quelle wieder abgegeben werden musste.

Die Entwicklung des angeführten Satzes bildet nur einen verhältnissmässig kleinen Theil der Carnot'schen Abhandlung; ihr zweiter grösserer Theil stellt sich dar als ein erster, bedeutsamer Schritt in das Gebiet der merkwürdigen Sätze über specifische und latente Wärme, welche jetzt einen wichtigen Theil der mechanischen Wärmetheorie bilden.

Als ein imponirender Bau ragte die Carnot'sche Theorie herein in die neue Zeit, welche mit der Begründung des Aequivalenzsatzes angebrochen war. Die neue Lehre, so fruchtbar auf den verschiedensten Gebieten der Physik, hatte auf dem eigensten Felde der Carnot'schen Schöpfung nichts gegenüberzustellen. Das Fundament der Carnot'schen

Theorie aber war zerstört, nachdem die immaterielle Natur der Wärme bewiesen war und damit schien der ganze Bau in sich zusammenzustürzen. Clausius hat gezeigt, dass diese Befürchtung keine begründete war; er hat die bleibenden Gedanken der Carnot'schen Theorie erkannt und mit der neuen Anschauung zu einem in sich vollendeten Ganzen verschmolzen, zu einer Theorie der Wärme, welche auf dem Gebiet der Physik als eine der grössten Errungenschaften unseres Jahrhunderts erscheint. Die Abhandlung, in welcher die Grundzüge der neuen Theorie niedergelegt sind, wurde von Clausius im Februar 1850 der Berliner Akademie vorgelegt. Als unberührt von dem Wechsel der Anschauungen bezeichnet er den Satz, dass wo auch immer durch Wärme Arbeit geleistet wird, eine gewisse Wärmemenge von einem heissen zu einem kalten Körper, von einer oberen Wärmequelle zu einer unteren übergehen müsse. Dagegen war die Annahme, dass die ganze von dem arbeitenden Körper aufgenommene Wärmemenge auch wieder abgegeben werde, mit der neuen Anschauung unvereinbar. Vielmehr muss die ganze aufgenommene Wärmemenge sich spalten in zwei Theile; der eine derselben wird verzehrt durch die Arbeit, in welche er sich nach dem Satze von der Aequivalenz verwandelt; der andere Theil wird an die untere Wärmequelle abgegeben, wenn die arbeitende Substanz mit dieser in Berührung tritt. Die aufgenommene Wärmemenge ist grösser als die abgegebene und zwar grösser um den Betrag der geleisteten Arbeit. Die Carnot'sche Auffassung des Processes würde nichts gewesen sein, als ein geistreiches Aperçus, wenn er daran nicht den Satz geknüpft hätte, dass der Wirkungsgrad einer Maschine nur abhängig sei von den Temperaturen der oberen und unteren Wärmequelle. Dass dieser Satz seine Gültigkeit auch bei der neuen Anschauung vom Wesen der Wärme behielte, mochte von vornherein nicht unwahrscheinlich sein; aber bei dem Versuche ihn zu beweisen versagte der von Carnot befolgte Gedankengang seinen Dienst. Er hatte den Satz gegründet auf die Thatsache, dass kein Perpetuum mobile existieren kann, dieselbe Thatsache, welche auch dem Aequivalenzsatze zu Grunde liegt. Dagegen zeigte Clausius und diess ist der fundamentale Punkt seiner Abhandlung, dass zu dem

Beweise des Satzes ein neues und von dem früheren völlig unabhängiges Princip in die Wärmelehre eingeführt werden müsse. Als ein solches benutzte er die Thatsache, dass die Wärme überall das Bestreben hat, vorhandene Temperaturdifferenzen auszugleichen, von den wärmeren auf die kälteren Körper überzuströmen. Dem instinktiven Gefühle nach ist es daher undenkbar, dass Wärme von selbst, d. h. ohne irgend welchen Kraftaufwand oder ohne anderweitige Veränderungen aus einem kalten Körper hinübergeht in einen warmen. Der Carnot'sche Satz folgt aus diesem Principe auf indirektem Wege. Bei seinem Beweise machte Clausius zuerst die Annahme, dass es zwei arbeitende Substanzen gebe von verschiedenem Wirkungsgrade; er konstruirte dann nach dem Vorgange von Carnot eine ideale Maschine, welche abwechselnd in direktem Sinn mit der einen, in rückläufigem mit der andern in Betrieb gesetzt wurde; er zeigte, dass man die Verhältnisse so reguliren kann, dass von der Maschine schliesslich weder Arbeit geleistet noch aufgenommen wurde und alle Theile derselben wieder in ihrem anfänglichen Zustand sich befinden, dass aber dennoch eine gewisse Wärmemenge von dem kalten Körper, dem Condensator, zu dem warmen, dem Kesselraum, übergegangen ist. Die Annahme eines verschiedenen Wirkungsgrades bei verschiedenen Substanzen führt somit zu einem Widerspruch mit dem Princip, dass die Wärme nicht von selbst von einem kalten Körper in einen warmen überströmen kann. Der Wirkungsgrad wird also unabhängig von der arbeitenden Substanz lediglich durch die Temperaturen der oberen und unteren Wärmequelle bestimmt werden. Seinen Betrag selbst ermittelte Clausius dadurch, dass er in seiner idealen Maschine eine Substanz sich bewegen liess, deren mechanische und thermische Eigenschaften durch eine grosse Reihe experimenteller Untersuchungen hinreichend aufgeklärt waren, die Luft. Es ergab sich, dass für diese das Verhältniss der nutzbar gemachten, in Arbeit verwandelten Wärme zu der ganzen aufgenommenen Wärme gleich ist der Temperaturdifferenz der beiden Wärmequellen dividirt durch die absolute Temperatur der oberen Quelle. Es ist diess die Zahl, welche sich

ergiebt, wenn zu der an einem Celsiusthermometer abgelesenen Gradzahl noch 273 addirt wird.

Ueerblicken wir den Gang des von Clausius gegebenen Beweises, so scheinen die Schwierigkeiten des Problems mit spielender Hand überwunden zu sein. In der That ist es für uns, die wir in den Anschauungen der mechanischen Wärmetheorie gross geworden sind, nicht ganz leicht, von der Gedankenarbeit, welche in der Abhandlung von Clausius verborgen ist, eine richtige Vorstellung zu gewinnen. Wir müssen uns vergegenwärtigen, dass bei Carnot und bei dem seine Gedanken in analytischem Gewande weiterführenden Clapeyron Wahrheit und Irrthum aufs innigste verwoben sind, dass daher ein nicht gewöhnliches Maass von kritischem Scharfblick erforderlich war, wenn diese Vorarbeiten nicht ebenso verwirrend als aufklärend wirken sollten. Nur in der intuitiven Ueberzeugung, dass die Carnot'sche Theorie mit einem wenn auch schwankenden Strahl neue und fruchtbare Gebiete der Erkenntniss getroffen habe, konnte Clausius die Arbeit der Neugründung unternehmen, welche dem weniger tief blickenden als eine hoffnungslose erscheinen musste.

Auf dem Gebiete der mathematischen Physik schliesst sich an die Entdeckung eines neuen Gesetzes die Aufgabe die verschiedenartigen Formen aufzusuchen, in welchen dasselbe zum Ausdrucke gebracht werden kann. Das Interesse der Aufgabe besteht wesentlich darin, dass von den verschiedenen möglichen Formen stets die eine oder die andere in der Anwendung als vielseitiger und fruchtbarer sich erweist; durch den Process der Umformung kann die Anwendbarkeit eines Gesetzes auf Erscheinungen ins Licht gestellt werden, welche vorher von demselben kaum berührt zu werden schienen. In diesem Sinne haben wir eine zweite Abhandlung zu betrachten, welche Clausius im Jahre 1854 unter dem Titel »Ueber eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie« veröffentlicht hat. Schon in der Ueberschrift wird der Carnot'sche Satz als der zweite Hauptsatz dem Satze von der Aequivalenz von Wärme und Arbeit als dem ersten Hauptsatze der Wärmetheorie zur Seite gestellt und damit der dualisti-

sche Aufbau derselben auf Grund der beiden durch die Erfahrung gegebenen Sätze nachdrücklich betont. Die neue Wendung, welche Clausius in seiner Abhandlung dem zweiten Hauptsatze giebt, ist beeinflusst durch das Bestreben, jenen Dualismus auch durch die formale Analogie der beiden Sätze zum Ausdruck zu bringen. Er erinnert daran, dass bei jedem in einer Wärmemaschine sich vollziehenden Prozesse Entstehung von Arbeit aus Wärme nach einem bestimmten Maasse gebunden ist an den Uebergang von Wärme von einer oberen zu einer unteren Wärmequelle; er bezeichnet beide Vorgänge als Verwandlungen und betrachtet eine Verwandlung als positiv, wenn sie dargestellt wird durch den Uebergang von Wärme von einem heissen zu einem kalten Körper oder durch Entstehung von Wärme aus Arbeit. Die bei dem Kreislauf einer Maschine sich wechselseitig bedingenden Verwandlungen bezeichnet Clausius als äquivalent, den zweiten Hauptsatz als den Satz von der Aequivalenz der Verwandlungen. Als Aequivalenzwerth einer Wärmemenge, welche bei dem Kreislauf der arbeitenden Substanz vollständig in Arbeit verwandelt wurde, muss dabei eingeführt werden der Betrag dieser Wärmemenge dividirt durch die absolute Temperatur der Quelle, von welcher sie stammt; als Aequivalenzwerth einer Wärmemenge, welche von hoher Temperatur überging zu tiefer, erscheint diese Wärmemenge dividirt durch die tiefe vermindert um dieselbe Wärmemenge dividirt durch die hohe Temperatur. Für jeden vollständigen Kreislauf der Substanz gilt dann der Satz: Der Aequivalenzwerth der in Arbeit verwandelten Wärme ist gleich dem Aequivalenzwerth der von hoher zu tiefer Temperatur übergegangen, die Summe der Aequivalenzwerthe der positiven und negativen Verwandlungen ist gleich Null. Der neue Inhalt, welchen der Satz durch die mit ihm vorgenommene Umformung gewonnen hat, stellt sich noch einfacher in einer dritten Fassung dar, welche Clausius unmittelbar aus dem Satze von der Aequivalenz der Verwandlungen abgeleitet hat. Man braucht in der That nur die mathematische Formel hinzuschreiben, in welcher dieser letztere seinen Ausdruck findet, um zu sehen, dass bei jedem Kreislauf der arbeitenden Substanz die Summe der von ihr aufgenommenen Wärme-

mengen, jede derselben dividirt durch die absolute Temperatur ihrer Quelle, gleich ist der Summe der abgegebenen Wärmemengen wiederum jede dividirt durch die absolute Temperatur des Körpers, auf welchen sie übertragen wird.

