

Über die durch Erwärmung bewirkte Ausdehnung der Körper.



Die Wärmelehre ist mit Recht an den Anfang des physikalischen Unterrichts gestellt und nach dem Lehrplan der preussischen Gymnasien nebst den Anfangsgründen der Chemie als Pensum für die Untersekunda bestimmt.

In welcher Beziehung wir auch die Wirkungen der Körper auf einander betrachten, immer kommt es dabei auf den von dem Wesen jedes einzelnen Körpers untrennbaren Wärmezustand an, und es ist daher von Wichtigkeit, ehe man zu anderen Untersuchungen übergeht, vor Allem über den Zusammenhang zwischen dem Wärmezustand und den sonstigen allgemeinen Eigenschaften der Körper eine klare Vorstellung zu haben. Daher gehört die Wärmelehre notwendig zu der allgemeinen Einleitung in die Physik und ist am besten geeignet, in das Kapitel von den allgemeinen Eigenschaften der Körper, in welchem noch vielfach statt mit klaren Begriffen mit leeren Worten gearbeitet wird, einiges Licht hineinzutragen.

Ob aber deswegen der Vortrag der Wärmelehre auch überall leichter sei als der der folgenden Abschnitte der Physik, kann bezweifelt werden. Zumal derjenige Teil, welcher von der durch Erwärmung bewirkten Ausdehnung und von der spezifischen Wärme der Körper handelt, bietet Schwierigkeiten die Fülle. Wenn das Gesetz vorgetragen wird, dass feste und gasförmige Körper durch Erwärmung gleichmässig, flüssige ungleichmässig ausgedehnt werden, so tritt an den Lehrer eine doppelte Forderung heran, einmal den Schülern den Sinn des Gesetzes klar zu machen, dann aber auch ihnen zur einer Anschauung darüber zu verhelfen, durch welche Beobachtungen dasselbe gefunden worden ist; in beiden Beziehungen aber gewähren die gebräuchlichen Lehrbücher wenig oder gar keine Hilfe.

Wer als obersten Grundsatz seiner Methode hinstellt, dass beim Vortrag der Physik überall vom Experiment auszugehen sei, muss dies Gesetz ganz beiseite lassen, denn ich wüsste nicht, durch welche jedesmal innerhalb einer Lehrstunde anzustellenden Versuche sogar im Vortrag der Universität, geschweige des Gymnasiums, dasselbe demonstriert werden könnte, und doch ist es für die wissenschaftliche Würdigung der Thermometerangaben ganz unentbehrlich. Aber auch die blosser Erklärung der Bedeutung des Gesetzes bietet Schwierigkeiten genug. Es ist ja sehr leicht zu sagen, »ein Körper dehnt sich gleichmässig aus, wenn gleichen Zunahmen seiner Wärme auch gleiche Zunahmen seines Volumens entsprechen«, in Wahrheit aber ist damit für die Anschauung nicht das Geringste geleistet. Was soll sich der Schüler unter gleichen Zunahmen der Wärme denken, zumal heute, wo die Auffassung der Wärme als Stoff veraltet und beseitigt ist? Wo in aller Welt hat er ein Mass der Temperaturzunahme, unabhängig von dem ihm zunächst einzig anschaulichen Thermometer? Und wenn man sich, wie ich es wol versuchte, etwa so aus der Verlegenheit helfen wollte, dass man eine als constant anzunehmende Wärmequelle, z. B. eine Gasflamme von gleichmässigem Gasverbrauch für die Vorstellung zuhülfe nähme und spräche: »Denke Dir, mein Lieber, dass alle von der Gasflamme gelieferte Wärme lediglich der Erwärmung des darüber befindlichen Körpers diene und nichts von dieser Wärme anderswohin ginge, so würde, wenn in gleichen Zeiten das Volumen des Körpers um gleich viel wüchse, die Ausdehnung des Körpers als gleichmässig zu bezeichnen sein«, so würde, meine ich, dem Schüler vielleicht eine Ahnung davon aufgehen, was diese Erklärung sagen will, aber

niemals würde er zur Erkenntnis darüber gelangen, wie man in der Praxis, wo doch die eingeführte Beschränkung absolut unerfüllbar ist, jemals feststellen könne, welche Körper sich gleichmässig ausdehnen, und welche nicht. Wie soll er also, wenn er ein denkender Kopf ist, zu den stolzen Namen Wissenschaft sich beilegenden Lehren Vertrauen gewinnen.

Nachdem ich lange wegen einer über diese Verlegenheit hinweg helfenden Methode nachgedacht habe, bin ich zu der Überzeugung gekommen, dass es nur auf dem Wege der modernen Wärmetheorie möglich ist, eine klare und exacte Darstellung des Begriffs der sogenannten Wärmemenge zu liefern. Ich glaube deshalb, dass auch beim ersten Vortrag der Wärmelehre spätestens, sobald das Kapitel über die Ausdehnung an die Reihe kommt, eine Darlegung der heutigen Wärmetheorie den Schülern gegeben werden muss, und versuche mich hier in einer für dieses Auffassungsvermögen berechneten Form des Vortrags. Dass ich dabei etwas ausführlicher geworden bin und gelegentlich sich darbietende Nebenbemerkungen nicht ängstlich vermieden habe, dürfte mir wol nicht als Fehler ausgelegt werden: ich schreibe ja kein Schulbuch, sondern liefere höchstens dazu einig Material. Wer aber daran Anstoss nehmen sollte, dass die vorgetragene Lehre, die Beschreibung weniger ebenfalls nur erdachten Experimente abgerechnet, überall nur Theorie sei, der möge sich doch klar machen, dass im physikalischen Unterricht die Theorie, d. h. das durch den Geist vermittelte Schauen des innern Zusammenhangs der Erscheinungen, die Hauptsache, das Experiment nur unterstützende Beigabe ist. Allerdings ist beim Aufbau der Theorie stets die Erfahrung und Beobachtung zugrunde zu legen, aber beobachten und experimentieren ist zweierlei. Jedes verständig ausgedachte Experiment ist von einer mehr oder weniger ausgebildeten Theorie eingegeben und soll die Probe dazu liefern, ob die Theorie richtig ist. Wenn bei der Führung zur Erkenntnis Experimente in Fülle sich bieten, warum sollte man sie nicht dem Schüler zur Erleichterung seiner Anschauung vorführen?, wiewol ich meine, dass auch hier leicht des Guten zu viel geschehen kann und ein Fundamentalversuch genügt. Wenn aber die Anstellung von Schulexperimenten entweder an und für sich wegen der Unzugänglichkeit des übermässig Kleinen oder übergewaltig Grossen unmöglich, oder wegen der peinlichen, kostspieligen und Zeit raubenden Ausführung unangebracht ist, so muss die ganze Anstrengung des Lehrers darauf gerichtet sein, die mathematische und mechanische Denkkraft des Schülers anzuspannen, oder durch eine in alle wesentlichen Punkte eingehende Beschreibung des Experiments, wobei das Zeichnen an der Tafel und die Bewegung der Hände sehr viel zur Verständlichung dazuthun kann, das Experiment zu ersetzen.

Als Ursache der Wärme dachte man sich früher einen überall verbreiteten Stoff von so überaus grosser Dünne und Feinheit, dass derselbe auch auf die empfindlichsten Wagen ohne Einwirkung bliebe. Je nachdem dieser ebenfalls Wärme genannte Stoff in den Zwischenräumen zwischen den die Körper zusammensetzenden Molekülen in grösserer oder geringerer Dichtigkeit vorhanden wäre, seien, so meinte man, die Körper mehr oder weniger warm. Verwandte Vorstellungen hatte man über die Lichtmaterie als Ursache der Lichterscheinungen, über die elektrischen und magnetischen Fluida als Träger der Elektrizität und des Magnetismus. Der ganze hierauf bezügliche Abschnitt der Physik hiess die Lehre von den Imponderabilien oder unwägbaren Stoffen. Durch die erwähnte Vorstellung von der Wärme vermochte man aber nur wenige Wärmeerscheinungen, etwa die Wärmeleitung und, im Zusammenhange mit den über das Licht herrschenden Vorstellungen, die Wärmestrahlung zu erklären.

Nachdem aber die Natur des Schalles als eine durch die schwingende Bewegung der Lufttheilchen hervorgebrachte Einwirkung auf unsere Gehörsnerven erkannt worden war, und zwar mit einer so grossen Sicherheit und Handgreiflichkeit, dass jeder Zweifel Verständiger aufhörte, wagten einzelne Physiker demnächst auch über das Licht, das dem Schall wegen seiner Fernwirkung verwandt schien, sich eine entsprechende Vorstellung zu bilden. Freilich

bedurften sie, da eine Wirkung in die Ferne ohne Weiterbeförderung der Stösse durch die Atome eines zwischengelagerten elastischen Stoffs undenkbar ist, die Luft aber dazu nicht geeignet war, weil das Licht auch den luftleeren Raum und die luftdichte Glaswand durchdringt, auch hier wieder einen überaus feinen und deshalb nicht mit den Sinnen wahrnehmbaren Stoff, den Äther; aber die Lichterscheinungen wurden keineswegs, wie früher, durch eine fortschreitende Bewegung des Lichtäthers erklärt (wer vermöchte wol dem Anprall einer Ätherflut, die in acht Minuten den Weg von der Sonne bis zur Erde zurücklegt, zu widerstehen!), sondern sowie die Luftwellen ohne merkliche Verschiebung des Luftganzen sich vom Schallerreger bis zum Ohre fortpflanzen, so, meinten die Begründer der neuen Lehre, pflanzten sich die Schwingungen des Äthers, wenn auch mit unvergleichlich grösserer Geschwindigkeit als der Schall, von der Lichtquelle bis zum Auge fort, und der von den schwingenden Ätheratomen auf unsere Sehnerven ausgeübte Reiz sei die Ursache der Lichtempfindung.

Die Wellentheorie des Lichts wurde allmählich so weit ausgebildet, dass durch sie die Gesetze und der Zusammenhang aller bisher beobachteten, sonst auf keine Weise erklärbaren Lichterscheinungen aufs klarste von selbst sich ergaben, ja noch mehr, die mathematische Spekulation eilte der Erfahrung voraus und erkannte Gesetze und Erscheinungen, die erst nachträglich durch Versuche sich bestätigt fanden. Dadurch hat für den Physiker der Äther aufgehört ein nur vermuteter oder hypothetischer Stoff zu sein, und es ist nicht anzunehmen, dass spätere Forschungen denselben als ein blosses Hirngespinnst der Vorzeit erweisen sollten.

Nachdem aber eine solche Sicherheit der physikalischen Erkenntnis gewonnen war, konnte es nicht ausbleiben, dass auch über die Natur der Wärme eine befriedigendere Theorie aufgestellt wurde. Der innige Zusammenhang zwischen Licht und Wärme, namentlich mit Rücksicht auf die strahlende und mit ungeheurer Schnelligkeit erfolgende Weiterverbreitung, drängt sich ja schon dem rohsten Beobachter auf. Auch für diese Theorie wurde der Äther in Anspruch genommen. Die moderne Wärmelehre ist kurz folgende:

Jeder Körper besteht aus hin- und herschwingenden Molekülen, in deren Zwischenräumen zahlreiche ebenfalls in Schwingungen begriffene Ätheratome sich befinden, aber weniger dicht bei einander als die Atome des umgebenden Äthermeers. Die schwingenden Ätheratome des freien Weltraums stossen auf die Oberflächenmoleküle und die intermolekularen Ätheratome, und durch deren Vermittlung auch auf die inneren Körpermoleküle und umgekehrt, so dass ein Körper, dessen Teilchen schwächer schwingen als der umgebende Äther, zu kräftigeren Schwingungen angeregt wird, während er umgekehrt, wenn er stärkere Schwingungen als jener vollführt, diesen zu kräftigeren Schwingungen anregt und, unter Abgabe eines Teils seiner lebendigen Kraft, allmählich immer schwächere Schwingungen macht.

