

Geschichte der absoluten Mafseinheiten.

Von

Dr. A. Kiel.

I.

Erklärung des Begriffs der absoluten Mafseinheiten und Einteilung derselben.

Die Veränderungen der materiellen Natur, welche in der Physik betrachtet werden, sind sämtlich Bewegungsvorgänge und aus solchen hervorgegangene Naturerscheinungen. Es kann daher die Aufgabe der Physik mit denselben Worten bezeichnet werden, mit welchen Kirchhoff die der Mechanik charakterisiert. Wie diese im Besonderen hat auch der übrige Teil der Physik eigentlich keine andere Aufgabe als „die in der Natur vor sich gehenden Bewegungen vollständig und auf die einfachste Weise zu beschreiben.“ Da nun jede Bewegung eine innerhalb der Zeit vor sich gehende Ortsveränderung einer bestimmten Masse ist, so sind zu ihrer Beschreibung die Begriffe von Raum, Zeit und Materie nötig und auch hinreichend. Mit diesen Mitteln muss daher die gesamte Physik ebenso ihr Ziel zu erreichen und die dabei nötigen Hilfsbegriffe zu konstruieren suchen, wie die Mechanik.

Es ist klar, dass für die Bestimmung der räumlichen, zeitlichen und materiellen Beziehungen drei Vergleichungsgrößen vorhanden sein müssen, mit denen die übrigen ihrer Gattung gemessen werden, nämlich eine Längeneinheit, eine Zeiteinheit und eine Masseneinheit. Weil nun jede Größe als Maß für alle gleichartigen Größen dienen kann, so ist die Wahl der genannten Einheiten Sache der Übereinkunft. Gleichwohl verdient ohne Zweifel die Festsetzung solcher Einheiten den Vorzug, die stets in unveränderlicher Größe bleiben und überall und von jedem ohne allzugroße Schwierigkeit bestimmt werden können. Die Originale, von denen solche Einheiten abgenommen werden, müssen selbst im Wechsel der Erscheinungen unveränderlich bleiben. Es leuchtet ein, dass, sobald es gelingt, Mafseinheiten von der soeben gekennzeichneten Eigenschaft herzustellen, diese als absolut bezeichnet werden können. Das Bedürfnis nach solchen Einheiten machte sich erst sehr spät geltend. Die Wissenschaft fand, längst gebräuchliche Maße und Gewichte vor, mit deren Hilfe sie lernte und beobachtete,

und es erging ihr wie dem Handel und Verkehr: erst die Ausbreitung der Beziehungen unter den Völkern drängte sie zur Lösung der schwierigen Aufgabe, ein allgemein geltendes und möglichst constantes Maß aufzusuchen und für alle Zeiten zu sichern, sowie die Werte der alten Maße mit den neu aufgestellten zu vergleichen. Diese Aufgabe ist durch Aufnahme des neufranzösischen Maßsystems wenigstens einigermaßen als gelöst zu betrachten.

Aber dadurch ist zunächst nur die Vorbedingung erfüllt, damit die Wissenschaft das ihr gesteckte Ziel erreiche. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, alle physikalischen Größen durch jene Fundamenteinheiten auszudrücken. Ein Beispiel möge den Sinn dieser Forderung klar machen. Der wichtigste physikalische Begriff ist derjenige der Kraft. Früher hat man nun, um die Intensität einer Kraft zu messen, dieselbe mit einer willkürlich gewählten Kräfteinheit derselben Art verglichen und das hieraus sich ergebende Verhältnis als die Maßzahl der Kraft hingestellt. Als Einheit der mechanischen Kräfte galt das Kilogramm d. h. die Kraft, mit welcher 1 Kubikdecimeter Wasser bei 4° Celsius von der Erde angezogen wird. Die Größe dieser Anziehung ist nicht überall dieselbe, weil die Intensität der Erdkraft nach den Polen zu wächst und nach dem Äquator hin abnimmt. Um also die Kräfteinheit sich nicht von Ort zu Ort ändern zu lassen, musste diejenige Beschleunigung der Erde dafür ausgewählt werden, welche sie unter einem bestimmten Breitengrad ausübt. Unter dieser notwendigen Einschränkung verliert aber das Kilogramm als Kraftmaß jene Eigenschaften, die ein glücklich gewähltes Grundmaß besitzen muss, dass es nämlich an allen Orten herstellbar sei und dass es sich, ohne eine Änderung zu erleiden, transportieren lasse. Um ein Dynamometer dieser Art herzustellen, müsste die Verlängerung einer elastischen Drahtspirale bei Belastung mit einem Kubikdecimeter Wasser an einem bestimmten Normalorte, etwa unter 45° geographischer Breite, gemessen und dann für jeden anderen Ort der Beobachtung das Gewicht festgestellt werden, welches eine gleiche Verlängerung bewirkt. Dieses Verfahren wäre aber weder bequem noch hinlänglich genau. Anders gestaltet sich die Sache, wenn man das Kilogramm nicht als Maß einer Zugkraft, sondern als Maß der Masse betrachtet. Weil sich die Masse des Kilogramms nirgends ändert und durch die gewöhnliche Wage eine genau gleichgroße Masse eines beliebigen Körpers bestimmen lässt, so erhellt hieraus, dass das Kilogramm, und ebenso jedes andere Gewicht als Masseneinheit dienen kann. Man hat dafür das Gramm gewählt. Und um nun zu einem Kraftmaß zu gelangen, nennt man diejenige Kraft die Einheit, welche einem Gramm per Secunde die Beschleunigung von 1 Centimeter erteilt. Eine solche Kraft heisst eine D y n e. Da die Erde unter 45° geographischer Breite einem Gramm die Beschleunigung von 980 cm erteilt, so ist die Intensität ihrer Anziehung daselbst = 980 Dynen.

Die Kräfteinheit dieses Maßsystems ist freilich auch nicht direkt transportabel und auch nicht ohne besondere Schwierigkeiten herstellbar. Aber der große Vorteil, der von selbst in die Augen springt, besteht darin, dass dieses Kraftmaß unabhängig vom Beobachtungsorte gemacht ist und dass es nur abhängt von den gewählten Grundeinheiten der Masse, Länge und Zeit. Außerdem lässt sich die so definierte Einheit auf alle physikalischen Kräfte ausdehnen, auf die magnetischen ebensogut wie auf die elektrischen. Man nennt diese Kräfteinheit wegen ihrer Unabhängigkeit von jedem Orte

und wegen ihrer allgemeinen Gültigkeit ebenfalls absolut. Im Anschluss hieran nennt man die Einheit einer jeden physikalischen Grösse absolut, wenn zu ihrer Definition ausschliesslich die Fundamenteinheiten verwandt werden. Diesen absoluten Einheiten gegenüber stehen die empirischen. Die letzteren werden nicht ausschliesslich auf die Grundeinheiten zurückgeführt und stehen daher entweder in gar keinem oder doch nur in sehr losem Zusammenhange mit den andern Mafseinheiten. Solche empirische Einheiten sind die Calorie und der Temperaturgrad des Thermometers, ebenso die Siemens'sche Widerstandseinheit eines elektrischen Stromes. Die empirischen Mafseinheiten passen zwar nicht in das absolute Mafssystem, aber sie lassen sich doch dafür verwerten, sobald sie durch absolute Einheiten ausgedrückt werden können.

Man kann daher zwei Arten von absoluten Mafseinheiten unterscheiden, nämlich diejenigen im weiteren Sinne oder Fundamenteinheiten und diejenigen im engeren Sinne oder abgeleitete absolute Mafseinheiten. Im Folgenden soll ein geschichtlicher Überblick über die Entwicklung beider Arten gegeben werden.

II.

Geschichte der Fundamenteinheiten.

A. Altes System.

Zwischen den Mafssystemen der Kulturvölker des Altertums und auch der Neuzeit hat ein bestimmter, unverkennbarer Zusammenhang bestanden. Wie mannigfaltig auch die bei den verschiedenen Völkern angewandten Mafse gewesen sind, so leiten dieselben doch wie vielfach verschlungene Fäden, die von demselben Punkte auslaufen, zu einem gemeinsamen Ursprunge. Die vergleichende Betrachtung der Mafse und Gewichte hat zu der Überzeugung geführt, dass das Grundmafs eines Volkes bei einem Teil der anderen Völker unmittelbar eingeführt worden ist, bei dem andern eine Abänderung der zuvor nicht bestimmt geregelten Mafse bewirkt hat, damit ein einfaches Verhältnis zwischen dem fremden und einheimischen System zu Stande kam. Die Meinungen über den Ursprung der geregelten Mafse weichen indes von einander ab. Es können hierbei nur die Ägypter und Babylonier in Betracht kommen, da diese beiden Völker schon frühzeitig gute astronomische Beobachtungen angestellt haben und da die gewaltigen uralten Bauwerke derselben genaue Mafse in unbestimmbar früher Zeit voraussetzen. Die grösste Geltung hatte früher die Ansicht, dass den Ägyptern das Verdienst gebühre, zuerst ein in sich geschlossenes Mafssystem geschaffen zu haben, von welchem die der übrigen Völker sich abgeleitet hätten. Als Grundlage zu demselben soll ihnen eine von der Ausmessung des Erdkörpers entnommene Längendimension gedient haben, ähnlich wie bei dem neufranzösischen System die Länge des Erdquadranten benutzt wurde. Diese Ansicht stützt sich darauf, dass die ägyptische heilige Elle und die Längendimension von grossen Bauwerken (namentlich der grossen Pyramide von Memphis) in einem einfachen Zahlenverhältnis zur Länge eines Meridianquadranten in Ägypten stehen soll. Diese Behauptung wird namentlich von Pancton¹⁾ und Jomard²⁾ verfochten. Aber eine solche

1) Pancton, *Métrologie ou tables pour servir à l'intelligence des poids et mesures des anciens.* Paris 1789.

2) Jomard, *Mémoire sur le système métrique des anciens Égyptiens.* Paris 1817.

Ableitung vindiziert den Ägyptern weitgehende astronomische Kenntnisse und sehr feine mechanische Hilfsmittel, worüber uns jede Andeutung fehlt. Wenn nun auch die von Jomard aufgestellte Behauptung zu verwerfen ist, so kann ich anderseits doch nicht Böckh beipflichten, der Babylonien als Ursprungsland und Heimat der antiken Systeme ansieht. Denn bei den ägyptischen Teilmaßen und -Gewichten ist der decimale Aufbau des Systems zu erkennen, während dem babylonischen, wie wir nachher sehen werden, eine eigentümliche und verwickelte Sexagesimalteilung zu Grunde liegt, worin aber auch decimale Elemente enthalten sind. Nun ist aber das Decimalsystem, als von der Zehnzahl der Finger entnommen, das ursprünglichere, während das Sexagesimalsystem eine schon entwickelte zahlentheoretische Ausbildung voraussetzt und wegen der außerordentlichen Teilbarkeit der Zahl 60 unbedingt vor dem Decimalsystem den Vorzug verdient. Ich kann daher nicht mit C. F. Lehmann, dessen Ausführungen „über das altbabylonische Maß und Gewicht und deren Wanderung“ ich sonst bis auf nur wenige Punkte völlig beistimme, das Decimalsystem als einen Fortschritt auffassen, da es durchaus nicht größere Einfachheit mit bequemerer Verrechnung verbindet. Ich muß es daher nicht an das Ende, sondern an den Anfang der Entwicklung stellen. Damit wird zwar den Ägyptern die Priorität in der Ausbildung eines Maßsystems zugesprochen. Aber dieses schließt nicht aus, dass am Euphrat das Maßsystem diejenige Fassung erhalten hat, welche dem Altertum eigentümlich ist. Die Richtigkeit dieser Ansicht wird durch eine Vergleichung der Maße der verschiedenen Völker mit denen der Babylonier bewiesen. Die Vergleichung muss sich vor allem auf die Gewichte beziehen, weil durch den Handel die mit einander in Beziehung stehenden Völker gezwungen werden, die Gewichte in Einklang zu bringen. Die Längen- und Hohlmaße erfordern keine Übereinstimmung, da sie im Handel mehr oder weniger völlig entbehrlich sind.

