

Diese Gleichung, welche von van der Waals¹⁾ abgeleitet wurde, ist eine Zustandsgleichung der Gase, welche an Stelle der nur angenäherten $p v = R T$ zu setzen ist. Sie gibt in der That nahezu richtig das Verhalten der Gase bei Kompression und Erwärmung, gestattet die kritische Temperatur zu berechnen u. s. w. Sie ist also viel vollkommener als die alte Gleichung.

E. Leitung und Strahlung der Wärme.

§ 165. Wir haben bisher das Wesen und die Wirkung der Wärme untersucht, nicht aber die Art, wie wir einem Körper Wärme zuführen oder entziehen.

Wenn zwei verschieden warme Körper in Berührung sind, oder verschiedene Stellen desselben Körpers verschieden warm sind, so findet ein Ausgleich statt, welcher mit gleicher Temperatur endet. Wir nennen dies Wärmeleitung. Hier ist der Wärmeübergang sozusagen ein kontinuierlicher, die Wärme fließt von Teilchen zu Teilchen der ponderablen Materie.

Wir kennen aber noch eine andere Art der Uebertragung von einem Körper auf einen beliebig entfernten zweiten, wobei im Zwischenraum die Wärme nicht bemerkbar zu sein braucht, weil keine ponderable Substanz vorhanden ist. Derart ist die Wärmezufuhr von der Sonne, welche durch das Vakuum des Weltraumes stattfindet, derart ist auch die Hitze, die man in der Nähe eines Ofens empfindet, wobei die Luft ganz kühl sein kann. Man spricht hierbei von Wärmestrahlung. Da die Wärme Energie der Molekularbewegung ist, ist es klar, dass sie im Vakuum als solche gar nicht existieren kann, dass die strahlende Wärme also etwas prinzipiell anderes ist, als die gewöhnliche Wärme.

Wir beschäftigen uns zunächst mit der Wärmeleitung.

§ 166. Die tägliche Erfahrung lehrt schon, dass die Körper die Wärme sehr verschieden gut leiten: ein glühender Holzstab ist dicht neben der brennenden Stelle kalt, ein glühender Eisenstab leitet die Hitze viel weiter fort. Man unterscheidet danach gute und schlechte Wärmeleiter. Eine alte Methode von Ingenhouss lässt ungefähr die Leitungsfähigkeit vergleichen. Stäbchen von

¹⁾ Van der Waals, Ueber die Continuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes. Deutsch von Roth, Leipzig 1881.

gleicher Form aus den verschiedenen Substanzen ragen mit einem Ende durch die Wand eines Kastens; sie werden mit einer dünnen Wachsschicht überzogen. Füllt man den Kasten mit heissem Wasser, so schmilzt das Wachs je nach der Leitungsfähigkeit verschieden weit ab. So findet man, dass Metalle, voran Silber, die besten Wärmeleiter sind, organische Substanzen die schlechtesten.

Die Benutzung der Kleidungsstücke beruht darauf; die gewöhnliche Bezeichnung, dass dieselben erwärmen, ist falsch, sie halten nur die vom Körper entwickelte Wärme zurück, verhindern durch ihre schlechte Leitung deren Abgabe an die umgebende Luft. Andererseits wird die gute Leitung der Metalle benutzt, um die starke Erhitzung einer Stelle, der die Wärme z. B. durch eine Flamme zugeführt wird, zu vermeiden. So legt der Chemiker und Physiker beim Kochen in Glas- und Porzellengefäßen zwischen Flamme und Gefäß ein Drahtnetz, damit nicht eine Stelle des Glases viel stärker erhitzt wird, wodurch das Gefäß springen würde. Sehr wichtig ist diese Benutzung bei der Davyschen Sicherheitslampe, die zur Vermeidung von Explosionen in Kohlenbergwerken verwandt wird. Es strömt bekanntlich aus den Spalten der Kohlenflöze Grubengas aus; ist dasselbe in einem bestimmten Prozentsatz mit Luft gemischt, so ist die Mischung explosibel, d. h. bei Erhitzung auf 1200—1500° verbrennt die ganze Masse, es ist ein schlagendes Wetter vorhanden, dem schon unzählige Menschenleben zum Opfer gefallen sind. Mit offenen Lampen darf man daher in ein solches Bergwerk nicht eintreten. Davy hat daher die Lampen mit einem dichten Drahtnetz umgeben, welches das Licht durchlässt, aber die durch die Flamme erzeugte Wärme der Verbrennungsgase durch Leitung schnell über die ganze Lampe verteilt, so dass keine Stelle heiss genug wird, um die Explosion hervorzurufen.