Die grössere oder geringere Stärke der Schwingungen wird durch deren Dauer und Weite bedingt, kräftigere Schwingungen erfolgen entweder in kürzerer Zeit oder mit grösserer Weite, und umgekehrt. Werden die Schwingungen der Körpermoleküle stärker, so sagen wir, der Körper werde wärmer, im entgegengesetzten Fall erklären wir ihn für kälter als vorher. Die Erhöhung der Wärme eines Körpers hat, wenn wir von den dabei eintretenden Änderungen des Aggregatzustandes und der chemischen Gruppierung der Atome absehen, für unsere Vorstellung keine Grenze: wir können uns vorstellen, dass ein Körper ohne Ende immer wärmer werde. Dagegen tritt bei fortgesetzter Verminderung der Wärme für unsre Vorstellung endlich der Fall ein, dass die molekularen Schwingungen und die Schwingungen des eingelagerten Äthers überhaupt aufhören. Bei diesem Zustande wäre der Körper vollkommen kalt und könnte nicht noch kälter werden. Ob es einen solchen Körper giebt oder jemals geben kann, lässt sich nicht ermitteln, jedenfalls aber kann er gedacht werden.

Die Frage, warum die Wärmeschwingungen des Äthers nicht zugleich immer als Licht empfunden werden, beantwortet sich leicht durch den Hinweis auf das verwandte Verhalten der Luft, deren Erschütterungen ebenfalls nicht immer einen Schall erzeugen.

Der Wärmezustand eines Körpers wird, um das vorher Gesagte nochmals kurz zusammenzufassen, durch die Weite und Dauer der Schwingungen seiner Moleküle bestimmt. Man nennt diesen Zustand die Temperatur des Körpers.

Wenn zwei verschiedene Körper gleiche Temperaturen haben, so können sie, in innige Berührung mit einander gebracht, gegenseitig in ihrem Wärmezustand keine Änderung hervorbringen. In der That ist kein vernünftiger Grund vorhanden, warum, wenn die innerhalb beider Körper befindlichen Ätheratome übereinstimmende Schwingungen vollführen, die Schwingungen der einen Moleküle die der andern verzögern oder beschleunigen sollten. Daraus folgt aber noch keineswegs, dass bei gleichen Temperaturen zweier Körper die Schwingungen der beiderseitigen Moleküle congruent sein müssen. Dagegen darf man wol annehmen, dass, wenn die beiden Körper aus derselben Art Stoff bestehen, auch Congruenz der Molekularschwingungen besteht.

Wenn umgekehrt zwei innig mit einander verbundene Körper in ihrem Wärmezustand gegenseitig keine Änderung hervorbringen, so haben sie gleiche Temperaturen. Wir wollen beiläufig bemerken, dass dieser Satz ein reines Verstandesergebnis und durch kein Experiment zu begründen ist. Wie wollte man wol ein Thermometer*) in eine von einem Ölbad umgebene Bleikugel einsenken?

Arbeit und lebendige Kraft.

Man versteht unter Arbeit in mechanischem Sinne den Kraftaufwand, welcher nötig ist, um einen Körper mit fortwährender Überwindung von Widerständen auf einer gewissen Bahn zu bewegen. Die Grösse der Arbeit richtet sich ausser nach der Grösse der zu bewegendem Masse auch nach der Grösse der Widerstände: einen beladenen Eisenbahnwagen zu bewegen verlangt weniger Arbeit als die Fortbewegung eines leeren Frachtwagens auf gewöhnlicher Strasse. Dabei ist es gleichgültig, wie viel Zeit zu der Arbeit verbraucht wird, und ob die Einwirkung durch einen einmaligen Stoss oder durch einen den bewegten Körper stetig begleitenden Druck erfolgt. Um ein bequemes, sich immer gleich bleibendes Mass der Arbeit zu haben, mit welchem sich alle andern Arbeiten leicht vergleichen lassen, nimmt man denjenigen Kraftaufwand, welcher zur Hebung eines Körpers in der Luft nötig ist, denn eine solche Hebung erfolgt unter dem fortwährend gleichen Widerstande des Gewichts des Körpers. Die Arbeit 1 wird verbraucht durch die Hebung eines Kilogramms um einen Meter.

Wird der Begriff Arbeit in diesem Sinne aufgefasst, so hört durch die aufgewandte Kraft die Bewegung nach Zurücklegung des verlangten Weges von selbst auf. Sehr häufig aber geht die Masse nach beendeter Kraftaufwand noch mit einer gewissen Geschwindigkeit über das Ziel hinaus weiter: in diesem Fall ist die wirklich geleistete Arbeit grösser als erforderlich war, und der Ueberschuss an Kraft ist durch Anwendung der Fallgesetze leicht zu berechnen.

Umgekehrt kann ein in Bewegung begriffener Körper, indem von einem gewissen Zeitpunkt an seiner Bewegung Hindernisse entgegenreten, entweder in kürzester Zeit durch einen Stoss, oder auch durch eine Folge von Hemmungen allmählich zur Ruhe kommen; dabei führt er offenbar in umgekehrter Reihenfolge eine gleiche Arbeit aus, wie nötig wäre, um seine Masse unter Überwindung eben derselben Hindernisse vom Zustande der Ruhe auf diejenige Geschwindigkeit zu bringen, die er in dem vorhin erwähnten Zeitpunkt hatte. Wurde die Bewegung, wie z. B. bei einem bergab rollenden Wagen, neben den Hemmungen auch zugleich noch durch äussere Einwirkungen hefördert, so ist die Summe der Förderungen, da sie nicht aus der eigenen Kraft des Körpers hervorging, von der berechneten Arbeit in Abzug zu bringen. Diese Arbeitskraft des bewegten Körpers hat, weil derselbe gleichsam wie ein lebendiges Wesen wirkt, den bezeichnenden Namen lebendige Kraft.

Es ist aber ein streng beweisbarer Satz der Mechanik, dass, wenn in einem System von Körpern, welche irgendwie bewegend auf einander wirken, etwas von lebendiger Kraft durch geleistete Arbeit verloren geht, an einer anderen Stelle genau das gleiche Mass von lebendiger Kraft durch diese Arbeit erzeugt wird, so dass die Summe der lebendigen Kräfte des ganzen Systems fortwährend unverändert erhalten bleibt. Wird z. B. durch Überwindung der Schwerkraft ein Kilogramm Eisen einen Meter hoch gehoben und dadurch die Arbeit 1 verbraucht,

*) Ich setze eine genaue und sichere Kenntnis aller Regeln, welche bei der Anfertigung eines gleichmässig graduierten Quecksilber- oder Weingeistthermometers zu beobachten sind, voraus; ich meine also ein Thermometer, das lediglich nach der Natur seiner Substanz graduiert und nicht etwa nach einem aus einer anderen Substanz gefertigten Thermometer corrigiert ist.

so kehrt das Eisenstück, sich selbst überlassen, alsbald an seinen früheren Ort zurück und erlangt durch den Fall eine lebendige Kraft, welche imstande wäre, die bei ihm aufgewandte Arbeit von Neuem zu leisten.

Man kann nun freilich einwenden: »Wenn das niederfallende Eisen etwa einen Nagel in ein Brett schlüge, so wäre die Arbeit wohl ersichtlich. Wie denn aber, wenn das Eisen daneben fällt und keine Gelegenheit hat, seine lebendige Kraft zu bethätigen? Dann hört doch seine Geschwindigkeit auf, und die lebendige Kraft ist unwiederbringlich verloren!« Dieser Ansicht muss jedoch widersprochen werden, und die erforderlichen Beweisgründe werden wir aus der Wärmelehre gewinnen.

Wärme durch Arbeit erzeugt. Man kann sich denken, dass eine gewisse mechanische Arbeit darin bestände und lediglich zu dem Zweck verbraucht würde, ein bestimmtes Gewicht eines bestimmten Stoffes, dessen Moleküle sich in absoluter Ruhe befinden, soweit anzuregen, bis sie die für eine bestimmte Temperatur erforderlichen Schwingungen vollführen. Dass eine solche Arbeit in der That geleistet werden kann, zeigt das Beispiel des Schmieds, der durch wiederholte Hammerschläge ein auf dem Ambos liegendes Stück Eisen in so heftige Schwingungen versetzt, dass es mit graurotem Lichte erglüht. Freilich leistet hier der wiederholt auffallende Hammer noch viel mehr Arbeit, als wir von ihm verlangen, er erwärmt z. B. vermutlich auch den Ambos und bis zu einer gewissen Tiefe dessen Unterlage und den Erdboden; andererseits wird durch jeden Aufprall der Hammer zurückgeschleudert und dadurch die für den nächsten Schlag nötige Anstrengung etwas vermindert u. a. m. Endlich hatte auch das Eisenstück, als es auf den Ambos gelegt wurde, schon eine gewisse Wärme und war nicht absolut kalt. Es ist deshalb unmöglich, auf diesem Wege das genaue Mass der für die alleinige Erhitzung des Eisenstücks erforderlichen Arbeit zu gewinnen; aber es ist wichtig und für unsern Zweck zunächst genügend, einzusehen und festzuhalten, dass zu dieser Erhitzung und so auch zu jeder Erwärmung im Allgemeinen, auch vom Zustande der absoluten Kälte aus, ein jedesmal ganz bestimmter Arbeitsaufwand gehört oder doch als dazu erforderlich angenommen werden kann. Umgekehrt kann aber auch Wärme in Arbeit zurückverwandelt werden.

Arbeit durch Wärme erzeugt. Dass Wärme Arbeit leisten kann, ist längst bekannt. Wird z. B. eine leere Blechflasche mit einem luftdicht, aber nicht übermässig fest schliessenden Korkstöpsel verschlossen und erwärmt, so nimmt auch die Wärme der eingeschlossenen Luft zu, dadurch wächst ihre Expansivkraft, und endlich wird der Stöpsel mit einem Knall herausgeschleudert. Diese Bewegung des Stöpsels ist aber nichts weiter als von der Wärme geleistete Arbeit. Wichtiger jedoch ist die Beobachtung, dass durch diese Arbeit die Temperatur der erhitzten Luft erniedrigt worden und thatsächlich etwas von der Wärme verloren gegangen ist, nicht etwa durch Erwärmung des Stöpsels oder Vermischung der eingeschlossenen Luft mit der Aussenluft, denn das würde ja nur eine Ortsveränderung und Verschiebung des Wärmevermögens bedeuten.

