

Erst als man begann, sich mit strömender Elektrizität näher zu beschäftigen, insbesondere nachdem Ohm im Jahre 1827 sein grundlegendes Gesetz aufgestellt und damit zur Klärung der Begriffe wesentlich beigetragen hatte, ergab sich die Möglichkeit von Messungen im heutigen Sinne, aber zunächst noch nicht einmal das Bedürfnis darnach. Dies trat erst auf, als nach der Erfindung des Zeigertelegraphen durch Gauß und Weber 1838 der elektrische Strom zum ersten Male aus dem Laboratorium heraus und in die Öffentlichkeit trat. Die Leitungstechnik führte die Notwendigkeit der Messung des elektrischen Widerstandes herbei. Während man Spannung und Strom durch Ladungs- oder Stromwirkungen zu messen lernte, lag die Sache beim Widerstand etwas schwieriger. Hier konnte man über den Wert des Widerstandes nur etwas aussagen auf Grund seiner Rückwirkung auf den Strom. Es ergab sich also das Bedürfnis nach Vergleichsmaßen, d. h. nach einer Widerstandseinheit.

Als erster schlug Jacobi vor jetzt rund 100 Jahren einen Cu-Draht von bestimmtem Querschnitt und bestimmter Länge im Betrage von nach heutigem Maß rd. 0,3 Ohm als Widerstandseinheit vor. Doch waren damals die Eigenschaften von Metallen, die uns heute geläufig sind, noch weitgehend unbekannt. Da der Widerstand des Kupfers nicht nur von seinem Reinheitsgrad, sondern auch von seiner Bearbeitung und außerdem von der Temperatur abhängt, so zeigte sich, daß an den Jacobischen Kopien Unterschiede bis zu 8 % auftraten. Dies ging auch für die damaligen relativ niedrigen Ansprüche an die Meßgenauigkeit über das erträgliche Maß hinaus. Werner von Siemens, der klar erkannte, daß das Wesen eines Normalen in seiner Konstanz begründet ist, schlug daher 1860 Quecksilber als Widerstandsmaterial vor. Quecksilber hat für diesen Zweck sehr vorteilhafte Eigenschaften: es hat einen hohen spezifischen Widerstand, es läßt sich leicht in größter Reinheit herstellen, also reproduzieren, und es ist als Flüssigkeit von keiner Bearbeitung abhängig. Die Siemens-Einheit wurde hergestellt durch eine Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt bei 0° C und besaß in roher Annäherung den Wert von 10⁹ cgs-Einheiten, entsprach also ungefähr der Widerstandseinheit des damals gerade eingeführten „praktischen Maßsystems“. Sie ist als der Vorläufer des Quecksilberohms anzusehen, mit dem sie durch die Beziehung

$$1 \text{ SE} = 0,941 \text{ Ohm}$$

verbunden ist. Sie wurde außer in Deutschland auch in Österreich und Rußland benutzt, während die westlichen Länder eine andere Einheit hatten.

In England hatte die British Association for the Advancement of Science unter Führung von Maxwell die Einheit des praktischen Maßsystems, für

Zur Einführung des absoluten Ohms.

I. Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Widerstandseinheit bis zur Einführung des absoluten Ohms am 1. Januar 1948.

Von Dr. G. Zickner
Oberregierungsrat
bei der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
zu Braunschweig.

In den frühen Entwicklungsjahren der Lehre von der Elektrizität, die sich bekanntlich im wesentlichen mit elektrostatischen Erscheinungen befaßte, kann von Meßvorgängen im eigentlichen Sinne kaum gesprochen werden, wenn man nicht etwa die Maßflasche des Engländers Lane, die erstmalig verhältnismäßig rohe Ladungsvergleiche ermöglichte, als das Urbild des Normalkondensators ansehen will.

die die Bezeichnung Ohm eingeführt wurde, direkt durch eine Absolutmessung zu realisieren versucht. Infolge der Unzulänglichkeit der experimentellen Hilfsmittel gelang dies nur unvollkommen, so daß praktisch nur die Annäherung der British Association unit an das Ohm

$$1 \text{ BAU} = 0,988 \text{ Ohm}$$

erreicht wurde. Immerhin muß die BAU als Vorläufer des absoluten Ohms angesprochen werden. Man beachte wohl: die SE ist experimentell definiert, die BAU systematisch, in gleicher Weise wie später das Ohm_{int} und das Ohm_{abs} . Die BAU wurde dargestellt durch den Mittelwert eines Satzes von 10 Drahtwiderständen aus Edelmetall-Legierungen, doch war sie mangels Erfahrungen mit Drahtwiderständen, insbesondere wegen Fehlens der künstlichen Alterung, nicht hinreichend konstant.

Deshalb griff man auf dem ersten internationalen Elekriker-Kongreß zu Paris 1881 doch allgemein auf die Quecksilbereinheit zurück. Ihre Länge wurde jedoch jetzt dem Ohm besser angepaßt und auf dem dritten Pariser Kongreß 1884 auf 106 cm festgelegt. Die hierdurch definierte Widerstandseinheit wurde als „legales Ohm“ bezeichnet. Doch wurde die Festsetzung des Verhältnisses

$$\frac{\Omega}{\text{SE}} = 1,06$$

ausdrücklich als vorläufig bezeichnet und ihre genauere Festsetzung einem späteren Termin nach entsprechender Verbesserung der Meßtechnik vorbehalten. Infolgedessen wurde in den folgenden Jahren eine große Zahl von Absolutmessungen der SE vorgenommen, und zwar in allen Kulturländern. Dorn hat diese Arbeiten kritisch gesichtet und die Ergebnisse in einer umfangreichen Arbeit in den Wissenschaftlichen Abhandlungen der PTR 1895 niedergelegt. Er hält den Wert 1,0628 für den wahrscheinlichsten. Doch glaubte man auf dem Elekrikerkongreß zu Chicago 1893, der auf Grund der inzwischen ausgeführten Messungen den Pariser Wert verbessern und definitiv festlegen sollte, die letzte Stelle nicht mehr vertreten zu können und rundete auf 1,063 ab, also auf die noch heute gültige Zahl für die Länge der Quecksilbersäule.

In Deutschland nahm sich seit 1887 die PTR der Sache an und bereitete ein Gesetz über die elektrischen Einheiten vor, das am 1. Juni 1898 verkündet wurde. In Amerika und England waren entsprechende Gesetze schon 1894, in Frankreich 1896 erlassen worden. Aus der geschilderten Entwicklung und aus dem Wortlaut der Gesetze wird erkennbar, daß das Quecksilberohm die praktische Realisation des absoluten Ohms sein sollte. Der später festgestellte Unterschied zwischen beiden lag zur Zeit des Entstehens dieser Gesetze noch innerhalb der Meßgenauigkeit. Das Quecksilber-Realisat wurde bereits

seit dem Kongreß zu Chicago als internationales Ohm bezeichnet. Die Reichsanstalt besaß zu dieser Zeit bereits fünf Quecksilberrohre, deren Herstellung zum Teil schon 1890 begonnen war. Sie waren mit denkbar größter Genauigkeit ausgewertet worden und stellten die empirische Widerstandseinheit mit einer hohen Reproduzierbarkeit dar. Die Herstellung und Auswertung solcher Rohre mit der erforderlichen Genauigkeit ist eine schwierige und sehr langwierige Aufgabe, für deren Bearbeitung ihrer grundsätzlichen Wichtigkeit wegen nur ein Staatsinstitut in Frage kommt. Dazu kommt, daß die Rohre leider nicht konstant sind, weil das Glas als sehr zähe Flüssigkeit offenbar einem Fließprozeß unterliegt, wodurch der Widerstand der Rohre sich ändert, so daß für langfristige Aufbewahrung als Normalien nicht geeignet sind. Vielmehr müssen die umfangreichen Ausmessungsarbeiten von Fall zu Fall wiederholt werden. Um nun ein stets verwendungsbereites Gebrauchsnormal zu haben, hat man an die frisch ausgewerteten Ohmrohre Drahtwiderstände angeschlossen in der Annahme, daß diese die Konstanzbedingung besser erfüllen würden. Die damals zur Verfügung stehenden Normalwiderstände von S. & H. bestanden aus Neusilber- oder Patentnickeldrähten, also Cu-Ni-Legierungen mit einem TK von etwa $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, und besaßen starke Thermokräfte gegen Cu. Durch systematische Untersuchungen, teils von Weston in Amerika, teils von Feußner und Lindeck in der PTR, gelang es, im wesentlichen durch Zusatz von Mangan, besser geeignete Widerstandslegierungen zu schaffen, von denen das Manganin (84 Cu 12 Mn 4 Ni) einen um eine Zehnerpotenz kleineren TK und eine wesentlich geringere Thermokraft aufwies. Es bildet seitdem den klassischen Werkstoff für alle Normal- und Präzisionswiderstände. Seine Herstellung übernahm die Isabellenhütte in Dillenburg/Lahn. Gleichzeitig wurde den Widerstandsnormalien die klassische Reichsanstaltsform gegeben. Auch die Verbesserung der zeitlichen Konstanz durch künstliche Alterung mittels Erwärmung wurde damals schon gefunden. Ohne diese Maßnahme ändert sich der Widerstandswert neu hergestellter Widerstände ziemlich erheblich infolge von Strukturänderungen im Leitermaterial; aber auch nach erfolgter Alterung tritt eine Nachalterung ein, die den Widerstandswert langsam wandern läßt. Außerdem übt die Luftfeuchtigkeit einen Einfluß aus, der sich in einer jahreszeitlichen Schwankung, einer Art Jahresperiode äußert. Das Maximum liegt regelmäßig im Oktober, das Minimum im März. Es handelt sich offenbar um Quellung des zum Festlegen der Wickelung verwendeten Schellacks und eine damit verbundene reversible Dehnung des Drahtes. Diese Erkenntnisse stammen im wesentlichen von Feußner und Lindeck. Um den Effekt zu reduzieren,

bewahrt man die Widerstände in Schränken mit konstant gehaltener Luftfeuchtigkeit auf, doch scheint das keinen durchgreifenden Erfolg zu haben, weil auch die Bäder, insbesondere Petroleumbäder, Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen und den Widerständen mitteilen. Kapselt man die Widerstände feuchtigkeitsdicht ein, so folgen sie erfahrungsgemäß schlecht etwaigen Änderungen der Temperatur. Für moderne Präzisionsmessungen höchster Genauigkeit ist daher die Kostenthaltung der Temperatur und ebenso der Luftfeuchtigkeit des Meßraumes, also die Klimatisierung des Laboratoriums unbedingt erforderlich.

In den folgenden Jahren entstanden nun auch im Ausland Staatsinstitute nach dem Muster der PTR, und zwar in England 1902 das NPL, in Amerika 1904 das NBS. Diese drei Institute haben in der Folgezeit die wesentlichen Untersuchungen auf dem Gebiete der elektrischen Einheiten ausgeführt, wozu sie bestimmungsgemäß verpflichtet waren, sowie internationale Vergleichen angestellt. Frankreich hat sich hieran durch Messungen im LCE beteiligt und beherbergt überdies seit 1875 die internationale Vergleichsstelle, das BIPM. In neuerer Zeit haben sich auch Japan (ETL) und Rußland im Palota Mer i Wjesow (IMS) eigene Staatsinstitute geschaffen.