Der zweite Hauptsatz gilt in den verschiedenen Formulierungen, welche ihm von Clausius zunächst gegeben worden sind, nur für einen sogenannten umkehrbaren Process. Der Beweis desselben gründet sich ja wesentlich auf die Annahme, dass das Spiel der Carnot'schen Maschine jederzeit auch in rückläufigem Sinne sich vollziehen kann, ohne dass eine Aenderung des Mechanismus erfordert wird. Bei allen wirklichen Maschinen finden Wärmeverluste statt überall, wo Maschinentheile sich aneinander reiben, oder wo Körper von verschiedener Temperatur sich berühren. Bei der idealen Maschine, deren Spiel bei dem Beweise des zweiten Hauptsatzes von Clausius benutzt wird, ist reibungslose Bewegung vorausgesetzt; Berührungen verschieden warmer Körper werden vermieden. Jede dem arbeitenden Körper zugeführte Wärmemenge wird sofort in Arbeit verwandelt, ohne eine Temperaturerhöhung zu bewirken; jede Temperaturänderung wird lediglich durch eine von ihm geleistete oder auf ihn ausgeübte Arbeit bedingt, ohne dass er selbst Wärme von einem anderen Körper aufnimmt oder an einen solchen abgibt. Dadurch ist die Möglichkeit gewonnen, einen solchen idealen Kreisprocess jederzeit auch in rückläufigem Sinne zu vollziehen, wobei nur Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe, geleistete und von aussen aufgenommene Arbeit ihre Rolle tauschen. Der Kreislauf einer Maschine, in welcher Wärmeverluste stattfinden, ist nicht in derselben Weise umkehrbar. Wenn Wärme von einem heissen zu einem kalten Körper bei unmittelbarer Berührung durch Leitung übergeht, so findet dieselbe kein Aequivalent in einer anderen in Arbeit verwandelten Wärme; bei rückläufigem Gang der Maschine wird sie nicht wieder gewonnen. Clausius hat auch diese nicht umkehrbaren Prozesse in den Kreis seiner Untersuchungen gezogen. Dieselbe Betrachtung, mit Hülfe deren er die Gleichheit des Wirkungsgrades für umkehrbare Prozesse bewiesen hatte, wandte er an auf die Combination eines umkehrbaren und eines

nicht umkehrbaren Processes; er kam zu dem Satze, dass die algebraische Summe aller in einem Kreisprocess vorkommenden Verwandlungen nur positiv sein kann; der umkehrbare Process bildet einen Grenzfall, in welchem jene Summe gleich Null wird. Unmittelbar einleuchtend wird die Richtigkeit des Satzes, wenn wir bemerken, dass derselbe auch so ausgesprochen werden kann: Der Wirkungsgrad einer idealen Maschine mit umkehrbarem Kreislauf ist grösser als der einer wirklichen Maschine mit nicht umkehrbarem Kreislauf.

Von der gesammten wissenschaftlichen Thätigkeit, welche Clausius in den fünfziger Jahren entfaltet, giebt der Bericht, welchen ich im Vorhergehenden über zwei der fundamentalen Arbeiten gegeben habe, nur ein unvollständiges Bild. Hand in Hand mit der Theorie gehen die mannigfachsten Anwendungen derselben; Clausius behandelt die Gesetze der specifischen und latenten Wärme; er untersucht die Abweichungen, welche der gesättigte Wasserdampf von den Gesetzen von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac zeigt, er berechnet die Aenderung, welche der Schmelzpunkt des Eises durch Druck erleidet. Eine ausführliche Abhandlung widmet er der Theorie der Dampfmaschine und giebt so der Technik den Impuls zurück, welchen sie ihrerseits auf die Wissenschaft ausgeübt hatte. Clausius wendet sich weiter zu der Anwendung der beiden Hauptsätze auf elektrische Erscheinungen, auf die Wärmeentwicklung durch die elektrische Entladung und den galvanischen Strom, die thermoelektrischen Wirkungen, die Elektrizitätsleitung der flüssigen Leiter, der Elektrolyte. Von besonderer Bedeutung für die Molekularphysik ist die Anschauung geworden, welche sich Clausius von der Natur der Elektrolyte gebildet hat. Er nimmt an, dass die Moleküle derselben in theilweiser Dissociation begriffen sind; die elektromotorische Kraft dient nicht dazu, die positiven und negativen Bestandtheile der Moleküle von einander zu reissen, sie wirkt nur richtend und regulirend auf die Bewegungen der bereits befreiten Bestandtheile. Neben dieser in einer grossen Reihe von Publikationen sich äussernden Thätigkeit gewahren wir die Spuren einer stillen und unermüdlichen Arbeit, welche die Weiter-Entwicklung und Vertiefung des zweiten

Hauptsatzes, die Begründung einer wirklichen Molekularmechanik der Wärme zum Ziele hat. Die erste Frucht derselben tritt im Jahre 1862 in einer Abhandlung »Ueber die Anwendung des Satzes von der Aequivalenz der Verwandlungen auf die innere Arbeit« an die Oeffentlichkeit. Clausius geht aus von der Bemerkung, dass die Wärme, welche wir einem Körper zuführen, im Allgemeinen zwei verschiedene Wirkungen ausübt; der eine Theil derselben erzeugt eine Erhöhung der Temperatur, der andere verrichtet irgend welche äussere oder innere Arbeit. Mit Bezug auf den letzteren Theil stellt er die Hypothese auf, dass er proportional sei der absoluten Temperatur, ausserdem proportional mit der Aenderung einer Grösse, welche von dem Zustande der Moleküle abhängt und welche als Disgregation bezeichnet wird. In der That führt diese Hypothese auf den zweiten Hauptsatz zurück, sobald man noch die Annahme hinzufügt, dass die zur Temperaturerhöhung gebrauchte Wärme nur von der Temperatur abhängt.

Ein Zusatz, welchen Clausius im Jahre 1864 zu der vorstehenden Abhandlung gegeben hat, ist beachtenswerth, weil er sich in demselben der von William Thomson in die Wärmelehre eingeführten Terminologie anschliesst. Wenn man sieht, dass Arbeit, lebendige Kraft, elektrische Spannung, chemische Differenz in Wärme sich verwandeln, dass umgekehrt Wärme zur Erzeugung von Arbeit, elektrischer Spannung, chemischer Differenz verbraucht werden kann, so liegt es nahe, diese verschiedenen Zustände, deren Aequivalenz in dem ersten Hauptsatze der Wärmetheorie begründet wird, als verschiedene Formen einer und derselben unveränderlichen Eigenschaft der Körper aufzufassen und diese hat William Thomson als ihre Energie bezeichnet. Die Formen der Energie sind so mannigfaltig, wie die Welt der Erscheinungen; die gesammte Summe der in einem abgeschlossenen System enthaltenen Energie ist nach dem ersten Hauptsatze konstant.

Die Bestrebungen von Clausius, für den zweiten Hauptsatz eine möglichst durchsichtige, für weitere Anwendungen geeignete Form zu finden, haben mit den Abhandlungen der Jahre 1854 und 62 keineswegs ihren Abschluss erreicht. Wir erkennen in beiden Arbeiten die

Keime, aus welchen sich im Jahre 1865 die endgültige Formulierung entwickelt. Bei dieser letzten Umprägung fehlt auch der Stempel nicht, welcher den bequemen Gebrauch des Satzes im wissenschaftlichen Verkehre sichert; es ist der Begriff der Entropie, welcher sich mit ihm in ähnlicher Weise verbindet, wie mit dem ersten Hauptsatz der der Energie. In seiner neuen Abhandlung »Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie« bemerkt Clausius, dass bei einem umkehrbaren Kreislauf eines Körpers die während einer kleinen Veränderung demselben zugeführte Wärme sich müsse darstellen lassen durch das Produkt aus seiner absoluten Temperatur in die Veränderung einer Grösse, welche lediglich von dem augenblicklichen Zustand des Körpers abhängig ist. Diese Grösse nennt Clausius die Entropie. Bei einem umkehrbaren Prozesse ist die Aenderung der Entropie gleich der Summe der dem Körper zugeführten Wärmemengen, jede derselben dividirt durch die absolute Temperatur, bei welcher sie aufgenommen wurde. Bei einem nicht umkehrbaren Process ist die Aenderung der Entropie gleich jener Summe noch vermehrt um eine stets positive Grösse. Nicht umkehrbare Vorgänge sind aber bedingt dadurch, dass Wärme durch Leitung übergeht von einem heissen auf einen ihn berührenden kalten Körper, dass Arbeit oder lebendige Kraft durch Reibung in Wärme sich verwandeln. Diese Aenderungen treten jederzeit ohne unser Zuthun von selber ein, sie bedingen stets eine Vermehrung der Entropie. Während bei dem Kreislauf, welchen wir eine Substanz in der idealen Carnot'schen Maschine durchlaufen lassen, jeder Uebergang von Wärme von hoher zu niederer Temperatur mit einer Verwandlung von Wärme in Arbeit, jede Aufnahme von Wärme bei hoher Temperatur mit einer Abgabe von Wärme bei tiefer Temperatur so verbunden erscheint, dass die Entropie konstant bleibt, verlaufen alle natürlichen Prozesse so, dass die Entropie wächst. Damit tritt nun die Bedeutung des zweiten Hauptsatzes in ein neues Licht. Der erste Hauptsatz der Wärmetheorie sagt, dass alle Veränderungen, welche in einem abgeschlossenen System eintreten mögen, dem Gesetz der konstanten Energie unter-

worfen sind. Der zweite Hauptsatz sagt, dass nur diejenigen Veränderungen wirklich eintreten, welche mit einer Vermehrung der Entropie verbunden sind; dem allgemeinen Rahmen fügt er die besondere Tendenz hinzu und so ist er zu einem mächtigen Hilfsmittel der Forschung geworden, dessen Einfluss auf weite Gebiete der physikalischen und physikalisch-chemischen Erscheinungen sich erstreckt. Im Verfolge dieser Gedanken charakterisirt Clausius nach dem Vorgange von W. Thomson die gegenseitige Stellung der beiden Hauptsätze der Wärmetheorie in den Schlussworten seiner Abhandlung: Die Energie der Welt ist konstant, die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.