Die verschiedene Leitungsfähigkeit ist sehr maßgebend für das Wärme- oder Kältegefühl beim Anfassen eines Körpers. Berühren wir einen guten Wärmeleiter, der heisser ist als die Hand, so wird der berührten Stelle Wärme entzogen, es fließt neue nach, die wieder abgegeben wird u. s. w.; die Hand wird dabei stark erhitzt, der berührte Körper scheint sehr warm. Einem Holzstück dagegen, welches ebenso heiss sein kann, entzieht die Hand nur die wenige Wärme der berührten Stelle, das Holz erscheint daher lange nicht so heiss. Sind umgekehrt die Körper kälter als die Hand, so ent-

zieht der gute Wärmeleiter der Hand viel mehr Wärme als der schlechte, er erscheint viel kälter.

§ 167. Die Wärmeleitung kann in demselben Körper von einer Stelle zur anderen stattfinden, oder von einem Körper durch die Oberfläche zu einem anderen. Man unterscheidet danach innere und äussere Wärmeleitungsfähigkeit. Erstere lässt sich so definieren: wir denken uns eine Masse an zwei gegenüberliegenden Seiten auf konstanter Temperatur erhalten, z. B. indem die eine Seite von Dampf aus siedendem Wasser getroffen wird, die andere mit Eis in Berührung ist. Dann stellt sich im Inneren ein stationärer Zustand her, d. h. wenn wir uns dort eine Schicht von der Einheit der Dicke denken, empfängt dieselbe von der einen Seite ebensoviel Wärme, wie sie nach der anderen Seite abgibt. Man nimmt nun an — und die Versuche bestätigen die Annahme —, dass der Wärmestrom proportional der Temperaturdifferenz zweier Flächen ist, die um die Einheit der Länge von einander abstehen. Die ganze in der Zeiteinheit durchströmende Wärmemenge Q ist daher proportional 1. dem Querschnitt q , 2. der Temperaturdifferenz $t - t'$ der äussersten Grenzflächen, 3. umgekehrt proportional der Zahl der Schichten von der Einheit der Dicke, auf welche diese Temperaturdifferenz sich verteilt, d. h. der Dicke d des Körpers.

So ist $Q = lq \frac{t - t'}{d}$, der Proportionalitätsfaktor l ist abhängig von der Substanz; er heisst der Koeffizient der inneren Leitungsfähigkeit; er ist, indem wir $q = d = t - t' = 1$ setzen, gleich der Wärmemenge, die in einer Sekunde durch einen Würfel von 1 cm Seitenlänge fliesst, bei dem zwei gegenüberliegende Seiten um 1° verschieden warm sind.

Die ersten genauen vergleichenden Bestimmungen sind von Wiedemann und Franz gemacht. Sie fanden, indem sie die Leitungsfähigkeit des Silbers = 100 setzten:

Ag	100,0	83	Fe	12,0	10
Cu	73,6	61	Pb	8,5	7
Au	53,2	44	Pt	8,5	7
Zn	19,0	16	Bi	1,8	1,5
Sn	14,5	12			

Die zweite Zahlenreihe gibt die Wärmeleitungsfähigkeit in kalorimetrischem Maß, d. h. sie gibt an, wieviel Kalorien per Minute durch die Würfel hindurchgehen. Es sei hier gleich darauf aufmerksam gemacht, dass die Wärmeleitungsfähigkeit proportional der elektrischen Leitungsfähigkeit ist (§ 280).