In Chicago wurde ungeschickterweise je eine empirische Definition für Spannung, Strom und Widerstand gegeben, und zwar wurde die Spannung durch das Clark-Element, der Strom durch das Silbervoltmeter und der Widerstand durch die Quecksilbersäule definiert. In den USA hatte man, den Anregungen des Kongresses folgend, diese Definitionen gesetzlich festgelegt, in Deutschland dagegen mit Rücksicht auf die Tatsache, daß bei zwei festgelegten Einheiten die dritte durch das Ohmsche Gesetz gegeben ist, nur den Strom und den Widerstand gesetzlich verankert. So ergaben sich in Amerika für jede Einheit zwei zahlenmäßig verschiedene Definitionen, nämlich eine direkte und die andere auf Grund des Ohmschen Gesetzes aus den beiden anderen Einheiten berechnete. Dies trat in Deutschland natürlich nicht auf. Es ist aber verständlich, daß die USA diesen Zustand, der bei ihnen bis zum 1. Januar 1948 herrschte, ändern wollten, aber nicht durch Änderung des Gesetzes, sondern durch Rückkehr zu ihrem Ausgangspunkt, nämlich zu den systematisch definierten absoluten Einheiten. Als sich nun mit dem Fortschritt der Meßtechnik die Meßgenauigkeit erhöhte, stellte sich außerdem heraus, daß die drei empirisch definierten Einheiten den absoluten Einheiten, die sie ja verkörpern sollten, nicht genau entsprachen. Der Unterschied in den Einheiten fiel bereits auf dem nächsten internationalen Elekrikerkongreß zu St. Louis 1904 unangenehm auf, der Kongreß beschränkte sich jedoch darauf, eine internatio-

nale Regelung zu empfehlen. Der Präsident des NBS, Stratton, schlug eine Besprechung im engeren Kreise vor, die auf Initiative der PTR 1905 in Charlottenburg, in den Räumen der PTR, stattfand. Und hier wurde beschlossen, daß in Zukunft bei der Definition der elektrischen Einheiten auf ihre theoretische Festsetzung, die ja feststeht und bekannt ist, nicht mehr Bezug genommen werden sollte. Hier entstand also ein System empirischer Einheiten, das definitionsgemäß von dem System der absoluten Einheiten unabhängig war und in der Folge allgemein als das System der Internationalen Einheiten bezeichnet wurde.

Die in St. Louis 1904 empfohlene internationale Konferenz zur Regelung der Einheitenfrage fand 1908 in London statt. Hier wurde den Charlottenburger Beschlüssen internationale Gültigkeit zugesprochen.

Hier ist also das Auseinanderfallen der empirisch und der systematisch definierten Einheiten zur Tatsache geworden, und die Erkenntnis, daß man mit der Festsetzung der empirischen Einheiten nicht genau das erreicht hatte, was man hatte erreichen wollen, ließ sich nicht mehr bestreiten. Mit Rücksicht auf die nunmehr notwendigen exakten experimentellen Feststellungen des Unterschiedes zwischen der empirischen und der theoretischen Widerstandseinheit wurden der im Gesetz bereits verankerten Länge des Quecksilberfadens von 106,3 cm zwei Nullen angehängt, wodurch jeder Zweifel darüber beseitigt werden sollte, daß die angegebene Zahl als auf 10^{-5} genau anzusehen sei, ohne daß eine Gesetzesänderung notwendig gewesen wäre.

Um die von den einzelnen Ländern aufgestellten oder noch aufzustellenden Realisate der elektrischen Einheiten vergleichen und die internationale Übereinstimmung sicherstellen zu können, wurde der Plan ins Auge gefaßt, den interessierten Regierungen die Gründung einer permanenten internationalen Kommission nebst einem Laboratorium für elektrische Einheiten zu empfehlen, das diese Vergleichen praktisch ausführen sollte. Zur Vorbereitung der entsprechenden Schritte wurde ein wissenschaftliches Komitee gewählt, das als Rayleigh-Komitee bekanntgeworden ist. Dieses Komitee veranlaßte zunächst durch Rundschreiben an die zuständigen Körperschaften, also im wesentlichen an die Staatsinstitute, eine Klärung der Ansichten und bereitete alsdann praktische Vergleichsmessungen vor, die 1910 im NBS ausgeführt wurden. Auf seine Veranlassung trat noch im gleichen Jahre zu Washington eine Delegiertenkonferenz zusammen, die sich dahin einigte, den Mittelwert aus der deutschen und der englischen Quecksilbereinheit, die sich nur um $10 \cdot 10^{-6}$ unterschieden, unter der Bezeichnung Washington-unit als internationales Ohm einzuführen. Am 1. Januar 1911 wurde diese Rege-

lung in Kraft gesetzt und ist bis zum 1. Januar 1948, also 37 Jahre in Kraft geblieben. Sie ist zur Zeit in Deutschland noch in Kraft, abgesehen von der Tatsache, daß der Mittelwert später aus den nationalen Einheiten auch der übrigen beteiligten Länder gebildet wurde, als deren Arbeiten hinreichend weit fortgeschritten waren.

Das Rayleigh-Komitee ist im ersten Weltkrieg aufgelöst worden. Nach dem Kriege wurde Deutschland bekanntlich auf Jahre von der Mitwirkung an internationalen Fragen ausgeschlossen. Den Plan, ein internationales Laboratorium für elektrische Einheiten zu gründen, ließ man fallen und übertrug 1929 diese Aufgaben dem schon länger bestehenden Comité International des Poids et Mesures (CIPM). Für die experimentellen Vergleichen wurde dem Bureau International (BIPM) in Sèvres bei Paris ein elektrisches Laboratorium angegliedert. Gleichzeitig wurde ein Comité Consultatif gebildet, welchem die Vorbereitung der internationalen Regelungen auf dem elektrischen Gebiete obliegt, als beratendes Organ für die Generalkonferenz des CIPM. Für die deutschen Belange, insbesondere auch mit Rücksicht auf die Normale der EP, arbeitete die PTR Vorschriften aus, die als „Bekanntmachung über die Beglaubigung elektrischer Präzisionswiderstände und Normalelemente“ durch die PTR vom 24. März 1939 im Amtsblatt der PTR (15. Reihe, Nr. 3, S. 54) veröffentlicht wurden.

Man hatte in der PTR beobachtet, daß nach dem Abklingen der anfänglichen Änderungen bzw. ihrer Beseitigung durch künstliche Alterung immer noch geringe zeitliche Änderungen vorhanden sind, die einerseits, wie bereits bemerkt, auf Feuchtigkeitsschwankungen zurückzuführen, andererseits aber durch unbekannte Ursachen bedingt sind, die bei dem einen Widerstand einen positiven, beim anderen einen negativen Gang aufweisen, wobei die jährlichen Änderungen offenbar einem symmetrischen Fehlerverteilungsgesetz genügen. Sofern man also eine genügend große Anzahl von Normalien hat, kann man mit Recht die Annahme machen, daß die jährliche Änderung des Mittelwertes = 0 ist. So wird das deutsche Ohm durch den Mittelwert von 4 an die Quecksilbereinheit angeschlossenen Widerstandsbüchsen als Hauptnormale dargestellt, welche in einem Metallschrank in konstanter Feuchtigkeit aufbewahrt und nur zum Anschluß der Gebrauchsnormale benutzt werden. Sie wurden bei der Verlagerung nach Weida in einen Blechkasten eingelötet und mit vielen anderen Normalen der Reichsanstalt nach Staßfurt gebracht, wo sie im Salzbergwerk 360 m tief unter Tage zwar vor den Bomben sicher waren, aber nicht vor der Demontage, der sie 1945 zum Opfer fielen. Seitdem ist das deutsche Urnormal des internationalen Ohm durch vier andere

Normalbüchsen repräsentiert, die zuvor an die ersten angeschlossen waren.

1925 stellten Steinwehr und Schulze fest, daß das Büchsenmittel, das 1895 und 1910 von Jaeger an die deutsche Quecksilbereinheit angeschlossen worden war, sich in 30 Jahren um $33 \cdot 10^{-6}$ geändert hatte, indem sie die Quecksilbereinheit neu vermaß. 1935 wurde die Washington-unit als internationales Vergleichsmaß aufgegeben und das internationale Büchsenmittel eingeführt, dessen Einheit Ω_M sich auf 4 nationale, an Quecksilbereinheiten angeschlossene Drahtnormale (Deutschland, England, Amerika, Japan) stützte und nur noch in Form des Büchsenmittels aufrecht erhalten wurde. 1946 wurde durch Vergleichung in Paris gefunden, daß sich das deutsche Büchsenmittel um $9 \cdot 10^{-6}$ seit 1935 in gleichem Sinne weiter geändert hatte, 1948 um weitere $5 \cdot 10^{-6}$ auf $14 \cdot 10^{-6}$ Abweichung der Einheit von Ω_M . Für die Zeit von 1925—1935 fehlen Beobachtungen. Zur Zeit werden außer den oben genannten 4 nationalen Einheiten auch die französische sowie die russische Einheit bei der internationalen Mittelwertbildung berücksichtigt.

Offenbar wird das Gesetz der großen Zahl durch die Zahl 4 noch nicht hinreichend erfüllt, und die vorausgesetzte statistische Verteilung der Gangbeträge ist daher auch nicht gewährleistet. Andererseits ist es nicht möglich, den Anschluß an das Quecksilberohm öfter zu wiederholen, weil diese Aufgabe außerordentlich zeitraubend und überdies für moderne Ansprüche nicht hinreichend genau ist. Der Anschluß an das absolute Ohm ist leichter ausführbar; er erfordert nur einige Tage, vorausgesetzt, daß die einmalige Einrichtungsarbeit, die allerdings sehr umfangreich ist, geleistet wurde, und daß die Induktionsnormale geometrisch ausgemessen sind, eventuell mehrfach, um die Konstanz zu kontrollieren. Doch läßt sich dann jeder Gang zweifelsfrei feststellen.

Während England auch nur 4 Hauptnormale benutzte, hat Amerika 10, zeitweise 17 Standards gehabt und damit bessere Erfolge erzielt, die aber wohl überwiegend der Verbesserung der Konstruktion der Normale zuzuschreiben sind.

Sogleich nach der Einführung der internationalen Einheiten trat die Notwendigkeit auf, ihr zahlenmäßiges Verhältnis zu den absoluten Einheiten mit möglichst hoher Genauigkeit festzulegen. Dies geschah zunächst in England 1911—1914 durch Smith nach der Lorenzschen Methode der im Magnetfeld rotierenden Scheibe, 1911—1921 durch Grüneisen und Giebe in der PTR mit Hilfe der Maxwell-Brücke (Ohmarbeit). In den Jahren 1923—1924 nahmen Giebe und Zickner eine Reihe von Kontrollmessungen vor, die eine Änderung von etwa $20\text{—}30 \cdot 10^{-6}$ gegenüber den Werten von 1914 erkennen ließen,

welche, in Anbetracht der inzwischen gewonnenen Erkenntnisse, wahrscheinlich überwiegend auf Konto der verwendeten Widerstandsbüchsen gehen.