Der Name von Clausius wird mit dem zweiten Hauptsatz für alle Zeiten verbunden bleiben; er hat denselben zuerst für die mechanische Wärmetheorie gewonnen, er hat ihn in ungestörter, konsequenter Arbeit zu dem schönen und fruchtbaren Theoreme umgestaltet, welches wir zuletzt besprochen haben. Auf den Ruhm eines Mitarbeiters können nur William Thomson und Rankine Anspruch erheben. Beide haben den zweiten Hauptsatz auf eine neue Weise zu begründen versucht. Der Beweis von Rankine besitzt aber nur ein geringes Maass von Zuverlässigkeit. Thomson, welcher in der Folge den zweiten Hauptsatz zuerst auf die thermoëlektrischen und thermoelastischen Erscheinungen angewandt hat, war unabhängig von Clausius zu der Ueberzeugung durchgedrungen, dass der Carnot'sche Satz auch bei der neuen Anschauung über das Wesen der Wärme seine Gültigkeit behalte. Die Voraussetzungen seines Beweises, welchen er 1851, ein Jahr später als Clausius, veröffentlichte, sind aber weniger einfach und überzeugend als die von Clausius und Thomson selbst schliesst seine Betrachtung mit den Worten: »Es ist nicht in dem Wunsche, eine Priorität zu reklamiren, dass ich diese Auseinandersetzungen mache, da das Verdienst, den Satz zuerst auf richtige Principien gegründet zu haben, vollständig Clausius gebührt«.

Von der Reihe der Arbeiten, welche sich auf den zweiten Hauptsatz beziehen, wurde Clausius mit einer gewissen inneren Nothwendigkeit zu zwei weiteren Untersuchungen geführt, über welche wir mit

der durch die Zeit und den Ort gebotenen Kürze zu berichten haben. Der erste Hauptsatz der Wärmetheorie ruht zwar ebenso wenig wie der zweite auf der Annahme, dass die Wärme in einer Bewegung bestehe, aber er macht dieselbe doch zu einer sehr wahrscheinlichen. Wenn man aber Wärme als eine Art von Bewegung betrachtet, so fragt es sich, welches diese Bewegung ist; man überzeugt sich leicht, dass es sich nur um eine molekulare Bewegung handeln kann. Durch die Annahme einer solchen verwandelt sich aber die Wärmelehre in eine Kinetik der Moleküle und für diese entsteht dann eine doppelte Aufgabe. Wie wir in der Mechanik von der Statik fortschreiten zur Dynamik, so müssen wir auf dem Gebiete der Molekularerscheinungen die älteren statischen Theorien ersetzen durch dynamische, in welchen die Bewegung der Moleküle als mitbedingende oder wesentliche Ursache der Erscheinungen betrachtet wird: Eine erste Aufgabe, welche übrigens mit der mechanischen Wärmetheorie noch in keinem unmittelbaren Zusammenhange steht. Wenn aber die Körper aus Molekülen bestehen, welche in gewissen Bewegungen begriffen mit gewissen Kräften auf einander wirken, so können auch die beiden Hauptsätze der Wärmetheorie nichts anderes sein, als ein Ausfluss der allgemeinen Principien der Mechanik in ihrer Anwendung auf jene Molekularsysteme. In der That hatte schon Helmholtz gezeigt, dass der erste Hauptsatz unter dieser Voraussetzung sich deckt mit dem Princip von der Erhaltung der lebendigen Kraft; bei dem zweiten Hauptsatz dagegen lag der Zusammenhang mit den Principien der Mechanik nicht so offen; es erhob sich also die zweite Aufgabe, den verborgenen Zusammenhang zu entdecken und so die Möglichkeit der mechanischen Auffassung für das ganze Gebiet der physikalischen Erscheinungen zu beweisen. An der Lösung beider Aufgaben hat Clausius einen hervorragenden Antheil genommen.

Wir beginnen mit seinen Arbeiten über die kinetische Theorie der Gase. Schon im Jahre 1738 hatte Daniel Bernoulli in seiner Hydrodynamik die Ansicht ausgesprochen, dass die Moleküle der Luft in einer geradlinig fortschreitenden Bewegung begriffen seien und dass durch ihren Stoss auf die begrenzenden Körper der Druck der Luft erzeugt

werde. Er hatte damit seiner Zeit vorausseilend einen ersten Anstoss zu der Begründung einer kinetischen Gastheorie gegeben, welcher aber unbeachtet blieb und der Vergessenheit anheimfiel. Mehr als hundert Jahre später wurde dieselbe Anschauung von Joule, Krönig und Clausius aufs neue entwickelt. In der Einleitung zu der im Jahre 1857 erschienenen Abhandlung über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen, giebt Clausius an, dass er schon vor dem Jahre 1850 über die Art dieser Bewegung sich ganz bestimmte Vorstellungen gebildet und den Plan gefasst habe, die aus denselben sich ergebenden Consequenzen in einer besonderen Abhandlung darzustellen. Durch das Bestreben, keine Abhandlung der Oeffentlichkeit zu übergeben, ehe er den Gegenstand derselben nach allen Seiten hin erforscht und sich ganz zum Herren desselben gemacht hatte, wurde Clausius bestimmt, mit der Verwirklichung jenes Planes eine Reihe von Jahren zu zögern und so ging ihm der Ruhm, zuerst mit seinen Anschauungen hervorgetreten zu sein, verloren. Seiner Abhandlung bleiben aber den Arbeiten von Joule und Krönig gegenüber wesentliche und eigenthümliche Verdienste. Er hat den Beweis des Boyle-Mariotteschen Gesetzes ohne die willkürlichen Annahmen, deren sich Joule und Krönig bedient hatten, geliefert; er hat die Voraussetzungen genauer präcisirt, welche man über die molekularen Verhältnisse der Gase machen muss, um zu jenem Gesetze und zu dem von Gay-Lussac zu gelangen; er hat gezeigt, dass das Verhalten der Gase durch diese Gesetze nicht in aller Strenge, sondern nur mit einer unter gewöhnlichen Umständen allerdings weit gehenden Annäherung bestimmt wird. Er hat den Satz aufgestellt, dass von allen Gasen bei gleichem Druck und gleicher Temperatur in gleichen Räumen dieselbe Zahl von Molekülen enthalten ist; einen Satz, der schon im Jahre 1811 von Avogadro ausgesprochen worden war. Clausius hat ferner zuerst den Umstand in Betracht gezogen, dass die Moleküle der Gase der Regel nach aus einem grösseren oder kleineren Complex von Atomen bestehen, dass also der ganze Wärmehalt eines Gases nicht bloß durch die fortschreitende Bewegung der Moleküle, sondern auch durch die inneren Schwingungen der Atome repräsentirt wird. Er hat berechnet, dass das Ver-

hältniss zwischen der Energie der fortschreitenden Bewegung und der gesammten Energie umgekehrt wie die auf die Volumeinheit bezogene Wärmekapazität sich ändert.

In einer zweiten Abhandlung beschäftigt sich Clausius mit der Bestimmung der sogenannten mittleren Weglänge der Gas-Moleküle. Wir verstehen unter Weglänge die geradlinige Strecke, welche von einem Moleküle zwischen je zwei Zusammenstössen desselben mit anderen Molekülen zurückgelegt wird. In Wirklichkeit wird die von einem und demselben Molekül durchlaufene Bahn aus Weglängen von sehr verschiedener Grösse bestehen, welche sich unter allen möglichen Winkeln aneinanderreihen. Nehmen wir aus den verschiedenen vorkommenden Längen das Mittel, welches bei einem und demselben Gase nur von der Dichte abhängen kann, so bezeichnen wir dieses als die mittlere Weglänge. Die auf die Berechnung dieser letzteren gerichtete Untersuchung von Clausius ist für die kinetische Theorie der Molekularerscheinungen von epochemachender Bedeutung. In derselben ist zum ersten Male ein tiefer liegendes Problem der Molekulartheorie in Angriff genommen und es enthüllt sich dabei der eigenthümliche Charakter, welcher all diesen Problemen gemeinsam ist. Es handelt sich um die Aufgabe, das mittlere Verhalten der Moleküle in statistischer Weise zu ermitteln, während es völlig unbekannt bleibt, welches zu irgend einer Zeit das wirkliche Verhalten der einzelnen Moleküle ist. Zu der Lösung dieser von den älteren Problemen der Mechanik so abweichenden Aufgabe mussten neue Arten der Betrachtung, neue Methoden der Rechnung erdacht werden. Die Bedeutung der Abhandlung beruht ebenso sehr auf dieser methodischen Seite, wie auf dem erzielten Resultate; das letztere besteht in dem merkwürdigen Satze, dass die mittlere Weglänge der Moleküle proportional ist ihrem Durchmesser multiplicirt mit dem Verhältniss des Raumtheiles, der von der Masse der Moleküle selbst ausgefüllt wird, zu dem ganzen Raume, den das Gas als solches, den die Moleküle zusamt ihren Zwischenräumen einnehmen; einem Satze, mit Hülfe dessen es später gelungen ist, von der Grösse der Moleküle selbst eine bestimmte Vorstellung zu gewinnen. Durch diese wird die

Behauptung von Clausius, dass auch die mittlere Weglänge eine äusserst kleine sei, vollauf bestätigt. Clausius erklärte so die Thatsache, dass ungeachtet einer Geschwindigkeit von Hunderten von Metern, mit welcher die Gasmoleküle in ihren Bahnen einherfahren, doch die Ausbreitung eines Gases in einem anderen, z. B. die Verbreitung eines Geruches in der ruhigen Luft eines Zimmers, verhältnissmässig langsam vor sich geht.

