

Zur Geschichte des Metermasses

Von K. CLUSIUS*

Die Schaffung der modernen Längennormale, des Meters, geht auf die Zeit der grossen französischen Revolution zurück. Damals wurden die entscheidenden Beschlüsse gefasst, deren Ausführung sich zu einem riesigen Arbeitsprogramm auswachsen sollte, das bei steigenden Ansprüchen an die Güte und Reproduzierbarkeit der Normale nur in Etappen bewältigt werden konnte und auch in Zukunft immer wieder neue Probleme aufwerfen wird. Die auftretenden Fragen haben die scharfsinnigsten Persönlichkeiten jeder Zeit angezogen, die in der Kulturgeschichte einen Platz beansprucht haben. Glanzvolle Namen sind darunter, Namen von Philosophen, Physikern, Mathematikern, Geodäten, Astronomen, Chemikern, ja sogar von Diplomaten. Die Schaffung einer einwandfreien Längennormale hat durch die Beteiligung so vieler ausgezeichneten Männer eine Wirkung erlangt, die weit über die Lösung der ursprünglichen engen Spezialaufgabe hinausging und sich für die verschiedensten Richtungen menschlicher Tätigkeit als anregend und segensreich erwies.

Notwendigkeit eines universellen Längenmasses

Auf PROTAGORAS aus Abdera (480–410), einen der bedeutendsten Sophisten, geht der «Homo-mensura»-Satz zurück: «Der Mensch ist das Mass aller Dinge». Heute noch verrät die Benennung verschiedener, veralteter Längenmasse, dass sie vom menschlichen Körper genommen sind. Die Elle, der Fuss, der Daumen, der im französischen als «pouce» so viel wie «Zoll» bedeutet, sind dafür beredte Beispiele. Für die Abnahme des Masses gab es bei der unterschiedlichen Grösse der einzelnen menschlichen Individuen zwei Möglichkeiten. Entweder benützte man als Prototyp eine durch ihre soziale Stellung ausgezeichnete Persönlichkeit; zum Beispiel wurde im alten England im Jahre 1101 der Abstand vom Mittelfinger des ausgestreckten Armes bis zur Nasenspitze Heinrichs I. als Einheitsmass gewählt. Das so bestimmte Yard entspricht 3 Fuss und ist mit geringfügigen Änderungen heute noch in England im Gebrauch. Der im 18. Jahrhundert in Frankreich offiziell eingeführte «pied du roi» weist auf einen ähnlichen Ursprung hin. Die andere Möglichkeit besteht darin, dass man einer Mittelwertsbildung den

Vorzug gibt. So wird die Rute zu 16 Fuss in Köbels Buch *Geometry* (Frankfurt 1575), dadurch definiert, dass sich 16 Mann, klein und gross «wie sie gerade aus der Kirche kommen», Schuh an Schuh hintereinander aufstellen. Eine derartige Längendefinition hat den offensichtlichen Nachteil, dass je nach der Landesgegend und durchschnittlichen Körpergrösse die Einheitslänge recht verschieden ausfällt.

Diese Unterschiede spielten solange keine grössere Rolle, wie die einzelnen Wirtschaftsbezirke eines Landes voneinander weitgehend abgeschlossen waren. Die Bevölkerung war allerdings der Willkür der Feudalherren ausgesetzt, indem etwa ein Längenmass und damit die daraus abgeleiteten Hohlmasse vergrössert wurden, während die Zahl der an die Obrigkeit abzuliefernden Kasten Getreide die gleiche blieb. Deshalb waren später auf den Märkten wenigstens die Längenmasse als Metallstäbe in Stein eingelassen, um jedem Käufer eine Kontrolle des Masses zu ermöglichen. Als Handel und Wandel erstarkten, erwies sich die Vielfalt der Maßsysteme, die Betrügereien Tür und Tor öffnete, als ein ausserordentliches Hemmnis, das vom Bürgertum auf das schwerste empfunden wurde. Der König vermochte sich dem Adel gegenüber nicht durchzusetzen, der an seinen Vorrechten, zu denen die Zuständigkeit in Dingen von Mass und Gewicht zählte, zäh festhielt. In Frankreich war die Misswirtschaft besonders arg und erst als die Französische Revolution alle Standesvorurteile wegfegte, waren die Voraussetzungen gegeben, um für das ganze Land ein einheitliches Maßsystem einzuführen.

Der erste Anstoss zur Schaffung eines einheitlichen Maßsystems ging wohl von dem Bischof von Autun, TALLEYRAND, aus. Er äusserte sich 1790 in der Konstituierenden Versammlung folgendermassen: «Es genügt nicht, ein Gewicht und ein Längenmass an Stelle von vielen einzuführen. Das System muss vollkommen sein. Es muss auf einem unveränderlichen Modell aufgebaut werden, das sich in der Natur vorfindet, und auf das sich alle Nationen erneut beziehen können, falls die angenommenen Standardmasse verlorengehen oder sich ändern sollten». Es dürfte kein Zufall sein, dass

* Physikalisch-Chemisches Institut der Universität Zürich (Schweiz)

gerade der Diplomat, der sich später zum überragenden europäischen Staatsmanne entwickeln sollte, in der französischen Nationalversammlung ein System fordert, das nicht nur Interessen des eigenen Landes dient, sondern internationale Ansprüche zu befriedigen vermag. Weiter liegt es im Sinne der Zeit, in der ROUSSEAU'S Ruf «Zurück zur Natur» erscholl, dass die Idee, der Mensch sei das Mass aller Dinge, für die Maßsysteme wenigstens zu Grabe getragen wurde.

Über Naturmasse

Ein Naturmass war damals bereits in der Sekunde verwirklicht, die sich wegen der engen Verknüpfung von Astronomie und Schifffahrt bei allen zivilisierten Völkern eingeführt hatte und als ältestes internationales Mass gelten darf. Um 1670 machte CHRISTOPHER WREN, der Wiederaufbauer von London nach dem grossen Brand von 1666, den Vorschlag, die Länge des Halbsekundenpendels als Längenmass zu verwenden. Ein ähnlicher Vorschlag ging zu gleicher Zeit von dem Lyoner Astronomen Abbé PICARD aus. Für die Länge des Sekundenpendels folgt $l = g/\pi^2$ und mit einer Erdbeschleunigung $g = 980 \text{ cm/sec}^2$ würde die Einheit einen knappen Meter betragen. CHRISTIAN HUYGENS hat diesen Gedanken 1673 aufgegriffen und seine Vorteile mit grosser Klarheit im Buch über *Die Pendeluhr* näher erläutert:

«Sehr geeignet sind für diesen Zweck die Uhren, bei denen jede Schwingung eine ganze oder eine halbe Sekunde dauert, und die auch mit einem Sekundenzeiger versehen sind. Hat man nämlich eine derartige Uhr nach der Methode, die ich bei der Beschreibung der Uhr angegeben habe, auf Grund von Fixsternbeobachtungen auf die mittlere Länge eines Tages eingestellt, so hat man daneben ein anderes, einfaches Pendel zu hängen, das heisst eine Kugel aus Blei oder einem anderen schweren Stoffe, die an einem feinen Faden hängt, und dieses Pendel ein wenig anzustossen; dann hat man die Länge des Fadens so lange zu vergrössern oder zu verringern, bis die Hin- und Rückgänge dieses Pendels während einer Viertel- oder halben Stunde genau übereinstimmen mit den Schwingungen des Uhrpendels ... Misst man dann den Abstand vom Aufhängepunkt bis zum Schwingungsmittelpunkt des einfachen Pendels, und teilt man ihn, wenn ein Hingang oder ein Rückgang des Pendels jedesmal eine Sekunde dauert, in drei gleiche Teile, so ist ein solcher Teil die Länge eines Fusses, wie ich ihn früher Stundenfuss genannt habe; und dieses Mass kann nicht nur überall in der Welt festgestellt werden, sondern auch in aller Zukunft immer wieder aufs neue bestimmt werden ... Und auf diese Weise erlangt dieser Fuss, und auch beliebige andere Masse, ewige Dauer».

Durch die mehr als 100 Jahre später von dem Franzosen CHARLES BORDA benutzte Methode der Koinzidenzen lässt sich ein solcher Längenvergleich zweier Pendel ausserordentlich genau durchführen, wovon

besonders der deutsche Astronom F. W. BESSEL ausgiebigen Gebrauch gemacht hat.

Die Erde ist ein abgeplatteter Rotationskörper. Für das Internationale Referenzellipsoid hat der Pol vom Erdmittelpunkt einen um 21,476 km kleineren Abstand als ein Punkt des Äquators. Infolge dieser Abplattung und wegen des Fehlens der Fliehkraft durch die Erdrotation am Pol ist die Fallbeschleunigung von der geographischen Breite abhängig. Während sie am Äquator $978,05 \text{ cm/sec}^2$ beträgt, nimmt sie zum Pol hin bis auf $983,22 \text{ cm/sec}^2$ zu. Damit wird aber die Länge des Sekundenpendels breitenabhängig. Der französische Astronom Jean Richer erfuhr diese Tatsache höchst eindrücklich, als er 1672 auf der beim Äquator gelegenen Insel Cayenne astronomische Messungen anstellte. Seine von Paris mitgenommene Pendeluhr blieb täglich um 2 min zurück und das Pendel musste um 2,8 mm verkürzt werden, um diese Zeitdifferenz aufzuholen. Mit dieser Feststellung verlor der Vorschlag, das Längenmass an das Sekundenpendel anzuschliessen, viel von seinem Reiz, auch wenn TALLEYRAND die Festsetzung dahin präzisieren wollte, dass man eine «mittlere Breite der zivilisierten Welt», etwa 45° , für das Sekundenpendel benutzen sollte. TALLEYRAND versuchte mit seinem Vorschlag die französischen Interessen mit den englischen auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen. Doch hinderten leider die bald darauf ausbrechenden Feindseligkeiten zwischen Frankreich und England eine überstaatliche Einigung, die der Weltwirtschaft Milliarden guten Geldes erspart hätte.

Die von der französischen Akademie am 8. Mai 1790 eingesetzte Kommission, der hervorragende Gelehrte wie BORDA, LAGRANGE, LAVOISIER, TILLET und CONDORCET angehörten, nahm ihre Arbeit mit einem ersten, äusserst wichtigen Beschluss auf: das Dezimalsystem sollte als ausschliessliche Grundlage für alle Vielfache und Unterteilungen der neuen Normale dienen. Das Sekundenpendel wurde als Längennormale verworfen und am 30. März 1791 als Einheit der 40000000ste Teil des durch die Pariser Sternwarte gehenden Meridians gewählt. Ein Teilstück davon wurde von DELAMBRE und MÉCHAIN zwischen Dünkirchen und Monjuich bei Barcelona unter den grössten äusseren Schwierigkeiten vermessen. Der Bogen wurde später bis zur Insel Formentera verlängert, woran sich der französische Astronom ARAGO beteiligte, der uns in seinen Jugenderinnerungen eine anschauliche Schilderung der Abenteuer, die mit dem Unternehmen verbunden waren, hinterlassen hat. Der berühmte deutsche Astronom BESSEL fand 1826 bei einer neuen Gradmessung, dass die Länge des Erdquadranten 10000856 m nach dem festgesetzten Mass betrug, dass also das Urmeter um $0,0856 \text{ mm}$ zu kurz ausgefallen war. Bezogen auf das Referenzellipsoid vergrössert sich die Abweichung sogar auf $0,23 \text{ mm}$. Es ist nun offensichtlich, dass man unmöglich bei jeder genaueren

Erdvermessung jedesmal wieder eine neue Längeneinheit einführen kann. Soll nicht eine heillose Verwirrung Platz greifen, so muss man vielmehr an dem einmal geschaffenen Metermass festhalten. Damit ist freilich die ursprüngliche Idee des Naturmasses zunächst als gescheitert anzusehen.

Im Grunde hätte man also ebensogut die Länge des Sekundenpendels unter bestimmten Bedingungen als Einheit wählen können. Bereits BORDA und CASSINI erreichten 1796 eine hervorragende Genauigkeit, indem sie in Paris die Pendellänge zu 993,918 mm fanden, während sie sich nach den heute geltenden Werten zu 993,920 mm hätte ergeben sollen. Die Bestimmung einer Pendellänge lässt sich viel einfacher und billiger durchführen als eine Gradmessung, hat aber den schwerwiegenden Nachteil, die Bestimmung eines Naturmasses mit der eines anderen zu verquicken. Zudem liefert eine Gradmessung noch einen gewissen Aufschluss über die Gestalt der Erde. In dieser Hinsicht haben jedoch in jüngster Zeit die Beobachtungen der Umlaufzeit künstlicher Satelliten alle früheren Informationen an Genauigkeit weit übertroffen und die Abplattung auf 1:298,3 festgestellt.

Das «Mètre des Archives»

Als der Meterprototyp geschaffen war, lud TALLEYRAND, jetzt Aussenminister, im September 1798 alle Nationen zur Entsendung von Vertretern ein, die von der geleisteten Arbeit der französischen Forscher Kenntnis nehmen sollten. BERTHOLLET, MONGE und VANDERMONDE hatten die Verarbeitung des Platins für die Meternormale geleitet, MÉCHAIN, DELAMBRE, LAPLACE und PRONY die geodätischen Arbeiten und Rechnungen beendet. Am 22. Juni 1799 empfing die Gesetzgebende Körperschaft die Kommission der französischen und ausländischen Gelehrten, um die Längen- und Gewichtsetalons als Grundlagen des neuen Systems entgegenzunehmen und ihren Gebrauch legal zu verankern. Aber selbst in Frankreich dauerte es Jahrzehnte bis das metrische System sich durchsetzen konnte, so gross sind Beharrungsvermögen und passiver Widerstand der Masse, der mit den neuen Festsetzungen in erster Linie gedient werden sollte.

