Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 72 (1981)

Heft: 9

Artikel: Elektrische Masseinheiten : Definition und Realisation ; Sekundärnormale

Autor: Koch, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905101

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Elektrische Masseinheiten: Definition und Realisation; Sekundärnormale

Von P. Koch

389:53.081.1:621.3

Die definitionsgemässe Darstellung der elektrischen Basiseinheit Ampère und der abgeleiteten Einheiten Ohm und Volt führt zu sehr aufwendigen Experimenten, die noch heute Unsicherheiten von einigen 10^{-6} aufweisen. Durch Übereinkunft lässt sich eine konventionelle Messbasis schaffen. Bezogen auf diese sind Messungen mit Ungenauigkeiten $< 10^{-6}$ möglich. Praktisch arbeiten alle Industriestaaten mit solchen konventionellen Messwerten. Der Wunsch, daraus definitionsgerechte Grundeinheiten abzuleiten, ist im Moment nicht erfüllbar. Bei tiefen Frequenzen und im Genauigkeitsbereich $10^{-4}...10^{-5}$ bietet die Beschaffung von Sekundärnormalen wenig Schwierigkeiten.

La représentation de l'unité électrique de base, l'ampère, selon sa définition, ainsi que des unités dérivées, l'ohm et le volt, exige l'élaboration d'expériences très compliquées, qui présentent, encore actuellement, des incertitudes de l'ordre de 10^{-6}. Des valeurs de base peuvent toutefois être fixées par convention, de sorte qu'il est possible de faire des mesurages dont l'imprécision est inférieure à 10^{-6}. En pratique, tous les Etats industrialisés opèrent avec de telles valeurs conventionnelles. Pour le moment, le désir d'en déduire des unités de base conformes aux définitions n'est pas réalisable. Pour de basses fréquences et une précision de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-5}, il n'est pas difficile de se procurer des étalons secondaires.

1. Einheitensysteme

Elektrische Einheiten sind ein Teil eines übergeordneten Einheitensystems. Wer die Welt physikalisch und quantitativ beschreiben will, muss die beobachteten Erscheinungen mit irgend etwas zahlenmässig vergleichen. Er braucht also ein Grundmass, eine Basiseinheit, oder auch mehrere.

Wieviele Basiseinheiten nötig sind ist eine Frage des Standpunktes. Man kann sich zum Beispiel ein technisch primitives Volk vorstellen, das nur eine Masseinheit benötigt, den «Häuptling». Er dient als Massennormal, seine Schrittlänge als Längennormal und die Zeit in der er rasch auf fünf zählt, ist die Zeiteinheit. Dieses Vorgehen gehört noch nicht ganz zur Vergangenheit. Zum Beispiel ordnen wir die gleiche Grundeinheit, s^{-1}, so verschiedenen Erscheinungen wie der Winkelgeschwindigkeit und der Zerfallsrate radioaktiver Elemente zu. Oder wir beschreiben Drehwinkel und Raumwinkel beide als dimensionslose Grössen durch Rückführung auf Bogenlänge durch Radius oder Oberfläche durch Radiusquadrat. Erst die Idee, dass sich verschiedene Erscheinungen in etwas Grundlegendem unterscheiden, führt zum Wunsch nach mehreren unabhängigen Basiseinheiten. Welche dieser Erscheinungen dann zur Definition einer solchen Basiseinheit eingesetzt wird, hängt von verschiedenen Überlegungen ab.

Wichtig ist, Erscheinungen zu wählen, die von möglichst jedem oder allen Betrachtern gleich beurteilt werden, sog. Invariante. Im Bezugssystem, das *Newton* benützte, und in welchem verschiedene Beobachter sich gradlinig und unbeschleunigt gegeneinander bewegen dürfen, erweisen sich die Länge einer Strecke, der Zeitabstand zwischen zwei Ereignissen und die Masse als Invarianten. Daraus leiten sich die bekannten Grundeinheiten der Mechanik her. Stellt man sich hingegen auf den Standpunkt *Einsteins,* dann wird die Lichtgeschwindigkeit die wichtige Invariante und die Länge wird im System des Beobachters durch Zeit und Lichtgeschwindigkeit definiert, was in den letzten Jahren zur Diskussion stand.