Bereits 1927 wurde das Nebeneinanderbestehen der int. und abs. Einheiten als auf die Dauer untragbar empfunden und vom Amer. Inst. El. Eng. dem NBS der Vorschlag gemacht, auf die absoluten Einheiten überzugehen. Das NBS rief einen Ausschuß, das Advisory Committee, zur Überprüfung der Lage ins Leben, welches sich 1928 für die absoluten Einheiten entschied. Man trat nunmehr an das Comité Consultatif heran, das seinerseits das CIPM 1929 zu einem Beschluß veranlaßte, die absoluten Einheiten einzuführen. Die 8. Generalkonferenz billigte 1933 diesen Beschluß und beauftragte das CIPM mit der Festsetzung der Umrechnungszahlen und des Einführungsstermins. Für die Umrechnung wurde zunächst auf Grund der bisher vorliegenden Ergebnisse der Staatsinstitute der mittlere Wert 1,0005 vorgeschlagen und als Einführungsstermin der 1. Januar 1940 in Aussicht genommen. Den Staatsinstituten wurde empfohlen, durch neue Präzisionsmessungen den Umrechnungswert nach Möglichkeit noch genauer festzulegen. Daher wurde etwa 1935 die Ohmarbeit in der PTR von Zickner, Goens und Blechschmidt wieder aufgenommen. Doch die um diese Zeit herrschende Hochflut von Prüfungsarbeiten war zunächst dem Vorwärtkommen sehr hinderlich. Es wurde ein Raum konstanter Temperatur gebaut und die Apparatur dem fortgeschrittenen Stande der Meßtechnik entsprechend verbessert. 1938 und 1939 wurde eine Anzahl von Messungen durchgeführt. Wegen der tagsüber vorhandenen Störungen durch die Nachbarlaboratorien und durch die elektrische Straßenbahn konnten die Messungen nur nachts vorgenommen werden. Das vorläufige Ergebnis war 1,00051; hierzu fehlte aber noch die Korrektur wegen Ungleichmäßigkeit der Wicklung, die aber wahrscheinlich sehr klein war, und die Variation der Versuchsbedingungen. Das Ergebnis dieser Ohmarbeit kann daher nicht voll bewertet werden. Die Arbeiten mußten bei Kriegsbeginn eingestellt und konnten später nicht zu Ende geführt werden, weil die Apparate beschädigt oder demontiert waren und vor allem, weil die Protokolle nicht mehr vorhanden sind.

In England, Amerika und Frankreich wurden entsprechend den Vorschlägen des CIPM ebenfalls derartige Messungen durchgeführt.

Inzwischen hatte sich auch die wissenschaftliche Elektrotechnik mit diesen Fragen befaßt, so schon 1927 auf der Tagung der IEC in Bellagio. 1935 entschied man sich in Scheveningen für ein Maßsystem mit 4 Einheiten, 1938 in Torquay nach Fühlungnahme mit dem Comité Consultatif für die Festlegung des Ohm als vierter Einheit. Der Krieg unterbrach zunächst jede weitere Tätigkeit.

Die PTR hatte von jeher vor der allzu raschen Einführung der absoluten Einheiten gewarnt und auf

die bei der Umstellung entstehenden wirtschaftlichen Schwierigkeiten hingewiesen. Jaeger in seinem Buch über die Entstehung der internationalen Maße der Elektrotechnik nahm eine ebenso ablehnende Stellung ein wie v. Steinwehr, der der ersten Nachkriegstagung des CIPM 1946 ein Memorandum vorlegte, in dem er seinen Standpunkt eingehend begründete. Es wurde jedoch abweichend von Steinwehrs Vorschlag beschlossen, die absoluten Einheiten bei rationaler Schreibweise der Gleichungen, zum 1. Januar 1948 einzuführen. Für die Umrechnungsbeziehung wurde festgelegt

$$1 \text{ int. } \Omega_M = 1,00049 \text{ abs. } \Omega.$$

Ω_M ist durch den Mittelwert aus den Büchsenmitteln der sechs Länder Deutschland, England, Frankreich, Rußland, Japan und Amerika definiert. Dieser Mittelwert wird vom BIPM in periodisch wiederholten Zeiträumen festgestellt. Die Differenzen der nationalen Einheiten gegen das aus dem Gesamtmittel folgende Ω_M werden den beteiligten Staaten mitgeteilt.

Durch den Beschluß des CIPM von 1946, der von der 9. Generalkonferenz für Maß und Gewicht 1948 nachträglich gutgeheißen wurde, sind jedoch die absoluten Einheiten in Deutschland noch nicht Gesetz geworden. Es gilt vielmehr noch das Gesetz vom 1. Juni 1898, welches das Ohm empirisch definiert. Daher hat die Physikalisch-Technische Bundesanstalt im Einvernehmen mit dem DAMG für die Übergangszeit bis zu einem neuen Einheitengesetz eine (2.) Ergänzung der Bekanntmachung über die Beglaubigung elektrischer Präzisionswiderstände und Normal-elemente durch die PTR vom 1. März 1950 veröffentlicht (Amtsblatt d. PTA Nr. 1, S. 6), wozu die Physikalisch-Technische Bundesanstalt als Nachfolgerin der Physikalisch-Technische Reichsanstalt durch das gleiche Gesetz befugt ist. Hierin wird für die Übergangszeit bis zu einem neuen Einheitengesetz die Zulassung beider Widerstandseinheiten zur Beglaubigung ausgesprochen. Entsprechende gesetzliche Regelungen sind auch in den meisten Signatarstaaten der Meterkonvention bereits durchgeführt oder eingeleitet worden. Das NPL Teddington sowie das NBS Washington eichen und beglaubigen bereits in absoluten Einheiten.

Ein Kreislauf ist geschlossen. Von den absoluten Einheiten zur Zeit der Pariser Beschlüsse ausgehend, haben wir diese zunächst möglichst genau durch empirische Einheiten zu realisieren versucht. Auf die Feststellung der hierzu nötigen Definitionen ist viel Mühe und Zeit verwandt worden und eine Menge Kongresse haben zu diesem Zweck stattgefunden. Dann hat man durch sehr genaue Messungen die Beziehungen dieser empirischen Maße zu den absoluten bestimmt und schließlich diese empirischen Maße wieder ganz über Bord geworfen. In der Tat kann man sich bei rückschauender Betrachtung dieser Entwicklung nicht des Eindruckes erwehren, daß man „wie ein Tier auf dürrer Heide von einem bösen Geist im Kreis herumgeführt“ worden ist.

Zur Einführung des absoluten Ohms

Von Dr. G. Zickner
Oberregierungsrat
bei der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
in Braunschweig

II. Definition und Darstellung der absoluten Widerstandseinheit

In dem Teil I dieser Abhandlung (Amtsblatt der PTR Nr. 1, 1950, S. 70) war darauf hingewiesen worden, daß das internationale Ohm experimentell, das absolute Ohm dagegen systematisch bestimmt sei. Ersteres wurde definiert durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,300 cm Länge und einem 1 mm^2 gleich zu achtenden Querschnitt, deren Masse 14,4521 g beträgt, wobei die Temperatur 0°C vorausgesetzt ist. Nunmehr ist auch das absolute Ohm, von dem bisher nur gesagt wurde, daß es durch die Grundeinheiten definiert sei, genauer zu betrachten. Dazu müssen wir etwas weiter ausholen.

Grundeinheiten können ihrer Definition nach nur solche Einheiten sein, deren Objekte verstandesmäßig nicht auf andere zurückgeführt werden

können, deren Kriterium also logische Unzerlegbarkeit ist. Dazu gehören vor allem die beiden Kategorien unseres Erkennens, Raum und Zeit. Die dritte unmittelbare Gegebenheit ist die Materie. Sie ist die einzige in konkreter Form vorhandene Grundgröße. Da die Messung ein nur von menschlichen Vorstellungen ausgehender Vorgang ist, so kann man die Existenz natürlicher Einheiten nicht erwarten. Die Maße für diese Größen müssen daher konkreten physikalischen Erscheinungen entnommen werden, die zur Ableitung von Einheiten geeignet sind. In diesem Sinne gibt es also keine absoluten, d. h. keine a priori existierenden Einheiten; allen Grundmaßen müssen vielmehr Konkreta zugrunde gelegt werden, deren Wahl eine gewisse Willkür involviert. Man hat sich bemüht, hierzu nach Möglichkeit Naturkonstanten heranzuziehen (Lichtwellenlänge, Erdumdrehungsdauer); hierdurch sind die Maße für Raum und Zeit wenigstens unzerstörbar gemacht, was im Falle künftiger militärischer Verwicklungen von Wert sein könnte. Man hat sich gewöhnt, diese logisch nicht weiter analysierbaren Größen als Grundeinheiten und die aus ihnen abgeleiteten Einheiten als absolute Einheiten zu bezeichnen.

Sind die vier Grundeinheiten des Systems durch die internationalen Prototypen sowie durch die astronomisch definierte mittlere Sonnen-Sekunde und einen Zahlenwert für die Induktionskonstante, z. B. $\mu_0 = 1$ (nicht rationale Schreibung) oder $\mu_0 = 4\pi$ (rationale Schreibung) festgelegt, wobei die Dimension dieser Größen in den verschiedenen Maßsystemen hier außer Betracht bleiben soll, so sind die übrigen Einheiten ausschließlich durch logische Verknüpfungen, etwa in Form mathematischer Funktionen, daraus abzuleiten. Sie stellen also Ideen im Sinne Platons oder, um mit Dingler zu reden, unendliche Ideen dar, die nur in einer einzigen physikalisch denkbaren und zulässigen Weise realisiert werden können, nämlich durch einen unendlichen konvergenten Genauigkeitsprozeß. Während die Grundeinheiten infolge ihrer definitionsmäßigen Fehlerfreiheit axiomatischen Charakter tragen, sind die daraus abgeleiteten absoluten Einheiten nur mit der jeweils möglichen Meßgenauigkeit realisierbar. Diese nimmt jedoch erfahrungsgemäß mit fortschreitender Zeit zu, weil jeder Beobachter auf den Erfahrungen seines Vorgängers aufbaut, so daß die Differenz zwischen Idee und Realisat, d. h. die Meßunsicherheit, ständig abnimmt, also gegen Null konvergiert, ohne diesen Betrag jedoch jemals zu erreichen. Der aus den Grundeinheiten definierte Wert, z. B. der Widerstandseinheit, ist also derjenige, welcher der Idee nach erreicht wird, wenn der Genauigkeitsprozeß seinem Limes zustrebt. In Wirklichkeit existiert von diesem „richtigen“ Wert nur eine im Laufe der Zeit wachsende Reihe von Zahlen, nämlich den Ergebnissen der zahlreichen experimentell ausgeführten absoluten Bestimmungen der Widerstandseinheit. Diese Zahlen haben die Eigenschaft, daß jede folgende etwas genauer ist als die vorhergehende, wobei von Schwankungen, die diese Tendenz überdecken können, abgesehen werden soll. Der genannte Limes ist die Stelle, an der die aus den Axiomen abgeleitete Idee und ihr experimentelles Realisat sich tangieren und identisch werden. Das jeweilige, mit endlicher Genauigkeit behaftete Realisat jedoch ist nur als einzelnes Element in einem zielgerichteten Strom zu betrachten, der in die Zukunft fließt.