In analoger Weise hat Clausius in einer dritten Abhandlung die Wärmeleitung der Gase behandelt. Er traf auf diesem Felde zusammen mit Maxwell; diesem war es vorbehalten, die kinetische Theorie der Gase zu einem gewissen Abschluss zu bringen, indem er in eigenthümlichem und selbständigem Geiste die Reibung und Diffusion, die Wechselwirkung der Moleküle und die davon abhängende Mechanik ihrer Zusammenstösse, endlich das Gesetz der Geschwindigkeitsvertheilung in den Kreis der Betrachtung hinein zog.

In unmittelbarem Zusammenhang mit den gastheoretischen Studien steht das Interesse, welches Clausius den Untersuchungen der Chemiker über die Modifikationen des Sauerstoffs entgegen brachte; in mehreren Aufsätzen vertritt er die Anschauung, dass das Molekül des Ozons aus drei Atomen Sauerstoff zusammengesetzt sei, eine Ansicht, welche durch spätere Untersuchungen ihre Bestätigung gefunden hat.

Wir wenden uns nun zu den Arbeiten, welche die Zurückführung des zweiten Hauptsatzes auf allgemeine mechanische Principien zum Ziele haben. Der erste, dem die Entdeckung des Zusammenhanges glückte, war Boltzmann, welcher in der Folge in so hervorragender Weise an dem Ausbau der kinetischen Gastheorie sich betheiligt hat. Mit einer in vielen Punkten übereinstimmenden Lösung des Problems trat Clausius im Jahre 1870, vier Jahre nach Boltzmann hervor, ohne von der Untersuchung des letzteren Kenntniss gewonnen zu haben. Die Vorzüge seiner Entwicklung bestehen in der grösseren Allgemeinheit der zu Grunde liegenden Vorstellungen. in der genauen und klaren Formulirung der zu dem Beweise nothwendigen Hypothesen, in der Einfachheit der mathematischen Hülfsmittel. Clausius betrachtet ein

System von Molekülen, welche sich in geschlossenen Bahnen bewegen; diese Moleküle unterliegen der Wirkung von Kräften, welche sie theils wechselseitig auf einander ausüben, welche theils von aussen her auf dieselben wirken. Die Gesammtheit der Moleküle kann in verschiedene Gruppen zerfallen, so dass innerhalb einer Gruppe die Bahnen und Geschwindigkeiten der Moleküle einander gleich und nur die Phasen der Bewegung verschiedene sind. Tritt aber ein solches Zerfallen des Systemes in einzelne Gruppen ein, so muss die weitere Annahme gemacht werden, dass die mittleren lebendigen Kräfte der Moleküle in den verschiedenen Gruppen zu einander in einem unveränderlichen Verhältniss stehen. Wird nun durch Wärmezufuhr der Zustand des Systems geändert, so werden die Moleküle in neuen Bahnen mit veränderter Geschwindigkeit sich bewegen; es kann auch das Gesetz ihrer Wechselwirkung einer gewissen Modifikation unterliegen. Die zugeführte Wärme ist dann nach dem ersten Hauptsatz gleich dem Zuwachs der lebendigen Kraft vermehrt um die Arbeit, welche bei der Verschiebung der Moleküle in die Anfangspunkte der neuen Bahnen geleistet wird. Clausius zeigt, dass jene Wärmemenge durch ein Produkt zweier Faktoren dargestellt werden kann. Der erste ist proportional der mittleren lebendigen Kraft der Moleküle, der zweite wird gebildet durch den Zuwachs einer Grösse, welche von den Massen, Geschwindigkeiten und Umlaufzeiten der Moleküle abhängt, welche also durch den jeweiligen Zustand des Molekularsystems vollkommen bestimmt ist. Identificirt man den ersten Faktor mit der absoluten Temperatur, den zweiten mit der Entropie, so hat man in der That den zweiten Hauptsatz in der letzten der früheren Formen.

Die Untersuchungen von Clausius über die mechanische Begründung des zweiten Hauptsatzes sind auch für die allgemeine Mechanik nicht ohne Rückwirkung geblieben. Clausius hat dieselbe bereichert durch die Einführung des für die Theorie der stationären Bewegungen wichtigen Virials. Für ein Punktpaar erhält man dieses Virial, wenn man für eine sehr grosse Zahl von aufeinander folgenden Zeitabschnitten die zwischen beiden Punkten wirkende Kraft multiplicirt mit der halben

Entfernung derselben und den Mittelwerth der so gebildeten Produkte berechnet; dieser ist das Virial. Clausius bewies den die Grundeigenschaft des Virials enthaltenden Satz: die mittlere lebendige Kraft ist gleich dem Virial. Er benutzte denselben insbesondere zu einem allgemeineren Studium der Centralbewegungen und gelangte mit Hülfe desselben zu sehr beachtenswerthen Beziehungen, aus welchen als ein ganz specieller Fall das dritte Keppler'sche Gesetz abgeleitet werden konnte.

Gegen den zweiten Hauptsatz wurden von verschiedenen Autoren Einwände erhoben, welche denselben als einen unrichtigen oder wenigstens nur unter beschränkenden Voraussetzungen richtigen hinzustellen suchten. Clausius wurde dadurch zu einer Reihe von kritischen Erläuterungen veranlasst, durch welche die vollkommene Uebereinstimmung seines Satzes auch mit den anscheinend widerstrebenden Fällen nachgewiesen wurde. Unter jenen Einwänden möge einer mit Rücksicht auf seine allgemeinere Bedeutung besonders hervorgehoben werden. Wir haben früher erwähnt, dass der zweite Hauptsatz zu einer eigenthümlichen Consequenz führt, welche Clausius in dem Satze ausgedrückt hatte: die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu; das Weltall nähert sich mehr und mehr einem Zustande, wo alle Temperaturdifferenzen sich ausgeglichen haben und die Kräfte keine neuen Bewegungen erzeugen können. Gegen diesen Satz erhob Rankine Widerspruch; er nahm an, dass die sichtbare Welt eine Grenze besitze, an welcher alle Wärmestrahlen reflektirt werden. Er hält es für denkbar, dass durch diese Reflexion die strahlende Energie der Welt in Brennpunkten concentrirt werden könne von solcher Intensität, dass in denselben ein vollkommen erkalteter Weltkörper in Dampf verwandelt, die ihn zusammensetzenden chemischen Verbindungen wieder in ihre Elemente zersetzt werden könnten. So würde dann ein Wiederbeginn des kosmogonischen Processes ermöglicht werden, welcher nach der Kant-Laplace'schen Hypothese zur Bildung der Sonnensysteme geführt hat. Diesen Betrachtungen liegt die Annahme zu Grunde, dass durch Concentration von Wärmestrahlen Brennpunkte erzeugt werden können,

deren Temperatur höher ist, als die der strahlenden Körper; dies steht aber in offenbarem Widerspruch mit dem zweiten Hauptsatz. Clausius hat der von Rankine angeregten Frage eine umfangreiche Untersuchung gewidmet, welche auch abgesehen von ihrer speciellen Veranlassung von grossem Interesse ist. Er hat gezeigt, dass die ohne Concentration vor sich gehende Wärme- oder Lichtstrahlung mit dem zweiten Hauptsatz im Einklang steht, sobald angenommen wird, dass die Stärke der Strahlung von dem den Körper umgebenden Mittel abhängt, dass sie dem Quadrate seiner Lichtgeschwindigkeit umgekehrt proportional ist. Wenn diese Annahme zutrifft, so kann auch eine Concentration der Strahlen an dem Verhältniss der Wärmemengen, welche zwei Körper in denselben sich zusenden, nichts ändern; es gilt der zweite Hauptsatz also auch für diesen Fall und die Unmöglichkeit der von Rankine gemachten Annahme ist damit bewiesen.

Die Abhandlung über die Concentration der Wärme- und Lichtstrahlen führt uns auf das Gebiet der Optik, welches von Clausius im Ganzen wenig betreten worden ist. Nur eine Gruppe optischer Erscheinungen hat er wiederholt zum Gegenstand scharfsinniger und eingehender mathematischer Untersuchungen gemacht: die Licht- und Farben-Erscheinungen, welche die Strahlen der Sonne in unserer Atmosphäre hervorrufen; die Intensitätsverhältnisse des von allen Theilen des Himmels uns zukommenden Tageslichtes, die Natur der Theilchen, welche in der Atmosphäre suspendirt das Sonnenlicht reflektiren, die blaue Farbe des Himmels, die Morgen- und Abendröthe. So lehrreich und anziehend diese Arbeiten sind, wir müssen es uns versagen, auf ihren Inhalt genauer einzugehen, um so mehr, als nach neueren Beobachtungen die allgemeine Gültigkeit der von Clausius gemachten Annahmen einigermaassen zweifelhaft geworden ist, und eine kritische Revision seiner Theorie den Rahmen unserer Aufgabe überschreiten würde.

Nächst der Wärmelehre hat Clausius kein Gebiet der Physik in so eingehender und umfassender Weise bearbeitet, als die Elektrizitätslehre. Sein Interesse wandte sich zu Anfang naturgemäss denjenigen Erscheinungen zu, welche mit Wärmewirkungen verbunden unmittelbar den beiden Hauptsätzen der Wärmetheorie untergeordnet werden konnten. Aber schon die Behandlung dieser Probleme führte zu Untersuchungen, welche ausschliesslich dem Gebiete der Elektrizität angehören; vor allem ist hier die Theorie des Condensators zu erwähnen, welche Clausius neu bearbeitet und mit Rücksicht auf den Einfluss der isolirenden Zwischenschichte vervollständigt hat.

Von dem verhältnissmässig engen Gebiete der Electrostatik wandte sich Clausius mehr und mehr zu den fundamentalen Aufgaben, welche sich aus der Mannigfaltigkeit der elektrodynamischen Erscheinungen ergaben. Vom Jahre 1875 an traten diese so sehr in den Vordergrund seines Interesses, dass wir dieses als den Beginn einer zweiten elektrodynamischen Epoche seiner wissenschaftlichen Thätigkeit bezeichnen können. Ehe wir aber über die Ergebnisse derselben berichten, wird es nützlich sein, den Charakter der Probleme, welchen Clausius ein so eifriges und eindringendes Studium gewidmet hat, durch einige allgemeinere Bemerkungen zu erläutern.