Das Urmeter wird als «Mètre des Archives» bezeichnet und in Paris aufbewahrt. Es ist aus reinem Platin hergestellt und hat die Abmessungen $25 \times 4,05 \times 1000$ mm, stellt also ein Parallelendmass dar. Das Urmeter hat jedoch grosse technische Mängel. Ein derart langes prismatisches Metallband ist nicht genügend starr und gewöhnliches Platin ist weich, so dass die Enden durch Abgreifen der Flächen mit Fühlhebeln, was die damalige Methode des Längenvergleichs war, rascher Abnützung unterworfen sind. Ausserdem ist das Material chemisch schlecht definiert. Die Platinbegleitmetalle Palladium und Rhodium wurden erst 1803 durch HYDE WOLLASTON, Iridium und Osmium erst 1804 durch SMITHSON TENNANT entdeckt, Ruthenium

gar erst 1845 durch KARLOVICH KLAUS. Was bedeutet also «reines Platin» vor 1800, als man diese möglichen Verunreinigungen noch gar nicht kannte?

Die diplomatische Meterkonvention und der Meterprototyp von 1889

So war es nicht verwunderlich, dass mehr und mehr Stimmen laut wurden, die nach einer besser definierten Längeneinheit riefen. Als treibende Kräfte für diese Entwicklung sind die steigenden Ansprüche des Werkzeugbaues und des Waffenwesens anzusehen, deren Begehren von der Mitte des 19. Jahrhunderts an nicht mehr zur Ruhe kommen sollten und sich im wesentlichen durch zwei Stichworte kennzeichnen lassen: 1. die Massenherstellung völlig gleichartiger Erzeugnisse und 2. die Austauschbarkeit der einzelnen Bauelemente von Maschinen und Geräten.

Es ist eine ungeheure Leistung der modernen Technik, die der Laie gar nicht recht zu würdigen weiss, dass sie beiden Forderungen zu entsprechen vermag. Wir leben nicht nur im Zeitalter der Massenanfertigung von Gütern, sondern haben auch die beliebige Austauschbarkeit ihrer einfachsten und kompliziertesten Bestandteile bei äusserster Gleichförmigkeit des Materials und höchster Präzision der Abmessungen erreicht. Der Automobilbau, das Flugzeugwesen, der Nachrichtendienst, der Schiffsbau und in neuester Zeit die Raketen- und Satellitentechnik wären ohne die Erfüllung dieser beiden Forderungen undenkbar. Um ihnen zu entsprechen, musste die Messtechnik auf das allerfeinste entwickelt werden.

Dabei hatte sich die Erkenntnis Bahn gebrochen, dass die Ausgestaltung der Längenmessung durch internationale Abmachungen erfolgen musste. Alle internationalen Kommissionen arbeiten jedoch langsam und schwerfällig. Schliesslich tritt 1870 eine internationale Konferenz zusammen, die aber wegen des deutsch-französischen Krieges bei ihren Arbeiten bald auf grosse Schwierigkeiten stösst, sodass erst 1875 zwanzig Länder die «Diplomatische Meterkonvention» unterzeichnen. Sie umfasst: 1. die Schaffung des Bureau International des Poids et Mesures; damit war erreicht, was schon TALLEYRAND beabsichtigte, und 2. den Auftrag an das Bureau, eine Anzahl erstklassiger Meterprototypen herstellen zu lassen.

Die neuen Meter sollen Strichmasse, keine Endmasse sein. Sie sollen maximale Starrheit mit minimalem Materialaufwand vereinigen, wobei die Striche auf der neutralen Faser anzubringen sind. Der Franzose TRESKA berechnet dafür einen eigentümlichen X-förmigen Querschnitt. In chemischer Hinsicht wird gefordert, dass die Unreinheiten 2% nicht übersteigen dürfen, wobei zur Härtung des allzuweichen Platins ein Zusatz von 10% Iridium vorgesehen wird. In 12 Arbeiten berichtet zwischen 1859 und 1880 HENRI ST. CLAIRE DEVILLE, der berühmte Entdecker der Dissoziation der Gase, mit seinem Mitarbeiter JULES

DEBRAY über die Metallurgie des Platins und seiner Begleitmetalle und die Herstellung der Platinlegierung für die Normalstäbe. Während 10 Jahren hat sich DEVILLE ausschliesslich diesen Arbeiten mit einem Eifer hingegeben, der seine Kräfte erschöpfte und vermutlich sein Leben verkürzte. Am 13. Mai 1874 erfolgte der Guss der Platin-Iridium-Legierung im Conservatoire des Arts et Métiers, der Anstalt, die so viele hervorragende Leistungen französischer Wissenschaftler und Techniker gesehen hat. Dabei wurde ein Block von 250 kg Platin bewältigt, eine für die damalige Zeit enorme Leistung. Aus ihm wurden die Stäbe mit einem rechteckigen Querschnitt von 2×2 cm geformt, von denen jeder etwa 8 kg wog. Nachdem das von TRESCA geforderte X-förmige Profil herausgearbeitet war, wog jeder Stab noch 3,2 kg. Aber die Enttäuschung war gross, als die fertige Legierung eine Verunreinigung von 2,9% aufwies, sodass eine der ursprünglichen Forderungen nicht erfüllt war und die Annahme der Etalons durch das internationale Komitee am 19. September 1877 verweigert wurde.

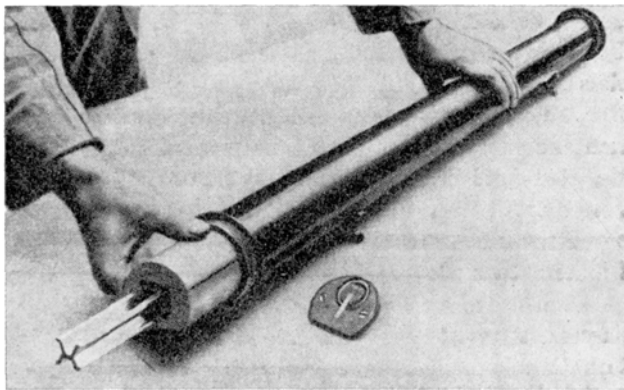


Fig. 1. Ein Platinurnmeter von 1888 in seinem hölzernen Schutzkasten, der seinerseits in einem Metallrohr liegt. Man beachte den X-förmigen Querschnitt und die elegante, zierlich erscheinende Ausführung des Metermasses.