Dem babylonischen System liegt, wie schon vorher erwähnt, eine Sexagesimalteilung zu Grunde; es werden die Einheiten durch Potenzen von 60 dargestellt. Jede höhere Einheit ist das Sechzigfache der vorhergehenden. Die Reihe der Zahleneinheiten ist daher folgende:

$$216\,000 \quad 3\,600 \quad 60 \quad 1 \quad \frac{1}{60} \quad \frac{1}{3\,600} \quad \frac{1}{216\,000}$$

Zwischen je zwei solche Einheiten treten noch Sechstel und Zehntel der höheren, ähnlich wie bei dem Duodecimalsystem Drittel und Viertel mit Vorliebe verwandt werden. Lehmann nimmt eine zweite Klasse von Einheiten zu Hilfe, aber trotzdem gelingt es ihm nicht, die Zahl 360 zu konstruieren, welche eine so wichtige Rolle in dem babylonischen System spielt, und mit der wir noch heutzutage bei der Einteilung des Kreises zu rechnen haben.

Bei dem babylonischen Gewichte sind die Grundeinheiten: Talent = 60 Minen à 60 Schekel. Dieses Gewicht hat in uralter Zeit auch den Verkehr mit den Edelmetallen reguliert. Das Sechzigstel der Gewichtsmine, der Schekel, galt als die Goldeinheit. 1 Schekel Gold wog $\frac{1}{60}$ der Gewichtsmine. Die Goldmine betrug jedoch nicht 60, sondern nur 50 Schekel, so dass also das Gewicht der Goldmine $\frac{5}{6}$ der Gewichtsmine betrug. Das Wert-Verhältnis zwischen Gold und Silber war $\frac{40}{3}$. Demnach musste das Silber-Äquivalent eines Goldschekels $\frac{40}{3} \cdot \frac{1}{60} = \frac{2}{9}$ Gewichtsmine wiegen. Ein solches Stück Silber würde aber für den Verkehr zu schwer gewesen sein, weil die Gewichts-

mine ungefähr 1 Pfund betrug. Daher wurde das Zehntel dieses Äquivalents und in Phönizien das Fünftel als Silberschekel eingeführt. Ähnlich wie bei dem Golde machten 50 Silberschekel eine Silbermine aus. Während nun 50 Gold- und ebenso 50 Silberschekel zu einer Gold-, resp. Silbermine gehörten, bildeten erst 60 Goldminen ein Goldtalent und ebenso 60 Silberminen ein Silbertalent. In griechischer Sprache wird aus dem Schekel der Stater, und die Hälfte desselben, welche also $\frac{1}{100}$ Gewichtsmine wiegt, wird Drachme genannt.

Das Verhältnis dieser verschiedenen Gewichtssätze lässt sich folgendermaßen darstellen. Es wiegt:

	S c h e k e l	M i n e	T a l e n t
1 Gewichtsmine	$\frac{1}{60}$ Gewichtsmine	1 Gewichtsmine	60 Gewichtsmine
1 Gold-	$\frac{1}{60}$ Gewichtsmine	$\frac{50}{60}$ Gewichtsmine	50 Gewichtsmine
1 Silber-	$\frac{1}{45}$ Gewichtsmine	$\frac{50}{45}$ Gewichtsmine	$\frac{200}{3}$ Gewichtsmine

Was nun die Beträge dieser Gewichte anbelangt, so haben die in Babylonien und Assyrien gefundenen Gewichtsstücke die merkwürdige Thatsache ergeben, dass daselbst 2 Systeme neben einander bestanden, die man durch die Bezeichnung schwer und leicht zu unterscheiden pflegt. Die schweren Gewichtsstücke hatten das doppelte Gewicht der leichten. Die meisten Gewichte sind in den Ruinen königlicher Paläste gefunden worden und sind als königliche Gewichte bezeichnet. Weil nun diese Bezeichnung auch im alten Testament und bei den klassischen Autoren vorkommt, hielt man bis in die neueste Zeit diese Gewichte für die Normalgewichte. Nach dem ungefähren Betrag der erhaltenen Gewichte berechnet sich die schwere Gewichtsmine auf 1010 g, also etwas mehr als 2 Pfund, und die leichte Gewichtsmine auf 505 g. Indem man nun hiermit die antiken Gewichte verglich, fand man allerdings, dass wegen der bestehenden nahezu einfachen Verhältnisse zwischen diesen und dem babylonischen Gewichte ein Zusammenhang vorhanden sein müsse, aber um eine glatte Übereinstimmung zu erzielen, musste man fast überall entweder erhöhen oder herabsetzen. Unter diesen Umständen ist es ein großes Verdienst, welches C. F. Lehmann deshalb gebührt, weil er nachgewiesen hat, dass diese sogenannten königlichen Gewichte durchaus nicht die einzige Gewichtsnorm bildeten, sondern dass es noch eine andere gab, die Lehmann die gemeine Norm nennt. Von dieser wiegt nach drei wohl erhaltenen Steingewichten die leichte Mine 491,2 g und die schwere Mine 982,4 g. In diesem System wiegt die Silbermine (= $\frac{10}{9}$ Gewichtsmine) 1091,5 g schwer und 545,8 g leicht. Nun beträgt das ägyptische Pfund 90,96 g, wovon das ägyptische Lot den zehnten Teil ausmacht. Also ist die leichte Silbermine so schwer wie 6 ägyptische Pfund, denn $90,96 \text{ g} \times 6 = 545,76 \text{ g}$. Daraus geht hervor nicht nur, dass mindestens in uralter Zeit ein enger Verkehr zwischen Ägypten und Babylonien bestanden haben und das Gewicht aus dem einen Land in das andere übertragen worden sein muss, sondern auch, dass das Gewicht gemeiner Norm in Babylonien das frühere war. Dieses uralte babylonische Gewicht erscheint noch unter den

1) Altbabylonisches Maß und Gewicht und deren Wanderung, veröffentlicht in der Zeitschrift für Ethnologie, 1889, IV. Heft.

Ptolemäern in Ägypten, findet sich in Syrien, in Attika und in Italien. Das römische Pfund hat sich unzweifelhaft aus ihm abgeleitet; denn wenn man das römische Pfund zu 327,45 g rechnet, so beträgt dasselbe $\frac{2}{3}$ der genannten Gewichtsmine. Auch in Gallien muss das Gewicht Geltung gehabt haben, denn der Normalbetrag des früheren französischen Pfunds von 489,50 g ist bis auf 2,2 g identisch mit der babylonischen Mine.

Dasselbe gilt von dem alten hannoverschen Pfund von 489,6 g. Fast genau ist die Norm dieses altbabylonischen Gewichts gewahrt geblieben in dem altholländischen Pfund Troy, dessen Betrag 492,17 g ist.

Wie in den soeben erwähnten Fällen die Gewichtsmine, ist in anderen die Gold- und Silbermine dem Gewichtssysteme fremder Völker zu Grunde gelegt worden. Die Erklärung dieser Thatsache ist darin zu suchen, dass diejenigen Waaren, welche für die Edelmetalle eingetauscht und verhandelt wurden, ebenfalls nach diesen Metallgewichten abgewogen sein werden. So finden wir die Gold- und Silbermine bei allen Völkern um das Mittelmeerbecken in Verwendung. Lehmann macht darauf aufmerksam, dass das noch heute in Russland übliche Pfund von 409,52 g fast genau mit der Goldmine gemeiner Norm der Babylonier von 409 g übereinstimmt, eine Übereinstimmung, die allerdings nicht als zufällig betrachtet werden kann. Das Silbergewicht findet sich erklärlicherweise viel häufiger vertreten als das Goldgewicht, weil das Silber im Verkehre und Handel mehr verwandt wurde als das Gold. Auch das babylonische königliche Normalgewicht ¹⁾ hat Eingang bei verschiedenen Völkern gefunden. Bei der Erhöhung um $\frac{1}{24}$ beträgt die königliche Gewichtsmine 511,7—513,4 g leicht und 1023,3 g schwer. Mit der leichten Mine stimmt das alte nürnberger Pfund von 510 g überein. Dieses nürnberger Pfund lag dem alten Medicinalgewicht zu Grunde. An seiner Entstehung aus den orientalischen Gewichten ist um so weniger zu zweifeln, als es durch den Gebrauch desselben beim Spezereihandel von Venedig nach Nürnberg gekommen und in Venedig ein uraltes beim Handel nach Asien gebräuchtes Gewicht war.

Ferner stammt von der königlichen Mine her das aufser dem genannten römischen Pfund auf der italischen Halbinsel noch in Gebrauch gewesene Pfund von 341 g, die sogenannte attisch-römische Mine, welche ebenso $\frac{2}{3}$ der königlichen Gewichtsmine beträgt wie das römische Pfund $\frac{2}{3}$ derjenigen der gemeinen Norm der Babylonier. Ein Zwölftel dieser attisch-römischen Mine, also 28,42 g, stimmt überein mit der Unze des noch heute in England gebräuchlichen Avoir-du-poids Pfunds, welche 28,3 g beträgt.

Aus dem Vorhergehenden ist ersichtlich, wie das alte babylonische Gewicht sich durch 5 Jahrtausende in seinen ursprünglichen Beträgen erhalten hat. Die Erklärung dieser merkwürdigen Thatsache ist darin zu suchen, dass beim Handel zwischen den verschiedenen Völkern jeder von selbst darauf sah, dass das Gewicht genau war, der Verkäufer, damit er sich nicht durch Gebrauch eines zu schweren Gewichtes schädige, und der Käufer, damit er durch kein zu leichtes Gewicht geschädigt werde. Als unmittelbare Folge dieser Bedeutung der Gewichte und der Mafse überhaupt für den Ver-

1) Die Art und Weise, wie sich die königliche Norm aus der gemeinen Norm heraus entwickelt hat, erklärt Lehmann folgendermaßen. Der König habe wahrscheinlich auf ein besonders reichliches Gewicht Anspruch gehabt. Dies sei dadurch erreicht worden, dass zu jedem Gewicht ein kleines Teilgewicht in die Wagschale hineingelegt wurde. Aus der Vereinigung des gemeinen Gewichts mit seinem Zuschlage wäre ein neues Gewicht entstanden. Die Erhöhung habe in früherer Zeit $\frac{1}{24}$, in späterer $\frac{1}{20}$ oder 5% betragen.

kehr ergab sich die Heilighaltung und die Überwachung der Richtigkeit der Normen durch priesterliche oder staatliche Beamte.