Wärmeverlust der arbeitenden Luft. Um sich thatsächlich durch eine Messung mit dem Thermometer zu überzeugen, dass durch die Arbeitsleistung ein Wärmeverlust der arbeitenden Luft eintritt, könnte man etwa folgendes Experiment anstellen: Ein innen genau cylindrisches Rohr aus starkem Glase ist am Boden geschlossen, und durch das offene Ende ist ein luftdicht gehender Messingstöpsel etwa bis zur Mitte des Cylinders eingeführt und durch einen vorgeschobenen Riegel verhindert, sich rückwärts zu bewegen. Im Innern befindet sich Luft und ein Thermometer von der höchsten erreichbaren Genauigkeit. So vorgerichtet, wird der Cylinder mit der Öffnung nach oben in ein mit heissem Öl gefülltes Glasgefäss wie in ein Bad so tief eingesenkt, dass er zwar noch aus dem Öl herausragt, aber die eingeschlossene Luft und der Messingkolben unter dessen Oberfläche liegen. Eine unter dem Ölbad angezündete Gasflamme ist so reguliert, dass sie dem Öl nur so viel Wärme zuführt, als fortwährend durch Leitung nach aussen und zum Cylinder verloren geht. Nach einiger Zeit kann man annehmen, dass der Glas-cylinder samt seinem Inhalt genau dieselbe Temperatur hat, wie das umgebende Öl, was zu grösserer Strenge noch durch ein zweites, in das Öl gesenktes Thermometer erprobt wird. Infolge davon kann man überzeugt sein, dass, wenn die im Cylinder eingeschlossene Luft plötzlich einen Wärmeverlust erleiden sollte, dies nicht in einer Abgabe durch Leitung nach aussen seinen

Grund haben kann. Die von der eingeschlossenen Luft erreichte Temperatur wird nun sorgfältig abgelesen und der die Bewegung des Stöpsels hemmende Riegel weggezogen. Durch die Erwärmung ist die Expansivkraft der Luft so bedeutend vermehrt worden, dass dieselbe mit grosser Stärke nach allen Seiten drückt und nach Wegnahme des Riegels den Kolben ein beträchtliches, genau zu messendes Stück emportreibt. Der dichte Verschluss und die dadurch bewirkte Reibung lässt ihn nicht ganz hinausfliegen, sondern an einer bestimmten Stelle halt machen. Eine Beobachtung des innern Thermometers zeigt nun eine plötzlich eingetretene Erniedrigung der Temperatur. Sogleich nach deren Ablesen wird der Apparat aus dem Ölbad herausgehoben. Da die Wärmeleitung des Glases gering ist, so ist bei schneller Beobachtung nicht anzunehmen, dass die Grösse der Temperaturerniedrigung durch das Ölbad merklich gestört worden sein sollte. Dagegen ist nicht zu verkennen, dass das Thermometer durch seine Abkühlung der umgebenden Luft etwas Wärme mitgeteilt haben muss, also der Wärmeverlust derselben ohne diesen Fehler noch grösser sein würde, weshalb es sich empfiehlt, den Luftraum möglichst gross, das Thermometer dagegen möglichst klein zu machen.

Bestimmung der von der verloren gegangenen Wärme geleisteten Arbeit. Der angestellte Versuch gestattet nun aber auch eine Berechnung der von der verloren gegangenen Wärme geleisteten Arbeit. Machen wir uns klar, worin diese Arbeit bestand: Auf der eingeschlossenen Luft lastete ausser dem Kolben auch der Luftdruck, dessen Grösse sich aus der Weite des Cylinders und dem zur Zeit beobachteten Barometerstand genau berechnen lässt; zu der durch die Hebung des Gesamtgewichts von Stöpsel und Luftdruck geleisteten Arbeit kam als zweite Arbeit noch die Überwindung der Reibung des Stöpsels an der Glaswand hinzu. Wir öffnen nun, um der Aussenluft Zutritt zu verschaffen und dadurch den einseitigen Luftdruck aufzuheben, den bisher verschlossen gewesenen Boden des Cylinders und schrauben an den Stöpsel ein dem Luftdruck genau gleiches, die Cylinderwand nicht berührendes Gewicht, befestigen den an beiden Enden offenen Cylinder mit lotrecht gestellter Axe auf einem Tisch und umgeben ihn wiederum, aber diesmal nur von den Seiten her, so dass über und unter dem Stöpsel die atmosphärische Luft freien Zutritt hat, mit einem Ölbad von derselben Temperatur wie vorhin. Es ist jetzt nur noch nötig, den Stöpsel etwa durch eine Kette von passender Länge an die senkrecht über ihm befindliche Aufhängestelle des einen Arms einer gleicharmigen Wage aufzuhängen, und den andern Arm, an welchem natürlich ein der Kette gleiches nicht in Rechnung kommendes Gegengewicht hängt, allmählich mit einem so grossen Gewicht zu belasten, dass der Stöpsel im Cylinder sich eben gerade zu heben beginnt. Dieses Gewicht, multipliciert mit der Strecke, um welche vorhin der Stöpsel gehoben wurde, ist das genaue Mass der von der verschwundenen Wärme geleisteten Arbeit.

Widerlegung des gegen den Satz von der Erhaltung der lebendigen Kräfte erhobenen Einwands. Wir sind jetzt imstande, das Bedenken zu heben, welches wir früher beim Vortrag des Satzes von der Erhaltung der lebendigen Kräfte im Namen des Schülers auszusprechen genötigt waren. Nachdem wir gezeigt haben, dass Arbeit Wärme erregen kann, und dass umgekehrt Wärme Arbeit zu leisten vermag, kann es wol keinem Zweifel mehr unterliegen, was aus der scheinbar verloren gegangenen lebendigen Kraft des niedergefallenen Kilogramms Eisen geworden ist. Die lebendige Kraft hat an der Aufschlagstelle und in deren Umgebung, desgleichen in dem Eisen selbst, Wärme erzeugt, und diese Wärme würde umgekehrt bei angemessener Verwendung imstande sein die Arbeit zu leisten, welche das niederfallende Eisen wegen der Ungunst der Umstände nicht leisten konnte. In der Form der Wärme ist die augenblicklich nicht verwendbare lebendige Kraft für eine günstigere Gelegenheit aufbewahrt, sie ist also in Wahrheit nicht verloren gegangen und kann jederzeit zu neuem Leben auferweckt werden, ob an dieser oder (mit Hilfe der Wärmeleitung oder Wärmestrahlung) an einer andern Stelle, ist gleichgültig.

Die Erwärmung eines Körpers ist mit einer Vergrösserung seines Volumens verbunden. Nach den ausführlichen und eingehenden über die Natur der Wärme angestellten Betrachtungen vermögen wir nun auch uns eine Vorstellung darüber zu bilden, was durch die Erwärmung mit dem Körper selbst vorgeht.

Denken wir uns, dass es einen absolut kalten Körper gäbe: wie müssten infolge der Stosswirkung des ihn umgebenden Äthermeers seine Moleküle zu einander gestellt sein? Die Atome dieses Meeres sind, nach unsrer Annahme, in fortwährenden Schwingungen begriffen; die Stösse der Ätheratome müssen also die Körpermoleküle auf den kleinsten Raum zusammendrängen, den ihre Gestalt zulässt. Da nun aber diese Moleküle, wenn wir der Einfachheit der Vorstellung wegen den Körper als gleichartig zusammengesetzt ansehen, die Gestalt congruenter Polyeder haben, so können sie auch bei der engsten, bis zur Berührung der Seitenflächen getriebenen Zusammendrängung doch aus geometrischen Gründen den Raum nicht stetig erfüllen, sondern müssen zwischen sich Lücken lassen, in welchen eben die von der Theorie geforderten Ätheratome Platz haben oder, falls sie noch nicht dort waren, von aussen in wogendem Getümmel eindringen. Nur in dem einzigen Fall, dass die Moleküle die Würfelgestalt hätten, wäre eine vollständige Raumerfüllung durch sie möglich. Jedenfalls also erhalten wir als erstes Ergebnis unsers Nachdenkens den Satz: Die Moleküle eines absolut kalten Körpers sind auf den kleinsten Raum zusammengedrängt, den sie ihrer Gestalt und zufälligen Gruppierung wegen einnehmen können.

Aber in dieser Zusammengedrängtheit könnten die Moleküle nur bei vollständiger Absperrung von dem rings um sie brandenden Äthermeer verharren. Thatsächlich führt die Wirkung der Ätherstösse sofort eine Lockerung der Moleküle herbei. Unter dieser Wirkung geraten nämlich die eingelagerten Ätheratome in immer stärkere Schwingungen, sie stossen hin und her auf die ihre Bewegung einschränken Moleküle, verlieren dadurch an lebendiger Kraft, welche auf die Moleküle übergeht, werden aber durch die Stösse von aussen immer wieder neu gekräftigt, und die Wirkung kann keine andre sein, als dass die Moleküle immer weiter auseinander rücken und selbst immer kräftiger hin- und herschwingen; aus der starren und toten Bewegungslosigkeit und absoluten Kälte erwachen sie zu lebendiger Wärme, wie schwach dieselbe auch anfangs sein mag, und mit der Erwärmung ist eine Vergrößerung des Volumens notwendig verbunden. So kommen wir zu einem der vornehmsten Gesetze der Wärmelehre: »Alle Körper werden durch Erwärmung ausgedehnt.«

Die Annahme einer molekularen Repulsion und Attraction ist entbehrlich. Doch es könnte scheinen, als sei dieses Ergebnis noch nicht gegen alle Einwände gesichert. »Wo bleibt denn«, so könnte Jemand fragen, der das Kapitel von den allgemeinen Eigenschaften der Körper gläubig aufgenommen hat, »die Wirkung der Repulsionskraft? Kann sie denn zulassen, dass im Zustande der absoluten Kälte die Körperteilchen einander bis zur Flächenberührung genähert werden?« Dieser Frage gegenüber kann man die Gegenfrage thun, was denn die Repulsionskraft sei. Die früheren Physiker waren zur Erklärung ihnen unverständlicher Erscheinungen schnell bereit, sich mit einem geheimnisvollen Wort aus der Verlegenheit zu helfen. Es ist eine unbestreitbare Thatsache, dass die Körper ihrer Zusammendrückung sich widersetzen; zur Erklärung dieses Widerstandes war man aus Mangel an Gründen mit der Behauptung bei der Hand, dass die Moleküle überhaupt niemals einander bis zur Berührung nahe kommen, weil sie eine mit der Annäherung wachsende, durch den leeren Raum in die Ferne wirkende abstossende Kraft haben. Andererseits sah man wieder, dass die festen Körper auch einer Trennung ihrer Bestandteile sich mit einer gewissen Stärke widersetzen, und zur Erklärung hierfür hatte man wieder eine allen Atomen innewohnende in die Ferne wirkende, gleichfalls mit der Annäherung wachsende Anziehungskraft. Wie beide Kräfte sich mit einander vertragen sollen, ist schwer zu fassen, aber absolut unbegreiflich und aller sinnlichen Erfahrung widersprechend ist eine Wirkung von Stoff zu Stoff durch den leeren Raum. Mit Rücksicht auf Sonnen- und Siriusweiten hat man allmählich, wenigstens in der Lehre vom Licht und von der Wärme, zur Annahme des die Stösse vermittelnden Äthers sich bequemt, aber bei den molekularen Abständen, die doch auch Entfernungen sind und durch die Leere führen, können sich Viele noch nicht von dem Glauben an geheimnisvoll und seelisch in die Ferne wirkende Kräfte trennen. Machen wir zunächst entschlossen mit der Repulsionskraft in unserer Vorstellung ein Ende. Es giebt keine Repulsionskraft. Die Körper widerstehen einer Verringerung ihres Volumens, weil sie warm sind, die Wärme ist die entschleierte Repulsionskraft.