Infolge dieser asymptotischen Annäherung der praktisch realisierten Einheit an die theoretisch abgeleitete wird es sich niemals vermeiden lassen, die praktische Einheit von Zeit zu Zeit dem fortschreitenden Stande der physikalischen Meßtechnik erneut anzupassen und sie hierdurch dem theoretisch definierten Wert hinreichend zu approximieren. Erscheint der verbleibende Rest (Unsicherheit) jeweils auch sehr klein, so ist er doch stets gegenüber unseren rationalen Stufenschritten unendlich, d. h. unausschöpfbar, analog wie z. B. die Zahl

$$z = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z}{2^n} = \frac{z}{2} + \frac{z}{4} + \frac{z}{8} + \dots$$

durch fortgesetzte Halbierung des Restes nicht ausschöpfbar ist.

Der Vorzug der neuen Einheitenwahl liegt darin, daß nicht mehr das jeweilige Realisat, sondern der Limes dieses Genauigkeitsprozesses als Einheit definiert wird. Nunmehr überhebt die ideelle Definition aus den Grundeinheiten der sinnlosen Notwendigkeit immer neuer praktischer Definitionen, sie liefert vielmehr ein für immer geltendes Ideal, dem die experimentelle Ausführung nach Maßgabe der jeweiligen Meßgenauigkeit mit fortschreitender Annäherung angepaßt werden kann.

Es ist nun zu klären, wie die Widerstandseinheit aus den Grundeinheiten m, kg, s, μ_0 abzuleiten ist.

Der Widerstand ist bekanntlich definiert als der Quotient aus Spannung und Stromstärke. Derjenige Widerstand eines Leiters, in welchem durch die Spannung 1 der Strom 1 entsteht, ist die absolute Widerstandseinheit. Kann man nun die Spannung als Funktion des Stromes darstellen, so fällt dieser aus dem Quotienten heraus. Das kann man in der Tat durch einen Induktionsversuch. Legt man eine Wechselspannung an einen Stromkreis mit der Induktivität L, so folgt, wenn

$$i = J \sin \omega t$$

der Strom ist, für die Spannung

$$u = L \frac{di}{dt} = J \omega L \cos \omega t.$$

Vom Vorzeichen können wir für diese Betrachtung absehen. Auch die Berücksichtigung des Leiterwiderstandes ändert grundsätzlich an dem Ergebnis nichts. Um die Zeitabhängigkeit zu eliminieren, bilden wir die Effektivwerte

$$\bar{u} = J \omega L / \sqrt{2} \quad \bar{i} = J / \sqrt{2}$$

Die bisherigen Überlegungen sind unabhängig davon, ob man ein „Dreier“- oder ein „Vierer“-System der Behandlung der Elektrodynamik zugrunde legt.

In dem elektromagnetischen „Dreier“-System, dessen Größen durch Anfügen des Index gekennzeichnet werden sollen, folgt für den Widerstand:

$$R_m = \frac{\bar{u}_m}{\bar{i}_m} = \frac{J_m \omega L_m \sqrt{2}}{J_m \sqrt{2}} = \omega L_m.$$

Diese mit m indizierten „Dreier“-Größen wurden folgerichtig in Einheiten gemessen, die aus drei Grundeinheiten abzuleiten sind. Das älteste dieser Systeme war das elektromagnetische cgs-System, in dem die Einheiten für L_m und R_m heißen:

$$\begin{aligned} [L_m]_{\text{cgs}} &= \text{cm} \\ [R_m]_{\text{cgs}} &= \text{cm s}^{-1}. \end{aligned}$$

Später bevorzugte man aus technischen Erwägungen das sogenannte praktische elektromagnetische System, in dem die Einheiten für L_m und R_m als

$$\begin{aligned} [L_m] &= 10^9 \text{ cm} \\ [R_m] &= 10^9 \text{ cm s}^{-1} \end{aligned}$$

festgelegt wurden. Als Kurzbezeichnungen für diese Einheiten wurden die Namen Henry und Ohm vereinbart. Die Gleichung

$$\Omega = 10^9 \text{ cm/s}$$

definiert daher die ursprüngliche Ohm-Einheit als Widerstandseinheit eines elektromagnetischen „Dreier“-Systems.

Die Zurückführung des Widerstandes mit Hilfe der Zeit auf eine Induktivität, die dann in Längeneinheiten ausgewertet wird, ist das Prinzip der absoluten Ohmbestimmung.

Legt man das „Vierer“-System zugrunde, d. h. beschreibt man die Elektrodynamik mit den nicht-indizierten Größen (z. B. L , R usw.), so bemerkt man, daß beispielsweise in den Formeln für spezielle Induktivitätsanordnungen die Größe μ_0 auftritt. Es ist daher zu klären, wie μ_0 in diese Zusammenhänge eingeht.

Die absolute Permeabilität ist definiert als der Quotient von Flußdichte und Feldstärke

$$\mu_{\text{abs}} = \frac{B}{H}$$

Nun ist μ_{abs} , gleich dem Produkt aus Induktionskonstante und Magnetisierungszahl

$$\mu_{\text{abs}} = \mu_0 \cdot \mu$$

Durch Einsetzen folgt für das Vakuum ($\mu = 1$)

$$\mu_0 = \frac{B_0}{H}$$

Nun ist, wenn der Index m die Größen des nicht-rationalen elektromagnetischen Dreier-Systems charakterisiert,

$$\frac{B_0}{V_{\text{abs}} \text{ s/m}^2} = 10^{-4} \frac{B_{0m}}{G}$$

und

$$\frac{H}{A_{\text{abs}}/\text{m}} = \frac{10^3}{4\pi} \cdot \frac{H_m}{\text{Oe}}$$

Dabei bedeuten V_{abs} , und A_{abs} , die Einheiten des absoluten, 1948 international vereinbarten elektrischen Maßsystems mit vier Grundeinheiten.

Da die Maßzahlen B_{0m}/G und H_m/Oe identisch sind, so gilt

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{V_{\text{abs}} \text{ s}}{A_{\text{abs}} \text{ m}}$$

oder

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{\Omega_{\text{abs}} \text{ s}}{\text{cm}}$$

d. h.

$$\Omega_{\text{abs}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Dies ist die Definitionsgleichung des absoluten Ohms im rationalen Vierer-System. Man vergleiche

diesen Ausdruck mit der Definitionsgleichung für das ursprüngliche Ohm im nicht-rationalen Dreier-System.

Dann ergibt sich

$$\Omega_{\text{abs}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \Omega$$

Eine analoge Gleichung kann man allgemein zwischen den Widerstandsgrößen R und R_m aufstellen:

$$R = \frac{\mu_0}{4\pi} R_m$$

Daraus folgt

$$\frac{R_m}{\Omega} = \frac{R}{\Omega_{\text{abs}}}$$

also die Gleichheit der Zahlenwerte im rationalen Vierer-System und im nicht-rationalen elektromagnetischen Dreier-System. Das Ohm hat somit in beiden Systemen zwar verschiedene Dimension, jedoch sind die in ihnen gemessenen Zahlenwerte R/Ω_{abs} und R_m/Ω identisch.

Die Festsetzung $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Omega_{\text{abs}} \text{ s}}{\text{m}}$ ist daher

gleichbedeutend mit der Einführung des absoluten Ohms als Widerstandseinheit im elektrischen Vierer-System. Man kommt auf diese Weise zu einem Maßsystem mit

$$\text{m, kg, s, } \Omega_{\text{abs}},$$

als Grundeinheiten. Die elektrische Energieeinheit wird in diesem System zwangsläufig gleich der mechanischen.

Auch die Wahl einer anderen Größe würde nichts daran ändern, daß man für den Aufbau des Einheitensystems auf die Widerstandseinheit zurückgreifen würde.

Es ließe sich natürlich ein Maßsystem mit den obigen vier Einheiten auch in nicht rationaler Schreibweise aufbauen. In einem solchen System würde die Größe

$$\mu_0 = 1 \cdot 10^{-7} \Omega_{\text{abs}} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

festzusetzen sein. Für das absolute Ohm würde sich in diesem System die Definition ergeben, durch die es auch im elektromagnetischen Dreier-System gegeben ist. Dies leuchtet ohne weiteres ein, wenn man bedenkt, daß das Auftreten des Faktors 4π ja von der Wahl der Schreibweise der Gleichungen abhängt. Der Unterschied geht letzten Endes auf die Kraftlinienvorstellung zurück. Setzt man fest, daß am Einheitspol eine Kraftlinie entspringt, so ergeben sich die rationalen Gleichungsformen. Läßt man dagegen eine Kraftlinie von der Flächeneinheit der den Einheitspol umschließenden Einheitskugel ausgehen, so entspringen 4π Kraftlinien am Einheitspol, und es entstehen die nicht-rationalen Formen der elektrodynamischen Gleichungen.

Die PTR hat das Vierer-System mit dem Ω_{abs} als vierter Grundeinheit nicht immer propagiert. v. Steinwehr vertrat stets den Standpunkt, man solle ein Maßsystem mit den Grundeinheiten

$$\text{m, kg, s, } \Omega_{\text{int}},$$

wählen, weil dann die Meßwiderstände nicht geändert zu werden brauchen. Er beruft sich darauf, daß ja auch Meter, Kilogramm und Sekunde willkür-

lich festgelegte Einheiten seien, und daß man daher auch die Widerstandseinheit frei wählen könne. Wählt man hierfür das $\Omega_{\text{int.}}$, so würden zwar alle Widerstandswerte ungeändert bleiben, aber dann führt die Gleichsetzung der mechanischen und der elektrischen Energieeinheit zu neuen Werten von V und A, die weder mit den absoluten noch mit den internationalen identisch sind. Dies wäre zum mindesten kein Vorzug des Systems. Für die Beibehaltung der internationalen Widerstandseinheit ins Feld geführte wirtschaftliche und zeitbedingte Gesichtspunkte sollten bei prinzipiellen Festlegungen wie im vorliegenden Falle gänzlich außer Betracht bleiben.

Zuzugeben ist, daß durch die neue Regelung während einer Übergangszeit Schwierigkeiten in der Umstellung eintreten werden. Doch sind schon Umstellungen vorgenommen worden, die zweifellos wesentlich schwieriger waren (Übergang der Thermometerskala vom Reaumur- auf den Celsiusgrad, Änderungen von Längen- und Gewichtsmaßen sowie von Geldwährungen, Kalenderreform). Die erforderlichen Änderungen betreffen nur die Meßwiderstände, die überwiegende Mehrzahl der technischen Widerstände wird nicht berührt. Außerdem müssen die Umstellungsschwierigkeiten, wirtschaftlich gesprochen Umstellungskosten, auf den Wert der davon abhängigen Güter bezogen werden. Von den Verfechtern des $\Omega_{\text{int.}}$ wird auf die Schwierigkeiten bei der seinerzeit durchgeführten Umstellung vom legalen auf das internationale Ohm hingewiesen. Seit dieser Umstellung ist die Zahl der von Meßwiderständen abhängigen Produktionsgüter sicher sehr viel stärker gestiegen als die Zahl der Meßwiderstände, obwohl diese natürlich ebenfalls gewachsen ist. Das Verhältnis von Kosten zu Wert ist also eher gesunken als gestiegen. Hieraus ergibt sich, daß die heute zu erwartenden Mißstände relativ geringer sein werden als bei der damaligen Umstellung. Auch bei den elektrischen Prüfämtern werden keine großen Schwierigkeiten auftreten, weil ihre Kompensatoren und Brücken nur Widerstandsverhältnisse angeben, bei denen die Maßeinheit keine Rolle spielt. Nur die Bezugsnormale müssen ausgetauscht werden.