Was wir auf dem Gebiet der elektrodynamischen Erscheinungen beobachten, ist die gesammte Wirkung, welche ein von einem galvanischen Strom durchflossener Drahtkreis auf einen anderen ebensolchen Kreis oder auf einen einfachen Leiter ausübt. Die Aufgabe der Beobachtung ist es, die Gesetze dieser Wirkungen zu ermitteln. Ist diess gelungen, so erhebt sich eine zweite Aufgabe, deren Lösung Sache der mathematischen Analyse ist: es muss festgestellt werden, welcher Antheil an der beobachteten Gesamtwirkung den einzelnen Stücken der gegebenen Drahtkreise zukommt, es muss aus dem Gesetz der Gesamtwirkung das Gesetz der Elementarwirkung erschlossen werden. Hier tritt nun eine erste Schwierigkeit ein; es zeigt sich, dass die Aufgabe gar keine bestimmte ist, sondern eine unendliche Menge von Lösungen zulässt. Die Mannigfaltigkeit derselben kann nur eingeschränkt werden

durch Hinzufügung weiterer Annahmen. In der Wahl dieser ist aber ein gewisser Spielraum gelassen; dieselbe wird von subjektiven Anschauungen beeinflusst in verschiedenem Sinne getroffen, die Elementargesetze dementsprechend in verschiedener Weise formulirt werden können.

Ein zweites Problem der Elektrodynamik knüpft sich an die nahe Beziehung, welche zwischen den elektrodynamischen Wirkungen und den elektrostatischen besteht. Dieselben Theilchen, welche an der Oberfläche einer mit Wolle geriebenen Siegellackstange gelagert die entgegengesetzte Elektrizität eines in der Nähe befindlichen Papierstückchens anziehen, rufen, wenn sie in leitenden Drähten sich bewegen, die elektrodynamischen Erscheinungen hervor. Ein und dasselbe höhere Gesetz muss daher die Elektrostatik und die Elektrodynamik umfassen. Das bekannte Grundgesetz der ersteren muss einer solchen Ergänzung fähig sein, dass auch die elektrodynamischen Wirkungen durch dasselbe ihre Erklärung finden. Der so formulirten zweiten Aufgabe der Elektrodynamik haftet aber eine Unbestimmtheit von ganz ähnlicher Art an wie der ersten vermöge des nahen Zusammenhanges, der zwischen beiden besteht. Ist nemlich das allgemeine Gesetz der Wechselwirkung zweier elektrischer Theilchen bekannt, wissen wir, wie dieselben im galvanischen Strome sich bewegen, so haben wir alles Nothwendige, um die Wechselwirkung beliebiger von galvanischen Strömen durchlaufener Drahtstücke zu berechnen, das heisst, wir erhalten aus dem Gesetz der Wechselwirkung zweier elektrischer Theilchen ein Elementargesetz der Elektrodynamik. Ist also dieses letztere der Natur der Sache nach in einem gewissen Grade unbestimmt, so muss dasselbe gelten von dem Gesetz der Wechselwirkung zweier elektrischer Punkte.

Der erste, welcher eine in ihrer Art vollendete Lösung des elektrischen Problems gab, war Wilhelm Weber. Nach dem von ihm aufgestellten Gesetz hängt die zwischen zwei elektrischen Punkten wirkende Kraft nicht allein von ihrer Entfernung, sondern auch von der Geschwindigkeit ab, mit der sie sich einander nähern oder von einander entfernen. Riemann hatte dieses merkwürdige Resultat durch die Annahme zu erklären versucht, dass die von einem elektrischen Theil-

chen auf ein anderes ausgeübte Kraft nicht momentan der jeweiligen Entfernung entsprechend wirke, sondern mit einer endlichen Geschwindigkeit, der Geschwindigkeit des Lichtes, den Zwischenraum der Theilchen durchheile. Die Abhandlung Riemanns, welche erst nach seinem Tode im Jahre 1867 veröffentlicht wurde, bot Clausius den ersten Anlass, seinerseits in die Entwicklung der Elektrodynamik einzugreifen. Er zeigte, dass in der Rechnung von Riemann ein Fehler enthalten war, durch welchen das Resultat der Untersuchung hinfällig wurde. Dass der Gedanke Riemanns trotzdem ein richtiger war, wurde durch Carl Neumann bewiesen, welcher im Jahre 1868 die Untersuchung von neuem aufgenommen hatte. In der Zeit, welcher diese Arbeiten angehören, erfreute sich die Weber'sche Theorie in Deutschland einer allgemeinen Anerkennung. Vercinzelte Versuche einer anderen Behandlung konnten sich mit derselben in der Klarheit der Entwicklung und der Weite des Gesichtskreises nicht messen, sie war die einzige, welche das ganze Gebiet der elektrischen Erscheinungen durch einen einheitlichen Gedanken in konsequenter Weise beherrschte. In England dagegen war von William Thomson und Maxwell im Anschluss an Faraday'sche Ideen eine ganz abweichende Auffassung der elektrischen Wirkungen ausgearbeitet worden, deren Bedeutung durch die Fülle neuer Beziehungen, welche sie auf theoretischem wie auf experimentellem Gebiet ergab, eindringlich bezeugt wurde. In Deutschland war diese zu wenig gekannte Entwicklung ohne Einfluss geblieben, bis von Helmholtz im Jahre 1870 in einer fundamentalen Abhandlung das Ergebniss der beiden gesonderten Entwicklungen zusammenfassend eine Brücke zwischen der deutschen und der englischen Behandlungsweise des Gegenstandes schlug. Er übte dadurch einen mächtigen Impuls aus, welcher die elektrodynamischen Untersuchungen zu neuem Leben erweckte, eine Anregung ebenso zu kritischer Prüfung der bisherigen Theorien, wie zu dem Versuche einer neuen Lösung. Auch Clausius nahm bald einen hervorragenden Antheil an der Bearbeitung der fundamentalen Fragen, welche sich so auf dem Gebiete der Elektrodynamik erhoben hatten.

Den Ausgangspunkt seiner Ueberlegungen bildete ein Punkt der Weber'schen Theorie, welcher schon früher zu Bedenken Veranlassung gegeben hatte. Weber nimmt an, dass im galvanischen Strom die beiden Elektricitäten sich mit gleicher Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung bewegen. Man hatte wiederholt den Versuch gemacht, an Stelle dieser complicirten Vorstellung die einfachere zu setzen, dass nur die eine der beiden Elektricitäten sich bewege, während die andere in Ruhe bleibt. Allein nun ergaben sich Folgerungen, welche mit der Erfahrung in offenbarem Widerspruch standen. Jener unitarischen Vorstellung zu Folge muss ein galvanischer Strom ausser den bekannten elektrodynamischen Kräften noch Wirkungen ausüben, welche den Charakter elektrostatischer Anziehungen und Abstossungen besitzen; Wirkungen, welche nie beobachtet waren. Clausius suchte nun ausgehend von einem sehr allgemeinen Ansatz die Wechselwirkung elektrischer Theilchen so zu bestimmen, dass bei Zugrundelegung der unitarischen Anschauungsweise jene der Erfahrung widerstreitenden Folgerungen von vornherein ausgeschlossen sind. Es zeigte sich, dass diess nur möglich ist, wenn man die weitere Annahme zulässt, dass die Wechselwirkung zweier elektrischer Theilchen von ihren absoluten Geschwindigkeiten im Raum, nicht von der relativen Geschwindigkeit in der Richtung der Verbindungslinie abhängt. Die weiteren Folgerungen, welche sich aus dem Gesetze von Clausius ergeben, insbesondere die Elementargesetze der elektrodynamischen Wirkungen stimmen mit den Beobachtungen überein, sofern sich diese auf die Wirkungen geschlossener Ströme beziehen. Trotzdem wird man einige Bedenken gegen die Theorie von Clausius nicht zurückhalten können. Die Abhängigkeit der Kraft von den absoluten Geschwindigkeiten ist mit den bewährten Principien der Mechanik nur in Einklang zu bringen durch die Annahme, dass die Wechselwirkung der elektrischen Theilchen keine unmittelbare sei, sondern vermittelt durch ein den Zwischenraum ausfüllendes Medium; die völlige Unbestimmtheit dieses letzteren, der Mangel jeder Vorstellung darüber, welche Vorgänge und welche Eigenschaften desselben die Vermittlung der Wirkung ermöglichen,

bedingt eine Lücke, welche das Ergebniss der Untersuchung als ein nicht ganz befriedigendes erscheinen lässt. Wenn die Einführung des Zwischenmediums den Umstand rechtfertigt, dass nach dem Gesetz von Clausius das Princip der Gleichheit von Aktion und Reaktion für die Wechselwirkung zweier elektrischer Theilchen nicht gilt, so bleibt die Frage offen, in wie fern das Princip der Erhaltung der Energie für die beiden Theilchen allein gelten kann ohne Berücksichtigung des Zwischenmediums. Zu einer einwurfsfreien und einheitlichen Vorstellung über die Natur der elektrischen Wirkungen sind wir aber trotz der vielen Anstrengungen der letzten Jahrzehnte überhaupt nicht gelangt, und es ist nicht unwahrscheinlich, dass die Schwierigkeiten des Problem es erst durch neue Thatsachen der Beobachtung gehoben werden können. Wenn aber eine glückliche Entdeckung den Schleier zerreisst, dann wird die wahre Bedeutung der verschiedenen Vorarbeiten, die Beziehung der ihnen zu Grunde liegenden Gedanken klar hervortreten; dann erst wird es möglich sein, auch den elektrodynamischen Arbeiten von Clausius ihre bleibende Stelle in der Entwicklung der Wissenschaft anzuweisen.