Die äussere Wärmeleitungsfähigkeit wird ganz analog definiert: der Wärmestrom, d. h. die in der Zeiteinheit durchgehende Wärmemenge Q ist proportional der Oberfläche O und der Temperaturdifferenz zu beiden Seiten, also $Q = kO(t-t')$.

k wird bestimmt, indem man das eine Ende eines Stabes dauernd erhitzt und die Temperaturen des Stabes in gleichen Abständen misst. Die Theorie zeigt, dass die Temperaturen in geometrischer Reihe sinken, wenn der Abstand in arithmetischer Reihe wächst; aus den Zahlenwerten lässt sich k berechnen.

§ 168. Die Erscheinungen der Wärmeleitung in festen Körpern sind nur an der Hand der sehr schwierigen Theorie genauer zu verfolgen, welche namentlich von Biot, Poisson, Fourier, Neumann entwickelt worden ist. Hier seien nur noch einige interessante Resultate in Bezug auf die Erde erwähnt.

An der Erdoberfläche finden tägliche und jährliche periodische Schwankungen statt; dieselben werden nach dem Inneren fortgepflanzt, wobei aber die Temperaturdifferenzen sehr schnell abnehmen.

Die schnell erfolgenden täglichen Schwankungen, welche mit einer Geschwindigkeit von 1 m pro Tag eindringen, verschwinden schon wenige Fuss unter der Oberfläche, die grösseren jährlichen dringen tiefer ein. Nach Versuchen von Quetelet beträgt ihre Geschwindigkeit 0,046 m pro Tag. Die jährliche Temperaturschwankung an der Oberfläche beträgt im mittleren Deutschland 15—20°, dagegen in

0,58 Fuss Tiefe	13,3°
2,31 " "	11,4°
6,00 " "	7,6°
12,00 " "	4,5°
24,00 " "	1,5°

In grösserer Tiefe als 50 Fuss wird die Temperatur konstant. Dringt man weiter in das Erdinnere ein, so findet man, dass für je 25 m Tiefezunahme die Temperatur um 1° C. steigt. Das beweist, dass das Erdinnere sehr heiss sein muss und dauernd Wärme nach aussen abgibt. Die Erde muss also früher sehr viel

heisser, flüssig gewesen sein. Die Theorie gestattet die interessante Rechnung auszuführen, wieviel Zeit seit der Erstarrung der Erdoberfläche bis heute vergangen sein kann. Die flüssige Erdkugel wird durchweg dieselbe Temperatur besessen haben, da die äussersten abgekühlten Teile stets gleichzeitig schwerer wurden und unter-sanken, und die Strömungen die Temperatur ausglich. Schliesslich wurde die Erstarrungstemperatur erreicht, es bildete sich eine feste Kruste, die sich sehr schnell abkühlte; Thomson, der die Rechnung ausgeführt hat, meint, dass sie schon nach einem Jahr bewohnbar gewesen sei. Je nach den Annahmen über die Erstarrungstemperatur, die mittlere spezifische Wärme und die Leitungsfähigkeit der Erdmasse lässt sich berechnen, dass bis zur heutigen Wärme-verteilung mindestens 20, höchstens 40 Millionen Jahre vergangen sein müssen.

§ 169. Bei isotropen, d. h. nach allen Richtungen gleich beschaffenen Körpern ist die Leitungsfähigkeit nach allen Richtungen identisch. Bei den Krystallen dagegen existiert eine Richtung mit geringster, eine mit grösster Leitungsfähigkeit, welche senkrecht auf einander stehen. Sénarmont hat das dadurch sichtbar gemacht, dass er Krystallplatten mit einer dünnen Wachsschicht überzieht; berührt man dann eine Stelle mit einem heissen Draht, so schmilzt das Wachs in Form einer Ellipse, deren Axen jenen Richtungen entsprechen.