Aber wir haben in unsrer Vorstellung von der Wärme zugleich eine Lösung des Rätsels der Anziehungskraft, beziehungsweise des Zusammenhalts oder der Cohäsion der Körper. Der Zusammenhalt der Moleküle wird durch die ringsum von allen Seiten auf sie loshämmernden Stösse der Ätheratome bewirkt, so dass sie nur durch eine Erhöhung der lebendigen Kraft ihrer Schwingungen weiter auseinander gerückt werden können. Die festen Körper widersetzen sich also ihrer Ausdehnung, weil sie noch nicht wärmer sind, als sie sind. Damit ist auch die Annahme einer besonderen Attractionskraft überflüssig geworden.

Bei dieser Schilderung des die Erwärmung eines Körpers begleitenden Vorganges haben wir der Einfachheit wegen immer nur die Stösse der freien Ätheratome als bewegende Kraft ins Auge gefasst. Mit dieser Beschränkung könnten wir aber bloss an die an den Grenzen der Atmosphäre befindlichen Körper denken und müssten die uns näher liegenden und uns zunächst umgebenden Körper ganz unbeachtet lassen. Offenbar aber macht es durchaus keinen Unterschied, ob die Wärme erzeugenden Stösse von Ätheratomen allein ausgehen, oder ob, wie es z. B. bei der eine kalte Eisenkugel umgebenden warmen Luft, oder einem Ölbad, oder glühenden um die Kugel gehäuften Kohlen der Fall ist, zu den Ätherstössen noch die Stösse der umgebenden Körpermoleküle dazu kommen. Immer ist mit der Erwärmung auch eine Vergrösserung des Volumens verbunden, und umgekehrt.

Zum Schluss dieser Betrachtung ist es nur noch wichtig, Folgendes zu bemerken: Durch die Ausdehnung eines Körpers wird wegen der dabei erfolgenden Überwindung eines Aussendruckes (gemeinhin Luftdruck genannt) Arbeit geleistet, so dass nicht alle für die Erwärmung verbrauchte Arbeit der Erhöhung der, bloss durch die Schwingungsenergie der Moleküle bedingten, Temperatur zugute kommt. Umgekehrt wird aber auch bei der durch Abkühlung bewirkten Zusammenziehung durch die vom Aussendruck geleistete Arbeit ein gewisses Quantum von lebendiger Kraft, das der für die Ausdehnung verwandten Arbeit gleich ist, in Wärme verwandelt: es wird also, wenn ein Körper nach einander in seiner Ausdehnung um gleich viel zu- und abnimmt, an der Summe der lebendigen Wärmekräfte des Körpers und seiner Umgebung nichts geändert. Im Folgenden wird das durch die Ausdehnung in Form von geleisteter Arbeit verbrauchte Wärmevermögen noch eingehender betrachtet werden.

Mit der bis zu einer gewissen Grenze getriebenen Vergrösserung des Volumens tritt auch eine Änderung des Aggregatzustandes ein. Indem die Moleküle eines Körpers mit zunehmender Wärme immer weiter auseinander rücken, kann es nicht ausbleiben, dass sie durch die gegenseitigen Stösse und die Stösse des Äthers ausser zu stärkeren Schwingungen auch zu drehenden Bewegungen angeregt werden. Dadurch wird freilich für eine kurze Zeit die Zunahme der Intensität der Wärmeschwingungen unterbrochen, vielleicht auch die Gesamtsumme ihrer lebendigen Kräfte gemindert, aber diese Verminderung wird sofort durch den wegen der Enge des Raums unvermeidlichen Zusammenstoss der sich drehenden Moleküle und die dadurch bewirkte Verminderung oder Vernichtung der lebendigen Kraft der Drehung und die andererseits durch eben diesen Stoss erhöhte Schwingungsenergie wieder ausgeglichen, so dass die Summe der lebendigen Wärmekräfte zwar in zitterndem Aufundniederschwanken, aber doch im Ganzen in steigender Tendenz begriffen ist. Es ist aber auch der Fall denkbar, dass trotz fortwährend von aussen erfolgender Anregung die lebendige Kraft, welche zur Erhöhung der Schwingungsenergie hätte dienen können, bei einem Teil der Moleküle sich in Erzeugung drehender Bewegungen erschöpft, und dass deshalb die Temperatur dieser Moleküle eine Zeit lang unverändert stehen bleibt.*) Dieser Fall kann naturgemäss nur dann eintreten, wenn einzelne sich drehende Moleküle sich bereits genügend Raum verschafft haben, so dass sie trotz ihres Hinundherschwingens einander nicht in den Weg kommen. Da zur Fortpflanzung der Wärme durch die schwerfälligen Moleküle

*) Wenn die Wärmezufuhr eine sehr energische ist, so wird der im Folgenden beschriebene Vorgang der Wärmebindung verdunkelt: es steigt dann die Temperatur der entstandenen Flüssigkeit, noch ehe die Schmelzung der bisher fest gebliebenen Teile des Körpers ganz beendet ist. Es ist wol hier der Ort, die in den meisten Lehrbüchern aufgestellte Behauptung zu bekämpfen, dass das aus Eis entstandene Schmelzwasser so lange auf der Gefriertemperatur stehen bleibe, bis auch der letzte Rest des Eises geschmolzen ist. Wer in einem Glaskolben vor den Schülern diesen Versuch anstellt, hat lächerliches Mislingen zu fürchten: er gelingt nur bei sehr allmählicher Erwärmung und indem man das Eis durch ein darüber gelegtes Drahtgewebe auf dem Boden festhält.

eine merkliche Zeit gehört, und deshalb im Allgemeinen nicht alle Teilchen eines von aussen her erwärmten Körpers dieselbe Temperatur haben, so trägt in einem solchen Fall die zugeführte Wärme nur bei den noch nicht sich frei drehenden Molekülen zu einer Temperaturerhöhung bei; es wird dadurch die Schwingungsweite derselben so viel vergrössert und ihnen dadurch so viel freier Raum verschafft, bis auch sie sich ohne Anstoss drehen können. In diesem neuen Zustand der Aggregation ist der Körper flüssig: jedes einzelne Molekül hat so viel Raum zur Bewegung, dass ein von aussen kommender mechanischer Eingriff die Moleküle aufs leichteste verschieben und ins Innere des Körpers eindringen kann. Dabei sind die Moleküle zugleich in schwingender und drehender Bewegung begriffen.

Hört die äussere Wärmewirkung auf, und ist umgekehrt der flüssige Körper der Einwirkung einer kälteren Nachbarschaft ausgesetzt, so vermindert sich zunächst die Schwingungsweite der am stärksten beeinflussten Moleküle, sie rücken dadurch einander so nahe, dass sie beim Schwingen an einander stossen und dabei an Drehungsenergie einbüssen; durch die verloren gegangene lebendige Kraft der Drehung aber wird die im Augenblick vorher verlorene Schwingungsenergie ersetzt, mit den andern Molekülen erfolgt nach und nach das Gleiche, und so behält der Körper trotz fortwährend nach aussen abgegebener Wärme eine Zeit lang dieselbe Temperatur, bis er endlich durch und durch die freie Rotation und leichte Verschiebbarkeit der Moleküle verloren hat und wieder fest geworden ist.

Die beim Flüssigwerden trotz der eine Zeit lang stehen bleibenden Temperatur fortwährend aufgenommene und nach unsrer Theorie durch die Drehungserregung consumierte, als solche ganz verloren gegangene Wärme nannte man bisher latent oder gebunden; umgekehrt sagte man, dass die beim Festwerden eines flüssigen Körpers durch Vernichtung drehender Bewegung erzeugte und deshalb ohne Erniedrigung der Temperatur des Körpers fortwährend nach aussen abgegebene Wärme wieder frei gewordene Wärme sei. Eine auf klare Anschauung hinielende Erklärung des Vorganges hat man meines Wissens bisher nicht zu geben versucht, man begnügte sich mit der Redewendung, die latente Wärme werde durch Überwindung innerer Widerstände beim Übergang aus dem festen in den flüssigen Aggregatzustand consumiert, ohne sich zu fragen, woher denn beim umgekehrten Vorgange die frei gewordene Wärme stammt.

Trotz der leichten Verschiebbarkeit hat jede Flüssigkeit bei jeder Temperatur ein entsprechendes bestimmtes Volumen. Wegen der höchst leichten Verschiebbarkeit seiner Moleküle bedarf ein flüssiger Körper, wenn er nicht durch die auf ihn einwirkenden Kräfte nach verschiedenen Richtungen zerfliessen soll, im Allgemeinen der festen Wände eines ihn einschliessenden Gefässes. Füllt er das Gefäss nicht aus, so hat er infolge des schon wiederholt erwähnten Aussendruckes eine gegen die Druckrichtung senkrechte, nahezu ebene freie Begrenzungsfläche. Die Stelle der festen Wand kann aber auch eine andere Flüssigkeit vertreten, und in diesem Falle ist die Begrenzungsfläche nahezu kugelförmig; eine weitere Ausführung dieser Betrachtungen gehört in die Hydrostatik, und wir halten hier nur das fest, dass jede Flüssigkeit ein ihrer jedesmaligen Temperatur genau entsprechendes Volumen hat. Mit diesem Satz stimmt auch die Erfahrung überein, dass zwei aus derselben Flüssigkeit gefertigte Thermometer, nahe bei einander in eine Flüssigkeit eingesenkt, immer verhältnismässige Volumina der thermometrischen Substanz zeigen. Dies könnte nicht der Fall sein, wenn die thermometrischen Flüssigkeiten unabhängig von ihrer Temperatur bald dieses, bald jenes Volumen hätten. Es ist überflüssig zu wiederholen, dass auch bei Flüssigkeiten das Volumen mit zunehmender Wärme wächst: die Gründe dafür sind dieselben, wie sie früher als allgemein gültig vorgetragen wurden.*)

*) Dass die vorgetragene Theorie nicht alle über die Veränderung des Volumens gemachten Beobachtungen erklärt und namentlich, abweichende Vorgänge beim Erstarren ungerechnet, das dem Ausdehnungsgesetz geradezu widersprechende Verhalten des Wassers, indem dieses erst bei etwa $+4^{\circ}$ Celsius seine höchste Dichtigkeit erreicht, ebenfalls ganz unerklärt lässt, dürfte noch kein hinreichender Grund sein, die ganze Theorie zu verwerfen. Vielmehr ergibt sich daraus nur die Aufforderung, das abweichende Verhalten des Wassers immer wieder durch Experimente der verschiedensten Art zu erforschen. Mit Rücksicht auf eine von v. Tschudi in seinem »Thierleben der Alpenwelt« über die Eigenschaften des Gletschereises gemachte Bemerkung wäre es nicht undenkbar, dass von der erwähnten Temperatur an abwärts eine erhöhte Sauerstoffabsorption das Volumen des Wassers dem Ausdehnungsgesetz entgegen vergrösserte, und dass bei der entgegengesetzten Bewegung der Temperatur das Volumen des Schmelzwassers durch Sauerstoffabgabe kleiner würde.