Wenn in dem ersten Jahrzehnt nach 1870 die Bewegung auf dem Gebiete der Elektrizität wesentlich theoretischen Fragen galt, so ist das folgende ausgezeichnet durch den ungeahnten Aufschwung welchen die Anwendung der Elektrizität auf die Technik nahm. Wie Clausius seiner Zeit den grossen Motor aller Industrie, die Dampfmaschine, einer sorgfältigen Untersuchung unterworfen hatte, so behandelte er jetzt in vollständiger und genauer Weise den mächtigen Motor der Elektrizität, die Dynamomaschine. Die anhaltende Vertiefung in die schwierigsten theoretischen Probleme hatte ihm nicht den offenen Blick für die Leistungen der Praktiker getrübt; auch hier suchte er in seinem Theile die anregenden und fruchtbringenden Beziehungen zwischen der wissenschaftlichen Arbeit und dem thätigen Leben zu befestigen. Dem aus verwandten Bestrebungen hervorgegangenen Congress der Elektriker, welcher im Jahre 1881 in Paris abgehalten wurde, wohnte Clausius als einer der Abgesandten des Deutschen Reiches bei. Durch die Auf-

gaben dieses Congresses wurden seine Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Elektrizität und Magnetismus und über die beide Gebiete umfassenden absoluten und praktischen Maasssysteme veranlasst.

Die wissenschaftliche Wirksamkeit eines Mannes wird getragen von demselben Grunde, auf welchem die ganze Führung seines Lebens beruht; sie ist ebenso bedingt durch seinen Charakter, wie durch das Maass seiner Begabung. Wir haben uns im Vorhergehenden mit den wissenschaftlichen Leistungen von Clausius bekannt zu machen gesucht, soweit die Kürze der Zeit diess ermöglichte. Es bleibt uns übrig zu erzählen, wie er sich in seinem Berufe, in den vielfältigen Beziehungen des Lebens dargestellt hat. Leider ist es mir nicht vergönnt gewesen, Clausius persönlich näher zu treten und so benutze ich im Folgenden dankbar die Mittheilungen seines Sohnes, welcher das Wesen seines Vaters mit den folgenden Worten schildert:

»Die Hauptcharaktereigenschaft meines Vaters war zweifellos die stolze Wahrhaftigkeit seines Wesens. In seinem Handeln und Reden hat er niemals irgendwie bedenkliche Mittel anzuwenden vermocht und besonders in der eigenen Selbstprüfung gab er sich keinen Selbsttäuschungen hin. Daher er sich niemals zu scheuen brauchte, die Beweggründe seines Handelns aufzudecken, daher seine durch und durch vornehme Natur, daher ebenso sehr seine seltene Bescheidenheit, wie die herzliche Freude, welche er jedesmal empfand und niemals auszudrücken zu stolz war bei einer Anerkennung seines Wirkens, daher seine Abneigung gegen jedes Halbwissen, gegen jede Oberflächlichkeit, in der er etwas Unwahrhaftes sah. Ein anderer hervortretender Charakterzug war die eigenthümliche Art, wie er an jedem seiner Nebenmenschen fast nur die gute Seite sah. Ihre Fehler beachtete er kaum und wenn er sie sah, so hatte er doch zu wohlfeilem Spott über sie nicht die geringste Anlage. Der Gesamteindruck, den er von einem Menschen gewann, ergab sich ihm aus der mehr oder minder kräftigen

Entwicklung seiner tüchtigen Anlagen und wurde wenig getrübt durch das Vorhandensein dieser oder jener Mängel. Aus diesem Zuge entsprang das herzliche, liebenswürdige Entgegenkommen gegen jeden, das zu jeder Zeit ihm aus dem Herzen kam. Nur wo er Unwahrheit entdeckte erfasste ihn eine tiefe Abneigung.«

Auf der Wahrhaftigkeit, Ruhe und Besonnenheit seines Wesens beruht auch der wohlthuende Eindruck, welchen die ziemlich zahlreichen polemischen Aufsätze von Clausius stets hinterlassen. Seine Zurückweisung der parteiischen und einseitigen Darstellung, welche Tait in seiner historischen Skizze der Thermodynamik gegeben hatte, ist ein Muster einer gerechten und schlagenden Kritik, welche von jeder persönlichen Erregung und von jeder Voreingenommenheit frei, nur die Herstellung der Wahrheit im Auge hat. Wenn er hier von sich selbst sagt, »ich bin gewohnt, mich immer offen auszusprechen und denke nie daran, etwas was ich nicht wirklich sagen will, doch andeutungsweise durchblicken zu lassen«, so bestätigt das vollkommen die Schilderung seines Sohnes.

An der Hand dieser letzteren möge endlich auch noch das ergänzt werden, was wir früher über den äusseren Lebensweg von Clausius mitgeteilt haben. In Zürich, wo er im Jahre 1857 auch zum Professor an der Universität ernannt worden war, gründete er im Jahr 1859 mit Adelheid Rimpau einen eigenen Hausstand. Die Erinnerung an die Zeiten ungezwungener Geselligkeit, welche ihn mit einer Reihe von ausgezeichneten Männern verband, an den zahlreichen Kreis dankbarer Schüler, welche sich um ihn scharten, hat er noch in seinen späteren Lebensjahren gern zurückgerufen. Nach 12 jähriger Thätigkeit in Zürich kam Clausius im Jahr 1867 nach Würzburg, 1869 nach Bonn, welchem er trotz lockender Anerbietungen von Strassburg und Göttingen treu geblieben ist. Sein Wirkungskreis daselbst wurde von Jahr zu Jahr ein grösserer nicht nur durch die wachsende Zahl der Zuhörer, sondern auch durch zahlreiche Nebenpflichten, denen er sich nicht entziehen zu dürfen glaubte. In Allem was er in seinem Berufe that, wurde Clausius von einem hohen Pflichtgeföhle geleitet;

der Vorbereitung für seine Vorlesungen widmete er stets geraume Zeit; kaum ein Jahr liess er vergehen, ohne ihren Inhalt von neuem durchzuarbeiten und umzugestalten, wo es der Fortschritt der Wissenschaft oder seine bessere Ueberzeugung verlangte. Die zahlreichen Prüfungen an der Universität und dem Oberbergamte hielt er nie ab, ohne vorher einen sorgfältigen Plan für dieselben entworfen zu haben. Es kostete ihm jedesmal einen schweren Kampf, seiner Gesundheit zu Liebe eine seiner Pflichten zu versäumen; selbst seine letzte Krankheit, welche seit Monaten von Woche zu Woche seine Kraft vermindert hatte, vermochte ihn nicht, seine Semesterthätigkeit früher abzuschliessen; noch in den ersten Tagen des August hat er, zuletzt vom Bette aus, die ihm obliegenden Prüfungen abgehalten.

Wissenschaft und Beruf nahmen Clausius nie in solchem Maasse gefangen, dass er nicht seiner Pflichten als Staatsbürger in vollem Maasse sich bewusst geblieben wäre. Kein Freund politischen Umtriebes hat er doch nie gezögert, wenn er es für seine Pflicht hielt, auch in den Dingen des öffentlichen Lebens seinen ganzen Einfluss einzusetzen. Im Jahre 1870 liess er sich nicht abhalten, auf den Kriegsschauplatz zu gehen. Als Führer eines Nothhelferkorps der Bonner Studirenden entfaltete er Dank der Selbständigkeit seines Wesens und der Bestimmtheit seines Auftretens eine segensreiche Thätigkeit. Den grossen Entscheidungsschlachten bei Mars La Tour und Gravelotte wohnte er persönlich bei Verwundete vom Schlachtfelde schaffend und ihre Leiden lindernd. Leider brachte er selbst eine ernstere Verletzung des Knies in die Heimath zurück, an deren Folgen er jahrelang litt. Erst als der weit über Fünfzigjährige sich entschloss reiten zu lernen, gewann er die alte Frische wieder; er brachte es aber auch in dieser Kunst noch zu solcher Fertigkeit, dass er in seinem hohen Alter mit Eifer und Vergnügen an den Ritten der Bonner Husarenofficiere theilnahm.

Im Jahre 1875 traf Clausius das harte Geschick seine geliebte Gattin zu verlieren. Sein tiefes Gemüth und sein ausgeprägter Familiensinn liessen ihn diesen Schlag nur schwer verwinden und er hat seitdem fast nur seinem Beruf und seiner Familie gelebt. In der

Erinnerung an jene Zeit schreibt mir sein Sohn: »Für seine 6 noch unerwachsenen Kinder sorgte er als ein so liebevoller und stets geduldiger Vater, dass sie nie das Gefühl gehabt haben, als könnten sie je den Vater mit ihren vielen kleinen Anliegen und Wünschen in der Arbeit stören. Ihr Vater, den sie stets in seiner Studirstube wussten, musste alle ihre Leiden und Freuden erfahren und er in seiner sinnigen, klar und liebevoll beobachtenden Weise liess jedes Kind in seiner Art gewähren, immer nur wenig eingreifend und doch bis ins tiefste hinein jedes Sinn und Charakter beeinflussend.«

Im Jahre 1886 vermählte sich Clausius zum zweiten male mit Sophie Sack; im folgenden Jahre wurde ihm ein Sohn geboren, aber dem neuen Glück, welches von ihm tief empfunden sein Leben verklärte, war nur noch eine kurze Frist gegeben. Im Sommer 1888 erkrankte er an einer perniciousen Anämie; am 24. August ist er sanft und schmerzlos entschlafen.

Wenn eine späte Nachwelt hören wird von der Geschichte unserer Zeit, so wird sie uns beneiden, dass wir Zeugen gewesen sind der grössten Thaten, der wunderbarsten Entwicklungen, welche das Deutsche Volk gesehen hat; sie wird staunen über die Fortschritte der Technik, die Umwälzung der Verhältnisse des Verkehrs und Erwerbes, sie wird mit Bewunderung blicken auf die grossen Entdeckungen, deren sich vor allen die Naturwissenschaft zu rühmen hat. Unter den leuchtenden Namen, an welche sich die Erinnerung so glorreicher Errungenschaften knüpft, wird dann auch der Name von Clausius nicht fehlen.

Verzeichniss der wissenschaftlichen Veröffentlichungen von Rudolf Clausius.