Dieselbe unmittelbare Abhängigkeit vom babylonischen System, welche sich beim Gewichte der verschiedenen Völker bis in die neueste Zeit nachweisen lässt, tritt beim Längenmaße nicht so augenscheinlich zu Tage. Es ist dies nicht zu verwundern, wenn die heute allgemein geltende Ansicht über die Festsetzung der Längennormen richtig ist. Darnach ist das Längenmaß überall bestimmt worden, indem man einen Wasserkubus herstellte, der das Gewicht des Normalpfundes besaß, und die Kante dieses Kubus als Längeneinheit annahm. Wenn sich die Sache so verhält, ist nicht zu erwarten, dass die aus den abgeleiteten Gewichten berechneten Längenmaße mit denjenigen des bestimmenden Systems ebenso in rationalem Verhältnis stehen wie die Gewichte selbst, da die dritte Wurzel aus dem Bruch zweier rationalen Zahlen in seltenen Fällen wieder rational wird. Gleichwohl lassen sich auch hier merkwürdige Beziehungen aufstellen, deren Wiedergabe jedoch über den Rahmen dieser Abhandlung hinausführen würde.

Dass die Babylonier auch die Schöpfer der dritten Fundamenteinheit, nämlich des jetzt noch geltenden Zeitmaßes gewesen sind, geht nicht nur aus dem Umstande hervor, dass sie bereits den Tag und die Nacht in je 12 Stunden teilten, sondern auch daraus, dass gerade hier noch die von den Babyloniern begründete Sexagesimalteilung in Kraft sich befindet, indem auch wir die Stunde in 60 Minuten und die Minute in 60 Sekunden teilen. Die Babylonier bedienten sich zu ihrer Zeitmessung der Wasseruhren und zwar müssen sie, um die verhältnismäßige Dauer zweier Zeitintervalle zu bestimmen, das Wasser mit konstanter Druckhöhe aus einem Ausflussgefäße haben ausfließen lassen. Der Vergleich der während zweier Zeiten ausgeflossenen Wassermengen hinsichtlich ihres Volumens oder noch einfacher ihres Gewichtes gab ein sehr genaues Verhältnis der Zeiten selbst. Indem man das Gewicht der während eines ganzen Tages aus einem stets gefüllten Gefäße, welches im Boden eine kleine Öffnung hat, ausfließenden Wassermenge genau bestimmte, konnte man durch das Gewicht der während einer beliebigen Zeit ausgeflossenen Menge sofort ersehen, den wievielten Teil von dem ganzen Tag dieser Zeitabschnitt betrug. Dass man mit einem großen Gefäße und einer entsprechenden Öffnung auf diese Weise schon auf sehr kleine Bruchteile kommen kann, ist klar.

In der Umdrehungszeit der Erde hatten die Babylonier ein unveränderliches Original, von dem sie daher auch eine konstante Zeiteinheit entnehmen konnten. Es entsteht nun die Frage, wovon sie die Einheiten für ihre Gewichte und ihre Längen abgenommen haben. Beide stehen in einer engen Beziehung, so dass sie von einander abgeleitet werden können. Man kann entweder das Gewicht als ursprünglich nehmen, dann einen Kubus einer homogenen Masse von bestimmter Dichte herstellen, welcher dieses Gewicht hat, und die Länge der Seitenkante als Entfernungseinheit auswählen oder umgekehrt die letztere zuerst festsetzen und aus ihr die Gewichtseinheit producieren. Weil nun die Babylonier durch ihre Art und Weise, die Zeit zu messen, dahin geführt wurden, das Gewicht bestimmter Wassermengen mit aller Genauigkeit zu messen, so läßt sich annehmen, dass auch die Festsetzung der Gewichtsnorm die ursprünglichere gewesen und ihr die der Entfernungseinheit gefolgt ist. Jedoch auch die entgegengesetzte Ansicht, dass aus der Längeneinheit die Gewichtsnorm sich entwickelt habe, ist zum Ausdruck gebracht worden. Und zwar sollen die Babylonier sogar die Länge des Sekundenpen-

dels dabei zu Grunde gelegt haben. Die Begründung dieser von Lehmann ausgesprochenen, jedenfalls kühnen Konjektur ist folgende. Die Länge des babylonischen Fusses beträgt nach den erhaltenen Ziegeln, deren Grundfläche einen Quadratfuß darstellt, etwa 330 mm. Dass sich dieses Maß durch eine sehr lange Zeit konstant erhalten habe, davon könne man sich leicht durch eine Betrachtung der im Berliner Museum aufbewahrten Backsteine überzeugen, die von den Zeiten des Priesterkönigs Gudea (etwa Anfang des 3. Jahrtausends vor Chr.) bis in die Zeit des Nebucadnezar II. hinabreichen. Die Elle dieses Fusses würde $\frac{3}{2} \cdot 330$ und die Doppelelle $3 \times 330 \text{ mm} = 990 \text{ mm}$ betragen. Nun beträgt aber die Länge des Sekundenpendels, die mit der geographischen Breite vom Äquator aus zunimmt,

für den 30. Grad nördlicher Breite 992,5 mm,

„ „ 40. „ „ „ 993,1 mm.

Unter dem 31. Grade nördlicher Breite aber liegen die Trümmerstätten der ältesten südbabylonischen Städte, welche als die Heimat der babylonischen Kultur anzusehen seien. Also stimmt die Länge der babylonischen Doppelelle mit der des dortigen Sekundenpendels überein, wenigstens bis auf einen kleinen, ganz unbeträchtlichen Unterschied von etwa 2 mm. Und so könne der Schluss gezogen werden, dass die Babylonier ihr Längenmaß nach der Länge des Sekundenpendels normiert hätten. Wenn nun auch zugegeben werden kann, dass bei den Chaldäern die Kenntnisse und Fertigkeiten vorhanden waren, die zur Bestimmung der Länge eines Sekundenpendels notwendig sind, so muss andererseits hervorgehoben werden, dass es undenkbar ist, dass das einmal gefundene Sekundenpendel wieder spurlos verloren gegangen wäre. Denn da gerade die Babylonier auf einen guten Zeitmesser außerordentliches Gewicht legten, so hätten sie unbedingt bald die praktische Verwendbarkeit des Pendels für diesen Zweck erkennen und benutzen müssen, und das Pendel hätte daher damals ebensogut wie nach der Auffindung seiner Gesetze durch Galilei allgemeine Verbreitung erlangt. Bei dieser Sachlage muss daher die Übereinstimmung zwischen der Pendellänge und der babylonischen Doppelelle für einen jener eigentümlichen Zufälle erklärt werden, denen man in der Geschichte der Menschheit ebenso begegnet wie in dem Leben der einzelnen Menschen.

B. System der neuen Zeit.

Aus der vorstehenden Darstellung geht hervor, dass sich aus dem babylonischen Maßsystem 5 Jahrtausende hindurch die Maße der anderen Völker der alten und neueren Zeit durch Teilung abgeleitet haben. Obwohl durch diese Zersplitterung die Maße selbst benachbarter Volksstämme nur schwer mit einander verglichen werden konnten, so machte sich doch nicht das Bedürfnis geltend, das eigene Maß mit dem anderer Orte in Übereinstimmung zu bringen. Der Verkehr und Handel hatten so beschränkte Dimensionen, dass es genügte, das für einen Stadtkreis übliche Maß durch Aufbewahrung der Normalen bei den Behörden der Stadt zu sichern.

Als sich nun seit dem Ausgange des Mittelalters die Handelsbeziehungen allerorts vergrößerten und die experimentalen Wissenschaften, die auf eine genaue Maßangabe besonderen Wert legen müssen, entwickelten, wurde man immer mehr zu dem Problem hingedrängt, ein allgemein annehmbares und unveränderliches Maßsystem herzustellen.

Ursprünglich machte man den Vorschlag, die Dimensionen von organischen Naturgebilden, so die Distanz der Pupillen, die Seiten der Bienenzellen etc. zu Grunde zu legen. Aber das Unstatthafte, solche und ähnliche Naturgebilde für unveränderlich zu halten, ergab sich bald, so dass diese Vorschläge keine Anwendung fanden. „Das Bestreben, aus der Natur selbst ein konstantes Maß zu entnehmen, wurde erst fruchtbar, als die Wissenschaft zu einer genauen Kenntnis der physikalischen Gesetze und zu feineren Methoden, dieselben experimentell zu prüfen, gelangte“¹⁾. Der erste Vorschlag, der zum gewünschten Ziele hätte führen können, wurde von Huyghens gemacht. Derselbe wurde durch seine Erfindung der Pendeluhr (im Jahre 1658), welches Problem ihn längere Zeit beschäftigte und schliesslich zu einer glücklichen Lösung brachte, auf den unmittelbaren Zusammenhang zwischen Pendellänge und Schwingungsdauer aufmerksam und schlug daher 1664 vor, 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. Es wurde nun noch in demselben Jahre die Beobachtung gemacht, dass das Sekundenpendel nicht an allen Orten der Erde dieselbe Länge besitze. Da man aber den Grund dieser Veränderung in der Abhängigkeit der Größe der Schwerkraft von den Breitegraden erkannte, so konnte die Idee von Huyghens doch verwirklicht werden, wenn nur ein bestimmter Breitegrad festgesetzt wurde, welchem das normale Pendel angehören sollte. Der Vorschlag Huyghens fand sofort allgemeinen Beifall. Besonders eifrig traten die beiden französischen Gelehrten Bouguer und la Condamine für denselben ein. Bouguer wollte die Pendellänge unter dem 45. Breitegrad als Maßeinheit gewählt wissen, während Condamine diejenige unter dem Äquator empfahl. Als daher in Frankreich eine neue Maßregulierung am Ende des vorigen Jahrhunderts vorgenommen werden sollte, beschloss man zuerst, die Länge des Sekundenpendels zu Grunde 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 diese Kommission ihren Bericht und sprach sich darin gegen die Pendellänge aus, weil die Reinheit des Systems räumlicher Maße durch Einmischung eines fremden Elements, nämlich der Zeit, getrübt werde, und weil außerdem die zu Grunde liegende 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, daneben aber auch die Länge des einfachen Sekundenpendels zu ermitteln. Am 30. März 1791 wurde dieser Vorschlag genehmigt und es bildete sich eine zweite Kommission, die zu dem einen Teil den Gradbogen zwischen Dünkirchen und Barcelona auszumessen hatte, zu dem anderen Teil die Länge des Sekundenpendels durch die genauesten Beobachtungen festzustellen suchte. Die geodätischen Arbeiten wurden von Méchain und Delambre geleitet, während Cassini und de Borda die Pendelbeobachtungen ausführten. Die Gradmessungen stießen auf viele Hindernisse. Erst am 23. April 1799 konnte die

1) Karsten, Encyclopädie der Physik S. 444 ff.