2. Eine unabhängige elektrische Einheit: das Ampère

Auf dem Gebiet der Elektrizität wurde lange nach einer Beschreibung der Vorgänge mit Hilfe der mechanischen Basiseinheiten Masse, Länge und Zeit gesucht. Es entstanden das elektrostatische und das elektrodynamische System, in welchem entweder die Ladung oder der Strom durch ihre Kraftwirkungen beschrieben werden. Diese beiden Systeme führen zu ungleichen Darstellungen für ein und denselben Vorgang. Erst die Einführung einer unabhängigen vierten Einheit für elektrische Vorgänge lockert den Zwang zur Beschreibung mit Hilfe der Mechanik allein und löst dadurch die Widersprüche. Prinzipiell könnte für die Darstellung dieser vierten Einheit ein Experiment aus der Elektrostatik oder der Elektrodynamik gewählt werden. Letzteres wurde vorgezogen und in der Folge das Ampère als Einheit der Stromstärke anhand eines elektrodynamischen Versuches definiert.

Ein Ampère ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der, durch zwei im Vakuum parallel im Abstand 1 m voneinander angeordnete, gradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem kreisförmigem Querschnitt fliessend, zwischen diesen Leitern je Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde [1].

Das Wort «würde» am Schluss dieser Definition unterstreicht ihre theoretisch-abstrakte Natur. Der etwas unerfreuliche Wortlaut ergibt sich beim Versuch, möglichst alle Begleitüberlegungen in einen einzigen Satz zu vereinigen und diesen dann aus dem eleganten Französisch in ein verschiedenen Staaten genehmes Deutsch zu übersetzen.

3. Realisierung des Ampère

Praktisch lässt sich aus der Definition auf die partielle Kraftwirkung zwischen je zwei kurzen Leiterstücken schliessen, und daraus die Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Spulen berechnen (Fig. 1). Die eine dieser Spulen kann an eine Waage gehängt werden. Die vom Strom hervorgerufene Kraft wird auf diese Weise mit einer Gewichtskraft verglichen. Dabei sind zu bestimmen: die Vergleichsmasse, die Erdbeschleunigung, sämtliche für die Kraftwirkung wesentlichen Spulenabmessungen [2].

Verschiedene Institute haben in den letzten Jahrzehnten solche Stromwaagen gebaut. Die ermittelten Ströme müssen mit einem bekannten Widerstand in Spannungen umgewandelt und zur Einmessung von Normalelementen benützt werden. Durch Zustellung solcher Normalelemente an das Bureau International des Poids et Mesures in Sèvres (BIPM) kann letzterem das Resultat des Experimentes materiell übermittelt werden. Dieses Labor sammelt solche Resultate, mittelt sie aus und legt damit den Spannungswert 1 Volt fest.

Zweierlei ist hier zu bemerken: erstens, dass das Ampère gemeint und primär gemessen, dass aber das Volt aufbewahrt und weitergegeben wird. Zweitens, dass für das Verfahren bekannte Widerstände erforderlich sind, deren Herkunft noch behandelt wird. Das Système international des unités (SI)

definiert das Ohm so, dass pro Sekunde 1 Joule Energie umgesetzt wird, wenn 1 Ampère durch einen Widerstand von 1 Ohm fliesst. Dies wäre eine Umwandlung elektrischer Energie in thermische. Das Joule ist aber seinerseits als mechanische Arbeit definiert. Es ist bis heute meines Wissens niemandem gelungen, das Ohm auf diese Weise definitionsgemäss und mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Vielmehr wird ein Umweg eingeschlagen: der elektrische Widerstand wird durch Vergleich mit der Wechselstromimpedanz einer berechneten Kapazität bei bekannter Frequenz des Meßstromes ermittelt (Fig. 2). Es ist das Verdienst von *Thompson* und *Lampard,* dass man heute eine Methode kennt, um kleine Kapazitäten auf einige 10^{-7} genau aus einer einzigen Längenmessung zu bestimmen. Experimentell ist die Sache zwar aufwendig, aber genau (Fig. 3).

Was nicht ganz einfach zu durchschauen ist, ist die Verknüpfung von Elektrostatik und Elektrodynamik. In beiden ist ein Potential im Sinne von Kraft mal Weg definiert, welches an die Begriffe und Einheiten der Mechanik anschliesst; aber der Vergleich von Spannungen und Strömen zwischen beiden Systemen führt über einen Umrechnungsfaktor c^2, der eine lange Geschichte hat. *Maxwell* hat theoretisch hergeleitet, dass c so etwas wie eine Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen sein müsste. *Hertz* hat diese Wellen experimentell