Bei der Aufstellung des folgenden Verzeichnisses habe ich eine von Herrn Dr. Pulfrich in Bonn mit grosser Sorgfalt ausgearbeitete Liste benützt; ihm ebenso wie Herrn Referendar Julius Clausius sage ich für die gütige Unterstützung, welche sie mir zu Theil werden liessen, meinen wärmsten Dank.

I. In Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie.

- Bd. 72. Ueber die Lichtzerstreuung in der Atmosphäre und die Intensität des durch die Atmosphäre reflectirten Sonnenlichtes. (1847.) 21 p.
- Bd. 76. Ueber die Veränderungen, welche in den bisherigen gebräuchlichen Formeln für das Gleichgewicht und die Bewegung elastischer fester Körper durch neuere Beobachtungen nothwendig geworden sind. (1849.) 21 p.
Ueber die Natur derjenigen Bestandtheile der Erdatmosphäre, durch welche die Lichtreflexion in derselben bewirkt wird. (1849.) 27 p.
Ueber die blaue Farbe des Himmels und die Morgen- und Abendröthe. (1849.) 7 p.
- Bd. 79. Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. (1850.) 55 p.
- Bd. 81. Notiz über den Einfluss des Druckes auf das Gefrieren der Flüssigkeiten. (1850.) 5 p.
- Bd. 82. Ueber das Verhalten des Dampfes bei der Ausdehnung unter verschiedenen Umständen. (1851.) 11 p.
Ueber den theoretischen Zusammenhang zweier empirisch aufgestellter Gesetze über die Spannung und die latente Wärme verschiedener Dämpfe. (1851.) 6 p.
- Bd. 83. Erwiderung auf die im Märzheft der Annalen enthaltenen Bemerkungen des Hrn. Holtzmann (über die bewegende Kraft der Wärme). (1851.) 9 p.
- Bd. 84. Bemerkungen über die Erklärung der Morgen- und Abendröthe. (1851.) 4 p.
- Bd. 86. Ueber die Anordnung der Electricität auf einer einzelnen sehr dünnen Platte und auf den beiden Belegen einer Franklin'schen Tafel. (1852.) 44 p.
Ueber das mechanische Aequivalent einer electricischen Entladung und die dabei stattfindende Erwärmung des Leitungsdrahtes. (1852.) 39 p.
- Bd. 87. Ueber die bei einem stationären electricischen Strome in dem Leiter gethane Arbeit und erzeugte Wärme. (1852.) 11 p.
Ueber die von Grove beobachtete Abhängigkeit des galvanischen Glühens von der Natur des umgebenden Gases. (1852.) 12 p.
- Bd. 88. Ueber das Vorhandensein von Dampfbläschen in der Atmosphäre und deren Einfluss auf die Lichtreflexion und die Farben derselben. (1853.) 14 p.
- Bd. 89. Ueber einige Stellen der Schrift von Helmholtz über die Erhaltung der Kraft. (1853.) 16 p.

- Bd. 90. Ueber die Anwendung der mechanischen Wärmetheorie auf die thermo-electrischen Erscheinungen. (1853.) 32 p.
- Bd. 91. Ueber einige Stellen der Schrift von Helmholtz über die Erhaltung der Kraft, zweite Notiz. (1854.) 3 p.
- Bd. 93. Ueber eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie. (1854.) 26 p.
- Bd. 97. Ueber die Anwendung der mechanischen Wärmetheorie auf die Dampfmaschine. (1856.) 83 p.
- Bd. 98. Notiz über den Zusammenhang zwischen dem Satz von der Aequivalenz der Wärme und Arbeit und dem Verhalten der permanenten Gase. (1856.) 7 p.
- Bd. 100. Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen. (1857.) 28 p.
- Bd. 101. Ueber die Electricitätsleitung in Electrolyten. (1857.) 23 p.
- Bd. 103. Erwiderung auf einige Bemerkungen des Hrn. Hittorf; (über die Wanderungen der Jonen.) (1858.) 4 p.
Ueber die Natur des Ozons. (1858.) 9 p.
- Bd. 104. Ueber die Zunahme des electricen Leitungswiderstandes der einfachen Metalle mit der Temperatur. (1858.) 2 p.
- Bd. 105. Ueber die mittlere Länge der Wege, welche bei der Molecularbewegung gasförmiger Körper von den einzelnen Moleculen zurückgelegt werden, nebst einigen anderen Bemerkungen über die mechanische Wärmetheorie. (1858.) 16 p.
- Bd. 115. Ueber die Wärmeleitung gasförmiger Körper. (1862.) 57 p.
- Bd. 116. Ueber die Anwendung des Satzes von der Aequivalenz der Verwandlungen auf die innere Arbeit. (1862.) 40 p.
- Bd. 120. Ueber einen Grundsatz der mechanischen Wärmetheorie. (1863.) 27 p.
- Bd. 121. Ueber die Concentration von Wärme- und Lichtstrahlen und die Grenzen ihrer Wirkung. (1864.) 44 p.
Ueber den Unterschied zwischen activem und gewöhnlichem Sauerstoff. (1864.) 19 p.
- Bd. 124. Ueber die Berechnung der Dichtigkeit des gesättigten Wasserdampfes. (1865.) 3 p.
- Bd. 125. Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie. (1865.) 49 p.
- Bd. 127. Ueber die Bestimmung der Disgregation eines Körpers und die wahre Wärmecapacität. (1866.) 8 p.
- Bd. 129. Ueber die relativen Intensitäten des directen und zerstreuten Sonnenlichtes. (1866.) 7 p.
- Bd. 135. Ueber die von Gauss angeregte neue Auffassung der electricen Erscheinungen. (1868.) 16 p.
- Bd. 136. Zur Geschichte des Ozons. (1869.) 4 p.
- Bd. 139. Bemerkungen zu zwei Aufsätzen von W. v. Bezold und E. Edlund über electriche Erscheinungen. (1870.) 6 p.
- Bd. 141. Ueber einen auf die Wärme anwendbaren mechanischen Satz. (1870.) 8 p.
- Bd. 142. Ueber die Zurückführung des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie auf allgemeine mechanische Principien. (1870.) 29 p.
- Bd. 144. Bemerkungen zu den Prioritätsreklamationen des Herrn Boltzmann. (1871.) 9 p.
- Bd. 145. Zur Geschichte der mechanischen Wärmetheorie. (1872.) 16 p.
- Bd. 146. Ueber die von Tait erhobenen Einwände gegen meine Behandlung der mechanischen Wärmetheorie. (1872.) 6 p.
Ueber den Zusammenhang des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie mit dem Hamilton'schen Princip. (1872.) 12 p.
- Bd. 150. Ueber einen neuen mechanischen Satz in Bezug auf stationäre Bewegungen. (1873.) 25 p.

- Bd. 150. Bemerkungen zu einer Aeußerung des Herrn Avenarius in Bezug auf thermoëlectrische Ströme. (1873.) 2 p.
- Jubelband. Ueber verschiedene Formen des Virials. (1874.) 13 p.
- Ergänzungsband VII. Ueber den Satz vom mittleren Ergal und seine Anwendung auf die Molecularbewegungen der Gase. (1874.) 65 p.
- Bd. 152. Bemerkung zu den meteorologischen Notizen des Herrn Budde. (1875.) 2 p.
- Bd. 156. Ueber ein neues Grundgesetz der Electrodyamik. (1875.) 3 p.
- Bd. 157. Ueber das Verhalten des electrodynamischen Grundgesetzes zum Princip von der Erhaltung der Energie und über eine noch weitere Vereinfachung des ersteren. (1876.) 5 p.
- Bd. 159. Bemerkungen zu dem Aufsatz des Hrn. von Oettingen über Temperatur und Adiabate. (1876.) 2 p.
- Bd. 160. Bemerkungen zu einem Aufsatz von F. Kohlrausch über Thermoëlectricität. (1877.) 5 p.

II. In Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie.

- Bd. 1. Ueber die Behandlung der zwischen linearen Strömen und Leitern stattfindenden ponderomotorischen und electromotorischen Kräfte nach dem electrodynamischen Grundgesetz. (1877.) p. 26.
Nachträgliche Bemerkung. (1877.) 1 p.
Ueber einen allgemeinen Satz in Bezug auf electriche Influenz. (1877.) 6 p.
- Bd. 2. Erwiderung auf die von Zöllner gegen meine electrodynamischen Betrachtungen erhobenen Einwände. (1877.) 13 p.
Ueber eine von Hrn. Tait in der mechanischen Wärmetheorie angewandte Schlussweise. (1877.) 3 p.
- Bd. 4. Ueber einige neue von Hrn. Zöllner gegen meine electrodynamischen Betrachtungen erhobenen Einwände. (1878.) 9 p.
Ueber die Beziehung der durch Diffusion geleisteten Arbeit zum zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. (1878.) 2 p.
- Bd. 8. Ueber das Bekanntwerden der Schriften Robert Mayers. (1879.) p. I—XII.
- Bd. 9. Ueber das Verhalten der Kohlensäure in Bezug auf Druck, Volumen und Temperatur. (1880.) 21 p.
- Bd. 10. Ueber einige neue Untersuchungen über die mittlere Weglänge der Gasmolecüle. (1880.) 11 p.
Ueber die Vergleichung der electrodynamischen Grundgesetze mit der Erfahrung. (1880.) 11 p.
- Bd. 11. Ueber die Anwendung des electrodynamischen Potentials zur Bestimmung der ponderomotorischen und electromotorischen Kräfte. (1880.) 30 p.
- Bd. 12. Ueber einige Bemerkungen des Hrn. Carl Neumann in Bezug auf Elektrodyamik. (1881.) 5 p.
- Bd. 14. Ueber die theoretische Bestimmung des Dampfdruckes und der Volumina des Dampfes und der Flüssigkeit. (1881.) 26 p.
- Bd. 16. Ueber die verschiedenen Maassysteme zur Messung electricheer und magnetischer Grössen. (1882.) 23 p.
- Bd. 17. Ueber den Zusammenhang zwischen den Einheiten des Magnetismus und der Electricität. (1882.) 7 p.
- Bd. 20. Zur Theorie der dynamoelectricheer Maschine. (1883.) 38 p.
- Bd. 21. Zur Theorie der Kraftübertragung durch dynamoelectricheer Maschinen. (1882.) 13 p.
- Bd. 31. Erwiderung auf eine Bemerkung des Hrn. Lorberg in Bezug auf dynamoelectricheer Maschinen. (1887.) 4 p.