Der Vorschlag, das Ohm als vierte Einheit einzuführen, stammt von Giorgi; und zwar hat Giorgi zuerst das $\Omega_{\text{abs.}}$, später das $\Omega_{\text{int.}}$ vorgeschlagen. Daher bezeichnen die Vertreter beider Standpunkte ihr System als das Giorgische, wodurch eine gewisse Verwirrung in den Begriffen entstanden ist. Man sollte unter diesen Umständen die Bezugnahme auf Giorgi besser ganz vermeiden.

Ein Punkt, der zu Bedenken gegen die Wahl des Widerstandes als Grundeinheit überhaupt Anlaß geben könnte, ist die mangelnde Sicherheit des Widerstandswertes, die bisher erreicht wurde, und die der der übrigen Grundeinheiten nicht unbeträchtlich nachsteht. Die relative Unsicherheit beträgt

| | |
|-------------------------------|--------------------------|
| bei der Längeneinheit . . . | $\sim 1 \cdot 10^{-8}$, |
| bei der Masseneinheit . . . | $\sim 2 \cdot 10^{-9}$, |
| bei der Zeiteinheit | $\sim 1 \cdot 10^{-8}$, |
| bei der Widerstandseinheit | $\sim 5 \cdot 10^{-7}$, |

wenn man die besten amerikanischen Ohmbüchsen zugrunde legt. Doch ist die Entwicklung von Widerstandsnormale wohl noch nicht als abgeschlossen anzusehen. Für die Wahl des Widerstandes als Grundeinheit spricht dagegen die Tatsache, daß sich

die Widerstandseinheit als Prototyp realisieren läßt, was z. B. beim Strom nicht und bei der Spannung nur mit ungerunden Werten (NE) möglich ist.

Es wurde bereits in Teil I darauf hingewiesen, daß als Widerstandsnormale wegen der mangelnden Reproduzierbarkeit der Quecksilberrohre schon frühzeitig in der PTR an die Quecksilbernormale anschließende Drahtnormale konstruiert wurden, und es wurden die Verdienste der PTR an der Entwicklung dieser Widerstandsnormale zu einem Meßgerät hoher Qualitäten erläutert. Das Ergebnis dieser Arbeiten, der bekannte Normalwiderstand in Büchsenform, besitzt im allgemeinen eine zeitliche Konstanz von einigen Millionstel. Da der Temperaturkoeffizient des Manganins selbst eine lineare Temperaturfunktion ist, so wird die Temperaturabhängigkeit eines solchen Widerstandes im Bereiche der Zimmertemperaturen im allgemeinen durch eine Kurve 2. Ordnung dargestellt, die jedoch meist in der Nähe von 20°C ein Maximum aufweist, so daß der Temperaturgang in der Regel gering ist.

Die PTR hat sich durch eine große Reihe von Arbeiten an der Weiterentwicklung der Normale beteiligt. Hier sind in erster Linie die Arbeiten von Jaeger, Steinwehr und Schulze zu nennen, die einerseits Kopien der Quecksilberwiderstände herstellten, die sich teilweise durch eine hohe Konstanz auszeichneten, ohne indessen als ausmeßbare Primärnormale zu dienen, und andererseits Manganin und andere Widerstandsmaterialien in bezug auf ihre Eignung zum Bau von Widerstandsnormale untersuchten und die zu diesem Zwecke erforderliche Vorbehandlung ermittelten. Diese Bemühungen fanden einen Niederschlag in der 1. Ergänzung zu der Bekanntmachung über die Beglaubigung elektrischer Präzisionswiderstände und Normalelemente durch die PTR (Amtsbl. d. PTA Nr. 1, S. 5) vom 27. 10. 1948, wodurch die Zulassung verschiedener neuer Baustoffe zur Herstellung von Normalwiderständen ausgesprochen wurde.

In Amerika hat Rosa schon 1909, nachdem das NBS bis dahin deutsche Widerstände der Firma Otto Wolff benutzt hatte, die nach den Modellen der PTR hergestellt und in der PTR geeicht worden waren, den Widerstandswickel in eine völlig geschlossene, mit Öl gefüllte Kapsel eingebaut und damit nach Messungen, die sich über 23 Jahre erstreckten, eine Konstanz von wenigen Millionstel erzielt. Hierzu gehörte aber unbedingt ein Raum völlig konstanter Temperatur, da diese Büchsen einer Temperaturänderung nur mit sehr großer Phasenverschiebung folgen und man daher bei Temperaturänderungen ihres Wertes nicht sicher ist. Auch die PTR hat Versuche mit derartigen Büchsen angestellt, aber mangels geeigneter, temperaturkonstanter Räume damit keine befriedigenden Ergebnisse gehabt. 1928 konstruierte Thomas eine neue Form. Der blanke Widerstandsdraht wurde nach Alterung bei $\sim 500^{\circ}\text{C}$ in eine geschlossene Büchse eingebracht, die mit trockener Luft von Atmosphärendruck gefüllt war. Der Durchmesser des Wickels wurde auf 6 und später auf 8 cm vergrößert, um den Draht mechanisch weniger zu beanspruchen. Diese Widerstände scheinen bis auf weniger als $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ konstant zu bleiben.

Das Widerstandsnormale eines jeden Signatarstaates der Meterkonvention ist dargestellt durch den Mittelwert eines Satzes solcher Widerstandsbüchsen. Diese nationalen Mittelwerte werden alle zwei Jahre

im BIPM zu Paris an den internationalen Mittelwert Ω_M angeschlossen, der der Widerstandseinheit 1Ω gleichgesetzt wird. Wie dieser Anschluß geschieht, soll im folgenden im Prinzip auseinandergesetzt werden.

In jedem der beteiligten Staaten wird eine nationale Widerstandseinheit, bisher ein Realisat des Quecksilberohms, in Zukunft ein nationales absolutes Ohm — aufgestellt und durch den Mittelwert eines Satzes von 1 Ω -Büchsen dargestellt. Für Deutschland wird diese nationale Einheit mit Ω_A (Allemagne) bezeichnet; der deutsche Normalwiderstandssatz umfaßt 4 Büchsen, die mit R_1, R_2, R_3, R_4 bezeichnet sein mögen. Diese Widerstände werden durch Ω_A ausgedrückt mit Hilfe der Gleichungen

$$\begin{aligned} R_1 &= \Omega_A + \delta_1 \\ R_2 &= \Omega_A + \delta_2 \\ R_3 &= \Omega_A + \delta_3 \\ R_4 &= \Omega_A + \delta_4 \end{aligned}$$

Hieraus ergibt sich der deutsche Büchsenmittelwert

$$R_{MA} = \Omega_A + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 \delta_n$$

Ein Widerstand R_5 wird zum Anschluß an das Ohm nach Paris geschickt. Er wird zuvor an das deutsche Ohm angeschlossen. In Paris kommen die Widerstände der sechs beteiligten Länder zusammen. Sie hängen mit ihren nationalen Einheiten zusammen durch die folgenden Beziehungen, wobei die Indices bedeuten: E = Amerika (États-Unis), G = England (Grande Bretagne), F = Frankreich (France), U = Rußland (Union Sovietique) und J = Japan (Japon). Der Mittelwert der nationalen Einheiten ist definitionsgemäß das Ohm ($\Omega_M = 1$).

$$\begin{aligned} R_5 &= \Omega_A + \delta_5 \\ R_6 &= \Omega_E + \delta_6 \\ R_7 &= \Omega_G + \delta_7 \\ R_8 &= \Omega_F + \delta_8 \\ R_9 &= \Omega_U + \delta_9 \\ R_{10} &= \Omega_J + \delta_{10} \end{aligned}$$

Der Mittelwert dieser Büchsen, der, wie bereits bemerkt, als konstant gelten soll, beträgt

$$R_M = \Omega_M + \frac{1}{6} \sum_{n=5}^{10} \delta_n$$

Jede der sechs Büchsen wird mit jeder anderen verglichen. Das ergibt für die deutsche Büchse folgende Aufstellung:

$$\begin{aligned} R_5 - R_5 &= 0 \\ R_5 - R_6 &= \Delta_1 \\ R_5 - R_7 &= \Delta_2 \\ R_5 - R_8 &= \Delta_3 \\ R_5 - R_9 &= \Delta_4 \\ R_5 - R_{10} &= \Delta_5 \end{aligned}$$

Der Zusatz der Identität $R_5 - R_5 = 0$ ist wegen der Mittelwertbildung erforderlich. Man erhält

$$R_5 = R_M + \frac{1}{6} \sum_{n=1}^5 \Delta_n$$

also durch Einsetzen

$$R_5 = \Omega_M + \frac{1}{6} \left[\sum_{n=5}^{10} \delta_n + \sum_{n=1}^5 \Delta_n \right]$$

Daraus ergibt sich für das deutsche Ohm

$$\Omega_A = 1 + \frac{1}{6} \left[\sum_{n=5}^{10} \delta_n + \sum_{n=1}^5 \Delta_n \right] - \delta_5 = 1 + \Delta_A$$

Δ_A stellt daher den Fehler der deutschen Ohmbestimmung, bezogen auf den international festgelegten Mittelwert Ω_M , dar. Er wird von Paris mitgeteilt. Diese Mittelwertbildung ist ganz unabhängig davon, ob die sechs Länder ihre Vergleichswiderstände in absoluten oder in internationalen Ohm präsentieren. Zur Zeit ist es noch so, daß dies die internationalen Werte sind, weil die absoluten Messungen noch nicht überall ausführbar sind. Die Länder reichen also Büchsen ein, die an das Quecksilberohm angeschlossen sind. Der resultierende Mittelwert wird dann mittels des festgelegten Umrechnungsfaktors 1,00049 auf das absolute Ohm umgerechnet. Dies ist jedoch nur ein vorläufiges Verfahren, welches einer direkten Vergleichung der absoluten Ohmwerte Platz machen wird, sobald die entsprechenden absoluten Meßanordnungen in den beteiligten Ländern betriebsbereit und in absoluten Ohm geeichte Büchsen verfügbar sind.

Praktisch sieht die Vergleichung der Normale etwas komplizierter aus. Es werden von mehreren Beobachtern voneinander unabhängige Meßreihen durchgeführt, die symmetrisch zu einem zeitlichen Mittelpunkt als Bezugsstermin liegen und deren Ergebnisse ermittelt werden. Außer den sechs erwähnten nationalen Normalen wird noch eine größere Anzahl von weiteren angeschlossen, unter denen sich eine Gruppe von ständig in Paris aufbewahrten nationalen Normalen befindet, deren Mittelwert das Ohm des BI PM repräsentiert, und u. a. als vorläufiges Bezugsnormale gelten kann, sofern eine vollständige Vergleichung, z. B. infolge Ausfalles eines oder mehrerer der beteiligten Staaten, nicht durchführbar ist.

Es ist, nach den oben gemachten Darlegungen wohl klar geworden, daß die Physikalisch-Technische Bundesanstalt auf die Schaffung einer experimentellen Möglichkeit zur praktischen Realisierung des absoluten Ohms nicht verzichten kann, ohne auf eine deutsche Stimme im Gremium der die elektrische Meßtechnik entscheidend beeinflussenden Nationen zu verzichten.