Kommission nach Abschluss der Vermessungsarbeiten ihren Bericht abgeben; nach diesen Vermessungsarbeiten beträgt bei einer angenommenen Abplattung der Erde von $\frac{1}{334}$ die Entfernung des Poles vom Äquator 5130740 Toisen und das Meter $443''',2959$ damaliger Längeneinheit. Auf Grund dieser Messung wurde sodann am 25. Juni 1800 die Länge des neuen Mafses gesetzlich zu 443,296 pariser Linien festgestellt. Hierauf wurde ein rein dekadisches System gegründet. Die Bezeichnung der Mafse erfolgte namentlich nach Vorschlag des holländischen Gelehrten van Swinden, der späterhin gleichfalls zur Kommission gehörte. Darnach wurde das Vielfache jeder Einheit mit griechischen, die Teile jeder Einheit mit lateinischen Zahlwörtern benannt. Es muss diese Festsetzung dem häufigen Missbrauch gegenüber hervorgehoben werden, demzufolge man die Teile Centimeter etc. französisch ausgesprochen findet. Gleichzeitig wurde ein Stab aus Platin von 1 m Länge, 25 mm Breite und 4 mm Dicke, dessen Endflächen bei 0° genau den Abstand der neuen Längeneinheit haben sollten, hergestellt und als Prototypus im Staatsarchiv aufbewahrt. Von dieser Längeneinheit leitete man nicht nur das Hohlmass, sondern auch das Gewicht ab, indem als Einheit des Gewichtes dasjenige eines Kubikdecimeters Wasser bei 4° Celsius ausgewählt wurde. Ein Platingewichtstück von dieser Grösse wurde gleichfalls im Staatsarchiv zu Paris niedergelegt. Genau gleiche Copien des Meters und Kilogramms befinden sich im Bureau des longitudes.

Obgleich dieses neue Mafssystem wegen seiner inneren Folgerichtigkeit vor allen vorhandenen den grössten Vorzug verdiente, so waren doch die Bemühungen, ihm allgemeinen Eingang zu verschaffen, anfangs nur von sehr geringem Erfolge begleitet. Der hauptsächlichste Grund lag darin, dass die Einführung dieses neuen Mafssystems nicht allein die wissenschaftliche Welt, sondern ebenso sehr die Industrie und Technik berührte. Wenn nun auch die Physiker und Chemiker schnell für das neue Mass eingenommen waren, so konnten sie doch nicht einseitig vorgehen, um einerseits nicht die Beobachtungen und Erfahrungen der Laien für sich unnütz zu machen und ebenso andererseits die Gesetze der Wissenschaft dem Laien nicht zu verschliessen; dieses musste geschehen, sobald die Sprachen, in denen die Laienwelt und Fachkreise sich ausdrückten, vollständig verschieden waren. Die Industrie und Technik sträubten sich aber gegen das neue System, weil es leichter dünkte, genaue, landesübliche Mafse erhalten zu können und weil man nun einmal gewohnt war, mit bestimmten, auf die Landesmafse gegründeten Zahlen zu rechnen. Die zuletzt genannte Schwierigkeit war um so grösser, als das metrische System mit den vorhandenen Mafseinheiten in durchaus irrationalem Verhältnisse stand. Selbst in Ländern, in welchen während des französischen Kaiserreichs das metrische System eingeführt worden war, wurde es nach dem Sturze Napoleons wieder abgeschafft. So vor allem in den italienischen Ländern, in denen zum Teil die diesbezüglichen Verfügungen nie in Kraft getreten sind oder nur von den Behörden beobachtet wurden, wie in dem Königreich beider Sicilien und dem lombardisch-venetianischen Königreich. Nur in Holland und Belgien, wo nach Einverleibung in das französische Kaiserreich im Jahre 1810 das metrische System bereits Eingang gefunden hatte, wurde nach Wiederherstellung des Königreichs durch ein Dekret vom 29. März 1817 das metrische System als das allein gesetzmässige Mass bestimmt. In einigen Ländern wurde durch eine geringe Abänderung der landesüblichen Mafse eine einfache Beziehung zum metrischen System hergestellt. So war schon 1810 in Baden ein derartiger Entwurf

gemacht und ein Fufs auf 0,3 m festgesetzt worden; aber dieser Entwurf trat erst 1831 ins Leben. Im Großherzogtum Hessen wurde ein ähnliches Anlehn an das metrische System im Jahre 1821 durchgeführt, indem daselbst der Fufs = 0,25 m gemacht wurde. Ebenso wurde in der Schweiz, wo vorher eine unendliche Verschiedenheit von Mafs und Gewicht gebräuchlich war, bereits 1828 für mehrere Kantone ein ähnliches Mafssystem ausgearbeitet, dem sich 1840 noch andere anschlossen. In diesem System wurde der Fufs zu 0,3 m zu Grunde gelegt. In Nassau war seit dem August 1853 ein ähnliches System gültig.

Da für den Verkehr der Völker unter einander das Gewicht von allen Mafsen am meisten in Betracht kommt und daher ein einfaches Verhältnis oder noch besser eine völlige Übereinstimmung der Gewichte unter einander wünschenswert ist, so waren lange Zeit die Bemühungen darauf gerichtet, ein gemeinsames Gewicht herzustellen. Es war für die weitere Einführung des metrischen Systems von Bedeutung, dass aus ihm dieses gemeinsame Gewicht entlehnt wurde.

Zuerst wurde 1839 im deutschen Zollverein, um eine Gleichmäfsigkeit bei den Abwägungen und Einfachheit bei den Berechnungen zu erzielen, der Zollcentner von 100 Zollpfund, das Pfund von der Schwere von 500 g eingeführt.

Im Jahre 1851 kam dasselbe Gewicht, nach Begründung des deutsch-österreichischen Postvereins, bei den Postsendungen in Anwendung.

Im Jahre 1852 wurde es auch als Zollgewicht in Österreich eingeführt.

Im Jahre 1857 wurde eine Verständigung über Münzverhältnisse in den verschiedenen deutschen Staaten herbeigeführt und in ganz Deutschland das halbe Kilogramm als Münzpfund festgesetzt.

Endlich haben nach und nach eine Reihe von Staaten dieses nämliche Pfund auch als gesetzliches Handelspfund angenommen, so vor allem Preussen durch das Gesetz vom 17. Mai 1856, Hamburg, Hannover, Braunschweig, Schaumburg-Lippe, Oldenburg und Bremen durch Übereinkunft vom 7. November 1856.

Ein weiterer Schritt wurde dadurch gethan, dass auf der 2. Konferenz der Mitglieder der „Europäischen Gradmessung“ in Berlin im Jahre 1867 beschlossen wurde, für alle europäischen Länder das Meter als Längeneinheit einzuführen. Diesem Beschlusse haben nach und nach alle europäischen Staaten gesetzliche Sanktion gegeben mit Ausnahme Englands, Hollands und Griechenlands, ebenso haben sich mehrere Staaten Amerikas angeschlossen, so dass jetzt schon ungefähr 350 Millionen Menschen sich des metrischen Systems bedienen.

Es ist nun die Frage zu beantworten, ob die dem metrischen System zu Grunde liegende Einheit die Anforderungen erfüllt, welche die Grundeinheit erfüllen muss. Diejenige Grundeinheit ist die vollkommenste, welche mit Sicherheit und ohne besondere Schwierigkeiten immer wieder und überall zu derselben Gröfse gefunden werden kann, wenn die vorhandenen Urmafse zu Grunde gehen sollten. Da aber die Messung des Erdmeridians sich aus sehr vielen Messungen zusammensetzt, muss jede neue Messung desselben zu einem etwas anderen Resultat führen, so dass nie mehr das Meter genau in derselben Gröfse würde aufgefunden werden können. Ausserdem haben teils neuere Messungen, teils Revision der Rechnungen für die ursprünglich bestimmte Gröfse des Meters einen abweichenden Wert ergeben. Nach Bessels Untersuchung müsste das

Meter 443,334 Pariser Linien betragen, während es thatsächlich $443^{\prime\prime},296$ beträgt, also um $0^{\prime\prime},036$ oder $0,0856$ mm zu kurz ist. Wenn also das Meter nach seiner Grundbestimmung als der zehnmillionste Teil des Meridianquadranten wieder hergestellt werden sollte, würde es $\frac{1}{11,000}$ länger gefunden werden, als es jetzt wirklich ist.

Diese grossen Nachteile würde die Pendellänge als Normaleinheit nicht bieten. Denn zunächst sind die Pendelbeobachtungen mit einer so grossen Genauigkeit ausgeführt worden, dass die Bestimmung einer einzelnen Pendellänge für einen gegebenen Ort bis auf $\frac{1}{135,000}$ sicher betrachtet werden kann. Es liefs sich also das Urmafs, wenn die Pendellänge zu Grunde läge, an dem Ort, an dessen Lage die normale Länge geknüpft wäre, mit so großer Genauigkeit stets wieder herstellen. Aber auch an anderen Orten liefs sich aus der daselbst beobachteten Pendellänge die normale Länge bis auf $\frac{1}{18,000}$ genau berechnen. Das Pendel kommt daher als natürliches Mafs mit Rücksicht auf die Genauigkeit, mit welcher es wieder aufgefunden werden kann, dem Meter mindestens gleich. Es verdient aber den Vorzug, weil seine Länge viel leichter ausgemessen werden kann.

Bei dem heutigen Stand der Wissenschaft wäre die allgemeinste Längeneinheit, die wir anwenden könnten, die Wellenlänge einer bestimmten Lichtart im Vakuum, wie sie von einem weitverbreiteten Körper ausgesandt wird, so von Natrium, das gut definierte Linien in seinem Spektrum hat. Eine solche Einheit würde unabhängig von Änderungen in den Dimensionen der Erde und ebenso unabhängig vom Beobachtungsorte sein. Ausserdem kann sie mit verhältnismäfsig geringen Mitteln und trotzdem mit großer Genauigkeit bestimmt werden.

Zum Schlusse dieses Abschnitts sind noch einige Worte über die dritte Fundamenteinheit, nämlich diejenige der Zeit zu sagen. Die Schöpfer des französischen Mafsystems liefsen als Grundlage der Zeitmessung die Rotationsdauer der Erde und damit die frühere Zeiteinheit unangetastet. Es lässt sich nun der Sterntag oder die wahre Periode für die Umdrehung der Erde durch gewöhnliche astronomische Beobachtungen mit großer Präcision und daraus mit Hilfe der Jahreslänge leicht der mittlere Sterntag berechnen. Infolgedessen würde es kein besseres Original für das Zeitmafs geben, wenn die Dauer der Erdrotation immer unveränderlich wäre. Allein das ist nicht der Fall. Denn die Umdrehungszeit der Erde wird infolge der Reibung der Erde gegen die durch Sonne und Mond hervorgerufenen Flutwellen des Meeres sowie gegen das Luftmeer unausgesetzt größer. Es sind daher auch schon die Zeitlängen von 2 anderen Bewegungen in Vorschlag gebracht worden, die nach unseren Erfahrungen und Berechnungen für unveränderliche Gröfsen gehalten werden müssen. Einmal kann die Oscillationsdauer der Lichtart, deren Wellenlänge man als Längeneinheit benutzt, zur Grundlage genommen werden. Ein anderer Vorschlag von Maxwell geht dahin, von einer angenommenen Einheit der Dichten ausgehend, Zeiteinheit und Längeneinheit daraus abzuleiten.