Darauf übernahm im gleichen Jahr die Firma Johnson Matthey in London die Aufgabe und goss nach langjährigen Vorbereitungen unter Verwendung der französischen Erfahrungen 1886 neue Barren, die nur 0,23% Verunreinigungen enthielten. Die vorgearbeiteten Stäbe wurden nach Paris zur endgültigen Fertigstellung und Politur geschickt, auch wurden dort die Strichmarken angebracht. Aus 30 Stäben wählte man 1889 den Stab Nr. 6 unter der Bezeichnung «M» als Urnormale, weil er dem Mètre des Archives am nächsten kam. Als *ein Meter* gilt der Abstand der Achsen der beiden Mittelstriche bei 0°C. Diese Festsetzung wurde 1927 durch den Zusatz ergänzt, dass «bei normalem atmosphärischem Druck in horizontaler Lagerung auf zwei symmetrisch zur Mitte liegenden Rollen von mindestens 1 cm Durchmesser in 571 mm Abstand gemessen werden soll». Dann ist die Durchbiegung unter dem Eigengewicht am geringsten. Die

anderen Meterstäbe wurden unter den der Meterkonvention angeschlossenen Ländern verteilt.

Nachteile eines fixen Meterstabes

Mit diesen Massnahmen schien das Menschenmögliche für die Festlegung eines Urmaßstabes geschehen zu sein und man wird sich fragen, ob es überhaupt denkbar ist, zu einer besseren Längendefinition vorzudringen. Bei näherem Zusehen entdeckt man jedoch, dass das ganze bis dahin geübte Vorgehen grossen Bedenken unterliegt.

Da ist einmal die Unbestimmtheit der Arbeitsbedingungen. Die Temperatur müsste auf $\pm 0,001^\circ\text{C}$ konstant sein, um die Richtigkeit der gemessenen Längen auf $1:10^8$ zu garantieren, weil der Ausdehnungskoeffizient der Platin-Iridium-Legierung

$$dL/dT = 8,62 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$$

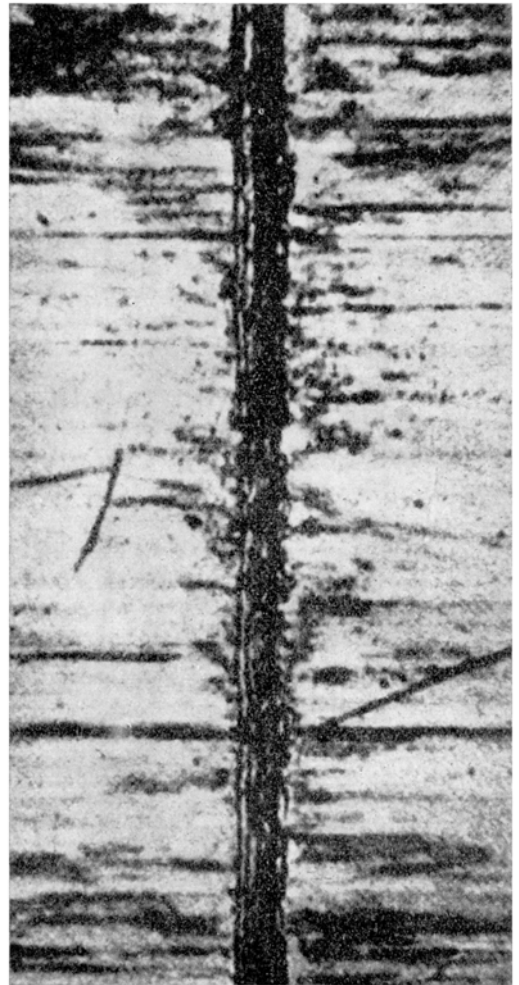


Fig. 2. Strichmarke auf dem Meterprototyp Nr. 26 in 500facher Vergrösserung.

beträgt. Aus diesem Grunde wurde seinerzeit die Eichtemperatur auf 0°C verlegt, die sich mit schmelzendem Eis genau herstellen lässt, aber in der Anwen-

derung zu grossen Unbequemlichkeiten führt. Eine entsprechend genaue Thermostatisierung der Messeinrichtungen bei einer anderen Temperatur stösst auch heute noch auf nicht geringe Schwierigkeiten. Dazu kommt die Unsicherheit der Massabnahme, die mit Messmikroskopen geschieht. Der Strichfehler ist wegen der Eigenbreite der Marken keineswegs zu vernachlässigen. Die genaue Untersuchung mit modernen Abdruckverfahren zeigt, dass es sich bei den Marken der internationalen Meterstäbe eher um Kratzer in dem harten Material als um scharfe Nuten mit keilförmigem Profil handelt. Höchst beunruhigend ist jedoch die Möglichkeit einer Instabilität des Gefüges des Prototyps. Nachmessungen und Vergleiche des internationalen Urmeters «M» mit den nationalen Meterstäben haben die unerwartete Tatsache ergeben, dass ausgerechnet der internationale Prototyp gegenüber dem Durchschnitt der übrigen Maßstäbe in 50 Jahren eine Verkürzung um $0,5 \mu$ erlitten hat. Dieses innere Eigenleben der Platin-Iridium-Legierungen war um 1880 noch unbekannt und wurde nicht im entferntesten vermutet. Die Gitterkonstante des Platins liegt mit $3,91 \text{ \AA}$ nahe der des Iridiums mit $3,83 \text{ \AA}$. Es schien selbst zu Anfang dieses Jahrhunderts noch sehr unwahrscheinlich, dass dieser Unterschied von nur 2% eine Instabilität der Legierung hervorrufen könnte, zumal beide Metalle kubisch flächenzentriert kristallisieren und eine lückenlose Mischkristallreihe zu bilden scheinen. Tatsächlich ist jedoch das Unwahrscheinliche eingetreten. Platin und Iridium bilden eine stabile Mischkristallreihe nur oberhalb von 1000°C . Darunter tritt eine breite Mischungslücke auf, und wenn auch der Zerfall in eine iridium- und eine platinreiche Phase bei Zimmertemperatur äusserst langsam erfolgt, so handelt es sich bei den Meterétalons prinzipiell um Legierungen mit thermodynamisch instabilem Gefüge.

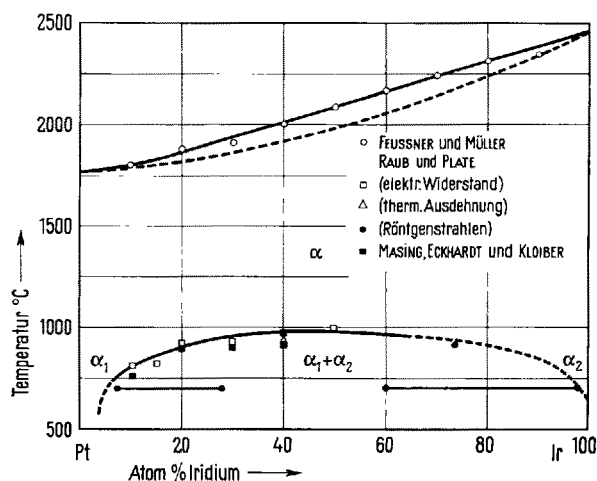


Fig. 3. Das Zustandsdiagramm Platin-Iridium.