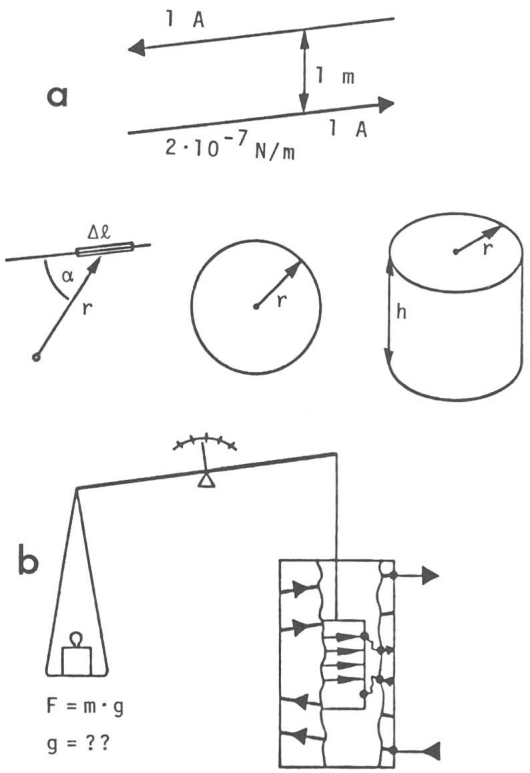


Fig. 1 Das Ampère: Definition (a) und Realisierung (b)

Die offizielle Ampère-Definition ist eine integrale Form des Gesetzes von *Biot-Savart*. Aus jenem lässt sich das Magnetfeld in einer einzelnen Windung und das Feld in einer Zylinderspule berechnen. Eine solche ist an der Waage befestigt und von einer unbeweglichen zweiten Spule umgeben, deren zwei Wicklungshälften zueinander entgegengesetzt arbeiten, so dass ihr Feld im Bereich der innern Spule eine ausgeprägte radiale Komponente hat (die Kraft ist senkrecht zum Strom und senkrecht zum Magnetfeld). Beispielsweise nach [2]:

$\mu = 1 + 37 \cdot 10^{-8}$, $I = 1$ A, $F \approx 0{,}066$ N

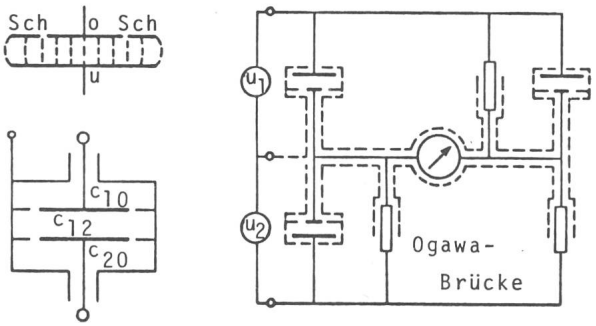


Fig. 2 Praktische Bestimmung des Ohms

Kondensatoren in Brückenschaltungen müssen derart von potentialgesteuerten Abschirmungen umgeben sein, dass nur die Ströme zwischen den definierten Kondensatorbelägen (C_{12}) in die Brückengleichung eingehen. Die Brücke nach *Ogawa* enthält (im Gegensatz zum Beispiel zur *Wien*-Brücke) keine Serieschaltungen, damit die Abschirmungen einfach und wirksam ausgeführt werden können. Dabei bietet die Überprüfung der an einem Ende abzuschirmenden Widerstände auf Phasenwinkel 0 einige Probleme. Der Vergleich Widerstand/Kapazität erfolgt bei Werten von ungefähr 10000 Ohm, 10000 pF und einer Kreisfrequenz von 10000 s^{-1}

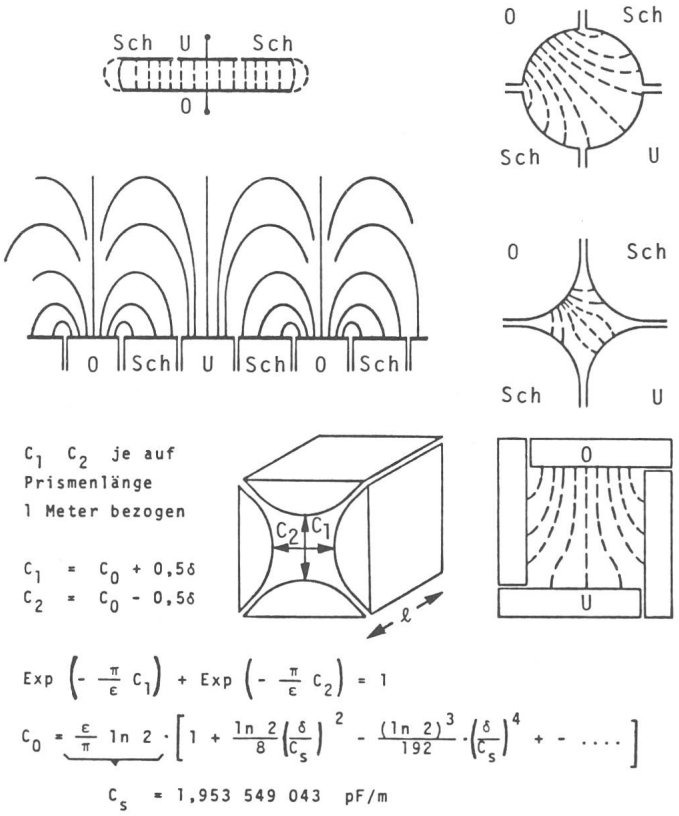


Fig. 3 «Linearer» berechenbarer Kondensator nach Thomson/Lampard [3]