Zur Einführung des absoluten Ohms

von Dr. G. Zickner, Oberregierungsrat
bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
in Braunschweig

III. Experimentelle Bestimmung des absoluten Ohms

In zwei vorangegangenen Aufsätzen wurde bereits die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Widerstandseinheit bis zur Einführung des absoluten Ohms am 1. Januar 1948 (Amtsblatt der PTB Nr. 2, 1950, S. 70) und die Definition und Darstellung der absoluten Widerstandseinheit (ebenda Nr. 1, 1951, S. 35) erörtert. Im folgenden sollen diese Ausführungen ergänzt und abgeschlossen werden durch einige Mitteilungen über die experimentelle Realisierung des absoluten Ohms und über seine zahlenmäßige Beziehung zum internationalen Ohm. Die Definitionen beider Größen wurden in den vorgenannten Veröffentlichungen gegeben. Auch im folgenden soll die Reihenfolge der historischen Entwicklung im wesentlichen innegehalten werden.

Zunächst ist einiges über die Methoden zu sagen, mit deren Hilfe man das absolute Ohm realisiert.

Um ein praktisch hergestelltes Widerstandsnormale in der theoretischen Maßeinheit von

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

angeben zu können, muß man das Verhältnis einer in absoluten Einheiten ausgedrückten EMK zu der durch dieselbe in einem Leiter erzeugten Stromstärke, ebenfalls in absoluten Einheiten ausgedrückt, bestimmen. Eine in absoluten Einheiten angebbare EMK erhält man durch relative Lageänderung eines Leiters von gegebenen Dimensionen zu einem magnetischen Feld von bekannter Stärke. Der in dem Leiter fließende Strom wird ausgedrückt durch diese EMK, dividiert durch einen absoluten Widerstand. So ergibt sich eine Beziehung zwischen diesem und den Beobachtungsdaten.

Nach einer solchen Methode wurde erstmalig 1863 von *Maxwell*, *Stewart* und *Jenkin* die BAU festgelegt, die ja das absolute Ohm verkörpern sollte. Eine kurzgeschlossene Spule vom Radius r und der Windungszahl z rotiert gleichförmig mit der Winkelgeschwindigkeit ω im Erdfeld um eine vertikale Achse. Eine in ihrer Mitte aufgehängte Magnetnadel wird dadurch um einen Winkel φ abgelenkt. Auf die Durchrechnung dieser Anordnung soll hier nicht eingegangen werden. Sie liefert die Beziehung

$$R = \mu_0 \cdot \frac{\pi z^2 r \omega}{4 \text{tg } \varphi}$$

In praxi sind eine ganze Anzahl Korrekturen anzubringen (Wickelraum, Fadentorsion, Induktivität, Rückwirkung der Nadel), so daß die Messung ziemlich ungenau wird. Daher hatte auch, wie spätere Messungen zeigten, die BAU einen Fehler von mehr als 1 %.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts befaßte man sich noch mit mehreren anderen Methoden der absoluten Widerstandsbestimmung, die heute wegen ihrer Ungenauigkeit nicht mehr in Betracht kommen. Statt den Erdinduktor rotieren zu lassen, kann man auch einen Spannungsstoß erzeugen durch eine einmalige Drehung um 180° aus der einen in die andere

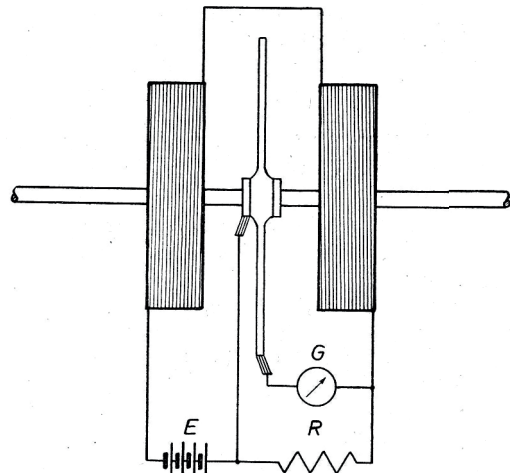


Abbildung 1
Lorenz-Methode

Ostwestlage, der auf ein Galvanometer gegeben wird. Dessen Ausschlag ist ein Maß für den Widerstand der gesamten Anordnung. Man erkennt sofort die zahlreichen Fehlerquellen: Es gehen ein außer μ_0

- 1) die Windungsfläche des Erdinduktors
- 2) die Eigenschaften des Galvanometers (Empfindlichkeit, Dämpfung, Schwingungsdauer)
- 3) bei einem Nadelgalvanometer Torsionsverhältnis und magnetisches Moment der Nadel
- 4) der Ausschlag
- 5) die Horizontalintensität des Erdfeldes.

also hinreichend viele mangelhaft bestimmbare Größen, um die Methode als aussichtslos erscheinen zu lassen.

Ganz ähnlich liegen die Dinge bei der von *Weber* vorgeschlagenen Methode, aus dem Dämpfungsunterschied der Nadelschwingung eines offenen und kurzgeschlossenen Multiplikators dessen Widerstand zu bestimmen.

Ein näheres Eingehen auf diese Methoden erübrigt sich also. Nur auf eine solche soll noch kurz hingewiesen werden, nämlich auf die absolute Bestimmung der Widerstandseinheit aus einer Energie. Der Strom i A entwickelt in 1 s die Wärmemenge $0,239 i^2 r$ am Widerstand r . Der Strom kann dynamometrisch, z. B. mit Hilfe der Stromwaage, und die Energie kalorimetrisch bestimmt werden. Dann erhält man das Ohm in absoluten Einheiten.

Mit Hilfe eines Differentialkalorimeters kann die Energie auch an das mechanische Energiemaß angeschlossen werden. Diese Methode hat *v. Steinwehr* zur Darstellung der Strom- und Spannungseinheit in dem von ihm befürworteten System unter Zugrundelegung des int. Ohms vorgeschlagen. Mit Hilfe einer derartigen „absoluten“ Methode läßt sich also der Wert eines

gegebenen Widerstandsnormals in absoluten Einheiten messen.

Nach der Einführung der internationalen Einheiten 1911 stand die Aufgabe im Vordergrund des Interesses, das int. Ohm in absolutem Maß auszudrücken. Dies geschah zuerst im NPL (1914) durch *Smith* nach der Methode von *Lorenz*. Im Magnetfeld H einer aus zwei in Reihe liegenden Hälften bestehenden einlagigen Zylinderspule rotiert eine Metallscheibe vom Radius r mit der sekundlichen Drehzahl n . Abb. 1 zeigt das Schema der Anordnung. Die zwischen Achse und Scheibenrand induzierte EMK ist

$$U = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t} = n\phi$$

da $d\phi = \mu_0 \pi n r^2 \cdot H dt$ eine lineare Zeitfunktion ist. Der von der Stromquelle E herrührende Strom i in der Spule durchfließt den Widerstand R und erzeugt an dessen Enden den Spannungsabfall iR , der durch U kompensiert wird. Zeigt also das Galvanometer G keinen Ausschlag, so gilt

$$n\phi = iR$$

Nun ist aber die Gegeninduktion zwischen Spule und Scheibenrand

$$M = \frac{\phi}{i}$$

folglich

$$R = nM$$

M ist aber aus den Dimensionen der Spule und der Scheibe nach einer Formel von *Jones* exakt berechenbar, n sehr genau meßbar. *Jones* hat diese Verhältnisse eingehend theoretisch behandelt, und zusammen mit *Ayrton* auch experimentell, aber mit geringerem Einsatz von Mitteln, ausgeführt, nachdem bereits Vorversuche von anderen (*Lorenz*, *Rowland* u. a.) vorlagen. Die eigenartige Spulenform ist aus Gründen des Feldverlaufs gewählt. Dieser ist aus Abb. 4 zu erkennen. Das später beschriebene *Campbell'sche* Gegeninduktionsnormal ist auf Grund der gleichen Überlegung konstruiert. Der Scheibenrand liegt im Raum sehr kleiner Feldstärke, kleine Unsicherheiten in seiner Lage ändern also M sehr wenig. In der praktischen Ausführung ist die Spulenordnung verdoppelt. Dadurch ist die EMK verdoppelt, und der störende Einfluß des Erdfeldes läßt sich dadurch beseitigen, daß die Feldrichtung in beiden Spulenpaaren entgegengesetzt liegt. Ferner fallen die Abnahmebürsten an der Welle fort. Auch die Kontaktpotentiale am Scheibenrand sind gegeneinander geschaltet, fallen also heraus. Überdies sind sie sehr klein, da Bürste und Scheibenrand aus dem gleichen Material bestehen, nämlich Bronze. Beide Scheiben von ca. 0,5 m ϕ sitzen auf einer ca. 7 m langen Welle, an deren Ende entfernt von den Spulen der Motor angreift, der die Scheiben mit ca. $n = 30$ dreht. Die Spulen haben etwa 36 cm ϕ und 16 cm Länge auf jeder Scheibenseite, sie sind auf Hohlzylinder aus Marmor gewickelt. Das Ergebnis war

$$1 \Omega_{\text{int.}} = 1,00052 \Omega_{\text{abs.}}$$

bezogen auf das englische Widerstandsnormal.

Die deutsche Ohm arbeit, nach einer Idee von *Rosa* durch *Grüneisen* und *Giebe* 1911 bis 1921 in der PTR ausgeführt, war vor dem ersten Weltkrieg experimentell abgeschlossen, wurde aber erst nachher ausgewertet. Diese Methode benutzt den Umstand, daß der Widerstand R die gleiche Dimension besitzt wie der Blind-

widerstand ωL , so daß das Verhältnis des internationalen Maßes zu dem absoluten für beide Größen dasselbe ist. Aus dem Quotienten der Blindwiderstände fällt ω heraus, man bestimmt daher das Verhältnis $L_{\text{int.}}/L_{\text{abs.}}$ und hat damit die gesuchte Beziehung.

$L_{\text{abs.}}$ ergibt sich durch Berechnung aus μ_0 und den Dimensionen der Spule. Man wählt also eine exakt berechenbare Form, z. B. eine einlagige Zylinderspule. Zur Berechnung müssen die geometrischen Dimensionen der Spule (Durchmesser D , Drahtstärke d , Ganghöhe g , Windungszahl z , aus den beiden letzteren ergibt sich die Spulenlänge) sehr genau bekannt sein. Zur Erreichung einer relativen Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-6}$ sind D und d auf $0,2 \mu$ zu messen, während g auf etwa $1 \text{ m}\mu$ bekannt sein muß; z ist eine ganze Zahl. $L_{\text{int.}}$ wird durch elektrische Messung mit Hilfe von in int. Ohm geeichteten Widerstandsbüchsen gefunden. Die Induktivität wird zunächst in einer Maxwellbrücke auf das Produkt $r^2 C$ zurückgeführt, dann C ebenfalls in einer von Maxwell angegebenen Schaltung mit Hilfe eines rotierenden Unterbrechers, wie er von *Giebe* für absolute Kapazitätsmessungen entwickelt worden ist, durch den Quotienten $1/n r$ dargestellt. Somit ergibt sich

$$L = \frac{r}{n}$$

n ist die durch den rotierenden Unterbrecher gegebene sekundliche Aufladungszahl, die durch einen speziell hierzu konstruierten Zentrifugalregulator sehr konstant gehalten und mit einem Chronographen sehr genau gemessen wurde. Daß hier die Frequenz n und nicht, wie man aus der Wechselstromtechnik gewohnt ist, die Kreisfrequenz auftritt, liegt daran, daß der Strom durch einen Kondensator bei n Aufladungen pro Sekunde gegeben ist durch

$$J = nQ = nCV \quad \text{also} \quad \frac{V}{J} = R = \frac{1}{nC}$$

Bei der Gleichstrommessung ist die Zeitkonstante der Widerstände belanglos, bei der Wechselstrommessung dagegen mußten die verwendeten Bifilarwiderstände kleiner Zeitkonstante vor und nach der Messung an das internationale Ohm (Büchsenmittel) angeschlossen werden. Natürlich treten eine Anzahl von Korrekturen hinzu. Eine ergibt sich z. B. aus den Daten des rotierenden Unterbrechers und der zugehörigen Meßanordnung. Die Korrekturen der Wechselstrombrücke werden durch einen Kunstgriff zum großen Teil eliminiert. Nach Einstellung der Brücke wird die Spule durch einen Bifilardraht gleichen Widerstandes ersetzt und die Kapazität bis auf einen geringen Rest abgeschaltet, mit dem das Gleichgewicht wieder eingestellt wird. Dadurch erhält man die Meßgröße als Einstellungs-differenz und die Brückenkorrekturen fallen durch die Differenzbildung bis auf die geringe Induktivität des Bifilardrahtes heraus.