Verdunstung einer Flüssigkeit. Bei der Erwärmung einer Flüssigkeit treten noch andere Vorgänge ein, als wir bei festen Körpern zu beobachten hatten. Als erste Besonderheit haben wir schon das Vorhandensein drehender Bewegungen der Moleküle erkannt, zu ihr kommt als zweite die Möglichkeit fortschreitender Bewegungen hinzu. Ein schwingendes Molekül kann durch die auf dasselbe wirkenden Stösse veranlasst werden, unter Aufgabe dieser Bewegungsart mit einer gewissen Geschwindigkeit geradlinig und vielleicht auch dabei rotierend weiter zu gehen. In den meisten Fällen wird es bald an ein anderes Molekül anprallen und dadurch von seinem Wege abgelenkt werden, vielleicht auch seine fortschreitende Bewegung ganz einbüßen, und es ist überflüssig, durch Wiederholung von früher Gesagtem zu zeigen, dass durch die Einleitung einer fortschreitenden Bewegung die Wärmeenergie der ganzen Masse für eine kurze Zeit gemindert, durch Hemmung derselben aber wieder vergrössert wird. Auch hier geht trotz zitternden Aufundniederwogens doch im Allgemeinen die Temperatur des Ganzen aufwärts. Doch ist es in besonderen Fällen, zumal wenn das Molekül nahe der freien Begrenzungsfläche liegt, nicht ausgeschlossen, dass dasselbe ohne Anstoss seinen Weg hinaus ins Freie findet, und dann hat sein Zusammenhang mit den übrigen Molekülen der Flüssigkeit ein Ende. Allerdings könnte es draussen durch Stösse fremder sich dort herumtreibender Moleküle sofort wieder glücklich zurückgeworfen werden und durch Beiseiteschieben von Ätheratomen wieder seinen Zusammenhang mit der Flüssigkeit gewinnen, doch dürfte dies nur selten und ausnahmsweise geschehen. Der hier beschriebene Vorgang hat den Namen Verdunstung. Diese erfolgt natürlich um so leichter, je höher die Temperatur der Flüssigkeit ist, weil dann die Moleküle weiter auseinanderstehen.

Verdunstung fester Körper. Ein der Verdunstung ähnlicher Vorgang kann auch bei einem festen Körper erfolgen. Wird derselbe sehr energisch durch Strahlung erwärmt, so können nahe der Oberfläche die intermolekularen Ätheratome in kurzer Zeit eine so grosse Schwingungsenergie erreichen, dass sie, trotzdem sie weniger dicht bei einander stehen als die Aussenatome, die schwächeren obschon zahlreicheren Stösse, welche von aussen das vor ihnen befindliche Molekül wie einen Schild treffen, durch ihre stärkeren obschon an Zahl geringeren Gegenstösse auf dessen Innenseite überbieten und das Molekül abbröckeln machen. Sofort aber dringen jetzt Ätheratome von aussen seitwärts ein, und eine Rückkehr des Moleküls zu seinen Genossen ist unmöglich; höchstens kann es noch wie ein Sandkorn der Düne eine Zeit lang durch den Anprall der Ätherwogen in der Nähe des früheren Sitzes gehalten werden. (Verdunstung des Eises im Schatten bei Frosttemperatur, Kampher, eigentümlicher Geruch mancher Metalle etc.)

Eine Abstossung der an der Oberfläche befindlichen Moleküle tritt unter gleichen Umständen wie bei festen Körpern natürlich auch bei Flüssigkeiten ein, aber die Verdunstung ist bei diesem Aggregatzustande nicht bloss auf die Oberflächenmoleküle beschränkt.

Wärmeverlust durch Verdunstung. Neben dem Verlust an Masse, den ein flüssiger oder fester Körper bei der Verdunstung erfährt, tritt zugleich ein Wärmeverlust ein. Die durch die Ausstossung eines Moleküls geleistete Arbeit ist für die zurückgebliebene Flüssigkeit in der Form von Wärme verloren und kann nicht wieder ersetzt werden. Ein entsprechender Verlust wiederholt sich mit der Ausstossung jedes folgenden Moleküls, und so verschwindet fortwährend ein Teil der von der Wärmequelle aufgewandten Arbeit, ohne dass die Temperatur der Flüssigkeit entsprechend erhöht würde. Auch hier nennt man die verloren gegangene Wärme latent, obschon sie nicht bloss verborgen, sondern wirklich verschwunden ist. Ist keine äussere Wärmequelle da, so geht die Verdunstung auf Kosten der von der Flüssigkeit bereits erreichten Temperatur vor sich, d. h. die Temperatur geht zurück.

Sieden. Von der Verdunstung nicht wesentlich verschieden ist der Vorgang des Siedens. Mit steigender Temperatur werden immer mehr Moleküle der Flüssigkeit zu fortschreitender Bewegung angeregt, und die dadurch hervorgebrachten Stösse werden immer gewaltiger, so dass ganze Säulen der Flüssigkeitsmasse in auf- und niederschwankende Bewegung geraten: aus immer grösserer Tiefe unter der Oberfläche gelingt es einzelnen Molekülen, den Weg ins Freie zu finden, bis endlich diese Möglichkeit auch für einzelne Moleküle und Molekül-

gruppen des Grundes des Gefässes sich eröffnet, mit um so deutlicher sichtbarem Erfolge, wenn, wie es meistens der Fall, die Wärmequelle unter dem Boden des Gefässes sich befindet. Aber niemals werden alle Moleküle zu gleicher Zeit entfesselt. Durch jedes hinausgestossene Molekül geht die von der Wärmequelle auf dasselbe verwandte Arbeit verloren, ohne durch Rückverwandlung in Wärme zur Erhöhung der Temperatur der noch zurückgebliebenen Moleküle beitragen zu können. Die Temperatur bleibt deshalb bei diesen letzteren nahezu auf derselben Höhe oder schreitet doch nur langsam vorwärts, bis endlich alle Moleküle in Freiheit gesetzt sind. Es ist erklärlich, dass für die unterhalb der Oberfläche befindlichen Moleküle die Möglichkeit, die über ihnen lagernden Genossen mit emporzuschleudern, ausser von der Temperatur auch von dem Drucke abhängt, der von aussen auf der Flüssigkeit lastet. Daher tritt eine Verdunstung bei jeder Temperatur ein, ein Sieden nur, wenn die Temperatur eine gewisse Höhe erreicht hat, und zwar muss die Temperatur bei constantem Aussendruck um so höher sein, je tiefer unter der Oberfläche das Sieden eintreten soll. (Erklärung der Thätigkeit der isländischen Geiser.)

Hierin liegt auch die Erklärung der beim Sieden des Wassers zu beobachtenden Erscheinung, dass, wenn das Wasser Luft enthält, die Dampfbildung znnächst rings um die Luftblasen herum beginnt: jede Luftblase schafft im Innern des Wassers ein Stück freier Oberfläche. Wird die Luft aus dem Wasser durch wiederholtes Kochen ausgetrieben, so steigt die Siedetemperatur weit über die gewöhnliche Höhe. (Donny's Versuch.)

Allgemeine Bemerkung. Der Siedevorgang ist die einzige Gelegenheit, wo unsern für die Beobachtung des Kleinsten nicht beanlagten Augen ein Einblick in die das Wesen der Wärme umgebenden Geheimnisse gestattet wird, so dass jedem unbefangenen Beobachter die Vermutung sich aufdrängen muss, dass Wärme eine Bewegung ist. Was wir sonst thatsächlich und erfahrungsmässig von der Wärme wissen, sind gewisse unabhängig von der Theorie der innern Vorgänge durch Erfahrung gefundene Gesetze. Namentlich hat man als unzweifelhaft erkannt, dass für jeden Stoff die Änderung des Aggregatzustandes bei Gleichheit der äussern Umstände genau bei unwandelbaren, jedem Stoff eigentümlichen Temperaturen erfolgt, und dass bei jeder wiederkehrenden Temperatur auch das Volumen jedes Körpers immer wieder dasselbe ist. Diese strenge Gesetzmässigkeit lässt vermuten, dass erstlich die Zahl und Gruppierung und das Massenverhältnis der Moleküle und der intermolekularen Ätheratome bei jedem Körper genau bestimmt und nirgends dem Zufall überlassen ist, und dass deshalb zweitens die von jedem Molekül und jedem Ätheratom ausgeführten Bewegungen genau nach den Gesetzen der Bewegung auf streng bestimmten Bahnen erfolgen. Doch ist eine Beantwortung der darauf bezüglichen Fragen für jetzt noch ganz unmöglich.

Gasform. Im Zustande der vollkommenen Zerstreung der Moleküle ins Äthermeer, so dass jedes derselben von allen Seiten von gleich dicht bei einander stehenden Ätheratomen umgeben ist, heissen dieselben gasförmig. Die Erwärmung vermag also die Körper aus dem flüssigen und festen in den gasförmigen Aggregatzustand überzuführen. Die Gasform ist vermutlich der Urzustand der Materie. Bei den auf der Erde und den übrigen Weltkörpern sich vorfindenden Gasen hat man nicht zu fragen, aus welchen festen und flüssigen Körpern dieselben durch Erwärmung entstanden sind, sondern viel näher liegend und schwerer zu beantworten ist die umgekehrte Frage, durch welche Vorgänge sich die festen und flüssigen Körper aus der Gasform gebildet haben mögen.

Was wird aus dem ausgestossenen Molekül? Grenze der Atmosphäre. Das durch Verdunstung oder Sieden ins Äthermeer hinausgestossene Molekül muss nach dem Gesetz der Trägheit in der einmal angenommenen Richtung mit sich gleich bleibender Geschwindigkeit so lange weitergehen, bis es auf ein Hindernis, entweder ein anderes sich bewegendes Molekül, oder ein Ätheratom stösst, und dadurch wird seine Bewegung in bezug auf Richtung und Geschwindigkeit streng nach mechanischen Gesetzen in bestimmter Weise abgeändert. So irrt es bei sich wiederholenden Stössen in endlosem Wechsel auf bald kurzen bald langen Strecken, schnell und wiederum langsam, stets ruhelos dahin. Wird es dabei etwa immer weiter hinaus in den Ätherocean verschlagen, wo die Wärmeschwingungen der Ätheratome schwächer sind, so

wird es durch diese auch schwächer gestossen, die Grösse seiner Bewegung nimmt immer mehr ab, und es erreicht endlich, indem es nur noch in einem kleinen Bezirk herumgeführt wird, eine Art von Ruhe, die freilich niemals vollständig sein kann. Damit ist vielleicht auf die viel erörterte Frage wegen der Grenze der Atmosphäre eines Weltkörpers eine nicht ganz unzutreffende Antwort gegeben.