§ 170. Viel schwieriger als bei festen Körpern ist die Messung der Wärmeleitungsfähigkeit bei Flüssigkeiten; bei diesen ist mit Aenderung der Temperatur auch Aenderung des spezifischen Gewichts verbunden, es entstehen Strömungen, welche die Temperaturdifferenzen viel schneller ausgleichen, als es durch Leitung geschehen würde. Man nennt diese Fortführung der Wärme durch bewegte Teilchen Konvektion der Wärme. — Die Bestimmungen sind an dünnen Flüssigkeitsschichten durch Erwärmen von oben gemacht worden. Die Leitungsfähigkeit ist sehr gering; setzt man die für Silber = 100, so fand sich: für Wasser 0,093, für Alkohol 0,090, Glycerin 0,045.

Genauer untersucht sind die Gase. Die meist benutzte Methode ist die, dass man ein erhitztes Thermometer sich in einem Gefäss abkühlen lässt, dessen Wände auf konstanter Temperatur gehalten werden, und welches mit den verschiedenen Gasen gefüllt wird;

man beobachtet dann die Zeit, welche zur Abkühlung zwischen zwei bestimmten Temperaturen nötig ist. So fand sich in kalorimetrischem Maß pro Minute bei Luft 0,00335. Wasserstoff leitet 6,33mal, Kohlensäure 0,604mal so gut.

Auf der sehr geringen Leitungsfähigkeit der Gase, sobald Konvektion verhindert wird, beruht die Wirkung der Doppelfenster, mehrfacher Kleidungsstücke, Watte, Federbetten u. s. w.

§ 171. Die zweite Art, wie Wärme von einem Körper zu einem anderen übergehen kann, ist die Wärmestrahlung. Da dieselbe durch das Vakuum hindurch stattfindet, kann dabei die Wärme nicht als solche existieren, denn sie besteht in Molekularbewegung. — Die Erscheinungen der Optik zwingen uns, im Vakuum und überall, wo nicht gerade ein ponderables Molekel sich befindet, die Existenz eines Stoffes anzunehmen, welchen man Lichtäther genannt hat. Derselbe ist im stande, Schwingungen auszuführen, welche sich mit der Geschwindigkeit von 300 000 *km* pro Sekunde fortpflanzen; je nach ihrer Beschaffenheit nehmen wir sie als Licht oder als strahlende Wärme wahr. Ein volles Verständnis der Erscheinungen kann erst bei der Optik erreicht werden, hier müssen wir uns mit wenigem begnügen. Wir können uns den Vorgang folgendermaßen denken: Bei einem heißen Körper befinden sich die Molekeln in lebhafter Bewegung, der dazwischenliegende Aether wird dadurch in Schwingungen versetzt, die sich durch den Aether nach allen Seiten fortpflanzen. Gelangen die Schwingungen in Aether, der sich wieder zwischen ponderablen Teilchen befindet, so werden diese mit in Bewegung versetzt, es entsteht Wärme. So haben wir am Anfang und Ende Bewegung von Molekeln, Wärme, dazwischen aber Aetherschwingungen.

Strahlende Wärme und Licht unterscheiden sich nicht anders von einander, als etwa rotes und blaues Licht; es hängt nur von der Zahl der Schwingungen pro Sekunde ab, ob wir sie als Wärmestrahlung, als rotes oder blaues Licht auffassen.