III. Zeitschrift für Mathematik und Physik.

- Bd. 9. Ueber den Einfluss der Schwere auf die Bewegungen der Gasmolecüle. (1864.) 1 p.
Bd. 11. Ueber die Bestimmung der Energie und Entropie eines Körpers. (1866.) 15 p.
Bd. 11. Ueber umkehrbare und nicht umkehrbare Vorgänge in ihrer Beziehung auf die Wärmetheorie. (1866.) 7 p.
Bd. 12. Erklärung in Betreff einer Bemerkung des Hrn. Bauschinger. (1867.) 1 p.
Bd. 15. Bemerkungen zu zwei Aufsätzen des Hrn. Mohr. (1870.) 1 p.

IV. Journal für die reine und angewandte Mathematik.

- Bd. 34. Ueber die Lichtzerstreuung in der Atmosphäre. (1847.) 26 p.
Bd. 36. Ueber die Intensität des durch die Atmosphäre reflectirten Sonnenlichtes. (1848.) 31 p.
Bd. 82. Ueber die Ableitung eines neuen electrodynamischen Grundgesetzes. (1876.) 50 p.
Bd. 83. Ueber das Grassmann'sche Gesetz der ponderomotorischen Kraft. (1877.) 1 p.

V. Mathematische Annalen.

- Bd. 4. Ueber die Anwendung einer von mir aufgestellten mechanischen Gleichung auf die Bewegung eines materiellen Punktes um ein festes Anziehungscentrum und zweier materieller Punkte um einander. (1871.) 11 p.
Bd. 6. Ueber die Beziehungen zwischen den bei Centralbewegungen vorkommenden charakteristischen Grössen. (1873.) 25 p.

VI. Annalen der Chemie und Pharmacie.

- Bd. 118. Ueber die specifische Wärme der Gase. (1861.) 14 p.

VII. Electrotechnische Zeitschrift.

- Bd. 6. Ueber die von Hrn. Fröhlich aufgestellte Theorie der dynamoelectrischen Maschine. (1885.) 3 p.

VIII. Polytechnisches Journal.

- Bd. 150. Ueber die mechanische Wärmetheorie. (1859.) 20 p.

IX. Monatsberichte der Berliner Akademie.

1847. Lichtmenge, welche die Erde durch Reflexion des Sonnenlichtes in der Atmosphäre erhält. 2 p.
1850. Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärme selbst ableiten lassen. 12 p.
1852. Ueber die Anordnung der Electricität auf einer einzelnen sehr dünnen Platte und auf den beiden Belegen einer Franklin'schen Tafel. 7 p.
Ueber das mechanische Aequivalent einer electricischen Entladung und die dabei stattfindende Erwärmung des Leitungsdrahtes. 7 p.
1853. Ueber die Anwendung der mechanischen Wärmetheorie auf die thermoelectrischen Erscheinungen. 13 p.
1884. Ueber die zur Erklärung des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie dienenden mechanischen Gleichungen. 7 p.

X. Nachrichten der Kgl. Ges. d. Wiss. zu Göttingen.

1871. Ueber die Anwendung einer von mir aufgestellten mechanischen Gleichung auf die Bewegung eines materiellen Punctes um ein festes Anziehungscentrum und zweier materieller Puncte um einander. 22 p.
1872. Ueber die Beziehungen zwischen den bei Centralbewegungen vorkommenden charakteristischen Grössen. 47 p.

XI. Mittheilungen der niederrheinischen Gesellschaft.

1870. Ueber einen auf die Wärme anwendbaren mechanischen Satz. 5 p.
1871. Ueber die Zurückführung des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie auf allgemeine mechanische Principien. 22 p.
1873. Ueber einen neuen mechanischen Satz in Bezug auf stationäre Bewegungen. 18 p.
1874. Ueber den Satz vom mittleren Ergal und seine Anwendung auf die Molecularbewegungen der Gase. 49 p.
1875. Ueber ein neues Grundgesetz der Electrodynamik. 3 p.
Ueber die Theorie der Lichtmühle. 7 p.
1876. Ueber das Verhältniss des electrodynamischen Grundgesetzes zum Princip von der Erhaltung der Energie und über eine noch weitere Vereinfachung des ersteren. 4 p.
Ueber die Behandlung der zwischen linearen Strömen und Leitern stattfindenden ponderomotorischen und electromotorischen Kräfte nach dem electrodynamischen Grundgesetz. 24 p.
1880. Ueber die Anwendung des electrodynamischen Potentials zur Bestimmung der ponderomotorischen und electromotorischen Kräfte. 31 p.
1882. Ueber die verschiedenen Masssysteme zur Messung electricischer und magnetischer Grössen. 23 p.

XII. Sitzungsberichte der math. naturwiss. Classe der Wiener Akademie.

1863. Ueber die Molecularbewegungen in gasförmigen Körpern. 2 p.

XIII. Vierteljahrsschrift der naturforschenden Gesellschaft in Zürich.

- Bd. 2. Ueber die Entfernung in welcher die von einem Eisenbahnzuge bewirkte Erschütterung noch spürbar ist. (1857.) 1 p.
- Bd. 7. Ueber die Anwendung des Satzes von der Aequivalenz der Verwandlungen auf die innere Arbeit. (1862.) 47 p.
- Bd. 8. Ueber den Unterschied zwischen activem und gewöhnlichem Sauerstoff. (1863.) 22 p.
- Bd. 10. Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie. (1865.) 59 p.

XIV. Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft.

- Bd. 4. Bemerkungen zu einem Aufsätze des Hrn. Mohr über die ungleiche Leitungsfähigkeit der Gase für Wärme. (1871.) 1 p.

XV. Philosophical Magazine.

- Bd. 2. Reply to a note from Mr. W. Thomson on the effects of fluid Friction etc. (1851.) 3 p.
- Bd. 4. On the colours of a jet of steam and of the atmosphere. (1853.) 1 p.
- Bd. 11. On the discovery of the true form of Carnots function. (1856.) 2 p.
- Bd. 19. On the dynamical theory of gases. (1860.) 2 p.
- Bd. 44. A necessary correction of one of Mr. Taits remarks. (1872.) 1 p.

XVI. Archives des sciences physiques.

- Bd. 36. Remarques sur la relation entre l'action chimique qui a lieu dans une pile voltaïque et les effets produits par le courant. (1857.) 3 p.
Bd. 43. Nouveaux mémoires sur la théorie mécanique de la chaleur. (1872.) 6 p.

XVII. Comptes rendus de l'Académie des sciences.

- Bd. 52. Sur la densité de la vapeur saturée. (1861.) 3 p.
Bd. 55. Sur la formule pour la vitesse de propagation du son dans l'air donnée par M. Duhamel. (1862.) 5 p.
Sur la pression dans l'air pendant la propagation du son. (1862.) 3 p.
Bd. 56. Sur la condensation des vapeurs pendant la détente ou la compression. (1863.) 2 p.
Bd. 58. Sur quelques équations, qui dérivent de la théorie mécanique de la chaleur. (1863.) 3 p.
Bd. 60. Sur le second théorème principal de la théorie mécanique de la chaleur. (1865.) 2 p.
Bd. 61. Remarques sur une loi générale relative à la force agissante de la chaleur. (1865.) 6 p.
Bd. 70. Sur une quantité analogue au potentiel et sur un théorème y relatif. (1870.) 5 p.
Bd. 75. Sur l'équation mécanique dont découle le théorème du viriel. (1872.) 4 p.
Bd. 78. Sur une équation mécanique, qui correspond à l'équation $\int \frac{dQ}{T} = 0$. (1874.) 4 p.
Bd. 87. Sur l'énergie d'un corps et sa chaleur spécifique. (1878.) 1 p.

XVIII. Liouville Journal de mathématiques.

- Bd. 3. Sur la démonstration de l'équation
$$\frac{dX}{dx} + \frac{dY}{dy} + \frac{dZ}{dz} = -4\pi\epsilon.$$
(1858.) 5 p.

XIX. Les Mondes.

- Bd. 6. Sur les équations fondamentales de la théorie mécanique de la chaleur. (1864.) 8 p.
Bd. 39. Sur la nouvelle manière de considérer les phénomènes électrodynamiques. (1875.) 1 p.

XX. La Lumière électrique.

- Bd. 17. Sur les dimensions des molécules et leur distances relatives. (1885.) 3 p.

XXI. Annales du Génie civil.

- Bd. 6. Introduction à la théorie mathématique de l'électricité. (1867.) 28 p.

XXII. Bulletin de l'Académie de Belgique.

- Bd. 11. Examen des objections faites par M. Hirn à la théorie cinétique des gaz. (1886.) 20 p.

XXIII. Selbständige Veröffentlichungen.

1. Die Potentialfunction und das Potential. Leipzig 1859. (III. Auflage. 1877.)
2. Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie. I. und II. Abtheilung. Braunschweig 1864 und 1867.

3. Die mechanische Wärmetheorie. Zweite umgearbeitete und vervollständigte Auflage des unter dem Titel „Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie“ erschienenen Buches. I. und II. Band. Braunschweig 1876 und 1879.
(Dritte Auflage. I. Bd. 1888.)
4. Ueber das Wesen der Wärme verglichen mit Licht und Schall. Zürich 1857.
5. Ueber den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. Braunschweig 1867.
6. Ueber den Zusammenhang zwischen den grossen Agentien der Natur. Bonn 1885.
7. Ueber die Energievorräthe in der Natur und ihre Verwerthung zum Nutzen der Menschheit. Bonn 1885.

Uebersichtliche Darstellung der in das Gebiet der Optik gehörenden Erscheinungen. Grunerts Meteorologische Optik. Bd. I. 1850.

Recension der Mayer'schen Schriften im Litterarischen Centralblatt 1868.



ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Abhandlungen der königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen](#)

Jahr/Year: 1889

Band/Volume: [35](#)

Autor(en)/Author(s): Riecke Eduard

Artikel/Article: [Rudolf Clausius \(geb. 2. Januar 1822, gest. 24. August 1888\) 1-39](#)