

Geschichte der absoluten Mafseinheiten.

Von Dr. A. Kiel.

Dritter Teil.

Die absoluten Mafse in der Mechanik.

Durch die Einführung der absoluten magnetischen Mafse hat Gauß die magnetischen Messungen und Berechnungen von den benutzten Apparaten sowie von Zeit und Ort der Beobachtung unabhängig gemacht. Gauß gelangte zu diesem Ziele, indem er die Einwirkung des Erdmagnetismus auf einen Magnetstab mechanisch ausdrückte und die benutzten mechanischen Mafse auf die drei Grundeinheiten der Länge, der Masse und der Zeit zurückführte, welche überall denselben Betrag haben und behalten.

Man hätte erwarten sollen, daß der große Erfolg, welcher durch die Einführung dieser absoluten Mafse in dem Gebiete des Magnetismus und später noch mehr in dem der Elektrizität erzielt wurde, die Veranlassung gewesen wäre, vor allem in dem Gebiete der Mechanik sämtliche Größen auf dieselben Grundeinheiten zurückzuführen und dadurch gleichfalls von Zeit und Ort unabhängige Mafse zu schaffen.

Das ist nun zwar auch geschehen bei allen Größen, in deren mathematischem Ausdruck die Kraft nicht enthalten ist. So ist von jeher die Einheit der Geschwindigkeit auf die Einheiten der Länge und der Zeit zurückgeführt worden; folgerichtig hat man dann auch die Beschleunigung von diesen beiden Einheiten abhängig gemacht, da die Beschleunigung die Geschwindigkeitszunahme in der Zeiteinheit bedeutet. Anders dagegen steht es mit der Kraft und allen davon abhängigen oder damit in Zusammenhang stehenden Größen. Man hat als Krafteinheit nicht nach dem Vorgang von Gauß diejenige Kraft gewählt, welche der Masseneinheit in der Sekunde die Beschleunigung 1 erteilt, sondern hat die Schwere der Gewichtseinheit als solche beibehalten, d. h. den Antrieb, welchen die Gewichtseinheit in vertikaler Richtung gegen die Erde erfährt, der sich als Druck gegen die Unterlage zu erkennen giebt, wenn der Körper unterstützt ist, dagegen den Körper mit gleichmäßiger Beschleunigung in vertikaler Richtung gegen die Erde treibt, wenn ihm die Unterstüttung entzogen wird. Man gelangte so zu einem System, welches als Grundeinheiten diejenigen der Länge, der Kraft und der Zeit hat. Dieses Mafssystem ist früher „praktisches“ System genannt worden. Weil aber auch die dem absoluten Mafssystem zugehörigen elektrischen Mafse: „Ampère, Volt, Ohm etc.“ als „praktische Mafse“ bezeichnet werden, so fühlte sich durch diese Doppelsinnigkeit

Pfaundler veranlaßt, nach einem anderen Ausdruck zu suchen, als welchen er dann in der 8. und 9. Auflage des von ihm herausgegebenen Lehrbuchs der Physik die Bezeichnung „terrestrisches oder irdisches Maß“ vorschlug. Dabei leitete ihn die Überlegung, dass in dem zu bezeichnenden Maßsystem die Definition der Kräfteinheit auf die Größe der irdischen Schwere gegründet ist und nur mit Bezug auf die Erde ausgesprochen werden kann. Die Einheiten der Länge, Zeit und Masse des absoluten Systems sind zwar auch von der Erde abgeleitet, nämlich die Längeneinheit von ihrer Größe, die Zeiteinheit von ihrer Rotationszeit und die Masseneinheit aus ihrer Größe unter Hinzuziehung eines irdischen Stoffes, des Wassers. Aber trotzdem glaubt Pfaundler dem gewöhnlichen Maßsystem vor dem absoluten das Vorrecht zuerkennen zu sollen, als „irdisch“ bezeichnet zu werden, und zwar deswegen, weil die absoluten Maße von der Erde losgelöst überall im Kosmos ihre Bedeutung behalten können, während die irdischen Maße der Kraft und der davon abgeleiteten Masse an der Erde haften und ihren Sinn verlieren, beziehungsweise ihren Wert ändern, sowie wir sie von der Erde auf einen anderen Punkt des Weltalls übertragen wollen. Ein Meter, eine Kilogramm-Masse können wir uns auf den Mond oder die Sonne übertragen denken, ohne daß sie deshalb ihre Größe ändern. Die Gewichtseinheit (die Kräfteinheit des irdischen Maßsystems) und ebenso die davon abgeleitete Masseneinheit verliert aber auf dem Monde oder der Sonne entweder ihren Sinn oder ändert ihren Wert; das erstere, wenn man vom Gewicht nur in Bezug auf die Erde sprechen will, das letztere, wenn man, wie oft gebräuchlich, vom Gewicht der Körper auf anderen Weltkörpern spricht.

Die Bezeichnung „irdisches Maßsystem“ ist von A. Overbeck¹⁾ beanstandet worden, weil man diesem Ausdruck ebenso wie dem von H. Herwig²⁾ hierfür gebrauchten nichtssagenden Ausdruck „conventionell“ eine von dem gewöhnlichen Sprachgebrauch wesentlich abweichende Bedeutung beilegen müsse, wenn sie zur Bezeichnung des betreffenden Maßsystems dienen sollen. Der von Herwig gewählte Ausdruck verdient allerdings die ungünstige Aufnahme, welche Overbeck ihm zuteil werden läßt. Daß aber „irdisch“ auch im Gegensatz zu „himmlisch“ gebraucht wird, ist kein genügender Grund, den Ausdruck zu vermeiden; in der Physik ist er nur im Gegensatz zu „kosmisch“ gebräuchlich, und da die Bezeichnung „irdische Schwere“ seit langem üblich ist, so kann wohl auch „irdisches Maß“ gesagt werden, um den gleichbedeutenden aber fremden Ausdruck terrestrisch zu vermeiden, gegen welchen Overbeck nichts einwendet. Thatsächlich hat der Vorschlag von Overbeck: die beiden Systeme als Masse-Gewicht-System und Kraft-Gewicht-System zu unterscheiden, keinen Anklang gefunden und bezeichnet man das eine nach wie vor als absolutes, das andere als terrestrisches.

Dieses „irdische Maßsystem“ leidet an zwei Übelständen, die zwar praktisch nicht sehr erheblich erscheinen, aber doch hinreichend gewesen sind, seine Anwendung in der theoretischen Mechanik ganz zu verhindern und es aus dem Gebiete der physikalischen Messungen fast vollständig zu verdrängen.

Der erste Nachteil besteht darin, dass dieses System die ursprüngliche Bedeutung

1) Wiedem. Annalen 31. Band, p. 336. 1887.

2) H. Herwig, Physikalische Begriffe und absolute Maße, p. 18. 1880.

des Gewichts als Masse aufgiebt. Denn spricht man im gewöhnlichen Leben z. B. von *n* Kilogramm Blei oder Schwefelsäure, so denkt man dabei nur an die Quantitäten dieser Stoffe, nicht aber an die Kraft, mit der sie von der Erde angezogen werden. Ebenso will der Chemiker nur Mengenverhältnisse ausdrücken, wenn er sagt, daß ein Gewichtsteil Wasserstoff mit 8 Gewichtsteilen Sauerstoff neun Gewichtsteile Wasser geben. Die sogenannten Gewichtssätze sind daher eigentlich als Massensätze zu bezeichnen, denn sie dienen zur Bestimmung der Massen der Körper. Läßt man diesen Begriff des Gewichts fallen und führt dafür den Kraftbegriff ein, so schafft man eine gekünstelte Beziehung zwischen Kraft und Masse. Nach der ersten Gleichung der Dynamik ist nämlich jede Kraft proportional der von ihr bewegten Masse und der durch sie bewirkten Beschleunigung, also

$$p = \text{const. } m \cdot \varphi,$$

wenn *p* die Kraft, *m* die Masse und φ die Beschleunigung bedeutet. Setzt man den Proportionalitätsfaktor = 1, so ist

$$p = m \cdot \varphi.$$

Damit erklärt man, daß die Einheit der Kraft der Masseneinheit die Einheit der Beschleunigung erteilt. Wird nun der Antrieb, den 1 Kilogramm in vertikaler Richtung von der Erde erfährt, als Krafteinheit festgesetzt, so darf die Masse des Kilogramms nicht als Masseneinheit gelten, denn dieser Masse erteilt die so gewählte Krafteinheit nicht die Beschleunigung 1 m, sondern 9,81 m. Die Masseneinheit muss 9,81 mal größer sein als die eines Kilogramms, d. h. also 9,81 kg betragen. So wird, wenn man an die beiden Fadenenden einer Atwood'schen Fallmaschine je 4,405 kg und an das eine Ende ein Übergewicht von 1 kg hängt, das System durch die Triebkraft des genannten Übergewichts die Beschleunigung 1 m erlangen, vorausgesetzt natürlich, daß das Trägheitsmoment des Rades unberücksichtigt bleiben darf. Diese 9,81 kg haben demnach die Masseneinheit. Das Verwirrende bei dieser Sachlage besteht demnach darin, daß das „irdische Maßsystem“ die gewöhnliche Masseneinheit als Krafteinheit benutzt, die Masseneinheit, die ihm als Ausgangspunkt diene, wieder aufgiebt, um aus der eben gewonnenen Krafteinheit und der Einheit der Beschleunigung eine neue Masseneinheit abzuleiten.