§ 172. Die Wärmestrahlung der Körper, die Emission der Wärme, hängt von der Temperatur des Körpers, von seiner chemischen Natur und von der Beschaffenheit seiner Oberfläche ab. Wir betrachten zuerst die Quantität der ausgestrahlten Wärme. Melloni, dem wir die ersten genaueren Messungen mit Hülfe der Thermosäule (§ 304) verdanken, benutzte einen hohlen Metallwürfel, dessen

Seitenflächen mit verschiedenen Stoffen überzogen waren; in ihm wurde z. B. Wasser im Kochen erhalten, und die von den Seiten bei der gleichen Temperatur von 100° ausgestrahlte Wärmemenge gemessen. Nennt man die Wärmemenge für Russoberfläche 100, so fand er z. B. Russ 100, Bleiweiss 100, Tusche 85, polierte Metallfläche 12. Wenn im letzten Fall die Politur beseitigt wird, z. B. durch Smirgelpapier, so wächst die Emission bedeutend. Verschiedene Metalle emittieren verschiedene Mengen.

Newton versuchte zuerst ein Gesetz aufzustellen, welches angibt, wie die Wärmeemission mit der Temperatur des strahlenden Körpers wächst, und meinte, die Emission sei proportional der Temperaturdifferenz des strahlenden und des bestrahlten Körpers. Dulong und Petit stellten ein anderes Gesetz auf, welches aber ebenfalls als falsch erwiesen wurde. Nicht besser gelang es Rossetti. Stefan fand, die Gleichung $W = A(T^4 - T_1^4)$ (wo W die ausgestrahlte Wärmemenge bedeutet, T die absolute Temperatur des strahlenden Körpers, T_1 die des bestrahlten, A endlich eine Konstante, welche von der Natur des Körpers und seiner Oberfläche abhängt) stelle die Beobachtungen gut dar. Die Gleichung ist in neuester Zeit theoretisch und experimentell vollkommen bestätigt.

Auch die Qualität der Strahlung ist veränderlich, indem je nach der Natur des Körpers und nach seiner Temperatur Strahlen von verschiedener Schwingungszahl ausgesandt werden. Wir kommen darauf in der Optik bei der Spektralanalyse zurück.

§ 173. Die verschiedenen Körper verhalten sich sehr verschieden gegen auffallende Wärmestrahlen; einige lassen die Strahlen fast vollständig hindurch — solche nennt man diatherman, andere absorbieren die Strahlen fast vollständig, d. h. verwandeln sie in Wärme — sie heissen atherman. So fand Melloni, dass von den auffallenden Strahlen folgende Mengen in Prozenten hindurchgelassen werden durch Platten von der Dickeneinheit:

Steinsalz	92	Schwefelkohlenstoff	63
Glas	62	Aether	21
Schwerspat	33	Alkohol	15
Gips	20	Wasser	11
Alaun	12		

Atherman sind die Metalle, Kohle, feste organische Substanzen. Im allgemeinen sind die durchsichtigen Körper auch diatherman,

die undurchsichtigen atherman, doch in sehr verschiedenem Maße, wie obige Tabelle zeigt, und mit Ausnahmen: so ist eine Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff sehr undurchsichtig, ebenso Ebonit, beide sind aber diatherman.

Wie feste und flüssige Körper, so sind auch Gase in Bezug auf die Absorption sehr verschieden. So gibt Tyndall folgende Zahlen; nennen wir die bei gegebenen Verhältnissen von Luft absorbierte Menge 1, so absorbieren unter denselben Bedingungen:

Luft	1	H ₂ S	390
Cl	39	SO ₂	970
CO	90	NH ₃	1195

Unter den Dämpfen absorbieren einzelne noch viel stärker.

Uebrigens ist die Absorption der Körper noch abhängig von der Beschaffenheit der Wärmestrahlen, also von der Natur und Temperatur der Wärmequelle. Von Kirchhoff ist ein ungemein wichtiges Gesetz bewiesen worden, welches wir in der Optik näher besprechen werden (§ 386). Dasselbe sagt aus, dass ein Körper die Strahlen stark absorbiert, welche er selbst stark aussendet. Danach müssen die schwarzen Körper, z. B. Russ, welche auffallende Strahlen am vollständigsten absorbieren, dieselben auch am stärksten emittieren. Ebenso erklärt sich daraus, dass matte Metallflächen, welche von auffallendem Licht weniger reflektieren als polierte, also mehr absorbieren, auch stärker emittieren müssen.