III.

Absolute Mafseinheiten im engeren Sinne.

Wie schon in der Einleitung hervorgehoben worden ist, macht das Vorhandensein quantitativer Beziehungen zwischen den vielfältigen Formen der Energie es wünschenswert, alle Arten physikalischer Gröfsen auf eine gemeinsame Vergleichsskala zurückzuführen. Dieses geschieht dadurch, dass sämtliche Arten durch die drei Fundamenteinheiten ausgedrückt werden. Den Anstofs hierzu hat Gauß durch seine berühmte Abhandlung: *Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata*, gegeben, welche er 1832 in der Sitzung vom 15. Dezember der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen vorgelesen hat. Diese Abhandlung giebt einen vorzüglichen Einblick in das Wesen der absoluten Mafse im engeren Sinne und verdient daher ihrem Hauptinhalte nach hier wiedergegeben zu werden.

Die ersten Aufklärungen über die Intensität des Erdmagnetismus sind von Humboldt gegeben worden, welcher auf allen seinen Reisen ein Hauptaugenmerk darauf gerichtet hat. Er lieferte eine große Menge von Beobachtungen, aus denen sich die allmähliche Abnahme der Horizontalcomponente der Intensität vom magnetischen Äquator nach den magnetischen Polen zu ergab. Die von Humboldt angewandte Methode, die auch später noch beibehalten wurde, besteht darin, dass man an den Orten, für welche man die Intensität des Erdmagnetismus unter sich vergleichen will, eine und dieselbe Magnetnadel Schwingungen machen lässt und deren Dauer mit Schärfe misst. Die Intensität des Erdmagnetismus ist alsdann dem Quadrat der Schwingungsdauer einer und derselben Nadel verkehrt, oder dem Quadrate der Anzahl der Schwingungen in einer gegebenen Zeit direkt proportional. Die Zulässigkeit dieser Methode ist sowohl von der Unveränderlichkeit des magnetischen Zustandes der Nadel als auch von derjenigen der magnetischen Erdintensität abhängig. Aber keine dieser beiden Bedingungen ist erfüllt. Dadurch wird die Sicherheit dieser comparativen Methode aufgehoben. Dieselbe verliert ganz ihre Brauchbarkeit, wenn es sich darum handelt, die Veränderung der magnetischen Intensität an einem bestimmten Orte innerhalb eines langen Zeitraumes zu erfahren. Nun ist die Schwingungsdauer eines horizontal aufgehängten Magnetstabes isochron, solange der Ablenkungswinkel eine gewisse Gröfse nicht überschreitet¹⁾. Daraus folgt, dass die Schwingungen der Magnetnadel unter dem Einfluss des Erdmagnetismus dieselben Gesetze befolgen wie die ebenfalls isochronen Schwingungen des Pendels unter dem Einfluss der Schwerkraft. Das Pendelgesetz lautet

$$\tau = \pi \sqrt{\frac{K}{D}}; \text{ hier bedeutet } \tau \text{ die Schwingungsdauer,}$$

K das Trägheitsmoment, die Masse gemessen in g,
 D das Drehungsmoment der Erdkraft, gemessen in Dynen.

Wenden wir diese Formel auf einen Magnetstab an, der unter dem Einflusse des Erdmagnetismus um eine vertikale Axe schwingt, so drückt auch hier τ die Schwingungsdauer der Magnetnadel und D das von der Erde auf dieselbe ausgeübte Drehungsmoment aus, während K die Masse bedeutet, welche in der Entfernung 1 vom Drehungspunkte die ganze Masse des Magnetstabes ersetzt. Dieses Trägheitsmoment kann leicht

1) Hierbei wird natürlich vorausgesetzt, dass die Torsionskraft des Fadens vernachlässigt werden kann.

berechnet werden, wenn der Magnetstab ein regelmässiger Körper ist. Ist dagegen der Magnetstab unregelmässig oder trägt er während der Schwingungen noch Zubehör, so muss die Ausmittlung seines Trägheitsmomentes experimentell geschehen. Gaußs giebt in seiner Abhandlung hierfür die nötige Unterweisung. Ist das Trägheitsmoment bekannt, so erhellt aus der obigen Formel, wie man aus der beobachteten Schwingungsdauer des Magnetstabes das Drehungsmoment berechnen kann, welches der Erdmagnetismus durch seine Einwirkung auf den Magnetismus des Stabes ausübt. Es ist nämlich

$D = \frac{\pi^2 \cdot K}{\tau^2}$. Hierin bedeutet D die Zahl der im Abstände 1 cm von der Drehungsaxe angreifenden Druckeinheiten, deren jede der Masse eines Grammes in der Sekunde die Beschleunigung 1 cm erteilt, wenn der Magnetstab in der zum Meridian senkrechten Lage sich befindet. K dagegen bedeutet die Anzahl Gramm, welche im Abstände 1 cm von der Drehungsaxe die Masse des schwingenden Stabes ersetzt.

Das Drehungsmoment hängt von der Stärke der magnetischen Erdkraft ebenso sehr ab, wie von dem in dem Stab entwickelten Magnetismus. Nennen wir die Mafszahl des letzteren M , die Mafszahl der Erdintensität T , so ist die Mafszahl des Drehungsmoments $M \cdot T$, denn das Moment ist beiden Gröfsen, also auch dem Produkt proportional und daher gleich dem Produkt, wenn man dasjenige Drehungsmoment 1 nennt, für welches der Proportionalitätsfaktor 1 wird. Es ist daher $MT = \frac{\pi^2 \cdot K}{\tau^2}$.

Sobald wir den Magnetismus des Stabes auf ein absolutes Mafs zurückführen können, ist auch die Stärke des Erdmagnetismus selbst auf ein absolutes Mafs zurückgeführt, da nur die Zahl, welche das Drehungsmoment ausdrückt, mit der Zahl, welche den Magnetismus des Stabes misst, dividiert zu werden braucht. Nun ist diese Zurückführung nicht möglich, weil die Einwirkung eines Magnetstabes allein auf eine Magnetnadel nicht herzustellen ist, vielmehr letztere der überall gegenwärtigen erdmagnetischen Kraft nicht entzogen werden kann. Es lässt sich aber das Verhältnis $\frac{M}{T}$ bestimmen, indem man die Ablenkung einer Nadel von der Meridianrichtung, welche sie durch den Magnetstab erleidet, bei 2 verschiedenen Entfernungen beobachtet. Denn liegt der Magnetstab in der Horizontalebene der Nadel und senkrecht gegen den magnetischen Meridian, so dass seine Axe in der Verlängerung den Mittelpunkt der Nadel trifft, so wird sich die Nadel unter der Einwirkung der beiden magnetischen Kräfte, nämlich des Erdmagnetismus und des Stabes, nicht im magnetischen Meridian, sondern in einem Winkel gegen denselben einstellen. Sind die für die Entfernungen R und R' gefundenen Mittelwerte v und v' , so ist:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} v &= \frac{2M}{T} \left(\frac{1}{R^3} + \frac{\eta}{R^5} \right) & R^5 \operatorname{tg} v &= \frac{2MR^2}{T} + \frac{2M\eta}{T} \\ \operatorname{tg} v' &= \frac{2M}{T} \left(\frac{1}{R'^3} + \frac{\eta}{R'^5} \right) & R'^5 \operatorname{tg} v' &= \frac{2MR'^2}{T} + \frac{2M\eta}{T} \end{aligned}$$

Mithin

$$R^5 \operatorname{tg} v - R'^5 \operatorname{tg} v' = \frac{2M}{T} (R^2 - R'^2).$$

Und

$$\frac{2M}{T} = \frac{R^5 \operatorname{tg} v - R'^5 \operatorname{tg} v'}{R^2 - R'^2}$$

$$\frac{M}{T} = \frac{1}{2} \frac{R^5 \operatorname{tg} v - R'^5 \operatorname{tg} v'}{R^2 - R'^2}$$

$\frac{M}{T}$ ist eine reine Zahl, daher findet man durch Division des für MT gefundenen Ausdrucks mit dieser Zahl für T Gröfsen derselben Art, von welcher MT ist, d. h. man findet für T eine Anzahl Druckeinheiten, die auf einen in der Mitte aufgehängenen Magnetstab vom Trägheitsmoment K dasselbe Drehungsmoment ausüben wie der Erdmagnetismus, vorausgesetzt, dass in dem Stabe die Einheit des Magnetismus sich befindet. Obige Ausdrücke vereinfachen sich bedeutend, wenn R so grofs ist, dass $\frac{1}{R^5}$ vernachlässigt werden kann.

Alsdann ist

$$\operatorname{tg} v = \frac{2M}{TR^3} \text{ und } \frac{T}{M} = \frac{2}{R^3 \operatorname{tg} v}$$

$$\text{und da } M.T = \frac{\pi^2.K}{\tau^2} \text{ war,}$$

$$\text{so } T^2 = \frac{2\pi^2.K}{\tau^2 R^3 \operatorname{tg} v}; \quad T = \sqrt{\frac{2\pi^2.K}{\tau^2.R^3 \operatorname{tg} v}}$$

Den Abmessungen sind nur die drei Fundamenteinheiten zu Grunde gelegt. Von der Gröfse dieser Einheiten hängt die Zahl des schliesslichen Resultats ab. Wählt man statt derselben andere, so muss das vorher erhaltene Resultat mit einem Faktor multipliziert werden, der einmal von dem Verhältnis der beiden Einheiten und dann auch von der Potenz abhängt, in welcher die Einheit in dem Ausdruck enthalten ist. Um diese Umrechnung stets vornehmen zu können, schreibt man die Funktion der verschiedenen Fundamenteinheiten neben den das Resultat bestimmenden Ausdruck und nennt diese Funktion die Dimension des Ausdrucks. Es ist dieses Verfahren dasselbe, als wenn man in der Planimetrie als Längeneinheit das Centimeter zu Grunde legt und für ein Rechteck, dessen Grundseite 3 cm und dessen Höhe 2 cm misst, angiebt, dass der Inhalt desselben $J = 6$ Quadratcentimeter oder $6(\text{cm}^2)$ betrage.

Nennt man die angewandten Grundheiten resp. m , l und t , so ist

$$\text{die Dimension von } K = m.l^2,$$

$$\text{„ „ „ } \tau = t^2,$$

$$\text{„ „ „ } R = l^3,$$

$$\text{daher die Dimension von } T^2 = m.l^2.t^{-2}.l^{-3} = m.l^{-1}.t^{-2},$$

$$\text{daher von } T = m^{1/2}l^{-1/2}t^{-1}.$$

Und nun schreibt man: $T = \frac{\pi}{\tau} \sqrt{\frac{K}{R^3 \operatorname{tg} v}}$ ($m^{1/2}l^{-1/2}t^{-1}$), worin ($m^{1/2}l^{-1/2}t^{-1}$) nichts anderes ausdrücken soll, als dass in dem Ausdruck für T die Anzahl der Masseneinheiten in der Potenz $1/2$, die der Längeneinheiten in der Potenz $-1/2$ und die der Zeiteinheiten in der Potenz -1 enthalten sind. Wären daher zuerst das Centimeter, das Gramm und die Sekunde benutzt worden und sollte der erhaltene Wert in denjenigen umgerechnet werden,

bei welchem das Millimeter, das Milligramm und die Sekunde benutzt sind, so müsste, da $1\text{ g} = 10^3\text{ mg}$ und $1\text{ cm} = 10\text{ mm}$, das erste Resultat mit $10^{3/2} \cdot 10^{-1/2}$ oder 10 multipliziert werden.