Viele Physiker, welche die hierdurch hervorgerufene Schwierigkeit einer physikalischen Definition des Begriffes Masse vermeiden wollen, begnügen sich daher mit einer rein mathematischen. Sie erklären die Masse *m* als ein bloßes Zahlenverhältnis ohne physikalische Bedeutung. Da nämlich sowohl die Kraft *p* als die Beschleunigung φ als eine Länge aufgefaßt werden könne, so sei $\frac{p}{\varphi}$ der Bruch zweier Längen und daher eine reine Zahl; und diese unbenannte Zahl werde Masse genannt. Diese Denkweise steht aber nicht bloß zu der gewöhnlichen Anschauung, sondern ebensowohl zu derjenigen der großen Physiker der Gegenwart in Widerspruch. Denn diese rechnen gerade die Masse neben der Zeit und dem Raum zu den drei unabhängigen Grundvorstellungen, von denen die Mechanik auszugehen habe, und betrachten als die Aufgabe der Mechanik, die Beziehungen zwischen diesen dreien und allein zwischen diesen dreien darzustellen. Ein vierter Begriff, wie der Begriff der Kraft oder der Energie, ist als selbständige Grundvorstellung beseitigt. Die Bemerkung, daß die genannten drei von

einander unabhängigen Vorstellungen nötig, aber auch hinreichend seien zur Entwicklung der Mechanik, hat schon G. Kirchhoff seinem Lehrbuch der Mechanik vorangestellt. In dieselben Fußstapfen tritt der leider zu früh vom Geschick hinweggerissene Hertz in den nach seinem Tode herausgegebenen „Principien der Mechanik“, worin er das Ergebnis einer jahrelangen Gedankenarbeit niedergelegt hat. Versuchen wir die Bewegungen der uns umgebenden Körper zu verstehen und auf einfache und durchsichtige Regeln zurückzuführen, so schlägt unser Versuch im allgemeinen fehl, sobald wir nur dasjenige berücksichtigen, was wir unmittelbar vor Augen haben. Wir werden bald gewahr, daß die Gesamtheit dessen, was wir sehen und greifen können, noch keine gesetzmäßige Welt bildet, in welcher gleiche Zustände stets gleiche Folgen haben. Wir überzeugen uns, daß die Mannigfaltigkeit der wirklichen Welt größer sein muß als die Mannigfaltigkeit der Welt, welche sich unseren Sinnen unmittelbar offenbart. Wir müssen hinter den Dingen, welche wir sehen, noch andere, unsichtbare Dinge vermuten, hinter den Schranken unserer Sinne noch heimliche Mitspieler suchen. Diese tiefer liegenden Einflüsse dachte man sich früher als Wesen einer eigenen und besonderen Art und man schuf deshalb zu ihrer Wiedergabe die Begriffe der Kraft und der Energie. Es steht aber noch ein anderer Weg offen und den schlägt Hertz ein. Wir können zugeben, daß ein verborgenes Etwas mitwirke und doch leugnen, daß dieses Etwas einer besonderen Kategorie angehöre. Es steht uns frei anzunehmen, daß auch das Verborgene nichts anderes sei als wiederum Bewegung und Masse, und zwar solche Bewegung und Masse, welche sich von der sichtbaren nicht an sich unterscheidet, sondern nur in Beziehung auf uns und auf unsere gewöhnliche Mittel der Wahrnehmung. Diese Auffassungsweise ist nun die Grundhypothese, auf welcher Hertz sein vollständig in sich zusammenhängendes System der Mechanik aufbaut. Was wir gewohnt sind als Kraft und als Energie zu bezeichnen, ist für ihn nichts weiter als eine Wirkung von Masse und Bewegung, nur braucht es nicht immer die Wirkung grobsinnlich nachweisbarer Masse und grobsinnlich nachweisbarer Materie zu sein. Mit einer derartigen Erklärung der Kraft aus Bewegungsvorgängen, die man eine mechanische¹⁾ zu nennen pflegt, steht Hertz im Einklang mit den Resultaten der physikalischen Forschungen der neueren Zeit. Die Kräfte der Wärme hat man mit Sicherheit auf die verborgenen Bewegungen greifbarer Massen zurückgeführt. Durch Maxwell's Verdienst ist die Vermutung fast zur Überzeugung geworden, daß wir in den elektrodynamischen Kräften die Wirkung der Bewegung verborgener Massen vor uns haben. Lord Kelvin rückt die Möglichkeit mechanischer Erklärungen der Kräfte mit Vorliebe in den Vordergrund seiner Betrachtungen; in seiner Theorie von der Wirbelnatur der Atome hat er ein dieser Anschauung entsprechendes Bild des Weltganzen zu geben versucht. Wenn also das irdische Maßsystem zu der schließlichen Folgerung führt, daß die Masse ein Zahlenfaktor sei, ja, schon wenn dasselbe überhaupt auf den Kraftbegriff den Hauptwert legt und dem Begriffe der Masse eine mehr untergeordnete Bedeutung beimißt, so steht dieses System zu der Denkweise der neueren Physik in schroffem Gegensatz.

Hierzu kommt als zweiter Nachteil des irdischen Maßsystems der Umstand, daß die Beschleunigung, welche die Gewichtseinheit an verschiedenen Stellen der Erde bei dem freien Falle erfährt, eine verschiedene ist, daß mithin die Kräfteinheit nicht überall

1) Hertz bezeichnet diese Erklärungsweise als dynamische.

denselben Betrag hat. Hieraus folgt, daß dieses Maßsystem nur die unter derselben geographischen Breite und in derselben Höhe über dem Meeresspiegel angestellten Messungen vergleichbar macht, das heißt, daß die Zahlenwerte für irgend eine gemessene Größe, in welche die Kraft eingeht, nur an den so gelegenen Orten dieselben bleiben. Messen wir dieselbe Größe an einem anderen Orte, so wird dort ein anderer Zahlenwert gefunden.

Es macht nun zwar keine große Schwierigkeit, die an einem Orte a ausgeführten Messungen durch die an einem anderen Orte b gültigen Einheiten auszudrücken, denn es braucht nur der Zahlenwert für jede der Kraft proportionale Größe und für diese selbst mit dem Bruche aus der Beschleunigung an dem Orte a und dem Orte b multipliziert zu werden, d. h. mit dem Bruche $\frac{g_a}{g_b}$. Aber es ist doch wünschenswert, die physikalischen Größen in solchen Einheiten anzugeben, daß der für diese Größen erhaltene Zahlenwert überall derselbe bleibt.

Das sich zunächst darbietende Mittel würde sein, nicht den Zug, den das Kubikdecimeter Wasser an den verschiedenen Orten gegen die Erde erfährt, als Einheit zu wählen, sondern denjenigen Zug, welchen es an einem bestimmten Orte, etwa unter dem 45. Breitengrad am Meeresniveau erleidet. Alsdann ist, wenn die Intensität der Schwere unter dem 45. Breitengrad g_{45} beträgt, der Zahlenwert jeder der Kraft proportionalen Größe, wie er an einem Orte mit der Intensität g gefunden wird, mit dem Bruche $\frac{g}{g_{45}}$ zu multiplizieren, um die an diesem Orte gemessene Größe auf die zugrunde gelegte Einheit zurückzuführen. Man hat statt der Intensität g_{45} wohl auch die in den mittleren Breitengraden geltende Intensität 981 cm oder die Intensität von Paris vorgeschlagen.

Gegen diese Definition der Krafteinheit lassen sich indes noch erhebliche Einwendungen machen. Zunächst muß zu derselben eine Konstante g_{45} verwandt werden, die an Ort und Stelle nicht bestimmt werden kann. Außerdem aber wird bei wirklichen Kraftmessungen die Kraft als abgeleitetes Maß erhalten. Denn wird an einem bestimmten Orte mit der Schwereintensität g einer Kraft durch den Zug von q Kilogramm das Gleichgewicht gehalten, so ist der Wert dieser Gewichte in dem festgesetzten Kraftmaße durch die Gleichung gegeben:

$$p = \frac{q}{g_{45}} g.$$

Es stellt aber $\frac{q}{g_{45}}$ die Masse im irdischen Maßsystem dar. Es wird demnach bei der Ausführung der Messung erst die Masse des Bewegten bestimmt und aus der Beschleunigung g dieser Masse die Kraft abgeleitet. Darnach ist die Krafteinheit diejenige Kraft, welche der Masseneinheit die Beschleunigung 1 erteilt.

Damit ist man aber auf das absolute Maßsystem von Gauß geführt, nur mit dem Unterschiede, daß die Einheit der Masse bei Gauß g_{45} mal kleiner ist. Denn bei Gauß stellt die Masse der Gewichtseinheit die Masseneinheit dar, der Gewichtsbetrag also auch den Zahlenwert der Masse.