Wiederum liess sich zunehmend die Kritik nehmen. Man sah immer mehr ein, dass ein fixer

Meterstab überhaupt veraltet war und enorme Nachteile und Risiken mit sich brachte:

1. Es ist immer ein Verlust des Prototyps durch Krieg, Erdbeben, Einschlag eines Riesenmeteoriten oder andere Naturkatastrophen zu befürchten und nie mit Sicherheit auszuschliessen.

2. Der Prototyp soll im Grunde zwei völlig widersprechenden Erfordernissen genügen. Er ist einmal so wichtig, dass er dauernd benützt werden sollte, um Sekundärmasse herzustellen und zu kontrollieren. Grade diese Forderung erhöht aber die Gefahr von Beschädigungen und unglücklichen Zufällen ausserordentlich. Andererseits ist nämlich der Meterprototyp ein solches Unikat, dass man es am besten überhaupt nicht anrührt und gebraucht. Es ist daher nicht verwunderlich, dass das internationale Meter «M» nur bei wenigen Gelegenheiten zugänglich gemacht wird. Die französische Kommission hat während 80 Jahren nur in 5 Fällen die Genehmigung erteilt, den Prototyp «M» unmittelbar zu Messungen heranzuziehen!

3. Es ist kaum zu hoffen, ein Material zu finden, das die Möglichkeit von Gefügeänderungen im Laufe der Zeit gänzlich ausschliesst. Die Herstellung eines Wolfram-Einkristalls in den nötigen Abmessungen wäre für die heutige Technik wahrscheinlich nicht unmöglich. Aber auch hier ist die Gefahr von Gleitungen und anderen Vorgängen im Kristallgitter nicht von der Hand zu weisen, ganz abgesehen davon, dass die vorgehenden Einwände dadurch nicht entkräftet werden.

4. Immer bleibt bei einem Strichmass die Schwierigkeit, die Marken in der wünschenswerten Schärfe anzubringen, wenn unsere Zeit darin auch grosse Fortschritte gemacht hat.

5. Schliesslich erfordern die sekundären Ableitungen des Längenmasses genaueste Teilmaschinen, damit man zum Beispiel Parallelendmasse aus nitriertem Stahl, wie sie JOHANSSON (1911) in die Technik einführte, an den Prototyp anschliessen kann.

Optische Definition der Längeneinheit; die Cadmiumlampe

Alle diese Bedenken führen dazu, einen materiellen Prototyp überhaupt auszuschliessen und die Längendefinition auf ganz anderem Wege vorzunehmen. In dieser Richtung hatte sich bereits 1829 der französische Physiker BABINET ausgesprochen und der Münchner Astronom LAMONT hatte schon 1839 den Vorschlag gemacht, Lichtwellenlängen als Masseinheit zu verwenden. Für diesen Gedanken hat sich später besonders CLERK MAXWELL eingesetzt, der 1870 die prophetischen Worte schrieb:

«Wenn wir absolut unveränderliche Einheiten der Länge, der Zeit und der Masse schaffen wollen, so müssen wir diese nicht in den Abmessungen, in der Bewegung und in der Masse unseres Planeten suchen,

sondern in der Wellenlänge, Frequenz und Masse der unveränderlichen, unvergänglichen und vollkommen gleichartigen Atome».

Hier taucht also der Gedanke des Naturmasses in einer neuen, geläuterten Form wieder auf. Er ist heute für die Masse durch Wahl des Kohlenstoffisotops ^{12}C als Einheit, für das Zeitmass durch die Atomuhren und für die Längeneinheit durch die neue optische Meterdefinition Wirklichkeit geworden.

Die Vorteile einer optischen Längeneinheit unter Benützung einer Lichtwellenlänge sind folgende: 1. Nach menschlichem Ermessen ist ein Verlust des Prototyps unmöglich, wenn an vielen Stellen der Welt die Messvorschrift aufbewahrt wird. 2. Eine Lichtwellenlänge erlaubt eine feine und genaue Einteilung des Meters in sich selbst. 3. Das Urmass ist jedermann unmittelbar zugänglich und lässt sich beliebig vervielfachen. 4. Optische Messungen verbürgen eine sehr hohe relative und absolute Genauigkeit der Längenbestimmung. 5. Alle Maßsysteme lassen sich auf Lichtwellenlängen zurückführen, wodurch man zu einem einheitlichen Grundmass für die ganze Erde kommt. So kann man zum Beispiel das Verhältnis Meter zu Yard endgültig festlegen.

Der amerikanische Physiker MICHELSON hat 1893–95 diese Idee durch interferometrische Ausmessung des Meters mit der roten Cadmiumlinie zu verwirklichen gesucht. Auf der 7. Generalkonferenz des Bureau des Poids et Mesures kam 1927 schliesslich ein *provisorischer* Beschluss zustande: 1. Die rote Cadmiumlinie gilt zunächst als primäres Normal für alle *Wellenlängen*-Messungen (nicht allgemein für alle *Längen*-Messungen!). 2. Die Wellenlänge der roten Cadmiumlinie hat in trockener Luft von 15°C bei 1 at Druck und 0,03% CO_2 -Gehalt den von BENOÎT und FABRY-PEROT bestimmten Wert

$$\lambda = 6438,4696 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Dies entspricht auch dem provisorischen Wert von 1553164,13 Wellenlängen für ein Meter. Darauf folgt eine Beschreibung der Ausführungsform, die eine besondere, von Michelson entwickelte Lampe vorsieht.

Die Mängel dieser provisorischen Wellenlängendefinition liegen auf der Hand (aber man hatte eben vor 35 Jahren noch nichts besseres!); sie lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen: 1. Es handelt sich um eine Strahlung in Luft. Die Notwendigkeit, trockene Luft von bestimmtem Druck und CO_2 -Gehalt zu verwenden, schliesst eine Unsicherheit ein. Zum Beispiel ist es bei einer Wellenlängenmessung mit einer grossen Gitteraufstellung fast immer notwendig, den Einfluss des schwankenden Luftdrucks, der Feuchtigkeit und des CO_2 -Gehalts rechnerisch zu korrigieren. 2. Das Provisorium sieht die Verwendung einer ganz bestimmten Lichtquelle vor, die rein konstruktiv heute längst überholt ist, aber wegen ihrer Definition den Fortschritten der Technik nicht ange-

passt werden darf. 3. Das Element Cadmium ist ein Isotopengemisch von 8 Nukliden mit den Massenzahlen 106, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 116, was MICHELSON (1895) nicht wissen konnte. Von einem solchen Gemisch ist die Ausstrahlung von streng monochromatischen Linien nicht zu erwarten, zumal die beiden Isotope ungerader Massenzahl sicher eine Hyperfeinstruktur aufweisen. Bei jeder derartigen Lichtquelle muss man mit dem Auftreten periodischer Messfehler rechnen, sobald es sich um grössere Längen handelt. 4. Die Temperatur der Cd-Strahlungsquelle liegt relativ hoch und ist schlecht definiert. 5. Der Gütefaktor $G = \sqrt{\text{Leistung}/\Delta\nu_{1/2}}$ bestimmt schliesslich die Reproduzierbarkeit und ist um so schlechter, je grösser die Halbwertsbreite $\Delta\nu_{1/2}$ der ausgesendeten Linie ist; diese ist aber bei der roten Cd-Linie keineswegs am günstigsten. 6. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Sekundär-Elektronen-Vervielfacher im Wellenlängengebiet der roten Cd-Linie wenig empfindlich sind.