Was geschieht, wenn viele Gasmoleküle in einem von allen Seiten begrenzten Raum eingeschlossen sind? Stellen wir uns vor, dass ein flüssiger Körper unter der Einwirkung einer äussern Wärmequelle in einem ringsum geschlossenen Raum verdunste oder siede und dadurch eine immer grösser werdende Zahl von Gasmolekülen in diesen Raum hinausschleudere. Die Teilchen der festen Wand sind natürlich so eng zusammengedrückt zu denken, dass sie den Gasmolekülen keinen Durchgang gestatten; ausser diesen aber enthält der Raum eine vielmal grössere Zahl von schwingenden Ätheratomen, denen gleichfalls durch die intermolekularen Atome der Wand der Ausweg versperrt ist. Da ein Molekül ein Ätheratom an Masse und Volumen vielmal übertrifft, so werden die Gasmoleküle jedesmal, wenn sie unter sich zusammenstossen, viel kräftiger angegriffen, als wenn sie Stösse von Ätheratomen empfangen, jeder Stoss der ersten Art bewirkt also ein verhältnismässig bedeutendes Auseinanderprallen der Moleküle, so dass eine längere Zeit vergeht, bis wieder eine Begegnung von Molekül und Molekül erfolgt. In dieser Zwischenzeit nun ist ein solches Molekül nur den zwar schwächeren, aber viel zahlreicheren, von allen Seiten kommenden Stössen der Ätheratome ausgesetzt, dadurch wird es aus seinem ungestümen Drang in die Ferne allmählich sanft in einen kleineren Kreis seiner Bewegung hineingetrieben, den andern Molekülen ergeht es nicht anders, und so werden sie vor einem Zusammenstoss mit ihren Genossen immer mehr bewahrt: der schliessliche Erfolg ist der, dass alle Moleküle möglichst gleichmässig über den ganzen Raum verteilt sind. Durch die fortgesetzte Verdunstung wird freilich die Gleichmässigkeit immer wieder gestört, aber wir können ja den Fall annehmen, dass bereits die ganze Flüssigkeit in die Gasform übergegangen sei. Zwischen den schwingenden Ätheratomen in schöner Regelmässigkeit gruppiert, werden nun die Gasmoleküle, welche eine Zeit lang das Schwingen ganz verlernt hatten, wieder zu den den Wärmezustand charakterisierenden Schwingungen veranlasst und verstärkt durch ihre Masse mächtig die Stosswirkung der Ätheratome auf die umgebende Wand. Dabei darf man nicht etwa meinen, dass in der Übergangszeit die wärmeerzeugende Wirkung der äussern Wärmequelle verloren gegangen wäre, denn was die Moleküle an fortschreitender Bewegungsquantität nach und nach einbüssten, das kam zunächst der durch jeden Zusammenstoss verstärkten Schwingungsenergie der Ätheratome zugute, und nur durch diese Kräftigung waren dieselben imstande, von ihrer lebendigen Schwingungskraft wiederum einen Teil an die in Schwingungen zu versetzenden Moleküle abzugeben: während des ganzen Übergangszustandes vollzog sich also eine unausgesetzte Folge von Verschiebungen und Ausgleichen, und es trat nicht nur kein Verlust im Wärmevermögen ein, dasselbe nahm vielmehr durch die aus der Flüssigkeit fortwährend neu übernommenen Moleküle wegen der in ihrer fortschreitenden Bewegung mit übernommenen lebendigen Kraft ununterbrochen zu. Ist alle Flüssigkeit in die Gasform übergeführt, so kommt die äussere Wärmeanregung der Verstärkung der Schwingungsenergie der Gasmoleküle direkt zustatten.

Die Stösse der eingeschlossenen Gas- und Äthermasse erhöhen teils die Temperatur der Wand, teils üben sie einen gleichmässig auf die Wandfläche verteilten nach aussen gerichteten Druck, der, wenn die Wand verschiebbar und dehnbar wäre, eine Ausdehnung des Raumes hervorbringen würde und deshalb den Namen Expansivkraft hat. Bleiben Gas und Wand fortwährend gleich warm, so dass die Wärmewirkungen beiderseits einander das Gleichgewicht halten, so hat eine Erhöhung der Temperatur des Gases nur eine Erhöhung der Expansivkraft zur Folge, und umgekehrt.

Zusammenfassende Wiederholung der das Volumen betreffenden Eigenschaften der festen Körper, Flüssigkeiten und Gase. Ein fester Körper hat ein der Zahl seiner Moleküle und seiner Temperatur entsprechendes Volumen und hat in sich die Kraft, den von ihm eingenommenen Raum nach Gestalt und Grösse zu behaupten.

Ein flüssiger Körper hat ein der Zahl seiner Moleküle und seiner Temperatur entsprechendes Volumen, bedarf aber, um in dem von ihm eingenommenen Raum zu bleiben, des Halts durch eine unten und an den Seiten ihn einschliessende Wand.

Ein Gas kann nur in einem es von allen Seiten einschliessenden Gefäss zusammengehalten werden und hat kein der Zahl seiner Moleküle und seiner Temperatur entsprechendes, sondern jedes beliebige ihm aufgenötigte Volumen, übt aber im Zusammenhang damit auf jedes Flächenstück der Gefässwand einen der Grösse des Flächenstücks proportionalen Druck aus.

Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Volumen eines Gases bei gleich bleibender Masse und gleich bleibender Expansivkraft. (Gay-Lussacsches Gesetz.)

Nach dem zuletzt Gesagten kann von der Ausdehnung eines Gases durch Erwärmung an und für sich nicht die Rede sein. Wenn man trotzdem sagt, dass auch alle Gase durch Erwärmung ausgedehnt werden, so ist dabei immer stillschweigend vorausgesetzt, dass trotz der Erwärmung die Expansivkraft des Gases oder, was ebenso viel bedeutet, der von der Gefässwand auf das Gas ausgeübte Druck derselbe bleiben soll. Es ist also dazu ein in seinem Rauminhalt veränderliches Gefäss erforderlich, als welches z. B. eine schlaffe Tierblase dienen könnte. Wegen der Einfachheit der Anschauung wollen wir ein innen cylindrisches Gefäss mit geschlossenem Boden wählen, in welchem ein gasdicht schliessender Stöpsel ohne Reibung sich bewegen kann. Diese Voraussetzung ist nahezu, wenn auch nicht vollkommen genau, bei einer engen Glasröhre erfüllt, in welcher ein kurzer Quecksilberfaden sich hin- und herschieben lässt. Es sei also eine bestimmte Gasmenge in einem sich in eine solche Röhre fortsetzenden Glasgefäss eingeschlossen. Auf dem Quecksilberfaden lastet der äussere Luftdruck: soll also keine Bewegung desselben eintreten, so muss ein diesem gleicher Druck von dem eingeschlossenen Gase auf jedes dem Querschnitt der Röhre gleiche Flächenstück der Innenwand ausgeübt werden; wir haben somit, so lange der Faden still steht, eine genaue Kenntnis der Grösse der Expansivkraft des Gases. Wird aber die Gasmasse erwärmt, so erhöht sich ihre Expansivkraft, und es tritt eine Verschiebung des Quecksilberfadens ein, so lange bis durch den grösser gewordenen Raum die Expansivkraft wieder zur Gleichheit mit dem Aussendruck zurückgekehrt ist. Wird nun die Erwärmung so bewerkstelligt, dass dabei das Gefäss von aussen her die gleiche Temperaturerhöhung erfährt, so wird die ganze dem Gase zugeführte Wärme lediglich dazu benützt, einerseits die Schwingungsenergie der Gasmoleküle zu erhöhen, andererseits den Quecksilberfaden um eine gewisse Strecke weiterzuschieben, welche letztere Arbeit sich aus der Grösse des Querschnitts der Röhre und dem gerade herrschenden Luftdruck genau berechnen lässt. Wird der Gasmasse von Neuem, unter gleichen Bedingungen wie vorher, ein gewisses Wärmequantum zugeführt, so wird wieder einerseits die Schwingungsenergie der Moleküle erhöht, andererseits die Verschiebung des Quecksilberfadens bewirkt, welche zweite Arbeitsleistung wegen des in der kurzen Zeit nicht geänderten Luftdrucks zur ersten sich verhält, wie die zweite Verschiebung zur ersten Verschiebung oder auch wie der zweite Zuwachs des Gasvolumens zum ersten Zuwachs. Da nun aber anzunehmen ist, dass das Verhältnis der beiden Leistungen, welche jede Wärmezuführung bewirkt, jedesmal dasselbe ist, so ist die Erhöhung der Schwingungsenergie der durch das Verschieben des Quecksilberfadens geleisteten Arbeit proportional, folglich entsprechen gleichen Temperaturerhöhungen des Gases gleiche Zunahmen seines Volumens. Damit sind wir bei dem in der Einleitung erwähnten Satze angelangt: Alle Gase werden durch Erwärmung unter gleichem Druck gleichmässig ausgedehnt. Wir werden nachher sehen, wie sich dieses wichtige, zuerst von Gay-Lussac ausgesprochene Gesetz, freilich nur auf einem Umwege, auch experimentell erschliessen lässt.

Zusammenhang zwischen dem Volumen eines Gases und seiner Expansivkraft bei unveränderter Masse und Temperatur. Mariottesches Gesetz. Man kann das in einem Gefäss eingeschlossene Gas durch einen gasdicht ohne Reibung gehenden Stempel zusammendrücken. Zu diesem Zweck braucht man nur eine lange, an dem einen Ende geschlossene Glasröhre in Form eines U so zu biegen, dass der offene Schenkel den geschlossenen an Länge etwas übertrifft. Wenn man genaue Versuche und Messungen anstellen will, so ist darauf zu sehen, dass der geschlossene Schenkel im Innern genau cylindrisch sei. Bei dieser einfachsten Form des Apparats kann man freilich nur mit atmosphärischer Luft arbeiten, es genügt aber die

Anbringung eines Hahns als Verschluss des kürzeren Schenkels, um auch mit jedem andern Gase Versuche anstellen zu können. Stellt man die Röhre senkrecht mit der Öffnung nach oben und giesst in den offenen Schenkel ein wenig Quecksilber, so sammelt sich dasselbe an der Biegungsstelle des Rohrs und sperrt das im kürzeren Schenkel enthaltene Gas ab. Durch Zugiessen von mehr Quecksilber wird nun dasselbe zusammengepresst und zugleich erwärmt. Wir wollen nun aber nicht etwa den Versuch wirklich anstellen, sondern die weitere Entwicklung des Vorgangs, lediglich auf unsre Wärmetheorie gestützt, in Gedanken verfolgen. Wir warten also in Gedanken so lange, bis durch Wärmeabgabe an das Gefäss und nach Aussen die Temperatur des zusammengedrückten Gases die gleiche ist, wie sie anfänglich war: offenbar wird wegen der dabei stetig zurückgehenden Expansivkraft das Volumen des Gases noch stetig abnehmen, bis die verlangte Temperatur erreicht ist. Nehmen wir, um einen bestimmten Fall vor uns zu haben, an, das Gas sei schliesslich auf die Hälfte des ursprünglichen Volumens zusammengepresst. Gesetzt, die Zahl der Gasmoleküle wäre $2n$ und p eine in n ohne Rest enthaltene Zahl. Wenn wir nun den gegenwärtig von dem Gase eingenommenen Raum in p gleiche Teile teilen könnten, so würden wir in jedem Raumteil doppelt so viel Moleküle und mit gleicher Schwingungsenergie thätig finden, als wenn wir den ursprünglichen Raum in ebenso grosse, also $2p$ gleiche Teile geteilt und die Zahl der Moleküle eines Raumteils festgestellt hätten. Daher muss auch die von ihnen ausgeübte Expansivkraft jetzt doppelt so gross sein, als sie früher war. Das hierin enthaltene Gesetz lautet allgemein: Die Expansivkraft eines Gases ist bei gleichbleibender Temperatur dem Volumen umgekehrt proportional. Dasselbe ist zuerst von Mariotte und Boyle durch Versuche erkannt worden.