Sobald das Gewicht als Masse betrachtet wird, ist dasselbe nirgends veränderlich,

denn ein und derselbe Körper wird überall durch dieselbe Anzahl Kubikdecimeter Wasser an der Wage äquilibrirt. Deshalb ist auch die so definierte Einheit der Masse überall dieselbe, somit neben der Einheit der Länge und der Zeit ein absolutes Maß. Ebenso ist die auf dem Begriffe der Masse aufgebaute Einheit der Kraft unverändertlich.

Aus der voranstehenden Darlegung geht hervor, daß das absolute Maßsystem den unbedingten Vorzug vor dem irdischen System verdient. Für das praktische Leben und die Technik mag es wohl zulässig bleiben, zur Messung von Kräften sich der Gewichte zu bedienen, weil die Änderung der Anziehungskraft der Erde von einem Ort zum anderen klein genug ist, um in den meisten Fällen vernachlässigt werden zu können. Auch handelt es sich sehr häufig um relative Messungen an demselben Orte, wo diese Änderung gar nicht in Betracht kommt.

Aber für die physikalische Wissenschaft, mag dieselbe nun zusammenhängend in einem Lehrbuche vorgetragen werden oder mag es sich um die Erforschung einer speziellen Frage handeln, wird es stets von Bedeutung sein, ein von Zeit und Ort der Beobachtung unabhängiges Grundmaß und damit auch das absolute System zu gebrauchen. Das Gesagte gilt auch für die Schule. Denn gerade für sie wird es von Wichtigkeit sein, den Begriff der Masse den Schülern klar vor Augen zu führen. Es wird nun den Schülern stets ein Rätsel bleiben, daß die Unveränderlichkeit der Masse bestehen bleibt, daß aber der numerische Ausdruck dafür sich von Ort zu Ort ändert, wie es das irdische Maßsystem verlangt. Im absoluten Maßsystem dagegen wird als Masse eines Körpers die Zahl seiner kleinsten Massenteilchen erklärt. Wenn diese Zahl auch nicht zu bestimmen ist, so kann wenigstens bestimmt werden, und zwar durch das feinste Präzisionsinstrument, die Wage, wievielmals die Zahl dieser Massenteilchen größer ist als die Zahl der Molekel eines Kubikcentimeters Wasser. So versteht jeder Schüler den Satz: „Ein Körper hat die Masse $3g$ “ dahin, daß dieser Körper dreimal so viel Massenteilchen enthält als 1 Kubikcentimeter Wasser.

Und wenn für das irdische Maßsystem ins Feld geführt wird, daß in ihm die Kräfteinheit durch den Zug der Gewichtseinheit außerordentlich veranschaulicht werde, so braucht dieser Vorteil dem absoluten System nicht verloren zu gehen. Denn da die Anziehungskraft der Erde einem Gramm die Beschleunigung von 981 cm erteilt, so ist diese Kraft 981 mal größer als die Kräfteinheit des absoluten Systems, die sogenannte Dyne, welche 1 g die Beschleunigung von 1 cm erteilt. Leider wird in den Lehrbüchern das absolute Maßsystem in der Mechanik noch nicht allgemein angewandt. Als Lehrbuch der Physik für höhere Lehranstalten, welches das absolute System überall benutzt, verdient dasjenige von Herrn Direktor H. Börner genannt zu werden. Unter den Lehrbüchern, welche über den Rahmen der Schule hinausgehen, sind hauptsächlich diejenigen von Pfaundler und Kaiser namhaft zu machen. Das letztere zeichnet sich durch Genauigkeit des Ausdrucks und Klarheit der Darstellung besonders aus. Selbst schwierige Rechnungen werden in dem Buche in einfacher Weise entwickelt oder aber, was noch wertvoller ist, durch begriffliche Ableitungen ersetzt.

Die Einführung des absoluten Maßsystems hat nicht nur auf die Präzisierung der Grundgrößen den größten Einfluß ausgeübt, sondern auch in die Verhältnisse der Fundamenteinheiten Ordnung gebracht. Früher herrschte in der Wahl der Längen-, Massen- und Zeiteinheiten eine große Mannigfaltigkeit. Bald wurden Fuß, Grain und Se-

kunde als Grundeinheiten angewandt, bald Millimeter, Milligramm und Sekunde, bald Centimeter, Gramm und Minute, oft Meter, Tonne und Sekunde. Häufig wurde auch ein Gemisch von Einheiten angewandt. Die Fläche einer Platte wurde z. B. in Quadratmetern angegeben, während ihre Dicke in Millimetern ausgedrückt wurde.

Die Ungleichartigkeiten der Einheiten kann, wenn es auch unzweckmäÙig ist, bei der Bestimmung von einfachen GröÙen wie Länge, Fläche, Volumen, Masse etc. beibehalten werden, da die Umrechnung auf eine andere Einheit leicht ausführbar ist. Anders ist es bei allen GröÙen, die sich auf mehr als eine der Grundeinheiten beziehen, besonders wenn ihre Dimensionen, in jenen Grundeinheiten ausgedrückt, nicht mehr einfach sind und eine vorsichtige Interpretation erfordern. Die Rechnungen werden dann sehr verwickelt und die Wahrscheinlichkeit, bei der Umrechnung einen Fehler zu begehen, wird sehr vermehrt. Als darum im Jahre 1861 die British Association for the advancement of science sich vor die Aufgabe gestellt sah, das absolute Maßsystem für das Gebiet der Elektrizität brauchbarer zu machen, bestand die erste Sorge dieser Gesellschaft der Wissenschaft darin, ein in jeder Beziehung geeignetes System von Grundeinheiten in Vorschlag zu bringen. Auf den Vorschlag von Thomson wählte man Centimeter, Gramm, Sekunde. Der Grund, welcher die Wahl von Centimeter und Gramm anstatt derjenigen des Meters und des Grammes wünschenswert machte, besteht darin, daß bei Annahme der erstgenannten Einheiten die Dichte des Wassers gleich der Einheit wird, indem 1 g Wasser bei 4° Celsius ein Volumen von nahezu 1 cbcm hat. Bei Annahme des Meters und des Grammes als Grundeinheiten würde die Dichte des Wassers gleich einer Million, denn die Volumeneinheit, das Kubikmeter, enthielt alsdann 1 000 000 g Wasser. In einem solchen System stimmt daher die Dichte einer Substanz nicht mehr mit dem spezifischen Gewicht überein, sondern ist eine Million mal größer als dieses.

Dieses sogenannte Centimeter-Gramm-Sekunden-System hat überall Aufnahme gefunden, wo man sich für das absolute System entschieden hat. Gleichzeitig damit haben sich die kurzen Benennungen für mehrere Einheiten der verschiedenen mechanischen GröÙen und die Angaben ihrer Dimensionen eingebürgert, welche Maxwell nach dem Vorgang von Fourier eingeführt hat. Diese Dimensionsformeln haben keine theoretische, sondern nur die arithmetische Bedeutung, die Verwandlungszahl zu bestimmen, wenn man von dem einen System von Grundeinheiten zu einem anderen übergehen will. Innerhalb des engeren, rein wissenschaftlichen Gebiets der Physik fällt diese Bedeutung weg, da hier das Centimeter-Gramm-Sekunden-System ausschließlich in Gebrauch ist. Wohl aber sind die Formeln wichtig, sobald es sich um GröÙen handelt, welche im gewöhnlichen Leben und namentlich in der Technik verwandt werden. Denn in der Technik sind in der Regel andere Grundeinheiten gebräuchlich, nämlich Kilogramm, Meter und Sekunde. Aber auch innerhalb des rein physikalischen Gebiets sind die Dimensionsangaben in denjenigen Fällen nicht ohne Wert, wo die Einheit der betreffenden GröÙe keine Benennung hat. Alsdann ersetzt die Dimension gewissermaßen diese Bezeichnung, besonders wenn die Grundeinheiten: cm, g, sec selbst eingeführt sind statt der allgemeinen Begriffe: *L*, *M*, *T*.

Die mechanischen GröÙen, deren Einheiten noch keine Benennungen haben, sind die folgenden:

Geschwindigkeit = $[LT^{-1}]$. Einheit der Geschwindigkeit hat ein Körper, welcher in 1 sec 1 cm durchläuft. Diese Einheit ist daher = $cm \text{ sec}^{-1}$.

Beschleunigung = $[LT^{-2}]$. Einheit ist die Geschwindigkeitsänderung um 1 cm in 1 sec = $cm \text{ sec}^{-2}$.

Lebendige Kraft oder kinetische Energie = $\frac{1}{2} mv^2 = [ML^2T^{-2}]$. Einheit = $g \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-2}$.

Potentielle Energie = $mgh = [ML^2T^{-2}]$. Die Dimension stimmt mit derjenigen der kinetischen Einheit überein.

Statisches Moment = Kraft \times Hebelarm = $[ML^2T^{-2}]$.

Trägheitsmoment = $\Sigma mr^2 = [ML^2]$.

Direktionskraft = $g\Sigma mr = [ML^2T^{-2}]$.

Winkelgeschwindigkeit = $\frac{2\pi}{T} = [T^{-1}]$.