Die neue Meterdefinition mit Hilfe des Isotops ^{86}Kr

Dies war der Stand der Angelegenheit, als wir 1942 eine Arbeit über die Abtrennung der beiden schweren Krypton-Isotope veröffentlichten. Krypton ist das Element mit der Ordnungszahl 36 und besteht aus einer Mischung von 6 Isotopen folgender Häufigkeit:

Massenzahl	78	80	82	83	84	86
Häufigkeit %	0,35	2,27	11,56	11,55	56,90	17,37

Wir hatten 10 l Krypton zur Verfügung und konnten mit einem Aufwand von 32000 kWh in einer 27 m langen Trennrohranlage 500 ml ^{84}Kr und 850 ml ^{86}Kr nach dem Thermodiffusionsverfahren rein isolieren. Dieses Gas wurde gerettet, als die Anlage 1943 durch einen Fliegerangriff zerstört wurde. Prof. KÖSTERS von der damaligen Physikalisch-Technischen Reichsanstalt schrieb uns, dass es von grösstem Interesse sei, die Strahlung des reinen ^{86}Kr auf ihre Monochromasie und Eignung als Längennormale zu untersuchen. KÖSTERS hat aus der Verbesserung der optischen Längenmessung eine Lebensaufgabe gemacht und durch Schaffung des Interferenzkomparators der Längenmessung eine vorher unerreichte Eleganz und Schnelligkeit der Ausführung bei höchster Genauigkeit gegeben. Aber erst das ^{86}Kr erlaubt diese Vorteile richtig auszunützen. Bei ihm handelt es sich um ein Reinelement gerader Ordnungs- und Massenzahl, bei dem keine Hyperfeinstruktur vorliegen kann, das also Linien höchster Interferenzfähigkeit aussenden sollte.

Beruhigend war noch der Umstand, dass schon die beim ersten Versuch abgetrennten ^{86}Kr -Mengen prinzipiell zur Füllung von 280 Lampen reichten. Es war leicht abzuschätzen, dass auch der künftige Weltbedarf durch im Trennrohr erhältliches Material ohne weiteres gedeckt werden konnte. Die Untersuchung der Eignung des Isotops ^{86}Kr wurde in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin und später in der

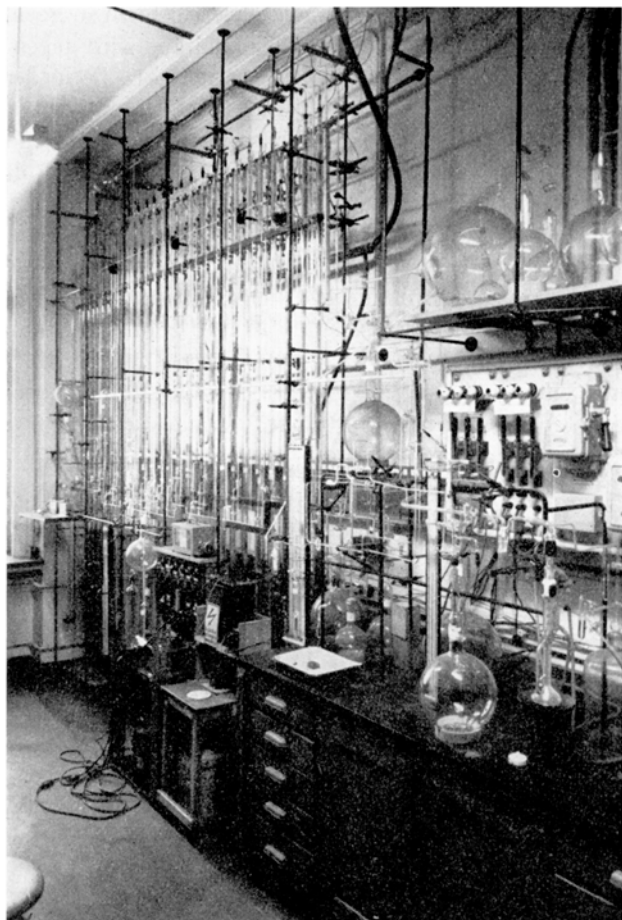


Fig. 4. Trennrohranlage des Physikalisch-Chemischen Instituts der Universität Zürich, in der u.a. die Kryptonisotope zerlegt wurden.

Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig mit grösster Gewissenhaftigkeit vorgenommen. Um diese Prüfungen und weiteren Entwicklungen hat sich besonders Dr. E. ENGELHARD verdient gemacht.

Wenn wir von der Forderung sprechen, eine monochromatische Wellenlänge als Längeneinheit zu benutzen, so muss man sich darüber klar sein, dass der Begriff der Monochromasie im strengen Sinne eine unerreichbare Fiktion ist, der praktische Umstände entgegenstehen: 1. Jede emittierte Strahlung besitzt eine natürliche Strahlungsbreite, die bei klassischer Berechnung unabhängig von der Wellenlänge $0,00012 \text{ \AA}$ beträgt. Nach quantenmechanischer Auffassung ist die Linienbreite von der Oszillatorenstärke und der Zahl der Niveaus abhängig, mit denen Ausgangs- und Endzustand der emittierten Linie möglicherweise einen Übergang eingehen können. Nicht jede Linie eignet sich also gleich gut. 2. In einem Gas gleichartiger Atome existiert infolge von Resonanzkräften eine Resonanzverbreiterung, die umgekehrt mit der dritten Potenz des Abstands der Atome abfällt. Sie verschwindet mit abnehmendem Druck viel langsamer als die von den van der Waalschen Austauschkräften zwischen ungleichen Atomen herrührenden Effekte, die mit der

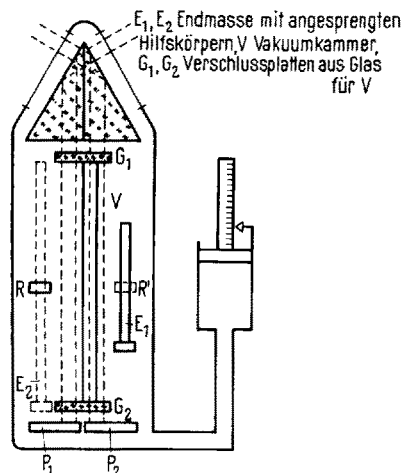
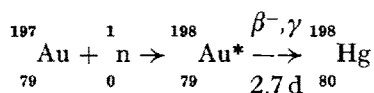


Fig. 5. Strahlengang im Kösterschen Interferenzkomparator («In ko») zum optischen Vergleich der Länge von Endmassen.