Ausdehnungsgesetz der festen Körper. Wir verlassen auf kurze Zeit die Betrachtung der Gase und kehren nochmals zu den festen Körpern zurück, um eine früher angekündigte Untersuchung zu Ende zu führen. Wir haben gesehen, dass die einem festen Körper zugeführte Wärme einerseits zur Erhöhung der Schwingungsenergie seiner Moleküle, andererseits, wegen der dabei erfolgenden Ausdehnung, zur Leistung einer Arbeit verwendet wird. Stellen wir uns der Einfachheit wegen vor, die Mittelpunkte der Bahnen, welche die Moleküle schwingend durchlaufen, seien geradlinig in gleichen Abständen von einander gestellt, und der Körper habe die Gestalt eines rechtwinkligen Parallelepipeds und stehe fest auf einer Seite als Grundfläche: auf den drei von einer Ecke ausgehenden Kanten mögen a , b , c Moleküle stehen. Nehmen wir zur Erleichterung der Anschauung einen ungeheuer vergrösserten Massstab und denken wir uns die Moleküle je einen Meter auseinander. Vergrössert sich nun durch Zuführung einer bestimmten Wärmequantität die Schwingungsweite jedes Moleküls um 1 mm, so muss, von der Grundfläche ab aus gezählt, jedes Molekül der ersten Parellelschicht um 1 mm, jedes Molekül der zweiten um 2 mm, der dritten um 3 mm u. s. f., endlich jedes Molekül der c ten Schicht um c mm verschoben werden. Die Summierung der einzelnen Verschiebungen ergibt nun mit Rücksicht darauf, dass c sehr gross ist, als gleichwertig mit dieser Arbeitsleistung die Verschiebung sämtlicher Moleküle um $\frac{c}{2}$ mm. Da aber die Ausdehnung des Parallelepipeds nach allen Seiten erfolgt, so ist, wenn wir die Grundfläche ac als fest ansehen, auch eine Verschiebung sämtlicher Moleküle je um $\frac{b}{2}$ mm und endlich noch, für bc als feste Grundfläche, die Verschiebung sämtlicher Moleküle um $\frac{a}{2}$ mm zu leisten. Es muss also im Ganzen eine gleiche Arbeit geleistet werden, wie zur Hebung des Körpergewichts vermehrt um den auf ab lastenden Luftdruck auf die Höhe $\frac{c}{2}$ mm, desgleichen zur Hebung dieses Gewichts vermehrt um den auf ac lastenden Luftdruck auf die Höhe $\frac{b}{2}$ mm, endlich zur Hebung dieses Gewichts vermehrt um den auf bc lastenden Luftdruck auf die Höhe $\frac{a}{2}$ mm erforderlich ist.

Werde dem Körper nun von Neuem eine ebenso grosse Wärmemenge wie vorher zugeführt und nehmen wir, was wol natürlich und erlaubt ist, an, dass sich die Wirkung davon auf die Erhöhung der Schwingungsenergie und auf die Ausdehnungsarbeit nach demselben Verhältnis wie vorher verteile, so wird, da die Ausdehnung fester Körper erfahrungsgemäss nur eine sehr geringe ist, wegen der sehr unbedeutenden Vergrösserung der Seitenflächen und des

ihnen entsprechenden Luftdrucks, die bei der Ausdehnung zu leistende Arbeit nur um eine verschwindend kleine Grösse von der vorher geleisteten Arbeit verschieden sein und demzufolge auch die Schwingungsenergie, d. h. die Temperatur des Körpers, um ebensoviel zunehmen, wie vorher. Daraus ergibt sich das theoretische Gesetz, dass auch bei festen Körpern innerhalb mässiger Grenzen die Zunahme des Volumens der Zunahme der Temperatur nahezu proportional ist, und zwar um so genauer, je weiter die erreichte Temperatur von der absoluten Kälte entfernt ist.)*

Eine gleiche Betrachtung wie bei den Gasen und festen Körpern hinsichtlich der Ausdehnung der flüssigen Körper anzustellen ist unmöglich, weil wir keinen Anhalt und kein Mass dafür haben, wie viel von der zur Einleitung der fortschreitenden Bewegung aufgewandten lebendigen Kraft beim Process der Verdunstung verloren geht.

Es tritt uns jetzt die Frage entgegen, durch welche Versuche wol eine Probe angestellt werden könnte, ob die zuletzt über die Ausdehnung der Gase und festen Körper abgeleiteten Theoreme der Wirklichkeit entsprechen oder nicht. Einen direkten Nachweis zu erbringen, ist freilich kein Experiment imstande, denn wir können den Strom einer Wärmequelle durchaus nicht so fest umgrenzen und absperren, dass sie nur an der von uns gewünschten Stelle thätig wäre: es fehlt uns also jedes Mittel, die von einem Körper aufgenommene Wärmequantität zu messen. Doch bietet sich folgender indirekte Weg:

Richmanns Regel. Wir haben früher uns klar gemacht, dass der einem Körper durch Erwärmung zuteil gewordene Zuwachs an lebendiger Kraft bei der Rückkehr desselben zu seiner vorigen Temperatur in seinem vollen Wertbetrag, ohne dass auch nur das Geringste davon verloren ginge, seiner Umgebung wieder zufließt. Daraus ziehen wir nun sofort folgenden Schluss: »Könnte ich zwei gleiche Gewichte desselben Stoffs, aber von verschiedenen Temperaturen, unter Abhaltung jedes Wärmeverlustes nach aussen mit einander verbinden, so müsste als Ausgleichstemperatur das arithmetische Mittel beider Temperaturen sich ergeben.« Dieses von uns auf rein theoretischem Wege gefundene Ergebnis wird durch die Erfahrung bestätigt und heisst die Richmannsche Regel.

Es ist nicht schwer, dieselbe auf rein theoretischem Wege auch für den Fall ungleicher Gewichte desselben Stoffs zu verallgemeinern:

Werden von einem und demselben Stoff a kil mit der Temperatur α und b kil mit der Temperatur β zusammengebracht und sei $a > b$, so könnte man mit demselben Wärmeausgleich auch

$$(a-b) \text{ kil mit der Temp. } \alpha \text{ und } 2b \text{ kil mit der Temp. } \frac{\alpha + \beta}{2}$$

zusammenbringen. Es zeigt sich nun, dass bei dieser Vertauschung die Summe der Produkte je aus dem Gewicht und der zugehörigen Temperatur unverändert bleibt, was ein bestimmtes Zahlenbeispiel mit wiederholten Vertauschungen noch anschaulicher machen würde.***) Daraus folgt, dass, wenn 2 Gewichte a und b desselben Stoffs mit den Temperaturen α und β unter Abhaltung jedes Wärmeverlustes nach aussen mit einander verbunden werden, die Ausgleichstemperatur $\frac{a\alpha + b\beta}{a+b}$ sich ergibt.

Die Anwendung der vorgetragenen Regel wird uns zu dem gewünschten Ziel führen. Um aber zu demselben genügend vorbereitet zu sein, wollen wir uns zuvor noch die Bedeutung der Angaben eines Thermometers recht klar machen.

*) Ist die Ausdehnung, wie es bei den nicht amorphen oder nicht im tesseralen System krystallisierenden Körpern der Fall ist, in verschiedenen Richtungen verschieden stark, so ist es nicht schwer, die obige Entwicklung passend abzuändern, indem man die Molekülabstände und ihre Verschiebungen noch mit angemessenen constanten Coefficienten multipliciert, das Resultat der Betrachtung aber bleibt dasselbe.

**) 7 kil von 40^0 und 5 kil von 30^0 können ersetzt werden durch 2 kil von 40^0 und 10 kil von 35^0 , diese wieder durch 8 kil von 35^0 und 4 kil von $37\frac{1}{2}^0$, diese durch 4 kil von 35^0 und 8 kil von $36\frac{1}{4}^0$, diese durch 8 kil von $35\frac{5}{8}^0$ und 4 kil von $36\frac{1}{4}^0$ etc. Immer findet sich als constante Summe der oben erwähnten Produkte die Zahl 430.

Bedeutung der Thermometerangaben. Wenn ein Quecksilberthermometer, es ist gleichgültig mit welcher Skala, in warmes Wasser getaucht auf 40° weist, darauf in laues Wasser gebracht 23° , endlich in kaltem Wasser 6° anzeigt, so könnten wir nach dem herrschenden Sprachgebrauch meinen, damit drei Temperaturen des Wassers beobachtet zu haben, und glauben vielleicht, wenn wir auf die gleichen Abstände der drei Zahlen von einander achten, dass die Temperatur des lauen Wassers um ebensoviel unter dem heissen Wasser liegt, um wie viel sie die Temperatur des kalten übersteigt. In Wahrheit ist dies aber nicht zutreffend. Wir haben in den Zahlen ganz offenbar kein Mass der Temperatur, weil ja der Nullpunkt des Thermometers nicht dem Zustande der absoluten Kälte entspricht, sondern in der vom unbekanntem Anfangspunkt ins Unendliche gehenden Linie ganz willkürlich gewählt ist. Aber auch über die Temperaturunterschiede erfahren wir durch das Thermometer nichts Verlässliches, sondern wissen streng genommen nur, dass das Quecksilber des Thermometers in dem warmen Wasser ein um 17 Raumteile grösseres Volumen hatte, als im lauen, ein um 34 Raumteile grösseres als im kalten Wasser. Nur wenn wir überzeugt sein könnten, dass das Quecksilber durch gleiche Zunahmen seiner Temperatur auch um gleich viel sich ausdehnt, könnte der Thermometerstand ein Mass, nicht etwa der Temperaturen, aber doch der Temperaturzunahmen sein. In der That werden wir sofort in unserm Glauben schwankend, wenn wir neben dem ersten Instrument ein Weingeistthermometer anwenden; es zeigt, obschon es mit gleicher Sorgfalt wie jenes gefertigt, und der Rauminhalt seines Glasgefässes unter Zugrundelegung derselben Skala in durchaus gleiche Teile geteilt ist, überall eine von den Angaben des andern Instruments abweichende Zahl von Graden. Unmöglich also können beide thermometrische Flüssigkeiten sich gleichmässig ausdehnen.

Nehmen wir nun statt der drei Gefässe mit Wasser drei andere mit Quecksilber, in welche hineingesenkt das Quecksilberthermometer ebenfalls wieder 40° , 23° und 6° zeigen möge, so können wir, wenn jedes Gefäss gleich viel Quecksilber enthält, zwar ebenfalls über die Temperaturen der drei Massen nichts Zuverlässiges wissen, aber diesmal können wir wenigstens überzeugt sein, dass die Volumina derselben um gleichviel von einander verschieden sind. Wenn es nun gelänge, das Quecksilber des ersten und dritten Gefässes ohne Wärmeverlust zusammenzuschütten, und das Gemisch ein doppelt so grosses Volumen hätte wie das Quecksilber des zweiten, dann, aber auch nur dann, wäre allerdings zufolge der Richmannschen Regel der Beweis erbracht, dass nicht blos die der Reihe nach genommenen Unterschiede der Volumina, sondern auch die der Temperaturen unter sich gleich sind, und das Thermometer wäre in der That, wie sein Name beansprucht, ein Messer zwar nicht der Wärme, aber doch der Wärmezunahme. Es handelt sich also, um darüber Gewissheit zu erlangen, nur noch um die Überwindung der Schwierigkeit, die beiden Quecksilbermassen ohne Wärmeverlust mit einander zu vermischen. Doch auch hierfür giebt es Rat.