Das Ergebnis ist

$$\Omega_{\text{int.}} / \Omega_{\text{abs.}} = 1,00051$$

bezogen auf das deutsche Widerstandsnormal. Die Genauigkeit betrug $2 \div 3 \cdot 10^{-5}$.

Die Übereinstimmung mit dem englischen, auf ganz anderer Basis stehenden Wert ist auf den ersten Blick überraschend. Da jedoch das deutsche und das englische Widerstandsnormal, wie später festgestellt wurde,

um etwa ebensoviel differierten, so hängt eine Vergleichung des deutschen Wertes mit dem englischen einigermaßen in der Luft, weil man die später ausgeführte Vergleichung, die seinerzeit durch den Kriegsausbruch 1914 verhindert wurde, nicht auf die Zeit der Messungen rückübertragen kann, da die beiden nationalen Mittelwerte sich geändert haben, aber in nicht genau bekannter Weise.

Es bleibt noch übrig, kurz auseinander zu setzen, wie man in dieser Methode das absolute Widerstandsmaß aus den zahlreichen in die Messung eingehenden Widerstandswerten explicite darzustellen hätte. Im Prinzip folgt der Widerstand aus einer berechneten Induktivität und einer gemessenen Frequenz. Was wir als Ohmspule bezeichnen, ist also ein Blindwiderstand; der Cu-Widerstand der Spule spielt gar keine Rolle. Abb. 2 zeigt eine Ohmspule.

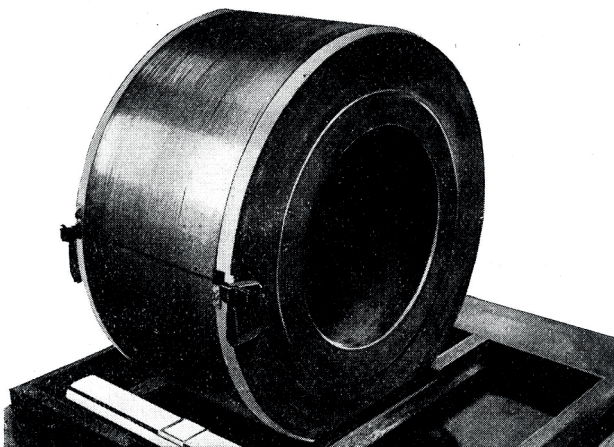


Abbildung 2
Ohmspule der PTR

In praxi sieht die Sache etwas komplizierter aus. Die hier folgende Darstellung weicht von der früher von *Giebe* gegebenen etwas ab; sie läßt den Zusammenhang besser erkennen. Die Induktivität der Ohmspule wird, wie oben erörtert, aus den Dimensionen berechnet. Die ziemlich komplizierte Formel stammt von *Lorenz* mit einer Korrektur von *Rosa* und arbeitet mit elliptischen Integralen; sie ist später von *Chester Snow* noch weiter verbessert worden.

Die geometrische Ausmessung der Spule mit sehr hoher Genauigkeit ist eine fast ebenso schwierige Aufgabe wie die exakte elektrische Messung. Sie wurde von *Grüneisen* und *Giebe* mit einem von *Goepel* konstruierten Kompensator und mit Hilfe geeichter Endmaße bewältigt. Die Ablesung geschah mikroskopisch.

Experimentell ist L in der Maxwellbrücke darstellbar durch das Produkt

$$L = C r_1 \cdot r_2$$

und C wiederum nach der Methode von *Maxwell-Thomson* mit Hilfe eines rotierenden Unterbrechers durch den Quotienten

$$C = \frac{r_3}{n r_4 r_5}$$

n ist die Unterbrecherfrequenz. Sie soll zunächst so gewählt sein, daß der Einstellwiderstand nahezu einen runden Wert hat. Die Widerstände der Brücken seien mit r_1 bis r_5 bezeichnet.

Durch Einsetzen erhält man

$$L = \frac{r_1 r_2 r_3}{n r_4 r_5}$$

Nun sei r das benutzte Widerstandsmaß. Dann kann man schreiben

$r_1 = a \cdot 10^\alpha r$ $r_2 = b \cdot 10^\beta r$ $r_3 = c \cdot 10^\gamma r$ $r_4 = d \cdot 10^\delta r$ $r_5 = e \cdot 10^\varepsilon r$, wobei die Zahlen a, b, c, d, e alle nahe bei 1 liegen, da es sich ja um Normalbüchsen handelt. Setzt man dies ein, so ergibt sich

$$L = \frac{abc}{nde} \cdot \frac{r^3}{r^2} \cdot 10^{\alpha + \beta + \gamma - \delta - \varepsilon}$$

Es sei jetzt

$$\frac{abc}{de} = 1 + \Delta \quad \text{wobei } \Delta \ll 1$$

und $\alpha + \beta + \gamma - \delta - \varepsilon = \psi$

so folgt $L = (1 + \Delta) \cdot \frac{r}{n} \cdot 10^\psi$

also $r = (1 - \Delta) nL \cdot 10^{-\psi}$

n wird durch Anschluß an die Quarzuhr ermittelt. Setzt man für L den berechneten Wert ein, so erhält man r in absolutem Maß, da ψ und Δ reine Zahlen sind.

Hat der Einstellwiderstand keinen runden Wert, so tritt an Stelle von $(1 - \Delta)$ ein Zahlenfaktor.

Eine neue Gruppe von Ohmarbeiten wurde ins Leben gerufen, als die 8. Generalkonferenz für Maß und Gewicht 1933 den Staatsinstituten empfahl, zwecks Einführung der absoluten Einheiten die Beziehung zwischen dem internationalen und dem absoluten Ohm mit größtmöglicher Genauigkeit festzulegen.

Zunächst wiederholte *Vigoureux im NPL* Teddington die Methode von *Smith* und erhielt 1937 das Ergebnis

$$\frac{\Omega \text{ int.}}{\Omega \text{ abs.}} = 1,000499$$

In NBS in Washington arbeitete man nach der gleichen Methode wie *Grüneisen* und *Giebe*, aber mit einem größeren Aufwand an Mitteln. Die Arbeit wurde von *Curtis, Moon* und *Sparks* 1936 veröffentlicht und benutzte 3 Spulen, eine aus Porzellan, eine aus Pyrexglas und eine aus Quarzglas. Während die beiden ersten etwa die Größe der deutschen Spulen hatten, war die Quarzglas-spule 110 cm lang bei 28 cm Durchmesser und besaß ungefähr 0,07 H. Für den Schleifprozeß der Zylinder sowohl wie für ihre geometrische Ausmessung wurden ad hoc konstruierte Spezialgeräte benutzt.

Die Meßgenauigkeit der Maxwellbrücke mit Indikatorverstärker betrug einige 10^{-6} und reichte aus, um z. B. die Lage der eisernen Träger in den Mauern nachzuweisen, wenn man die Spule innerhalb des Raumes verschob. Die absolute Kapazitätsmessung erfolgte durch Stimmgabelunterbrecher mit Vakuumkontakten. Das Ergebnis betrug

$$\frac{\Omega \text{ int.}}{\Omega \text{ abs.}} = 1,000450$$

weicht also um mehrere 10^{-5} von den bisherigen Ergebnissen ab. Die Autoren führten dies auf Ungleichmäßigkeiten in der Ganghöhe zurück, die eine fehlerhafte Berechnung zur Folge hatten, und wiederholten die Arbeit mit einer neuen, weiterhin verbesserten Spule aus Pyrexglas von 120 cm Länge, 35 cm Durchmesser, 10 cm Wandstärke und 1000 Windungen mit einer Induktivität von 0,1 H. Es ist leicht einzusehen, daß die Genauigkeit der Messung mit wachsender

Selbstinduktion der Spule wachsen muß. Nach annähernd erreichter Zylindrizität wurde mit Hilfe einer mit Diamantstaub beschickten Schleifscheibe eine Spirallnut in die Zylinderoberfläche geschnitten. Hierdurch kann man zwar die Ganghöhe besser konstant halten, doch wird der Durchmesser dafür unsicherer, da sich ja die Spirallnut weniger genau herstellen läßt als eine glatte Zylinderoberfläche.

Die Messungen geschahen in gleicher Weise wie früher, erfolgten aber in einem Raum konstanter Temperatur. Eine Reihe von Zusatzuntersuchungen wurden gemacht, um Fehlerquellen auszuschließen (Integration des Galvanometers, Verhalten der Widerstände, Einfluß der Ladebatterie). Es ergab sich nunmehr

$$\frac{\Omega \text{ int.}}{\Omega \text{ abs.}} = 1,000483$$

Der Mittelwert beider Arbeiten betrug mit geschätzten Gewichten

$$\frac{\Omega \text{ int.}}{\Omega \text{ abs.}} = 1,000472$$

Auch die deutsche Methode wurde verbessert, als der Verfasser zusammen mit *Goens* und *Blechschildt* etwa 1935 die Ohmarbeit wieder aufnahm. Ein Raum konstanter Temperatur wurde dafür geschaffen, dessen Schwankungen unter $0,1^\circ \text{C}$ blieben. Da die Zeitkonstante der Widerstände in die Brückenbedingungen eingeht, so wurden Bifilarwiderstände gebaut, wie sie *Grüneisen* und *Gieße* bereits in ähnlicher Form verwendet hatten. Für den Widerstandsanschluß wurde ein Verfahren ausgearbeitet, das eine Messung in den Bädern der Brücke selbst gestattete. In der Maxwellbrücke wurde ein elektrisch abstimmbares Vibrationsgalvanometer mit erhöhter Empfindlichkeit benutzt. Die absolute Kapazitätsmessung mit dem rotierenden Unterbrecher erhielt ein wesentlich empfindlicheres Galvanometer, der Unterbrecher selbst laufende Petroleumschmierung. Der *Gieße'sche* Fliehkraftregler wurde durch einen an die Quarzuhr angeschlossenen Synchronmotor ersetzt. Die Empfindlichkeit der Anordnung stieg dadurch auf ca. $\pm 1 \cdot 10^{-6}$.