sechsten Potenz abfallen, und bei Abwesenheit von Fremdgas ganz verschwinden. Der Gasdruck sollte daher so klein wie möglich gemacht werden, doch ist diesem Bestreben aus Intensitätsgründen eine Grenze gesetzt. 3. Die Stoss- oder Druckverbreiterung ist für die höheren Glieder einer Serie grösser als für die niederen, wodurch die Zahl der geeigneten Linien wiederum eingeschränkt wird. 4. Manche Linien, besonders Resonanzlinien, neigen zur Selbstumkehr, indem die Strahlung von weniger angeregten Atomen wieder absorbiert wird. Dieser Effekt verändert die Linienform und vermag auch ihren Schwerpunkt zu verschieben. Unter allen Umständen vermindert er die Monochromasie. 5. Die elektrischen Felder in der Entladungsbahn und in den Atomen selbst haben verschiedene Starkeffekte zur Folge, deren Auswirkung auf die Linienform empirisch nachgeprüft werden muss. 6. Schliesslich ruft der von der Temperaturbewegung der Atome herrührende Dopplereffekt eine Verbreiterung der Spektrallinien hervor. Er muss möglichst unterdrückt werden, wobei zu beachten ist, dass es auf den Faktor $\sqrt{T/M}$ ankommt und nicht etwa auf T oder M allein. Der Faktor muss möglichst klein gemacht werden, was zur Folge hat, dass von geeigneten Elementen nicht die schwersten den kleinsten Dopplereffekt zeigen, sondern zum Beispiel eben Krypton, das bei 60° K noch einen für die Entladung ausreichenden Dampfdruck besitzt. Von amerikanischer Seite wurde das Isotop ^{198}Hg nachdrücklich empfohlen, das aus Gold durch Neutroneneinfang in einem Kernreaktor gewonnen werden kann:



Russische Physiker wollten das Isotop ^{114}Cd verwenden. Sowohl Quecksilber wie Cadmium müssen wegen ihres kleinen Dampfdrucks zur Emission über ein Fremdgas, etwa Argon, angeregt werden. Wie

folgende Zusammenstellung zeigt, sind die genannten Metalle dem Krypton trotz ihrer höheren Masse unterlegen:

	⁸⁶ Kr	¹⁹⁸ Hg	¹¹⁴ Cd
Betriebstemperatur $T \sim$	60°K	$\sim 320^\circ\text{K}$	$\sim 540^\circ\text{K}$
T/M	0,70	1,62	4,74

Die 11. Generalkonferenz für Mass und Gewicht fasste am 14.10.1960 einstimmig folgende zwei Beschlüsse über die neue Definition des Meters auf Grund einer Lichtwellenlänge: 1. Das Meter ist das 1650763,73fache der Wellenlänge der von Atomen des Nuklids ⁸⁶Kr beim Übergang $5d_5 \rightarrow 2p_{10}$ ausgesandten, sich im Vakuum ausbreitenden Strahlung. 2. Die auf dem Internationalen Prototyp von Platin und Iridium beruhende Meterdefinition, die seit 1889 in Kraft war, wird für ungültig erklärt.

Durch den Bezug auf die im Vakuum sich ausbreitende Strahlung fällt bei der neuen Meterdefinition jede Unsicherheit des atmosphärischen Zustands dahin, die einer Strahlung in Luft anhaftet. Weiter ist mit dem emittierenden Atom ⁸⁶Kr ein Nuklid gerader Ordnungs- und Massenzahl gewählt, das den Kernspin 0 besitzt, also frei von Hyperfeinstrukturkomponenten ist, die eine Quelle von periodischen Fehlern bei der Längenmessung sind. Von einer Messvorschrift, wie die Strahlung zu erzeugen ist, wurde wissentlich Abstand genommen, so dass die neue Meterdefinition frei von Wandlungen der Lichtquellentechnik ist und tatsächlich auf eine natürliche Einheit zurückgeht. Die quantitative Angabe der Definition verknüpft das Verhältnis des Meters zur Wellenlänge der ⁸⁶Kr-Strahlung. Dieser Anschluss wurde nicht unmittelbar vollzogen, sondern über den 1927 festgelegten Wert für die Wellenlänge der roten Cadmiumlinie in Normalluft vorgenommen. Dadurch bleiben die etwa 300000 Wellenlängenmessungen von der neuen Definition unberührt, die von Spektroskopikern unter Anschluss an die rote Cadmiumlinie ausgeführt wurden. Dieses Vorgehen entspricht dem Bestreben, dass bei jeder neuen Meterfestsetzung die Längeneinheit zwar schärfer definiert wurde, aber immer innerhalb der Fehlergrenze der vorhergehenden Definition blieb. Bezogen auf

λ (Cd rot in spektroskopischer Normalluft) = 6438,4696 Å wird

$$\begin{aligned} \lambda (^{86}\text{Kr } (5d_5 \rightarrow 2p_{10}) \text{ im Vakuum}) &= 6057,8021 \text{ Å} \\ &= 1\text{m}/1650763,73 = 6057,8021 \cdot 10^{-10} \text{ m} \\ \text{also auch } 1 \text{ Å} &= 10^{-10} \text{ m.} \end{aligned}$$

Die ⁸⁶Kr-Lampe

Wenn auch aus guten Gründen von einer eigentlichen Messvorschrift für die Erzeugung der ⁸⁶Kr-Strahlung Abstand genommen wurde, so muss man sich anderseits doch schlüssig werden, welche Mess-

anordnung benützt werden soll. Dies geschieht in Form einer Empfehlung. Als ⁸⁶Kr-Normallampe wird gegenwärtig eine U-förmige Lichtquelle benützt, die in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt entwickelt wurde. Sie ist mit einer Glühkathode ausgerüstet und wird mit Gleichspannung von einigen Hundert Volt betrieben. Dazu wird sie in einen mit Sichtschlitzen versehenen Kryostaten eingesenkt, der das in einer Kapillare zusammengezogene Licht der positiven Säule ungehindert austreten lässt. Der Kryostat ist mit flüssiger Luft oder flüssigem Stickstoff gefüllt, die man unter vermindertem Druck sieden lässt. Die Lampe ist mit einigen Torr ⁸⁶Kr gefüllt, dessen Sublimationsdruck etwa folgende Werte hat:

$T^\circ\text{K}$	77°	63°	57°
Torr	2,0	0,03	0,003

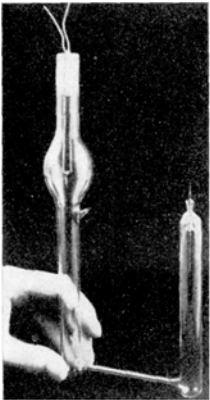


Fig. 6. ⁸⁶Krypton-Lampe, die bei der Temperatur des schmelzenden Stickstoffs (63° K) zur Aussendung der Normalwellenlänge dient.