Die mechanischen Größen, deren Einheiten einen Namen haben, sind die Kraft, die Arbeit und Arbeitsintensität.

Die Einheit der Kraft, welche 1 g in 1 sec um 1 cm beschleunigt, wird Dyne genannt. Allgemeine Dimension: $[MLT^{-2}]$.

Die Einheit der Arbeit, welche geleistet wird, wenn die Dyne ihren Angriffspunkt um 1 cm in ihrer Richtung verschiebt, oder wenn der Widerstand einer Dyne in ihrer Richtung auf der Strecke von 1 cm überwunden wird, heisst Erg. Allgemeine Dimension: $[ML^2T^{-2}]$.

Ausser dieser kleinen Arbeitseinheit giebt es noch eine große, welche auf dem Elekrikerkongress zu Paris im Jahre 1881 mit Rücksicht auf elektrische Messungen aufgestellt und Joule¹⁾ genannt worden ist. 1 Joule = 10^7 Erg.

Noch eine Einheit bedarf der Erwähnung, nämlich diejenige der Arbeitsstärke oder des Effekts. Darunter versteht man die in der Sekunde geleistete Arbeit. Man nennt sie das Sekundenerg. Dimension: $[ML^2T^{-2}]$.

Auch für die Arbeitsstärke ist von dem Elekrikerkongress eine größere Einheit gewählt worden, welche ebenfalls 10 Millionen mal größer ist als das Sekundenerg. Diese größere Einheit wurde zu Ehren des großen Erfinders Watt²⁾ mit dessen Namen belegt. 1 Watt = 10^7 Sekundenerg.

In der Technik werden als Einheiten der Arbeit und der Arbeitsstärke das Kilogrammometer und die Pferdekraft benutzt.

1) Die Bezeichnung ist zu Ehren des hervorragenden englischen Physikers Joule gewählt. James Prescott Joule, geboren am 24. December 1818, war Bierbrauer in Salford bei Manchester. Unter den Experimentaluntersuchungen, durch die er die Physik förderte, sind jene grundlegend gewesen, welche sich auf die durch die mechanische Arbeit hervorgebrachte Wärme und auf die Wärmewirkungen des elektrischen Stromes beziehen. Er starb am 11. Oktober 1889 in dem Städtchen Sale bei Manchester. (Hovestadt, Lehrbuch der absol. Mafse.)

2) James Watt wurde am 19. Januar 1736 zu Greenock in Schottland geboren. Die wichtigsten unter seinen vielen Erfindungen beziehen sich auf die Dampfmaschine. Die heute angewandte Maschine ist im wesentlichen noch die von ihm erfundene. Er starb am 19. August 1809 in Heathfield bei Birmingham. England hat ihm in der Westminsterabtei eine Statue gesetzt. (Hovestadt, Lehrbuch der absol. Mafse.)

Da die Kraft, mit welcher 1 kg nach der Erde gezogen wird, 1000 g die Beschleunigung 981 cm erteilt, so misst dieselbe $981 \cdot 10^3$ Dynen. Und da 1 kgmeter diese Kraft um 100 cm verschiebt, so ist

$$1 \text{ Kilogramm-meter} = 981 \cdot 10^5 \text{ Erg} = 9,81 \cdot 10^7 \text{ Erg} = 9,81 \text{ Joule.}$$

Die Pferdekraft leistet in der Sekunde eine Arbeit von 75 Kilogramm-metern. Das Zeichen für sie ist *PS*. Manche bezeichnen eine Pferdestärkestunde mit *PSSt*. Auch die englischen Bezeichnungen *HP* (*horse—power*) und *HPH* (*horse—power—hour*) sind in Gebrauch. Freilich bezogen sich dieselben ursprünglich auf eine etwas gröfsere Einheit, da die englische Pferdestärke zu 550 Fufspfund in der Sekunde angenommen wird und also rund 76 Kilogramm-meter in der Sekunde beträgt. Man hat aber die englischen Bezeichnungen auch auf die von uns angenommene Pferdekraft und Pferdekraftstunde übertragen.

$$\begin{aligned} 1 \text{ Pferdekraft} &= 75,9,81 \cdot 10^7 \text{ Sekundenerg} \\ &= 735,75 \text{ Watt.} \\ 1 \text{ Watt} &= 0,00136 \text{ Pferdekraft.} \\ 1 \text{ engl. Pferdekraft} &= 745,56 \text{ Watt.} \end{aligned}$$

Aus den soeben auseinandergesetzten Grundgröfsen leiten sich in einfacher Weise die physikalischen Gröfsen der Mechanik der Flüssigkeiten und luftförmigen Körper ab. Es führt über den Plan dieser Arbeit hinaus, diese Gröfsen alle absolut auszudrücken und ihre Dimensionen anzugeben. Nur von einer soll noch gesprochen werden, nämlich dem Barometerstand.

Es ist schon oben angegeben worden, dafs für die Technik und das praktische Leben die Veranschaulichung der Krafteinheit die Veranlassung gegeben hat, nur das irdische Mafssystem zu gebrauchen und von der Anwendung des absoluten Systems abzusehen. Bei der Messung des Luftdrucks läfst sich die Wissenschaft von demselben Grundsatz leiten.

Der Luftdruck wird auf zweierlei Weisen gemessen. Die eine Messung geschieht durch die Höhe der Quecksilbersäule von 0° , welche durch den Luftdruck im Gleichgewicht gehalten wird. Dabei wird in den meisten Fällen davon abgesehen, dafs diese Höhe des Barometerstandes nicht allein von dem Luftdruck, sondern auch von der am Beobachtungsorte geltenden Gröfse der Schwerkraft bestimmt wird. Denn an einem anderen Orte und in einer anderen Höhe ist der Druck aller Körper, also auch der Druck einer Quecksilbersäule, unter sonst gleichen Umständen, infolge des verschiedenen Wertes der Schwerkraft verschieden grofs. Um nun einen unbedingten Vergleich der an den verschiedenen Orten beobachteten Barometerzustände zu ermöglichen, führt man dieselben nicht nur auf die Temperatur von 0° zurück, sondern auf diejenigen, welche bei der Schwerkraft unter 45° am Meeresspiegel vorhanden sein würden. Dieses geschieht, indem der beobachtete und schon auf 0° zurückgeführte Barometerstand

noch mit $\frac{g}{g_{45}}$ multipliziert wird. Die andere Messung des Luftdrucks beruht darauf dafs man als Einheit des Druckes die irdische Krafteinheit, das Kilogramm oder das Gramm, anwendet. In dieser Einheit gemessen, hängt der Luftdruck auch noch von dem Inhalte der gedrückten Fläche ab. Man mufs daher noch festsetzen, dafs man den auf die Flächeneinheit ausgeübten Druck zugrunde legt. Nimmt man als Querschnitt

des Barometerrohres die Flächeneinheit, 1 cm^2 , so stehen beim Normalabdruck, also 76 cm Barometerhöhe, 76 cbcm Quecksilber auf der Flächeneinheit und üben daher auf dieselbe einen Druck aus, welcher gleich $76 \cdot 13,596 \text{ g}$, d. h. $1033,3 \text{ g}$ beträgt.

Bei dieser Zurückführung bleiben sämtliche Lehrbücher stehen. Und doch wird man fast von selbst dazu gezwungen, auch den letzten Schritt zu thun und den in Gramm ausgesprochenen Druck in Dynen auszusprechen, indem man mit der Mafszahl der Beschleunigung, in cm berechnet, multipliciert. Es beträgt dementsprechend die Gröfse des Druckes, welcher durch das Gewicht einer Quecksilbersäule von 76 cm Höhe bei einer Temperatur von 0^0 hervorgebracht wird,

$$1033,3 \text{ g Dynen per cm}^2.$$

Da dieser Ausdruck den Faktor g enthält, ändert sich der Druck mit dem Orte. In Berlin ($g=981,28$) ist der Druck jener Quecksilbersäule $1,0188 \cdot 10^6$ Dynen, d. h. etwas über eine Megadyne ($=10^6$ Dynen) per cm^2 . Die Höhe einer Quecksilbersäule, welche einen Druck von genau einer Megadyne per cm^2 erzeugt, ist $74,960 \text{ cm}$. Everett¹⁾ hat vorgeschlagen, die Megadyne per cm^2 als Normalwert einer Atmosphäre zu nehmen, weil durch diese Annahme sämtliche hierauf bezügliche Rechnungen wesentlich vereinfacht würden.

Als Schwierigkeit gegen die absolute Messung des Barometerstandes ist der Umstand genannt worden, dafs die genaue Bestimmung der Erdbeschleunigung dazu erforderlich, und dafs das hierzu erforderliche Reversionspendel nicht überall vorhanden sei. Aber dasselbe ist doch wenigstens an den großen Beobachtungsstationen vorhanden und für diese kann daher die unveränderliche Gröfse g , wenn sie noch nicht bekannt sein sollte, bestimmt werden. So liefs sich wenigstens im engeren Gebiet der Wissenschaft das absolute System auf die Messung einer Gröfse ausdehnen, deren Betrag wegen der allgemeinen Vergleichung unabhängig gemacht werden mufs vom Orte der Beobachtung.