Die Dimension kann man die mathematische Benennungsweise des Resultats nennen. Die Anwendung der Dimensionsformeln stammt von dem englischen Physiker James Clerk Maxwell. Die Theorie der Dimensionen ist schon von Fourier in seiner 1822 herausgegebenen Theorie der Wärme begründet worden. Derselbe hat den doppelten Vorteil, den die Kenntnis der Dimensionen der Grundeinheiten für jede in eine physikalische Gleichung eingehende GröÙe darbietet, bereits hervorgehoben.

Einmal lassen sich, wenn man für jede GröÙe die Dimensionen kennt, in denen die 3 Fundamenteinheiten in ihr vertreten sind, die Übergänge von einem Maßsystem zu einem anderen ohne Schwierigkeiten bewerkstelligen. Im § 161 des erwähnten Werkes führt Fourier eine solche Umrechnung aus. Außerdem betont er im folgenden Paragraph sehr richtig, dass jede physikalische Gleichung und deren Umänderung in bezug auf jegliche Art von Einheit homogen sein muss und dass, wenn dies nicht stattfindet, man in der Rechnung einen Fehler begangen oder abgekürzte Ausdrücke eingeführt hat. Es giebt daher die Kenntnis der Dimensionen der GröÙen ein bequemes Mittel an die Hand, die Zulässigkeit von Formeln, die durch längere Rechnung gewonnen sind, zu prüfen.

Auch Gaußs benutzt am Ende seiner Abhandlung die Dimensionen der Grundeinheiten, um eine Umrechnung des von ihm erhaltenen Resultats auszuführen, wenn man statt des Millimeters und Milligramms, welche er angewandt hat, das Meter und Gramm anwenden würde.

Die Bestimmung der Intensität des Erdmagnetismus nach absolutem Maß, welche Gaußs in die Physik eingeführt hat, besaß zunächst nur theoretisches Interesse. Aber dieselbe wurde bald von eminent praktischer Bedeutung, weil durch diese Arbeit sein Freund und Mitarbeiter Wilhelm Weber veranlasst wurde, mit Hilfe der Intensität des Erdmagnetismus auch

absolute Maße in der Elektrizität

einzuführen. Der Mangel an solchen MäÙen erschwerte wesentlich die technische Anwendung der Elektrizität. Denn wenn auch genügende einschlägige Erfahrungen von den verschiedenen Technikern gemacht wurden, so besaß man doch kein Mittel, die Resultate der gemachten Erfahrungen einfach und bestimmt auszusprechen. BloÙe Beschreibungen des Verfahrens genügten dazu nicht. Es war daher jeder Techniker genötigt, durch eigene Versuche die Verhältnisse zu erproben, welche günstige Resultate erzielen. Der dadurch verursachte Zeit- und Kostenaufwand machte sich besonders bei größeren Unternehmungen fühlbar. Nur durch unzweideutige und unveränderliche Maßbestimmungen konnte es ermöglicht werden, nicht nur die Resultate der gemachten Erfahrungen mit wenigen Worten und Zahlen allgemein verständlich darzulegen und bestimmte Vorschriften zum künftigen Gebrauch zu geben, sondern auch sich der Erfüllung der vorgeschriebenen Regeln zu versichern. Ein nicht minder großes Interesse an der Herstellung solcher elektrischen Maßeinheiten, welche stets in genauer Weise wiedergefunden werden können, hat die praktische Rechtspflege. Denn da sich die Elektrotechnik allmählich so weit entwickelt hat, dass sie eine rege Industrie repräsentiert, kann es nicht fehlen, dass Streitfragen, welche dieselbe betreffen, vor die Gerichte kommen

und dass sich die Notwendigkeit fühlbar macht, bei den Entscheidungen auf absolute Mafseinheiten zurückzugehen. Am meisten ist aber aus naheliegenden Gründen die Wissenschaft selbst bei der Regelung dieser Angelegenheit beteiligt.

Wilhelm Weber hat nun für die drei wichtigsten elektrischen Größen absolute Mafseinheiten geschaffen, nämlich für die Stromintensität, den Leitungswiderstand und die elektromotorische Kraft.

Für die Bestimmung der Stromintensität hatte Faraday ein sehr einfaches Mittel, nämlich das von ihm konstruierte und so benannte Voltameter angegeben. Hierbei zeigt die Menge Knallgas, welche der Strom durch die elektrolytische Zersetzung des Wassers in einer bestimmten Zeit erzeugt, die Intensität desselben an. Allein das Voltameter ist bei schwachen Strömen, wo die Wasserzersetzung sehr langsam geschieht, nicht anwendbar. Ausserdem erfordert stets die Bestimmung der Menge Knallgas mindestens eine Viertelstunde Zeit, wenn die Zeitdauer des Versuchs auch nur auf ein pro Mille genau bestimmt werden soll. Während dieser Zeit muss die Stromstärke möglichst konstant gehalten oder ihre kleinen Veränderungen müssen wenigstens fortwährend notiert werden. Endlich muss das Voltameter fortwährend in dem Stromkreis eingeschaltet bleiben, denn die Stromintensität bleibt bei Wegnahme des Voltameters nicht mehr die gemessene, sondern wird viel stärker. Diese Nachteile teilt die von Weber konstruierte Tangentenbussole nicht. Denn einmal giebt dieselbe auch bei schwachen Strömen einen genügenden Ausschlagswinkel, der innerhalb kurzer Zeit beobachtet werden kann, und dann ändert die Einschaltung der Bussole den übrigen Widerstand deshalb nicht, weil dieselbe aus einem sehr breiten Kupferlinge besteht und der Widerstand dieses Kupferlinges gegenüber dem übrigen verschwindet. Mit der Tangentenbussole hat W. Weber relative und absolute Messungen ausgeführt. Die ersteren sind auf das chemische Maf bezogen, die letzteren sind folgendermassen begründet. Ist der kupferne Ring der Tangentenbussole in der Ebene des Meridians aufgestellt, so übt ein durch denselben gehender elektrischer Strom auf eine in der Axe befindliche kleine Magnetnadel dasselbe Drehungsmoment aus wie ein bestimmter Magnetstab, der 1) sich in der Axe des Ringes befindet, 2) senkrecht gegen den Stromkreis steht und 3) von der Nadel dieselbe Entfernung wie der Ring hat. Es kann daher die Kraftwirkung des Stromes gleich derjenigen eines Magneten gesetzt werden. Ist die Entfernung der Magnetnadel von dem Ring gross genug, so dass $\frac{1}{R^5}$ vernachlässigt werden kann, so wird der Ablenkungswinkel ν

von einem Magnetstab in der bezeichneten Lage dann bewirkt, wenn sein Moment M der Gleichung genügt:

$$M = \frac{1}{2} R^3 \cdot \operatorname{tg} \nu \cdot T,$$

worin T die Stärke des Erdmagnetismus am Beobachtungsort bedeutet. Der Strom ruft also dieselbe Wirkung hervor wie diese Druckkraft M , wenn dieselbe an dem Hebelarm 1 angebracht wird und die Nadel rechtwinklig zum magnetischen Meridian steht. Auf diese rechtwinkelige Lage bezieht sich ja das Drehungsmoment.

Nun ist anderseits die Wirkung des Stromes von 2 Faktoren abhängig, nämlich seiner Intensität und der Grösse der umflossenen Kreisfläche und zwar ist die Wirkung beider Faktoren proportional. Es ist daher

$$M = c \cdot J \cdot R^2 \cdot \pi,$$

worin c den Proportionalitätsfaktor, J die Stromintensität und R den Radius des Kupfer-
ringes bedeutet. Der Faktor c wird 1, wenn man die Stärke desjenigen Stromes
als Einheit fasst, der die Einheit der Fläche umfließend dieselbe magne-
tische Wirkung in die Ferne ausübt, wie ein Magnet, dessen magnetisches
Moment der Einheit gleich ist und welcher im Mittelpunkt der Kreisebene
senkrecht zur Ebene desselben liegt. Diese Festsetzung macht nun auch Weber
und daher ist unter dieser Voraussetzung:

$$J \cdot R^2 \pi = \frac{1}{2} R^3 T \cdot \operatorname{tg} v \text{ und}$$

$$J = \frac{R \cdot T}{2\pi} \cdot \operatorname{tg} v.$$

Die Stromintensität ist daher auf die horizontale Komponente des Erdmagnetismus
zurückgeführt. Da die letztere sich nach der Gaussischen Methode durch die Grund-
einheiten ausdrücken lässt, so ist damit auch ein absolutes Maß für die Stromintensität
gegeben. Der Tangentenbussole hat man die verschiedensten Abänderungen gegeben,
um den durch die Theorie gegebenen Bedingungen zu genügen. Da die Genauigkeit
des Resultats von der Genauigkeit abhängt, mit welcher der Ablenkungswinkel v ge-
messen wird und da die Beobachtungsfehler um so weniger in die Wagschale fallen, je
mehr sich $2v$ einem rechten Winkel, also v einem solchen von 45° nähert, so hat man
den einfachen Kupfering durch einen mehrfach im Kreise herumgeführten kupfernen
Draht von ziemlicher Dicke ersetzt. Alsdann wirkt der hindurchgehende Strom n fach
auf die Magnetnadel und daher ist zu setzen: $JnR^2\pi = \frac{1}{2}R^3T\operatorname{tg}v$; und $J = \frac{RT}{2n\pi} \cdot \operatorname{tg}v$.

Weil sich die horizontale Komponente der magnetischen Erdkraft an demselben
Beobachtungsorte innerhalb nicht allzulanger Zeit so wenig ändert, dass sie für diese
Zeit als konstant angenommen werden kann, so lässt sich für dieselbe Tangentenbussole
der Faktor $\frac{R \cdot T}{2n\pi}$ ein für allemal bestimmen. Dann braucht man nur, um die absolute
Intensität eines Stromes zu messen, die Tangente des Ablenkungswinkels mit diesem
Faktor zu multiplizieren.