§ 174. Von den Strahlen, welche auf einen Körper auffallen, geht ein Teil hindurch, ein anderer Teil wird absorbiert, in Molekularbewegung umgesetzt, ein dritter endlich wird an der Oberfläche reflektiert. Es findet sich, genau wie bei der Reflexion des Lichtes, diffuse und regelmässige Reflexion, beide folgen genau den optischen Gesetzen (§ 340 und 344). Die Reflexion ist am stärksten bei polierten Metallen, fast 0 für Russ, hängt übrigens vom Einfallswinkel (§ 344) und der Beschaffenheit der Wärmestrahlen, also von der Wärmequelle ab. Ebenso werden die Wärmestrahlen wie die Lichtstrahlen gebrochen, polarisiert u. s. w.

§ 175. Von besonderer Wichtigkeit ist für uns die Strahlung der Sonne. Die ausgestrahlte Wärmemenge ist zuerst von Pouillet mit Hilfe seines Pyrheliometers gemessen worden. Dasselbe besteht aus einer dünnen Silberkapsel A (Fig. 122), welche mit

Wasser gefüllt ist und als Kalorimeter dient. Sie ist auf der Vorderfläche mit Russ bedeckt, um die auffallenden Wärmestrahlen möglichst vollständig zu absorbieren. Man beobachtet die in bestimmter Zeit eintretende Temperaturerhöhung an dem Thermometer B. — Es gelangt nun nur ein Teil der Wärme zur Erdoberfläche, ein anderer Teil wird von der Atmosphäre absorbiert. Die Erwärmung des Pyrheliometers hängt also von der Stellung der Sonne am Himmel, von der Dicke s der auf normale Dichte reduziert gedachten, durchstrahlten Schicht der Atmosphäre ab. Diesen Einfluss kann man ermitteln durch Beobachtung zu verschiedenen Tageszeiten. Pouillet findet die Erwärmung $t = T b^s$, wo b eine Konstante ist. T nennt er die Solarkonstante; sie ist die Erwärmung für $s = 0$, d. h. wenn keine Atmosphäre vorhanden wäre. Er findet, dass die Atmosphäre $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{4}$ der Sonnenwärme absorbiert, dass bei Abwesenheit der Atmosphäre auf jedes Quadratcentimeter der Erde jährlich 231700 Kalorien gelangen, welche genügen würden, eine Eisschicht von 30 m Dicke zu schmelzen.

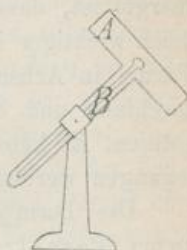


Fig. 122.

In neuerer Zeit nimmt man an, dass die Sonne jedem Quadratcentimeter 3 bis 4 Kalorien in der Minute zustrahlt.

Aus diesen Messungen lässt sich auch leicht berechnen, welche Wärmemenge die Sonne pro Quadratcentimeter und Sekunde ausstrahlt. Nimmt man das Stefansche Gesetz über die Abhängigkeit der ausgestrahlten Wärmemenge von der Temperatur zu Hilfe, so lässt sich daraus die Sonnentemperatur berechnen. Aber diese Rechnung ist sehr zweifelhaft; denn 1. kennen wir für die Sonne nicht die Grösse der Konstante A im Stefanschen Gesetz; 2. ist die Sonne selbst, wie die Spektralanalyse lehrt, von einer dicken absorbierenden Schicht umgeben, deren Absorption wir nicht berechnen können. Je nach den Annahmen, die man gemacht hat, sind denn auch die verschiedensten Zahlen gefunden worden zwischen 1500° C., was sicher viel zu gering ist, bis zu vielen Hunderttausend Grad.

In neuerer Zeit hat man auf anderem Wege mit ziemlicher Sicherheit 7000° bis 8000° gefunden.