Es giebt aber noch ein zweites Gebiet, in welchem die Anwendung des absoluten C. G. S. Mafssystems auch von der Wissenschaft nicht angewandt wird, nämlich die Wärmelehre.

Die absoluten Mafse in der Wärme.

a) Gewöhnliche Einheiten der Wärme.

In der Wärme sind zwei Systeme in Gebrauch, das gewöhnliche und das mechanische. Das gewöhnliche giebt die Wärmemengen in Calorien und die Temperaturdifferenzen in Graden des Thermometers von Celsius an. Diese beiden Einheiten sind nicht in den Grundeinheiten allein ausgedrückt, das Thermometer steht sogar zu denselben in gar keinem Zusammenhange. Es sind sogenannte empirische Einheiten. Aber einen großen Vorteil bieten sie dadurch, dafs sie überall denselben Betrag haben, dafs sie daher unabhängig von Zeit und Ort der Beobachtung sind und in diesem Sinne auch als absolut bezeichnet werden können. Dabei wird selbstverständlich vorausgesetzt,

1) Physikalische Einheiten und Konstanten S. 82.

dafs bei der Herstellung des Thermometers auf den Luftdruck die nötige Rücksicht genommen ist. Diese Unabhängigkeit wird dann noch durch die auferordentliche Einfachheit im Gebrauch und die unübertreffliche Veranschaulichung des Thermometers erhöht. Unter diesen Umständen ist es erklärlich, dafs man nie von der Anwendung dieser Einheiten absehen wird. Während früher diese beiden Einheiten ohne Zusammenhang mit den mechanischen Einheiten standen, ist durch den ersten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie eine sehr enge Beziehung hergestellt worden. Darnach läfst sich Arbeit in Wärme und umgekehrt Wärme in Arbeit verwandeln, wobei stets die Gröfse der einen der anderen proportional ist. Es ist dieser Satz eine Erweiterung des Satzes von der Erhaltung der lebendigen Kraft in der Mechanik. Während der mechanische Satz aber aussagt, dafs die Veränderung der lebendigen Kraft und die ihr entsprechende Arbeit unter einander gleich sind, ist in dem Satze, welcher die Beziehung zwischen Wärme und Arbeit ausdrückt, nur von Proportionalität die Rede. Das hat seinen Grund darin, dafs die Wärme nicht nach demselben Mafse gemessen wird wie die Arbeit.

Wenn die Verhältniszahl so gewählt wird, dafs sie die Arbeit angiebt, welche einer Wärmeeinheit entspricht, so nennt man sie das mechanische Äquivalent der Wärme; wird sie dagegen so gewählt, dafs sie die Wärmemenge angiebt, welche der Arbeitseinheit entspricht, so nennt man sie das calorische Äquivalent der Arbeit. Beide Werte sind reciprok zu einander. Die Bestimmung der Verhältniszahl ist auf verschiedene Weisen ausgeführt worden. Teils hat man sie durch Schlüsse aus schon vorhandenen Daten abzuleiten, teils durch besonders für diesen Zweck angestellte Versuche zu bestimmen gesucht.

Durch Rechnung ist das mechanische Äquivalent zuerst durch Robert Mayer gefunden worden. Allerdings ist der Wert, den Mayer in seiner ersten Abhandlung: „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“ im Jahre 1842 auf 365 Kilogramm-meter angiebt, ungenau. Dies rührte aber nicht daher, dafs die Rechnung nach falschen Grundsätzen durchgeführt sei, sondern vielmehr daher, dafs sie sich auf die ungenauen Zahlenwerte der specifischen Wärmen der Luft bei konstantem Druck und konstantem Volumen stützte, welche Delaroche und Bérard gegeben hatten. In der zweiten Arbeit, welche Mayer 1845 veröffentlichte und „Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel“ betitelte, giebt er nicht blofs das Äquivalent kurz wie in der ersten Abhandlung an, sondern auch die ausführliche Rechnung, wobei er die richtigeren Bestimmungen der specifischen Wärmen der Luft von Regnault benutzt und daher auch zu dem richtigen Resultat gelangt. Bezüglich der experimentellen Bestimmung des mechanischen Äquivalents der Wärme ist vorzugsweise dem englischen Physiker Joule das Verdienst zuzuschreiben, mit grösster Umsicht und Sorgfalt dieses Verhältnis im Jahre 1849 festgestellt zu haben, nachdem er schon seit 1843 zu demselben Zwecke ähnliche Versuche, wenn auch mit weniger Übereinstimmung ausgeführt hatte.

Er verfuhr meist so, dafs er fallende Gewichte eine bekannte Arbeit leisten liefs, welche ganz auf Hervorbringung von Reibung in Flüssigkeiten oder zwischen festen Körpern verwandt, d. h. in Wärme verwandelt wurde, die nun kalorimetrisch sich bestimmen liefs. In einer ersten, sehr ausgedehnten Versuchsreihe wurde Wasser mit Hülfe eines durch fallende Gewichte gedrehten Schaufelapparates in einem Gefäfse ge-

rührt. Das Gefäß war so eingerichtet, daß nicht die ganze Wassermasse in gleichmäßige Rotation kommen konnte, sondern daß das Wasser, nachdem es in Bewegung gesetzt war, immer wieder durch feststehende Schirme in seiner Bewegung gehemmt wurde. Hierdurch mußten vielfache Wirbel entstehen, welche eine bedeutende Reibung verursachten. Das in englischen Maßen ausgedrückte Resultat ist, daß zur Hervorbringung der Wärmemenge, welche ein englisches Pfund Wasser um einen Grad Fahrenheit erwärmen kann, eine Arbeit von 772,695 engl. Fufspfund gehört.

In zwei anderen Versuchsreihen wurde in ähnlicher Weise Quecksilber gerührt, und das Resultat war 774,083 Fufspfund. Endlich wurden in 2 Versuchsreihen Gufeisenstücke an einander gerieben, welche sich unter Quecksilber befanden und an dieses die erzeugte Wärme abgaben. Das Resultat war 774,984 Fufspfund. Unter allen seinen Resultaten betrachtete Joule das beim Wasser gefundene als das genaueste und indem er wegen des Tones, der beim Rühren erzeugt wurde, noch etwas den gefundenen Wert erniedrigen zu dürfen glaubte, giebt er schließlic 772 Fufspfund als den wahrscheinlichsten Wert an. Rechnet man diese Zahl in die entsprechende Zahl im französischen Maßsystem um, so erhält man das Resultat, daß zur Erzeugung der Wärmemenge, welche ein Kilogramm Wasser um 1° Celsius erwärmen kann, eine Arbeit von 423,55 Kilogrammometer gehört. Ganz ähnliche Werte ergeben sich aus den zahlreichen und mannigfachen Versuchen von Hirn¹⁾, der teils nach den Methoden von Joule, teils nach anderen Methoden die Arbeitsmenge bestimmte, welche zur Erzeugung einer Wärmeinheit aufgewandt werden muß. Aus der Reibung des Wassers erhielt er die Zahl 432 kgm für 1° C. bei Versuchen in einem Reibungsapparat, welcher dem von Joule ähnlich war; die Zahl 433 kgm bei der Reibung des Wassers in engen Röhren, durch welche das Wasser mit hohem Druck hindurchgepreßt wurde. Einen mit dem von Joule gefundenen fast identischen Wert (425 kgm für 1° C.) erhielt er aus Stofversuchen, indem er Bleimassen durch einen kräftigen Stof deformierte.

Die vorstehende Darstellung ist deshalb gegeben worden, damit man daraus ersehe, daß der Wert des mechanischen Äquivalents innerhalb bestimmter, wenn auch enger Grenzen schwankt. Dieses Schwanken ist wohl auch die Ursache, daß das Äquivalent selbst von Lehrbüchern, welche sonst absolutes Maß gebrauchen, im technischen System, d. h. in kgm, angegeben wird. Auch das Lehrbuch von Kaiser vermeidet die Angabe in Erg. Dasjenige von Börner nimmt als Mittelwert des Äquivalents schließlic 424 kgm an und setzt diesen Wert unter der Voraussetzung, daß $g=981$ cm ist, $=416.10^8$ Erg.

b) Mechanische Einheit der Wärme.

Seitdem der Satz von Wärme und Arbeit aufgestellt worden ist, infolge dessen diese beiden sich gegenseitig ersetzen können, bot sich oft die Notwendigkeit, Größen zu bilden, welche Wärme und Arbeit als Summanden enthalten. Da nun aber Wärme und Arbeit nach verschiedenen Mäßen gemessen werden, so kann man in einem solchen Falle nicht einfach sagen, die Größe sei die Summe der Wärme und der Arbeit, son-

1) Hirn, Théorie mécanique de la chaleur. II. édition I. Teil p. 54 ff.

dern man muß entweder sagen: die Summe der Wärme und des Wärmewertes der Arbeit, oder die Summe der Arbeit und des Arbeitswertes der Wärme.