Es lässt sich auch die Stromeinheit des Voltameters für die absolute Bestimmung
benutzen, sobald das Verhältnis der elektrolytischen zur absoluten Einheit bekannt ist.
Dieses Verhältnis hat zuerst Weber¹⁾ bestimmt. Er leitete zu diesem Zwecke einen
und denselben Strom durch ein Voltameter und durch eine bifilar aufgehängte Drahtrolle,
deren Ebene mit derjenigen des magnetischen Meridians zusammenfiel. Aus der Ablen-
kung der bifilaren Rolle von der ursprünglichen Richtung lässt sich die Stromstärke
nach absolutem Maße bestimmen. Wird nämlich die anfangs dem magnetischen Meri-
dian parallel gerichtete Rolle von einem Strom durchflossen, so sucht der Erdmagnetis-
mus die Ebene der Rolle senkrecht zum Meridian zu stellen und die Gleichgewichtslage
ist dann erreicht, wenn das Drehungsmoment infolge der Aufhängung gleich ist dem
der Rolle durch den Erdmagnetismus erteilten Drehungsmoment. Ist nun J die Strom-
intensität, F die von dem Strom umflossene Fläche und T die Größe der horizontalen
Komponente des Erdmagnetismus, so ist das Drehungsmoment dieser horizontalen Kom-

1) Weber, Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins. 1840.

ponente $J.F.T. \cos a$, wenn a der Winkel ist, welchen die Drahtrolle mit dem Meridian bildet. Bezeichnet dagegen D die Direktionskraft der Rolle infolge der bifilaren Aufhängung, welche die Rolle im Meridian zu halten sucht, so ist bei der Ablenkung a das Drehungsmoment dieser Direktionskraft $D \sin a$. Die Gleichgewichtsbedingung ist daher:

$$J.F.T. \cos a = D \sin a$$

$$\text{und } J = \frac{D}{F.T} \operatorname{tg} a.$$

Unter Anwendung dieser Formel hat W. Weber gefunden, dass die von ihm angenommene Stromeinheit, welcher das Millimeter, das Milligramm und die Sekunde als Fundamenteinheiten zu Grunde liegen, in der Sekunde 0,009376 Milligramm Wasser zersetzt. Unter Berücksichtigung, dass das Gewicht von 1 Kubikcentimeter Knallgas 0,53631 Milligramm beträgt, ergibt sich hieraus, dass die Weber'sche Stromeinheit in 1 Minute 1,0489 Kubikcentimeter Knallgas zersetzt. Die chemische Stromeinheit, welche in 1 Minute 1 Kubikcentimeter Knallgas liefert, ist also nur um wenig kleiner als die Weber'sche absolute Einheit.

Nicht minder wichtig als die absolute Bestimmung der Stromstärke ist diejenige des Leitungswiderstandes. Um eine gemeinschaftliche Einheit hierfür zu schaffen, hatte man früher den Widerstand eines Kupferdrahtes von bestimmten Dimensionen ausgewählt. Aber es stellte sich heraus, dass bei den Widerständen auch der chemisch reinsten Metalle Unterschiede stattfinden, welche durch die Verschiedenheit der Dimensionen nicht allein erklärt werden können. Wenn daher 2 Widerstandsmesser auf Kupferdraht von 1 m Länge und 1 mm Dicke bezogen wurden, so war damit noch nicht die Ueberzeugung gegeben, dass die Kupferdrähte einen gleichen Widerstandskoeffizienten besitzen. Um diese Schwierigkeit zu heben, hat Jakobi im August 1846 von Petersburg aus an Professor Magnus in Berlin einen aus Kupferdraht hergestellten Widerstandsetalon geschickt und ihn gebeten, denselben bei den Physikern umher wandern zu lassen, damit diese ihre Widerstandsmessinstrumente darauf beziehen und ihre Messungen fernerhin nur nach diesem Masse angeben sollten. Daraufhin wurden nach diesem Originalmasse in Leipzig Etalons angefertigt und in Deutschland als Einheit angewandt. Später zeigte sich indessen, dass die Widerstandswerte dieser Etalons nicht konstant bleiben. Es war darum von wesentlicher Bedeutung, dass W. Weber auch ein absolutes Widerstandsmass durch eine eigentümliche Verbindung magnetoelektrischer und elektromagnetischer Beobachtungen herstellte. Das Wesentliche dieser Methode kann auf folgende Weise kurz in Worten ausgedrückt werden. Betrachtet man die Intensität irgend eines galvanischen Stromes, so kann dieselbe auf zwei verschiedene Arten bestimmt werden: erstens aus den Ursachen, von welchen sie abhängt; zweitens aus den Wirkungen, welche sie hervorbringt. Die aus ihren Wirkungen definierte Stromintensität kann nun aber auf absolutes Mass zurückgeführt werden, und da der Wert einer Stromintensität nach absolutem Masse der nämliche sein muss, es möge dieselbe aus ihren Wirkungen oder aus ihren Ursachen definiert werden, so ist das Resultat, welches auf dem letzten Wege erhalten werden muss, durch das auf dem ersten erhaltene schon im Voraus bekannt. Nun weiss man aber, dass die Stromintensität nur von 2 Ursachen abhängt, nämlich von der elektromotorischen Kraft und von dem Widerstand der Kette. So wie nun, wenn aufer der elektromotorischen Kraft auch der Widerstand nach

absolutem Mafse gegeben wäre, der absolute Wert der Stromintensität sich daraus unmittelbar ergeben würde, ebenso ergibt sich umgekehrt der Wert des Widerstandes nach absolutem Mafse, wenn aufer der Stromstärke auch die elektromotorische Kraft nach absolutem Mafse gemessen ist. Um dieses absolute Maf für die elektromotorische Kraft zu schaffen, benutzt W. Weber zur Stromerzeugung nicht ein galvanisches Element, sondern die Induktion des Erdmagnetismus und zwar aus drei Gründen. Erstens gewährt bei feinen Messungen die Anwendung rein metallischer Leiter eine weit grössere Sicherheit, sobald kein feuchter Leiter wie Wasser, Säure oder eine Salzlösung eingeschaltet zu werden braucht. Denn die Polarisationserscheinungen an den in einen feuchten Leiter eingetauchten metallischen Oberflächen stören die Messungen. Zweitens steigt bei Anwendung fortdauernder Ströme, wie sie mit konstanten Säulen erhalten werden, die Temperatur der Leiter und damit der Widerstand derselben. Diese Veränderlichkeit des Widerstandes macht aber die Bestimmung der elektromotorischen Kraft unsicher. Bei Anwendung momentaner Ströme, welche von so kurzer Dauer sind, dass keine merkliche Temperaturveränderung eintreten kann, fällt diese Veränderlichkeit weg. Während diese beiden Gründe die Anwendung der Induktion beharrlicher Magnete überhaupt empfehlen, spricht drittens der Umstand für die Anwendung der durch den Erdmagnetismus inducierten Ströme, dass alsdann die elektromotorische Kraft und der Leitungswiderstand ebenso auf das Maf des Erdmagnetismus zurückgeführt werden wie es mit der Stromintensität geschieht. Es hat nun W. Weber mit Hilfe seines Dynamometers die beiden Sätze nachgewiesen, dass die durch Bewegung eines Leiters in der Nähe eines Magnets inducierten Ströme, erstens der Geschwindigkeit der Bewegung und ebenso zweitens dem elektromagnetischen Drehungsmoment proportional sind, welches dem bewegten Leiter von dem Magnete erteilt würde, wenn der Leiter von der Einheit der Stromstärke durchflossen würde. Wenn aber die Einheit der Stromstärke durch einen Leiter fliesst, so ist das elektromagnetische Drehungsmoment nur abhängig von der umflossenen Kreisfläche und von der Stärke des Magnets und zwar ist es beiden, also auch dem Produkte beider proportional. Aber nicht allein die Intensität der inducierten Ströme ist der Geschwindigkeit der Bewegung, der umflossenen Kreisfläche und dem Momente des Magnets proportional, sondern, da der Widerstand derselbe bleibt, auch die elektromotorische Kraft, welche durch Bewegung dieses Stromkreises erzeugt wird. Bezeichnet daher

E die elektromotorische Kraft,

τ die Zeit der Bewegung,

F die umflossene Kreisfläche,

M das Moment des Magneten,

so ist für dieselbe Entfernung zwischen dem Stromkreis und dem Magneten

$$E = \text{const.} \frac{F.M}{\tau}$$

Ist nun für eine bestimmte Lage, sowie für $F=1$, $M=1$ und $\tau=1$ auch $E=1$, so ist die Konstante ebenfalls = 1. Daher alsdann: $E = \frac{F.M}{\tau}$. W. Weber gelangt darum zu dem absoluten Maf der elektromotorischen Kraft, indem er folgendes festsetzt. Ein Stromkreis, der die Flächeneinheit umfließt, befinde sich in der Richtung des magnetischen

Meridians. Wird derselbe einmal in der Sekunde um eine vertikale Axe aus der dem Meridian parallelen in die zu demselben senkrechte Lage gedreht, so werde in dem Stromkreis die elektromotorische Kraft T hervorgerufen, wo T die horizontale Komponente der magnetischen Erdkraft bedeutet. Die Einheit der elektromotorischen Kraft wird in dem Stromkreis also an demjenigen Orte erregt, an welchem die Horizontal-komponente der magnetischen Erdkraft $= 1$ ist.

Aus dieser Festsetzung geht hervor, dass wenn man einen Stromkreis F aus der Meridianrichtung in die dazu senkrechte Lage in der Zeit τ dreht, in dem Stromleiter die elektromotorische Kraft $\frac{F.T}{\tau}$ erregt wird.

Die Einheit des Widerstandes ist nun durch das Mafz der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke gegeben. Derjenige Leiter besitzt nämlich die Widerstandseinheit, in welchem die Einheit der elektromotorischen Kraft die Stromeinheit erregt. Ruft die elektromotorische Kraft E die Stromstärke J hervor, so ist nach dem Ohm'schen Gesetz der Widerstand $W = E : J$.

Wenn nun auch die Definition des Widerstandes diejenige der elektromotorischen Kraft voraussetzt, so hat nicht ebenso die Bestimmung des Widerstandes einer Kette die Messung der elektromotorischen Kraft zur Voraussetzung. Im Gegenteil wird zuerst der Widerstand gemessen und aus ihm und der beobachteten Stromstärke nach dem Ohm'schen Gesetz die elektromotorische Kraft abgeleitet. Absolute Widerstandsbestimmungen lassen sich aber direkt nur sehr schwer und in seltenen Fällen unter besonders günstigen Verhältnissen genau ausführen. Es behält daher eine willkürliche, aber unveränderliche Widerstandseinheit, wie sie die Siemens'sche darstellt, den grossen Vorzug, dass man mit ihr, sobald sie einmal in absolutem Mafze ausgedrückt ist, alle anderen Widerstandsbestimmungen auf absolutes Mafz zurückführen kann. Die ersten Methoden zur Messung von Widerständen in absolutem Mafze sind von W. Weber angegeben worden.