Die Spule von 23 cm Durchmesser und 23 cm Länge hatte 0,01 H und lag auf einem glatten zylindrischen Spulenkörper aus Quarzglas; der Durchmesser war also sehr genau bestimmbar. Um auch hohe Ganghöhen- genauigkeit zu erzielen, wurde ein sehr genau geschnittenes kurzes Gewinde gleicher Ganghöhe unter schwachem Druck in die Wicklung eingesetzt und auf der Bank über die Wicklung hinweggezogen, die Wicklung also gleichsam gekämmt. Hierdurch ließ sich die Ganghöhe, wie die Messungen zeigten, außerordentlich gleichförmig gestalten. Die Ausmessung der Spule geschah durch *Lampe* auf einer von *Kösters* konstruierten Meßmaschine teils optometrisch, teils mikroskopisch. Die Spule steht hierbei auf einem Kolben, der durch Öldruck in seiner Führung verschoben werden kann. Die Ablesegeräte sitzen in einer festen Haube. Als Vergleichsmaß sind eine Zylinderscheibe von genau bekanntem Durchmesser und ein geeichter Maßstab vorgesehen.

Das Ergebnis war

$$\frac{\Omega \text{ int.}}{\Omega \text{ abs.}} = 1,00051$$

Genauere Angaben können, wie bereits bemerkt, wegen vorzeitigen Abbruches der Arbeit nicht gemacht werden (vgl. I. Teil).

Eine ähnliche Methode benutzte *Yoneda* in Japan. Er verwandte jedoch statt der Selbstinduktion eine Gegeninduktion und entsprechend statt der Maxwellbrücke eine solche nach *Carey-Foster*. Seine Arbeit ergab das vorläufige Resultat

$$\frac{\Omega \text{ int.}}{\Omega \text{ abs.}} = 1,000455$$

Im NPL Teddington arbeiteten ferner *Hartshorn* und *Astbury* nach einer von *Campbell* angegebenen Methode und veröffentlichten 1937 die Ergebnisse. Die Methode geht auf einen Vorschlag von *Kirchhoff* zurück, den absoluten Widerstand durch eine Gegeninduktion zu bestimmen, und ist bereits in primitiverer Form von *Röiti* und *Himstedt* zu dem gleichen Zwecke benutzt worden. Die Schaltung ist in Abb. 3 dargestellt. Ein Wechselstrom von 100 Hz ($\omega = 628$) durchfließt das

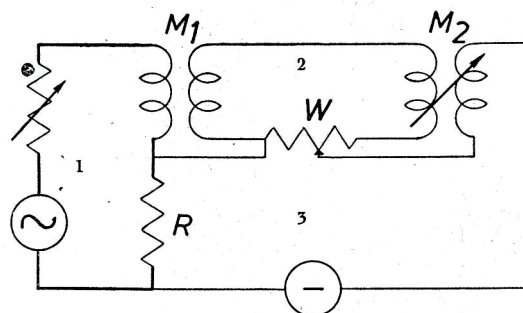


Abbildung 3
Campbell-Methode

int. Ω -Normal R und die Primärseite der Gegeninduktion M_1 , die im Sekundärkreis, der durch die Primärwicklung einer zweiten Gegeninduktion M_2 geschlossen ist, einen um 90° in der Phase gedrehten Strom erzeugt, der durch M_2 eine nochmals um 90° gedrehte, also um 180° phasenverschobene Spannung im Galvanometerkreis hervorruft, die den Spannungsabfall am Widerstand R kompensiert, wenn man W entsprechend wählt. In diesem Falle zeigt das in der Sekundärleitung von M_2 liegende Vibrationsgalvanometer keinen Ausschlag. Kleine Phasenungenauigkeiten (induktive Komponente von R) werden durch Hereinnehmen einer kleinen phasengedrehten Hilfsspannung in den Kompensationskreis, die an W abgegriffen wird, ausgeglichen. Beide Gegeninduktionen werden durch Vergleichung an das berechenbare, absolute Gegeninduktionsnormal nach *Campbell* angeschlossen, dessen Feldlinienbild in Abb. 4 veranschaulicht ist, und das nach den gleichen Prinzipien gebaut ist wie die im Magnetfeld rotierende Scheibe (Abb. 1). Die Sekundärspule der Gegeninduktion liegt also in dem aus Abb. 4 erkennbaren ringförmigen Raume sehr kleiner Feldintensität, der eine geringe Unsicherheit der Lage der Sekundärspule in Kauf zu nehmen gestattet, ohne daß die Gegeninduktion sich merklich ändert. Die Gleichgewichtsbedingung lautet

$$RW = \omega^2 M_1 M_2$$

W ist der gesamte Widerstand des Sekundärkreises 2. Man hat jetzt nur W in der Einheit R auszudrücken, um R in absoluten Einheiten zu erhalten. Die Methode ergab

$$\frac{\Omega \text{ int.}}{\Omega \text{ abs.}} = 1,000505$$

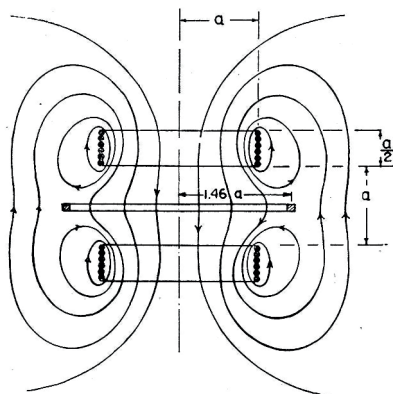


Abbildung 4

Feld des M-Normals nach Campbell

Im Laboratoire Central d'Electricité (Paris) wurde eine ähnliche Methode ausgearbeitet und von *Jouaust, Picard* und *Hérou* 1938 veröffentlicht. Die Autoren nahmen Anstoß daran, daß *W* die Cu-Widerstände der Sekundärspule von M_2 und der Primärspule von M_2 enthält und darum mit Rücksicht auf Frequenz und Temperatur schlecht definiert ist. Sie änderten daher die Schaltung etwas ab, indem sie die Kreise 2 und 3 vertauschten, d. h. das Galvanometer in den Kreis 2 legten. Dadurch vertauschen sich auch Primär- und Sekundärseite von M_2 . Jetzt lautet die Gleichgewichtsbedingung

$$RS = \omega^2 M_1 L$$

Sie enthält jetzt die beiden exakt definierten Widerstände *R* und *S*. *S* sei der abgegriffene Teil von *W* (Abb. 3). M_2 kann variabel sein, da es nicht eingeht. M_1 und *L* werden an ein absolutes Selbstinduktionsnormal angeschlossen, welches in gleicher Weise herge-

stellt, ausgemessen und berechnet wird wie die oben beschriebenen Ohmspulen. Die Vergleichung geschah bei *L* in einer Relativbrücke, bei M_1 in der bekannten Brückenschaltung nach *Rowland*.

Das Ergebnis war

$$\frac{\Omega \text{ int.}}{\Omega \text{ abs.}} = 1,00052$$

ist aber nach brieflicher Mitteilung von *Jouaust* an *v. Steinwehr* vom 7. 12. 46 auf 1,00051 abzuändern.

Endlich wurde in Amerika (NBS, Washington) eine Methode entwickelt, die dort zu einer Dauereinrichtung werden soll. Die Methode wurde von *Wenner* angegeben und 1948 von *Thomas, Peterson, Cooter* und *Kotter* veröffentlicht.

Läßt man in der *Campbell*-Schaltung die zweite Gegeninduktion weg, so kann die Spannung am Widerstand nicht kompensiert werden, weil die Kompensationsspannung um 90° in der Phase versetzt ist. Um die Phasenverschiebung zu umgehen, betreibt *Wenner* die Schaltung mit Gleichstrom, den er durch einen rotierenden Kommutator vor der Primärwicklung umschaltet und hinter der Sekundärwicklung wieder gleichrichtet. Während der Umschaltung ist der rotierende Kontakt für den Strom im Widerstand kurzgeschlossen; während des Stromflusses durch die Primärwicklung überwindet eine Zusatzbatterie deren Widerstand, die aber mit umgeschaltet werden muß, was der rotierende Mechanismus gleichfalls besorgt. Trotz dieser mehrfachen Schalter im Stromkreis gelingt es durch spezielle Zusatzeinrichtungen, den Strom im Widerstand bis auf $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ konstant zu halten. Der Normal-Widerstand ist von der gekapselten Type nach *Thomas*. Er wird mit einem hochohmigen Shunt zusammen verwendet, mit dem eingestellt wird. Die Umdrehungs-Frequenz ist an einen Quarzoszillator elastisch angeschlossen und zwar derart, daß kleine Frequenz-

Absolute Ohmbestimmungen.

| Methode | Endformel | Autoren | Jahr | Ergebnis |
|----------|------------------|----------------------------------|---------|-----------------|
| Lorenz | $R = n M$ | Smith | 1914 | 1,00052 |
| | | Vigoureux | 1937 | <u>1,000499</u> |
| Rosa | $R = n L$ | Grüneisen, Giebe | 1921 | 1,00051 |
| | | Curtis, Moon, Sparks | 1936/38 | <u>1,000472</u> |
| | | Zickner, Goens, Blechschmidt | 1939 | 1,00051 |
| Yoneda | $R = \omega M$ | Yoneda | 1937 | 1,000455 |
| Campbell | $R = k \omega M$ | Hartshorn, Astbury | 1937 | <u>1,000505</u> |
| | | Jouaust, Picard, Hérou | 1938 | 1,00051 |
| Wenner | $R = 4 n M$ | Thomas, Peterson, Cooter, Kotter | 1948 | <u>1,000484</u> |

Mittelwert der unterstrichenen Ergebnisse 1,000490

änderungen durch Belastungsänderungen des Motors durch eine Automatik mit Hilfe eines Thyratrons auskompensiert werden. Die Frequenz wird außerdem mit einer *Shortt-Uhr* kontrolliert. In dieser Schaltung wird ein berechenbares Gegeninduktionsnormal ähnlich dem *Campbell'schen* direkt benutzt. Bringt man zwischen den beiden Primärspulen noch eine dritte Wickelung an, so kann man erreichen, daß die Zone verschwindend kleinen Feldes die Form eines Kreisringes annimmt. In diesen ist die Sekundärspule gelegt. Die gleichgerichtete Sekundärspannung dient dazu, die Spannung am Widerstand zu kompensieren, so daß das Galvanometer nicht ausschlägt. Unter diesen Umständen gilt

$$|JR| = M \frac{dJ}{dt} = M \frac{J}{t}$$

da die Stromänderung praktisch linear erfolgt. Weil J pro Periode 4 mal zwischen 0 und $\pm J$ schwankt, also $t = 1/4n$, so ergibt sich

$$R = 4 nM$$

Es erscheint erstaunlich, daß es gelungen ist, diese Schaltung mit ihren drei rotierenden Kontakten zum einwandfreien Arbeiten zu bringen. Die Verfasser geben als Ergebnis an

$$\frac{\Omega \text{ int.}}{\Omega \text{ abs.}} = 1,000484$$

Die neueren Arbeiten sind in der Tabelle zusammengestellt. Sie läßt die Mittelwertbildung erkennen, welche die Zahl 1,000490 ergeben hat und vom CJPM als international gültige Umrechnungsziffer festgelegt worden ist. Diese Zahl stützt sich ausschließlich auf angelsächsische Arbeiten, und zwar nur auf diejenigen, deren Ergebnisse bis auf die Millionstel genau angegeben werden können. Sie sind in der Tabelle durch Unterstreichung hervorgehoben.