Wegen dieser Unbequemlichkeit hat Rankine vorgeschlagen, für die Wärme eine andere Einheit einzuführen, nämlich diejenige Wärmemenge, welche der Arbeitseinheit entspricht. Diese Wärmeeinheit nennt man die *mechanische*. Nimmt man als Arbeitseinheit das Erg an, so gehört die mechanische Einheit zu dem absoluten System. Nimmt man dagegen als solche das Kilogrammometer, so ist das irdische System zugrunde gelegt.

Der allgemeinen Einführung der mechanischen Wärmeeinheit, sowohl der absoluten als auch der technischen, ist der Umstand hinderlich gewesen, daß die bisher gebräuchliche Wärmeeinheit eine Größe ist, welche mit den gewöhnlichen kalorimetrischen Methoden, die meistens auf der Erwärmung des Wassers beruhen, innig zusammenhängt, so daß dabei nur geringe, auf sehr zuverlässige Messungen gestützte Reduktionen nötig sind, während die mechanische Wärmeeinheit außerdem, daß sie dieselben Reduktionen verlangt, noch das mechanische Äquivalent der Wärme als bekannt voraussetzt, eine Voraussetzung, die nur annäherungsweise erfüllt ist, wie wir oben gesehen haben. Indessen bei den theoretischen Entwicklungen der mechanischen Wärmetheorie, bei denen die Beziehungen zwischen Arbeit und Wärme besonders oft vorkommt, ist wiederholt wegen der Vorteile, welche die Einführung der mechanischen Wärmeeinheit gewährt, von dieser Gebrauch gemacht worden, so besonders von Clausius in seinem diesbezüglichen Lehrbuche. Alsdann braucht im ersten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie die Wärme der ihr entsprechenden Arbeit nicht bloß proportional, sondern kann ihr gleich gesetzt werden. Aber wiederum wird auch von Clausius nur das Kilogrammometer und nicht das Erg gebraucht. Wenn jedoch auch die dem Erg äquivalente Wärme als Wärmeeinheit gebraucht wird, so könnte das daran für die Wärmemessung abgeleitete System doch nicht als vollkommen absolutes bezeichnet werden, solange die Temperaturdifferenzen noch nach einem willkürlichen Maße bestimmt werden. Es ist nun zwar auch möglich, hierfür eine absolute Einheit festzusetzen, indem man als absolute Einheit der Temperaturerhöhung diejenige erklärt, welche an der Masseneinheit Wasser durch Zufuhr der absoluten Wärmeeinheit hervorgebracht wird. Allein dieser Versuch ist nur von einem Gelehrten gemacht worden, nämlich von Herwig, und es ist wohl keine Aussicht vorhanden, daß man von diesem zweiten mechanischen und eigentlich absoluten System der Wärmegrößen jemals praktischen Gebrauch machen wird.

Schlussbetrachtungen.

Die Weiterbildung des absoluten Maßsystems hat sich nach 2 Richtungen hin erstreckt. Einmal hat man dafür Sorge getragen, die Grundeinheiten in unzweideutiger Weise und in demselben Betrage festzusetzen und sie vor jeglicher Veränderung zu schützen. Dann hat man Vorschläge gemacht, entweder statt der drei unabhängigen

Grundeinheiten nur zwei oder eine zuzulassen oder aber die Anzahl der Grundeinheiten nicht zu beschränken, jedoch an Stelle „der nur eine beschränkte Bedeutung besitzenden Masse“ die Energie einzuführen.

Was den ersten Punkt anbelangt, so leuchtet von selbst ein, daß die wertvollen Ergebnisse der physikalischen Forschungen ihre Bedeutung verlieren, sobald über die angewandten Grundeinheiten Zweifel möglich sind. So lassen sich Resultate derselben Art, welche aus verschiedenen Quellen stammen, nur dann mit einander in Beziehung setzen oder vergleichen, wenn sie entweder sich auf dieselben Maßeinheiten beziehen, oder wenn das Verhältnis ihrer Grundeinheiten bekannt ist. Und wenn ferner der wissenschaftliche Besitz der Gegenwart, soweit er auf Messen und Wägen beruht, auch den zukünftigen Geschlechtern übermittelt werden soll, so müssen die Werte der Grundeinheiten nicht nur in der Gegenwart überall dieselben sein, sondern auch in der Zukunft unverändert bleiben oder in derselben Größe wieder gefunden werden können.

Diese beiden Gesichtspunkte der allgemeinen Übereinstimmung und der unveränderlichen Erhaltung oder Wiederherstellung haben zwar bei der Wahl der französischen Grundeinheiten vorgewaltet. Denn gerade um für alle Völker annehmbare und sich stets gleichbleibende Maße zu schaffen, suchte man von der Natur selbst gebotene Originale zugrunde zu legen und diese glaubte die von der Akademie der Wissenschaften zu Paris am Ende des vorigen Jahrhunderts zur Herstellung neuer Maßeinheiten eingesetzte Kommission in der Länge des Meridians und der Rotationsdauer der Erde gefunden zu haben. Wenn aber die Frage zu beantworten ist, ob nun auch das Beabsichtigte erreicht ist, so muß diese Frage verneint werden, wie aus dem Folgenden hervorgeht.

Am 30. März 1791 genehmigte die französische Nationalversammlung den Vorschlag der Kommission der Akademie, daß der in zehn Millionen gleiche Teile zerlegte Meridianbogen vom Äquator über Paris bis zum Nordpol die Längeneinheit abgeben, und der Wasserwürfel, dessen Kante dem 100. Teil dieser Längeneinheit gleichkommt, die Einheit der Masse darstellen soll. Es bestand also die Absicht, die Einheiten der Länge und der Masse auf die Größe der Erde und die größte Dichte des Wassers zurückzuführen. Gleichzeitig wurde angeordnet, Prototypen für diese Maßeinheiten herzustellen. Die hierfür erforderlichen und schwierigen Messungen nahmen indessen erhebliche Zeit in Anspruch. Um die Einführung der neuen Einheiten nicht allzusehr zu verzögern, beschloß daher die Nationalversammlung am 7. April 1795 ein vorläufiges Meter einzuführen, welches sich auf die früheren Gradmessungen stützte, indem man voraussetzte, daß die neuern Arbeiten keine großen Änderungen bewirken würden.

Am 23. April 1799 gab endlich die Kommission nach Abschluß der Vermessungsarbeiten ihren Bericht ab, durch welchen das Meter auf $443,^{\text{m}}2958$ berechnet wurde. Durch ein Dekret vom 10. December 1799 ward darauf das neue Maß als *mètre vrai et définitiv* zu $443,^{\text{m}}296$ des altfranzösischen Maßes angenommen. Gleichzeitig wurde ein Stab von der bezeichneten Länge, sowie ein Kilogrammgewicht, beide aus Platin, als Prototypen im Staatsarchiv zu Paris niedergelegt.

Wie Dove richtig bemerkt, fällt mit dieser gesetzlichen Bestimmung die ursprüngliche Festsetzung des Meters als zehnmillionster Teil des Erdquadranten weg, insofern dadurch eine Berichtigung seiner Länge durch spätere genauere Messungen der Erde ausgeschlossen wird. Thatsächlich haben teils neuere Messungen, teils Revision der

Rechnungen für die ursprünglich bestimmte Größe des Meters einen etwas abweichenden Wert ergeben. Nach Bessels Untersuchung, welcher 10 Gradmessungen zugrunde liegen, müßte das Meter 443,334 Pariser Linien betragen, so daß es $0,000036$ oder $0,0000856$ zu kurz ist. Wenn also das Meter nach seiner Grundbestimmung als der zehnmillionste Teil des Meridianquadranten hergestellt werden sollte, würde es um $\frac{1}{11000}$ seines Betrages länger gefunden werden. Aber auch abgesehen von diesem Rechenfehler würde doch nie mehr das Meter genau in derselben Größe aufgefunden werden, weil die Messung des Erdmeridians sich aus sehr vielen Messungen zusammensetzt und daher jede neue Messung desselben zu einem etwas andern Resultate führen muß.

Unter diesen Umständen läßt sich eine allgemeine Übereinstimmung der Längen und Masseneinheit nicht erzielen, wenn es jedem Staat überlassen bleibt, diese Einheiten von dem Naturmaße abzunehmen, ebensowenig würde eine spätere genaue Wiederherstellung nach Verlust des Originals möglich sein. Eine völlige Übereinstimmung ist nur im engsten Anschluß an die französischen Ureinheiten zu erzielen, vorausgesetzt, daß die Unveränderlichkeit derselben gesichert und bei ihrer Vielfältigkeit mit hinreichender Sorgfalt verfahren wird. Die französische Verwaltung hat sich dieser Aufgabe nicht gewachsen gezeigt, vielmehr war, durch die Sorglosigkeit der früheren Verwaltung des metrischen Urmaßes und Uргewichts und durch die nicht genügende Zuverlässigkeit der seit Jahrzehnten in Paris ausgegebenen Kopien eine empfindliche Unsicherheit eingerissen.