Mischung zweier Quecksilbermassen ohne Wärmeverlust. Wir schütten zunächst die beiden Massen schnell zusammen und lesen den Stand des eingeführten Thermometers ab. Natürlich ist wegen des offenbaren Wärmeverlusts die Zahl der Grade zu niedrig, aber sie ist doch eine erste Staffel zur Erreichung unseres Ziels. Nehmen wir, um die Vorstellung zu unterstützen, an, das Thermometer weise 20° . Nun setzen wir drei Ölbäder in Bereitschaft, welche wir auf die Thermometerstände 40° , 6° und 20° bringen und durch angemessen regulierte Gasflammen dauernd darin erhalten, und erwärmen in den beiden ersten Bädern in geschlossenen, nur oben in einer feinen Röhre sich öffnenden Glasgefässen je 1 Kilogramm Quecksilber bis zur Annahme der Temperatur der Umgebung, während in dem dritten Bade ein grösseres Gefäss zur Aufnahme der Mischung vorgewärmt wird. Wenn wir nun nach genauer Controle der beiden Temperaturen die Zusammenschüttung (am bequemsten durch ebenfalls von den Bädern umgebene Leitungsröhren) vollziehen, so ist das in die Mischung gesenkte Thermometer dem erwarteten Stande schon näher gekommen und weist vielleicht $21\frac{1}{2}^{\circ}$. Wir wiederholen nun den Versuch von Neuem, nur mit der Abänderung, dass wir das dritte Ölbad auf $21\frac{1}{2}^{\circ}$ bringen und dabei erhalten, und finden nach vollzogener Mischung wiederum einen etwas höheren, der Wahrheit näheren Thermometerstand. So werden mit stufenweise steigender Zuverlässigkeit des Resultats die Versuche so lange wiederholt, bis endlich zwischen der Temperatur des vorgewärmten Gefässes

und derjenigen der Mischung kein Unterschied mehr zu merken ist. Offenbar ist bei diesem Verfahren die Wärmeabgabe nach aussen endlich ganz vermieden.

Ausdehnung des Quecksilbers. Wenn man nun aber das Resultat mit der von der Richmannschen Regel geforderten Zahl vergleicht, so findet man eine wenn auch sehr unbedeutende Abweichung, woraus hervorgeht, dass die Ausdehnung des Quecksilbers durch Erwärmung in der That nicht gleichmässig ist. Indem man aber den vorstehend beschriebenen Versuch für beliebig gewählte Thermometerstände so wiederholt, dass man dabei die Fundamentalpunkte, nämlich den Gefrier- und den Siedepunkt, zum Ausgang der ersten Versuchsreihe wählt, darauf zwischen der erlangten Mitteltemperatur und dem einen der beiden Punkte einen neuen Mittelpunkt bestimmt und die nach und nach erhaltenen Mittelpunkte immer wieder combinirt, so gelangt man zu einer corrigierten Skala des Quecksilberthermometers, aus welcher man mit Sicherheit ersehen kann, welcher Thermometerstand jedesmal der in gleichmässigen Schritten sich vorwärts bewegenden Temperatur entspricht. Die Abweichung zwischen der corrigierten und der natürlichen Skala des Quecksilberthermometers ist aber innerhalb der Fundamentalabstände so gering, dass sie für das praktische Leben durchaus unerheblich ist, so dass das Quecksilber aus praktischen Rücksichten für die beste thermometrische Substanz zu erklären ist.

Viel weniger eignet sich der Alkohol dazu, weil die Skala eines Alkoholthermometers von der richtigen Skala erheblicher abweicht. Man braucht, um dies zu erkennen, nicht etwa unter Wiederholung des mühsamen Verfahrens eine Folge von Alkoholmischungen mit Anwendung von Alkoholthermometern auszuführen, was wegen der durch die Erwärmung herbeigeführten Änderung des procentualen Wassergehalts des Alkohols sogar kaum ausführbar wäre, sondern es genügt, ein Alkohol- und ein Quecksilberthermometer neben einander in dieselbe langsam sich erwärmende oder abkühlende Flüssigkeit zu hängen und die jedesmaligen Angaben zu vergleichen.

Einfachste Construction eines Luftthermometers. Wenn man ein beliebig gestaltetes dünnwandiges Glasgefäss mit einer im Innern genau cylindrischen engen Glasröhre verbindet und die darin enthaltene Luft an irgend einer Stelle der Röhre durch einen kurzen Quecksilberfaden von der Aussenluft absperrt, so wird im Zusammenhang mit der Erwärmung oder Abkühlung der eingeschlossenen Luft der Faden vorwärts oder rückwärts geschoben, und wir haben in dem Apparat ein Luftthermometer einfachster Form. Man kann durch ein entlang der Röhre gehendes zur Abmessung der Verschiebungen vorgerichtetes Lineal den Gang derselben genau verfolgen. Zu einer dauernden Graduierung ist jedoch das Instrument nicht geeignet, weil das Volumen der eingeschlossenen Luft ausser von der Temperatur auch von dem Luftdruck abhängig ist, der letztere aber stetig wechselt. Beobachtet man jedoch etwa während einer Mittagsstunde, wo der Luftdruck sehr wenig schwankt, den Gang des Luftthermometers neben einem in derselben Flüssigkeit aufgehängten Quecksilberinstrument, so findet man, dass gleichen Temperaturzunahmen absolut gleiche Verschiebungen des Fadens im Luftthermometer entsprechen. Es wird also für die atmosphärische Luft das früher von uns theoretisch abgeleitete Gay-Lussacsche Gesetz durch die Erfahrung bestätigt.

Anfertigung eines Gasthermometers mit fester Skala. Zweites Gay-Lussacsches Gesetz. Der Übelstand, dass sich an dem gewöhnlichen Luftthermometer keine feste Skala anbringen lässt, und dass dasselbe zur Beobachtung der Ausdehnung anderer Gase wenig bequem ist, kann durch folgende Einrichtung beseitigt werden. Man versieht das beliebig gestaltete dünnwandige Luftgefäss mit einem wol eingeschlifften Glashahn, füllt den ganzen Raum des Gefässes samt der in eine feine offene Spitze endigenden Röhre mit Quecksilber und leitet nach Öffnung des Hahns aus dem Gasometer so viel Gas ein, dass alles Quecksilber bis auf ein kleines im Röhrenende zurückbleibendes Säulchen verdrängt wird, worauf man nach Schliessung des Hahns das Gefäss in schmelzendes Eis bringt. Das sich abkühlende Gas zieht sich zusammen, und der Quecksilberfaden geht durch den Luftdruck so lange rückwärts, bis das Gas die Temperatur des schmelzenden Eises angenommen hat. Jetzt stülpt man auf das offene Ende einen Gummiball und drückt unter vorsichtiger Öffnung des Hahns langsam den Quecksilberfaden bis zu dem Punkte der Röhre zurück, den man als Nullpunkt zu wählen für passend hält, worauf

der Hahn sofort wieder geschlossen wird. Das so vorgerichtete Gasthermometer zeigt erstens bei seiner Vergleichung mit dem corrigierten Quecksilberthermometer, dass ein beliebiges Gas genau so wie die Luft durch gleiche Temperaturzunahmen um gleichviel ausgedehnt wird, zweitens aber, was überaus merkwürdig ist und die unerwartetsten Folgerungen gestattet, dass alle Gase gleich stark sich ausdehnen, so dass ein nach der Bewegung eines beliebigen Gases graduiertes Gasthermometer sofort auch zur Beurteilung der Temperatur jedes andern Gases brauchbar ist und überhaupt mit jeder Gasfüllung, wenn genau eingestellt, als Normalthermometer dienen kann. Auch dieses Gesetz trägt nach seinem Entdecker Gay-Lussac den Namen. Man kann demselben auch folgende Fassung geben: Gleiche Volumina verschiedener Gase von gleicher Temperatur haben auch gleiche Expansivkraft.

Folgerung aus dem zweiten Gay-Lussacschen Gesetz. Absoluter Nullpunkt. Absolute Temperatur. Bei dem experimentellen Nachweis, dass alle unter gleichem Druck gehaltenen Gase von gleichem Volumen und gleicher Temperatur sich durch Erwärmung um gleich viel ausdehnen, stellte Gay-Lussac auch im Besonderen fest, dass die Ausdehnung eines Gases unter dem normalen Druck der atmosphärischen Luft bei einer Erhöhung seiner Temperatur vom Gefrierpunkt bis zum normalen Siedepunkt des Wassers 3665 Zehntausendstel seines Volumens, also bei der Temperaturzunahme um 1 Celsiusgrad 3665 Milliontel desselben beträgt, welcher Bruch nahezu durch $\frac{1}{273}$ ersetzt werden kann. Gesetzt nun, es gäbe irgend ein Gas, welches trotz fortgesetzter Abkühlung nicht zum Übergange in den flüssigen oder festen Aggregatzustand gebracht werden könnte, sondern bis zur Flächenberührung seiner Moleküle gasförmig bliebe, so würde sein Volumen in Anbetracht des äusserst geringen Gewichts der Gase endlich fast gleich 0 zu erachten sein; diese Zusammenziehung würde aber durch ein Herabgehen der Temperatur bis auf 273 Celsiusgrade unter dem gebräuchlichen Nullpunkt erreicht werden. Daraus ziehen wir den Schluss, dass der Zustand der absoluten Kälte keinesfalls weiter als 273 Celsiusgrade unter Null liegen kann. Man nennt diese hypothetische Temperatur den absoluten Nullpunkt und spricht demgemäss auch von der absoluten Temperatur eines Körpers. Man erhält dieselbe, indem man 273 zu der gebräuchlichen von einem 100teiligen Quecksilberthermometer angegebenen Zahl der Grade addiert.

Zweite Folgerung. Gesetz des Avogadro. Denken wir uns zwei gleiche, von festen Wänden mit gleichem Druck umschlossene Räume von gleicher Temperatur: um eine bestimmte Vorstellung zu haben, nehmen wir an, der eine enthalte Wasserstoff, der andere Sauerstoff; beide enthalten noch ausserdem unsrer Wärmetheorie zufolge gleich viel Ätheratome von gleicher Schwingungsintensität.

Gesetzt nun, die Masse oder, was daraus entsprechend folgt, das Gewicht eines Wasserstoffmoleküls verhalte sich zu dem eines Sauerstoffmoleküls wie a zu b, so verhalten sich, weil beide Moleküle gleich starke Ätherstösse erfahren, die den Molekülen bezüglich mitgeteilten Geschwindigkeiten wie b zu a. Die Kräfte aber, welche die Moleküle nun ihrerseits irgendwo anstossend entwickeln, sind einander gleich.*) Die von jedem Wasserstoffmolekül ausgeübte Expansivkraft ist also ebenso gross, wie die, welche ein Sauerstoffmolekül zeigt. Da nun auch die gesamten Expansivkräfte beider Gase gleich sind, so bleibt nichts anderes übrig, als dass beide Räume gleich viel Moleküle enthalten. Wir kommen also zu folgendem merkwürdigen Satz: Gleiche Volumina verschiedener unter gleichem Druck gehaltenen Gase und von gleicher Temperatur enthalten gleichviel Gasmoleküle. Dieser Satz ist die Grundlage der chemischen Theorie der Atomgewichte. Er wurde zuerst von Avogadro vermutet. Was von den Gasmolekülen gilt, gilt selbstverständlich nach erfolgter Dissociation auch von den Gasatomen.

*) Zum Verständnis halte man sich folgende erste Überlegungen der Mechanik vor: Wenn zwei gleich schwere Kugeln mit gleicher Stärke gestossen werden, so erhalten sie gleiche Geschwindigkeiten. Wenn zwei Kugeln von 1 kg und 2 kg Gewicht gleich stark gestossen werden, so erhält die erste eine doppelt so grosse Geschwindigkeit wie die zweite, aber die Stosskräfte beider Kugeln unmittelbar nach dem Stosse sind gleich.