Die Untersuchungen Weber's über absolute Mafzeinheiten der verschiedenen elektrischen Gröfzen sind von grofser Bedeutung geworden. Allerdings hat es lange Zeit gedauert, bis sie eine allgemeine Anwendung fanden. Der Grund davon ist darin zu suchen, dass W. Weber seinen elektrischen Einheiten als Grundmafze das Millimeter, das Milligramm und die Sekunde zu Grunde legte und dass sich die hierauf aufgebauten Einheiten der elektromotorischen Kraft und des Widerstandes für praktische Zwecke nicht verwenden lassen. Für die Bestimmung der Stromstärke war die Weber'sche Wahl nicht ungünstig. Denn, wie wir schon gesehen haben, ist die Weber'sche Stromeinheit 1,0489mal gröfser als die chemische. Wenn man dagegen die Siemens'sche Widerstandseinheit, welche sich für praktische Zwecke aufserordentlich eignet, im Weber'schen Mafze ausdrückt, so kommt man auf die Anzahl von nahezu 10000 Millionen. Wenn man daher die Widerstände langer Telegraphenleitungen in diesem Mafze angeben wollte, müsste man dazu ungeheuer grofse Zahlen gebrauchen. Auf ähnlich grofse Zahlen kommt man bei der Berechnung der elektromotorischen Kräfte, die praktisch verwendet werden. Ein zweiter Übelstand lag darin, dass die von Weber geschaffenen elektrischen

Einheiten einer kurzen Bezeichnung ermangelten. Man benannte sie durch die Dimensionsfunktionen ihrer Fundamenteinheiten. Es wurde also gesagt, dass

$$\text{eine beobachtete Stromstärke } i = n \text{ (} mg^{1/2} mm^{1/2} sec^{-1} \text{)}$$

$$\text{eine elektromotorische Kraft } a = n \text{ (} mg^{1/2} mm^{1/2} sec^{-2} \text{)}$$

$$\text{und ein Widerstand } W = n \text{ (} mm \cdot sec^{-1} \text{) sei.}$$

Der Unbequemlichkeit wegen liessen nun die Beobachter die Bezeichnung der Einheiten oft aus, nachdem sie dieselben anfangs in Worten angegeben hatten, und gaben dadurch häufig zu den unangenehmsten Irrtümern Veranlassung.

Im Jahre 1861 hat daher die British Association for the advancement of science die Aufgabe in die Hand genommen, auf Grund des Weber'schen Masssystems eine Wahl von passenden Einheiten zu treffen und passende Namen dafür festzustellen. Die British Association hat nun auf den Vorschlag von William Thomson als Einheiten der Masse, Länge und Zeit das Gramm, das Centimeter und die Sekunde gewählt. Aber auch diese Grundeinheiten liefern noch elektrische Einheiten, deren Gröfsen von praktisch zu messenden Gröfsen sehr verschieden ist. Die British Association hat daher beschlossen, die aus dem Thomson'schen System von Fundamenteinheiten hervorgehenden elektrischen Einheiten noch mit gewissen Potenzen von 10 zu multiplizieren oder zu dividieren und so Einheiten von praktisch zweckmäfsiger Gröfse zu bilden. Als Benennung für diese letzteren Einheiten sind dann die Namen berühmter Männer ausgewählt worden, welche sich um diesen Teil der Physik besondere Verdienste erworben haben. Die Widerstandseinheit wurde nach Ohm, welcher den Einfluss des Widerstands auf die Stromstärke zuerst richtig festgestellt hat, anfänglich Ohmad und später Ohm genannt. 1 Ohm ist 10⁹mal gröfser als die Thomson'sche Widerstandseinheit und nur sehr wenig gröfser als 1 Siemens. Es ist nämlich 1 Ohm = 1,06 Siemens.

Die elektromotorische Kraftereinheit wurde nach Volta, der zuerst die Existenz einer solchen Kraft nachwies, mit Volt bezeichnet. Diese ist 10⁸mal gröfser als die Thomson'sche Kraftereinheit und ungefähr gleich der elektromotorischen Kraft eines Daniell'schen Elements. Es ist nämlich 1 Daniell = 1,09 Volt.

Für die Einheit der Stromstärke ($i = \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}}$) hatte die British Association keinen besonderen Namen vorgeschlagen. Die englischen Elektriker fühlten später das Bedürfnis, auch für die Stromstärke ein besonderes Wort zu haben und gebrauchten allmählich immer mehr für ihre Stromeinheit den Namen Weber. In Deutschland wurde damit aber die ursprünglich von Weber selbst gebrauchte Stromeinheit bezeichnet. So gab es schliesslich 2 Webereinheiten, von denen die englische zehnmal so grofs war als die deutsche.

Es war nicht zu verkennen, dass die englische Ausführung des ursprünglich deutschen Systems von Gauss und Weber ihre Vorzüge hat unter der Voraussetzung, dass sie mit hinreichender Genauigkeit verwirklicht werden kann. Aber die praktische Ausführung, besonders die absolute Bestimmung des Ohm stiefs auf die gröfsten Schwierigkeiten. Die Versuche, welche die British Association veranlafste, sind hauptsächlich nach den Plänen und unter Leitung von Clerk Maxwell im Laboratorium der Universität Cambridge ausgeführt worden. Es wurden 3 Originaldrähte von Kupfer als Etalons des Ohm hergestellt. Aber nicht allein die von verschiedenen Ateliers hiervon abge-

nommenen Kopien, sondern auch die Originale selbst zeigten bald kleine Abweichungen von einander. Es ist dies nicht zu verwundern, da die elektrischen Ströme, welche durch Drähte aus festem Metalle gehen, den Krystallisationszustand und damit das Leitungsvermögen auf die Dauer verändern. Außerdem stimmten die Werte, welche verschiedene Physiker für das Ohm durch ihre Versuche feststellten, durchaus nicht überein. Unter diesen Umständen konnte man sich in Deutschland, wo die inzwischen (1860) von Siemens hergestellte Quecksilbereinheit eine unbedingt zuverlässige Vergleichbarkeit elektrischer Messungen ermöglichte, nicht entschliessen, das englische System anzunehmen, obwohl es absolute Einheiten von praktischer Anpassung enthielt. Man behielt in Deutschland das willkürliche System bei, demgemäss man den Widerstand nach Quecksilbereinheiten, die Stromstärke nach der Anzahl der in einer Minute zersetzten Kubikcentimeter Knallgas und die elektromotorische Kraft nach Daniells berechnete. An dieses Siemens'sche System, wie wir es kurz bezeichnen wollen, schlossen sich Österreich, zum Teil auch Russland und ein Teil der östlichen Länder an. Das englische System dagegen hat nicht nur über England und die englisch sprechenden Länder, sondern auch über Frankreich Ausbreitung gefunden. Nun war es ein wesentliches Bedürfnis zu erreichen, dass das Verhältnis der von beiden Ländergruppen gebrauchten Masse ganz genau festgesetzt oder aber eine völlige Übereinstimmung hergestellt wurde. Um dies zu erzielen, trat im Oktober 1882 in Paris ein Elektriker-Kongress zusammen, dem die hervorragendsten Physiker aller Länder angehörten. Dieser Kongress nahm die Festsetzungen der British Association bezüglich der praktischen Einheiten des Widerstandes, der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke, sowie deren Benennungen an. Nur für die Stromeinheit wurde ein anderer Name, nämlich Ampère, eingeführt, weil der in England allgemein üblich gewordene Name Weber für zwei verschiedene Stromstärken in Gebrauch war. Es wurden aber von diesem Kongress die von der British Association aus Kupferdraht hergestellten Widerstandsetalons nicht für hinreichend korrekt anerkannt. Über die „legale“ Grösse des Ohm konnte man sich jedoch noch nicht einigen. Es sollte vielmehr ein zweiter Kongress darüber den endgültigen Beschluss fassen. Diese zweite Konferenz trat denn auch im April 1884 zusammen. Es wurde eine Reihe neuer Arbeiten über die Bestimmung des Ohm, ausgedrückt in Werten der Siemens'schen Quecksilbereinheit, vorgelegt. Die Bestimmungen zeigten eine ziemlich weitgehende Übereinstimmung und auf Grund derselben wurde der Wert des Ohm auf 1,060 Quecksilbereinheiten festgesetzt.

Der Elektriker-Kongress nahm noch zwei neue praktische Einheiten an, nämlich das Coulomb als Einheit der Elektrizitätsmenge, und das Farad, als Einheit der Capacität. 1 Coulomb ist diejenige Elektrizitätsmenge, welche 1 Ampère in 1 Sekunde liefert. 1 Farad ist die Capacität eines Kondensators, der 1 Coulomb enthält, wenn die Potentialdifferenz der beiden Platten 1 Volt beträgt.

Es ist zu beklagen, dass bei der Benennung der verschiedenen praktischen Einheiten der Schöpfer des ganzen Systems mit einem bloßen Beglückwünschungstelegramm abgefunden und der Name Weber nicht für die Stromeinheit festgesetzt wurde. Der Grund, dass Verwirrung entstehen würde, wenn man die praktische Stromeinheit auch Weber nenne, ist nicht stichhaltig. Man hätte dann von selbst aufgehört, die von W. Weber gebrauchte Einheit so zu bezeichnen.

Die elektromagnetischen Maße sind durch Vermittelung des absoluten magnetischen Maßes auf die Grundeinheiten zurückgeführt und erscheinen daher in einer gewissen Abhängigkeit von dem magnetischen Maße. Aus der Unabhängigkeit der elektrodynamischen Grundgesetze von den magnetischen geht aber hervor, dass dies in der Sache keineswegs begründet ist. Es hat daher W. Weber auch elektrodynamische Maßeinheiten hergestellt, bei welchen er auf die Grundgesetze der Elektrodynamik und Volta-Induktion zurückgeht. Eine praktische Verwertung haben jedoch diese Einheiten nicht gefunden.

Während die elektrodynamischen Maßeinheiten dieselben Dimensionen wie die elektromagnetischen besitzen und sich nur durch einen Zahlenfaktor von ihnen unterscheiden, unterscheidet sich von diesen beiden das dritte absolute elektrische Maß, welches W. Weber ebenfalls vorgeschlagen und zum ersten Male mit R. Kohlrausch gemeinsam durchgeführt hat, auch durch die Dimensionen, in welchen es die Grundeinheiten enthält. Es ist das sogenannte elektrostatische Maßsystem. Der wesentliche Unterschied beider Systeme (nämlich der elektromagnetischen und -dynamischen Maße einerseits und der elektrostatischen andererseits) rührt daher, dass die elektrischen Kräfte, welche zur Messung angewandt werden, doppelter Art sind. Diese Kräfte sind entweder von der Bewegung der Elektrizitätsmengen unabhängig und werden stets von diesen auf einander ausgeübt, sie mögen in Ruhe oder in Bewegung sein, oder sie entstehen nur durch die Bewegung. Die Messung der ersteren Kräfte liegt dem elektrostatischen System, die der letzteren den beiden anderen elektrischen Maßgruppen zu Grunde.

Wenn man eine Stromstärke elektrostatisch und ebenso elektromagnetisch misst, so findet man, dass man die letztere Maßzahl mit einer gewissen Geschwindigkeit v multiplicieren muss, um dieselbe Stromstärke elektrostatisch auszudrücken. Eben diese Geschwindigkeit v oder deren Quadrat drückt das Verhältnis der elektromotorischen Kraft, des Widerstandes, der Elektrizitätsmenge und der Capacität aus, diese Größen einmal elektrostatisch und das andere Mal elektromagnetisch gemessen. Man hat nun die Geschwindigkeit v zu bestimmen gesucht. Die von den verschiedenen Experimentatoren erhaltenen Werte zeigen zwar keine große Übereinstimmung, aber aus den Messungen ergibt sich, dass der Wert von v mit großer Annäherung gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes ist. Diese sehr annähernde Übereinstimmung des Wertes von v und der Lichtgeschwindigkeit ist eine der Hauptstützen der elektromagnetischen Lichttheorie, die durch die genialen Versuche von Herrn Prof. Hertz nun auch ihre experimentelle Bestätigung gefunden hat.