Diese Unsicherheit bezog sich besonders auf die Längenmaße und war zumteil in der Natur der Verhältnisse begründet. Denn der Platinstab, welcher das Urmeter darstellte, war aus einem doppelten Grunde nicht gut geeignet, daß man genaue Kopien von demselben anfertigte. Einmal hat sich das Platin als zu weich herausgestellt und dann war der Platinstab wegen seiner geringen Querschnittsdimensionen zu biegsam. Als daher auf der zweiten Konferenz der Mitglieder der „Europäischen Gradmessung“ in Berlin 1867 beschlossen wurde, für alle europäischen Länder das Meter als Längeneinheit einzuführen, wurde auch der Plan gefaßt, zur Herstellung eines neuen, zweckmäßigeren Urmeters, dessen Länge von jener des mètre des archives möglichst wenig abweichen sollte und zur Anfertigung und Vergleichung der für die verschiedenen Länder bestimmten Kopien eine internationale Kommission zu bilden. Dieser Vorschlag wurde von der französischen Regierung anfangs mit Mißtrauen aufgenommen. Als aber sämtliche Staaten Europas mit Ausnahme Englands, Hollands und Griechenlands dem Beschlusse der Mitglieder der „Europäischen Gradmessung“ nach und nach gesetzliche Sanktion gaben, sah sich schließlich die französische Regierung genötigt, zur Regelung der Angelegenheit eine internationale Konferenz zu berufen. Nach wiederholten Zusammenkünften und langwierigen Verhandlungen beschloß die Konferenz im Herbst 1874, die Regierungen der vertretenen Staaten zu ersuchen, ein internationales Institut zu errichten, welches die Arbeiten zur Festsetzung und Erhaltung der Ureinheiten zu übernehmen habe.

Dem Ersuchen wurde am 20. Mai 1875 entsprochen; an diesem Tage schlossen die Vertreter von den europäischen Staaten, den Vereinigten Staaten, Argentinien, Peru und Venezuela in Paris einen Vertrag zur Gründung eines auf gemeinsame Kosten zu gründenden Instituts unter dem Namen: „Internationales Maß- und Gewichtsbureau“,

welches dann auch auf der Höhe von St. Cloud bei Paris erbaut und eingerichtet wurde. Ein „Comité international des Poids et Mesures“ giebt die Anleitung zu den Arbeiten dieses Instituts und überwacht sie. Das „Comité“ selbst steht unter einer „Conférence générale des poids et mesures“, deren Mitglieder bei jeder Berufung dieser Konferenz von den betreffenden Regierungen bestimmt werden.

Die erste Arbeit, welche nun das Institut ausführte, bestand darin, neue Ureinheiten herzustellen, welche die Mängel der alten nicht mehr teilten: und zwar sowohl einen neuen Meterstab als auch eine neues Kilogrammstück. Da das Platin sich als zu weich erwiesen hatte, so wurde beschloßen, die neuen Etalons aus einer Legierung von 90 Prozent Platin mit 10 Prozent Iridium, welche sich durch grofse Härte auszeichnet, herzustellen. Ferner wurde für den Meterstab eine Form gewählt, welche nur eine sehr geringe Biegung zuläfst und die Anbringung der Endstriche auf einer sogenannten neutralen Schicht gestattet, die bei der Biegung keine Längenänderung erleidet. Die alten Urmafse, das Meter und das Kilogramm, welche im französischen Staatsarchiv aufbewahrt wurden, legte man selbstverständlich den neu herzustellenden Ureinheiten zugrunde. Es wurden zuerst mehrere Kopien angefertigt, die möglichst genau die alten Ureinheiten darstellten. Die Stäbe und Cylinder hierfür wurden von Matthey und Comp. in London bezogen. Von diesen Kopien wurde der Meterstab und das Kilogrammstück ausgewählt, die den alten Ureinheiten am nächsten kamen. Diese Arbeit war bis zum Jahre 1882 vollendet. Die Länge des ausgewählten Meterstabes unterscheidet sich von derjenigen des im Archiv aufbewahrten um höchstens $\frac{6}{1000}$ Millimeter und das Gewicht des neuen Kilogramms von demjenigen des ursprünglichen um nicht mehr als $\frac{1}{100}$ Milligramm. Diese beiden Stücke gelten von da ab als die internationalen Ureinheiten.

Von denselben wurden bis zum Jahre 1889 als Kopien dreifsig Meterstäbe und vierzig Kilogrammstücke abgenommen, die als nationale Ureinheiten zur Verteilung gelangen sollten. Der Metallwert aller Stücke beläuft sich auf etwa 4 Millionen Frs. Von dem internationalen Meterstab weicht kein nationaler um $\frac{1}{100}$ mm, von dem internationalen Kilogrammstück weicht kein nationales um 1 Milligramm ab. Die Abweichung ist im ersteren Falle bis auf $\frac{1}{5000}$ Millimeter, im letzteren bis auf $\frac{1}{200}$ Milligramm genau bestimmt.

Im Jahre 1889 trat die erste Generalkonferenz zusammen, um die Arbeitsergebnisse des Instituts zu prüfen und die nationalen Urmafse durch das Loos zu verteilen. Deutschland fielen hierbei zwei besonders gute Stücke zu, die den internationalen Ureinheiten fast genau gleich sind. Die Generalkonferenz beauftragte eine besondere Kommission, die beiden Ureinheiten im tiefsten Keller des Instituts unter Verschluss zu bringen. Es geschah dies am 28. September 1889.

Mit der Herstellung möglichst genauer Kopien der Ureinheiten für die einzelnen Länder sind die Arbeiten noch nicht erschöpft, welche das internationale Institut neben der dauernden Überwachung der Urmafse auszuführen hat. Dem Institut bleibt noch eine Reihe von weiteren Aufgaben zu lösen, von denen besonders eine hier Erwähnung verdient. Es sind begründete Zweifel erhoben worden, ob das Meter und das Kilogramm des Archivs ursprünglich der Forderung genau entsprochen haben, nach welcher tausend Kubikcentimeter Wasser bei der Temperatur der gröfsten Dichte (4° C.) ein Kilogramm

wiegen sollten. Da die jetzt gültigen Ureinheiten, wenn auch nur sehr wenig, so doch etwas von den Einheiten des Archivs abweichen, so gilt für sie erst recht das Gesagte. Es ist daher von Wichtigkeit zu ermitteln, bei welcher Temperatur nach den jetzt gültigen internationalen Mafseinheiten 1000 Kubikcentimeter Wasser genau 1 Kilogramm wiegen.

Es lässt sich nicht leugnen, dass man auf dem gegebenen Boden das Vollkommenste geschaffen hat. Aber von dem Ziel, was die französische Akademie am Ende des vorigen Jahrhunderts erreichen wollte, ist man weit verschlagen worden. Und doch hatte sie es in der Hand, eine Längeneinheit (und damit auch Masseneinheit) zu bestimmen, welche von der Natur geboten wird und die zu jeder Zeit und ohne besonders große Vorrichtungen und Mühen abgenommen werden kann und unveränderlich bleibt, nämlich die Länge des Sekundenpendels. Bereits Huyghens, welcher durch seine Erfindung der Pendeluhr (im Jahre 1658) auf den unmittelbaren Zusammenhang zwischen Pendellänge und Schwingungsdauer aufmerksam wurde, hatte 1664 vorgeschlagen, die Länge des Sekundenpendels als das natürliche Maß zur Begründung eines neuen Systems zu machen. Huyghens entwickelte ausführlich seine Ansicht in seinem 1673 erschienenen Werke: *Horologium oscillatorium*, worin er als Längeneinheit den 3. Teil der Länge des einfachen, mittlere Zeit schlagenden Sekundenpendels aufstellte und mit „Zeitfuß“ benannte. Der Vorschlag von Huyghens fand sofort allgemeinen Beifall. Besonders eifrig traten die beiden französischen Gelehrten Bouguer und la Condamine für denselben ein. Und als in Frankreich am Ende des vorigen Jahrhunderts eine neue Maßregulierung vorgenommen werden sollte, beschloß man zuerst, die Länge des Sekundenpendels zugrunde zu legen. Die *Assemblée nationale* erließ am 8. Mai 1790 auf Antrag von Talleyrand-Périgord ein Dekret, worin die Akademie der Wissenschaften zur Bildung einer Kommission aufgefordert wird, um den Entwurf zu einem auf der Pendellänge begründeten Maßsystem auszuarbeiten. Am 16. März 1791 erstattete die Kommission ihren Bericht und sprach sich gegen die Pendellänge aus, weil die Reinheit räumlicher Maße durch Einmischung eines fremden Elements, nämlich der Zeit, getrübt werde, und weil außerdem die zugrundeliegende Zeiteinheit willkürlich gewählt sei. Die Kommission schlug daher vor, durch eine Gradmessung die Größe des Quadranten eines Meridians zu bestimmen und den zehnmillionsten Teil davon als Maß zu nehmen. Dieser Vorschlag wurde dann am 30. März 1791 genehmigt.

Von den beiden Gründen, welche die Kommission gegen die Länge des Sekundenpendels als Längeneinheit anführte, ist der letzte völlig hinfällig; denn das Meter ist ein ebenso willkürlicher Teil von dem Erdquadranten wie die Sekunde von dem Tag. Was aber den ersten Punkt anbelangt, so wäre die Abhängigkeit aller Grundeinheiten von einer einzigen nach neuerer Anschauung kein Nachteil, sondern ein Vorteil gewesen.