Der Überschuss an Krypton friert aus, sodass zum Beispiel in schmelzendem Stickstoff bei 63° K stets ein konstanter Gasdruck herrscht, der sich durch den Betrieb der Lampe infolge Aufzehrungs- und Adsorptionserscheinungen nicht ändert. Darin besteht ein ausserordentlicher Vorzug gegenüber anderen gasgefüllten Lampen, bei denen der Druck während der Lebensdauer immer mehr abnimmt. Auch elektrodenlose ⁸⁶Kr-Lampen in Form einfacher Röhrchen, die bis zu einem Druck von 300 Torr gefüllt sind und durch ein hochfrequentes Wechselfeld zum Leuchten angeregt werden, sind brauchbar, wenn nicht höchste Genauigkeit verlangt wird. Die beste Reproduzierbarkeit wird erreicht, wenn bei 63° K und einer Stromdichte von 0,3 A cm⁻² der in der Achse der Kapillare ausgesandte Anteil der Strahlung verwendet wird, der von der Kathode nach der Anode hin gerichtet ist.

Fortschritte bei der Meterdefinition

Wenn man sich klar machen will, welche Verbesserung eine 170jährige Anstrengung für die Längenmessung gebracht hat, so betrachtet man am besten die folgende Zusammenstellung:

Jahr	Bezeichnung des Meters	Unsicherheit in Metern
1799	«Mètre des Archives»	$\pm 10^{-5}$
1889	Internationaler Prototyp	$\pm 5 \cdot 10^{-7}$
1927	Provisorisches Meter	
	Rote Cadmiumlinie (in Luft)	$\pm 2 \cdot 10^{-8}$
1960	Lichtwellenmeter, Orange $^{86}_{36}\text{Kr}$ -Linie (im Vakuum)	$\pm 2 \cdot 10^{-9}$

Summary. The history of the normal meter shows distinct steps of development. The meter itself was defined by French scientists as a national unit at the beginning of the great French Revolution and realized in 1799 by a platinum rod. A better reproduction of the unit of length was given in 1889 by a 90% Pt–10% Ir platinum bar of special cross section according to an international convention. Every substantial standard, however, has many disadvantages, besides the possibility of an entire loss by an accident. The red cadmium line was therefore used in 1893 to express the meter by the number of its wave lengths in air and a provisional resolution was adopted in 1927 on this basis. Much more suitable, however, is an orange line emitted at 63°K from the isotope ^{86}Kr , which can be produced in a thermal diffusion column in the state of highest purity. Since 1960, the vacuum wave length of this element has served as the fundamental unit of length.

CH. HUYGHENS, *Die Pendeluhr*. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 192.

F. A. MÉCHAIN und B. J. DELAMBRE, *Grundlagen des dezimalen metrischen Systems*. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 181.

J. CH. BORDA und J. D. CASSINI, *Versuche über die Länge des Sekundenpendels in Paris*. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 181.

L. LANGEVIN, *Die Geschichte des metrischen Systems*. Ein langer Kampf gegen das Chaos, Impact, Science et Société 40, Heft 2 (1961); s.a. Unesco Kurier 3, Heft 3, 18 (1962).

D. McKIE, *The Origins of the Metrique System*, Endeavour 22, 24 (1963).

R. VIEWEG, *Mass und Messen in Geschichte und Gegenwart*. Sonderdruck aus «Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen», Heft 70.

H. SAINTE-CLAIRE DEVILLE (teilweise mit H. J. DEBRAY), Literatur siehe: *Great Chemists* (Interscience Publishers New York 1961), p. 622.

K. CLUSIUS und G. DICKEL, *Darstellung der Isotope ^{84}Kr und ^{86}Kr* . Z. physikal. Chem. (B) 52, 348 (1942).

A. S. DARLING, *Iridium-Platinum Alloys*. Platinum Metals Review 4, 18 (1960).

E. ENGELHARD und R. VIEWEG, *Über die neue Definition des Meters auf Grund einer Lichtwellenlänge*. Z. angew. Phys. 13, 580 (1961).

E. ENGELHARD, *Wissenschaftliche Abhandlungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt* 12, 6 (1961).

Das altehrwürdige Archivmeter war auf etwa $\pm 0,01$ mm unsicher, ein Fehler, den man um 1800 ohne weiteres glaubte zulassen zu dürfen. Der 90 Jahre später geschaffene Internationale Prototyp ist bereits 20mal genauer. Die Einführung der Interferenzoptik bewirkt bis 1927 eine nochmalige Verbesserung um den Faktor 25, wobei man allerdings nicht ausser acht lassen darf, dass der Anschluss der roten Cadmiumlinie an den Platin-Iridiumstab von 1889 mit einer Unsicherheit von $\pm 3 \cdot 10^{-7}$ behaftet sein dürfte. Die neue Meterdefinition von 1960 bewirkt eine nochmalige Verbesserung um den Faktor 10 und erfüllt die ursprüngliche Forderung, die Längeneinheit auf ein Naturmass zurückzuführen.

Sind wir am Ende? Sicher nicht! Wenn man auch annehmen darf, dass das neue Lichtwellenmeter den Bedürfnissen der Wissenschaft und Technik in hervorragender Weise gerecht wird, so wäre es Beschränktheit und Vermessenheit zugleich zu glauben, dass ein weiterer Fortschritt nicht möglich ist. Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, dass dabei ein optisches Messverfahren beibehalten werden wird. Eine künftige Definition müsste dann eine Strahlung benutzen, die nach Intensität, Reproduzierbarkeit und Güte der Monochromasie sich noch erheblich genauer festlegen lässt als die gegenwärtig benutzte $^{86}_{36}\text{Kr}$ -Strahlung.

Brèves communications – Kurze Mitteilungen – Brevi comunicazioni – Brief Reports

Les auteurs sont seuls responsables des opinions exprimées dans ces communications. – Für die kurzen Mitteilungen ist ausschliesslich der Autor verantwortlich. – Per le brevi comunicazioni è responsabile solo l'autore. – The editors do not hold themselves responsible for the opinions expressed by their correspondents.

Total Synthesis of Oestrogenic Hormones

A recently reported¹ 'straightforward' synthesis of oestrone prompts us to summarise more extensive related work completed several years ago²⁻⁴.

5, 6, 7, 8-Tetrahydro-8-methylindan-1, 5-dione (I; n = 1)⁵, on conversion to the potassium enolate by treatment with one equivalent of potassium *t*-butoxide in refluxing ben-

zene and removal of the benzene-alcohol azeotrope, and subsequent treatment with 2-*m*-methoxyphenylethyl bro-

¹ D. J. CRISPIN and J. S. WHITEHURST, Proc. chem. Soc. 1962, 356.

² G. A. HUGHES, M. Sc. Thesis, Manchester (1957).

³ B. J. McLOUGHLIN, Ph. D. Thesis, Manchester (1960).

⁴ Belgian Patents 595387 and 600244 (granted March 23 and August 16, 1961, respectively).

⁵ C. B. C. BOYCE and J. S. WHITEHURST, J. chem. Soc. 1959, 2022.