Auch das Bedenken läßt sich gegen die Länge des Sekundenpendels nicht geltend machen, daß dieselbe infolge ihrer Abhängigkeit von der Größe der Erdbeschleunigung eine Funktion des Ortes sei und daß daher nicht die Pendellänge im allgemeinen, sondern nur die eines bestimmten Ortes als Längeneinheit gewählt werden könne. Denn zunächst sind die Pendelbeobachtungen mit einer so großen Genauigkeit ausgeführt worden, daß die Bestimmung einer einzelnen Pendellänge für einen gegebenen Ort bis

auf $\frac{1}{135000}$ sicher betrachtet werden kann. Mit so großer Genauigkeit liefs sich also das Urmafs, wenn die Pendellänge zugrunde läge, an dem Ort, an dessen Lage die normale Länge geknüpft wäre, stets wieder herstellen. Aber auch an anderen Orten liefs sich aus der daselbst beobachteten Pendellänge die normale Länge nach den bekannten Formeln:

$$g_{\varphi} = g_0 (1 + 0,0052 \sin^2 \varphi)$$

$$\text{und } g = \pi^2 \lambda,$$

$$\text{also auch } \lambda_{\varphi} = \lambda_0 (1 + 0,0052 \sin^2 \varphi)^1)$$

bis auf $\frac{1}{18000}$ genau berechnen.

Eine Schwierigkeit, welche gegen die Sekunde als unabhängige Grundeinheit geltend gemacht wird, lässt sich allerdings nicht heben. Die Rotationsdauer der Erde ist nämlich nicht unveränderlich. Denn nach den heutigen Anschauungen über die Beschaffenheit des Erdkörpers ist es wahrscheinlich, dass die Hauptmenge des Erdinnern aus einer flüssigen Masse besteht, deren Teile einer leichten Beweglichkeit unterliegen. Verschiedene Ursachen vulkanischen und plutonischen Charakters werden daher gröfsere Massenverschiebungen in bezug auf die Rotationsaxe bewirken, so dass Unregelmäfsigkeiten in der Erdrotation auftreten müssen, welche möglicherweise einen sogar sprungweise sich gestaltenden Verlauf haben. Aber auch ohne Hypothese über die innere Beschaffenheit des Erdkörpers lässt sich zeigen, dass die Rotationsgeschwindigkeit der Erde fortwährend Änderungen erfahren muss. Denn da sich die Erde in einem Raume bewegt, der viel kälter als sie selbst ist, so verliert sie jedenfalls ununterbrochen Wärme an den Weltraum, wodurch die Oberflächenteile sich der Rotationsaxe nähern und ihre bisherige Rotationsgeschwindigkeit sich beschleunigen muss. Nur in dem einzigen Falle, dass die — wahrscheinlich aber auch veränderliche Wärmestrahlung von der Sonne der Erde genau soviel Wärme zuführt, als diese an den Weltraum abgibt, würde die Wirkung ausgeglichen werden. Dieser ganz unwahrscheinliche Fall müsste aber erst bewiesen werden; denn eine übrigbleibende Temperaturabnahme von nur 0,02 Grad Celsius würde den mittleren Erdradius schon um 1 m und die Tageslänge um etwa 0,02 Sekunden verkürzen.

Auf die Erdrotation wirken noch zwei andere Ursachen, welche die Drehungsgeschwindigkeit stetig verzögern müssen, von denen wir aber nicht sagen können, ob sie die durch die Wärmeabgabe bewirkte Änderung überwiegen, ob sie diese zum kleinen oder großen Teil kompensieren. Die eine dieser beiden Ursachen, das Wandern der von Sonne und Mond hervorgerufenen Flutwelle der Ozeane in einer der Richtung der Rotationsbewegung der Erde entgegengesetzten Richtung und ihr Anschlagen an die Ostküsten der Kontinente erzeugt durch die dabei auftretende Reibung eine Verzögerung der Erdrotation, deren Gröfse sich zwar der Rechnung noch entzieht, aber von Hertz auf 22 Sekunden im Jahrhundert geschätzt wird. Eine zweite Ursache bilden die durch die Sternschnuppenfälle teilweise zu unserer Kenntnis gelangenden Niederschläge staubwolkenartiger kosmischer Materie.

Aus der Gesamtheit der die Erdrotation stetig ändernden Ursachen ergibt sich,

1) g_{φ} und g_0 bedeuten die Beschleunigungen der Schwere in den Breitengraden φ und 0, λ_{φ} und λ_0 die entsprechenden Längen des Sekundenpendels.

dafs die Voraussetzung der gegenseitigen Ausgleichung dieser Veränderungen sehr unwahrscheinlich ist, dafs wir daher nicht mit einer konstant bleibenden Drehgeschwindigkeit der Erde und daher ebensowenig mit einer gleichmäfsig verlaufenden Zeit rechnen können¹⁾.

Maxwell hat aus dieser Schwierigkeit den folgenden Ausweg vorgeschlagen. Bezeichnen wir nach ihm durch eckige Klammern die Dimensionen des von denselben eingefafsten Ausdrucks, mit M eine Masse, mit L eine Länge, mit T eine Zeit, so ist die Anziehung zwischen zwei schweren Massen m (in Gravitationsmafs gemessen) in der Entfernung r :

$$\left[\frac{m^2}{r^2} \right] = \left[\frac{M \cdot L}{T^2} \right] \text{ oder } \left[\frac{M}{L^3} \right] = \left[\frac{1}{T^2} \right].$$

Links steht eine Dichtigkeit, rechts eine Funktion der Zeit. Setzen wir also, wie bisher, die absolute Dichte des Wassers gleich eins, während die Einheit der Masse nach Gravitationsmafs bestimmt ist, so ist dadurch ein von der veränderlichen Rotation der Erde unabhängiges Zeitmafs gegeben, und es bliebe nur die Überlieferung eines einzigen Mafses, das Meter, der Tradition überlassen. Aber auch dieses liefse sich absolut definieren, wenn man eine unveränderliche Geschwindigkeit, z. B. die Lichtgeschwindigkeit im freien Äther zu Hilfe nähme.

So würde z. B. die Umlaufzeit T eines kleinen Trabanten, der dicht an der Oberfläche einer Kugel aus reinem Wasser von normaler Dichtigkeit D umliefe, sich unabhängig von dem Radius der Kugel in Gravitationsmafs finden:

$$T^2 = \frac{3\pi}{D},$$

und die Lichtgeschwindigkeit

$$v = \frac{L}{T} = L \sqrt{\frac{D}{3\pi}},$$

durch welche letztere Gleichung die Länge L gegeben wäre. Dieses System würde uns also von der Überlieferung jedes traditionellen Mafses frei machen²⁾.

Während der soeben geschilderte Vorschlag alle Grundeinheiten auf eine einzige zurückführt, ist neuerdings von W. Ostwald³⁾ noch ein anderer Versuch gemacht worden, das absolute Mafssystem umzubilden. Seine positiven Vorschläge kommen im Wesentlichen darauf hinaus, zunächst für sämtliche Gebiete als gemeinsame Grundeinheiten die der Länge, Zeit und Energie einzuführen.

Für die Mechanik genügen diese Einheiten; für jedes andere Gebiet — Elektrizität, Magnetismus, Wärme, strahlende Energie, Chemie — muss dann noch eine vierte, dem jeweiligen Gebiete speziell angehörige Einheit festgesetzt werden. Hierdurch wird die Anwendung absoluter Mafse auch für die Erscheinungen der Wärme, der strahlenden Energie und der chemischen Kräfte ermöglicht — was auf dem von Gauss und Weber angebahnten Wege nicht gelungen war.

1) Vergl. Prof. Deichmüller: Das Grundmafs der Himmelsmechanik im Sitzungsbericht der Niederrhein. Gesellschaft für Natur- und Heilkunde vom 1. Juli 1895.

2) S. Helmholtz, Wied. Annalen, S. 43 u. 44.

3) W. Ostwald, Studien zur Energetik. Ber. d. Sächs. Ges. der Wissenschaften 1891 u. 1892.

Für den Magnetismus ergibt sich hierbei aber eine eigentümliche Schwierigkeit. Augenscheinlich muß die vierte Ostwald'sche Einheit, wenn sie praktisch brauchbar sein soll, entweder sich unverändert aufbewahren lassen (wie das Originalmeter) oder sicher reproduzierbar sein (wie die Siemens'sche Widerstandseinheit). Es giebt aber weder einen unveränderlichen Magnet noch auch einen Ort von unveränderlicher Intensität des Erdmagnetismus, so daß der Ostwald'sche Vorschlag unausführbar wird, wenn man sich auf den Magnetismus allein beschränken will. Unter Hinzuziehung der Elektrizität wird die Aufgabe lösbar: nach Feststellung der elektrischen Masse hätte man als Einheit des magnetischen Momentes (des „Stabmagnetismus“) dasjenige anzusetzen, welches in großer Entfernung gleiche Wirkung ausübt, wie ein die Flächeneinheit umfließender Strom der Stärke 1.