Man kann sich die Feldlinien in einem Kondensator als von «Ladungseinheiten» ausgehend vorstellen. Diese Ladungen würden dort sitzen, wo die Feldlinien die Elektrodenfläche schneiden. Diese Fläche ist eine von vielen Äquipotentialflächen, die alle senkrecht zu den Feldlinien stehen. Es gibt konforme Abbildungen, die die Querschnitte durch zwei Kondensatoren ineinander transformieren, wobei Potentialdifferenzen und Ladungsmengen erhalten bleiben. Die Kapazitäten in einem prismatischen System von vier Elektroden lassen sich auf diese Weise auf diejenigen in einem geeigneten Spezialfall zurückführen und hängen damit praktisch nur von der Länge des Systems ab, wenn eine kapazitive Symmetrie zwischen «aktivem» und abschirmendem Plattenpaar gewahrt wird

nachgewiesen und gezeigt, dass sie sich ähnlich verhalten wie Licht. Später wurde ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit mit immer grösserer Genauigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ermittelt, die ihrerseits von der Relativitätstheorie als universelle Konstante postuliert wird. Vor wenigen Jahren ist es gelungen, Licht von Lasern unter einem elektrischen Punktkontakt zur Schwebung zu bringen, daraus direkt ein elektrisches Signal zu gewinnen, und auf diese Weise die Lichtfrequenz zu messen sowie die Lichtgeschwindigkeit auf $4 \cdot 10^{-9}$ genau zu ermitteln [4]. Diese Unsicherheit stammt von der Unschärfe her, die der Kryptonspektrallinie bei der Definition des Meters anhaftet.

Die Ungenauigkeiten der Strommessung mit der Stromwaage sowie der Übertragung bis zum Volt in Paris werden vom BIPM zu rund $3 \cdot 10^{-6}$ geschätzt. Neuerdings sind Verbesserungen in dem Sinn vorgeschlagen worden, dass die Spulenabmessungen nicht mehr geometrisch bestimmt werden müssen. Ihre Einflüsse können aus der Spannung berechnet werden, die in der stromlos gemachten einen Spule induziert wird, wenn die andere Spule als Erregung wirkt und die Waage sich bewegt. Anders dargestellt: die Waage wird einmal als Motor benützt, der über die Gegeninduktivität des Spulensystems einen Strom in ein Drehmoment umwandelt. Das andere Mal ist die Waage ein Generator, der über dieselbe Gegeninduktivität eine Geschwindigkeit in eine Spannung (oder einen Weg in ein Spannungsintegral) umwandelt. Die Gegeninduktivität kann aus den beiden Resultaten eliminiert werden, jedoch ist eine sehr präzise Messung der Waagenbewegung nötig [5; 6].

4. Zusammenfassung und Aufbau einer konventionellen Messbasis

Das Ohm lässt sich auf einige 10^{-7} genau realisieren und über Jahre aufbewahren. Mit genügend Fleiss ist ein Vergleich von gleich grossen Widerständen ebenfalls auf etwa 10^{-7} möglich.

Das Volt lässt sich mit Normalelementen über Jahre auf einige 10^{-7} aufbewahren. Der Vergleich zwischen zwei Orten ist auf einige 10^{-7} bis 10^{-6} ungenau.

Das Ampère ist zwar die Basiseinheit, lässt sich aber nur au einige 10^{-6} genau darstellen und bisher nicht mit der messtechnisch nötigen Genauigkeit transportieren.

Aus diesen Gründen wurde das Definitionsverfahren umgekehrt: International einigte man sich über den Spannungswert, der den Normalelementen im BIPM zugeschrieben wurde. Dieser Wert mochte, bezogen auf das unbekannte SI-Ampère um einige 10^{-6} falsch sein, er ist aber weitgehend stabil und eindeutig. Durch Transport von Normalelementen und Benützung von Widerständen lassen sich auf diese Weise bei Gleichstrom elektrische Messungen durchführen, die von Land zu Land um nur einige 10^{-7} unterschiedlich ausfallen, wenn der Aufwand für diese Genauigkeit nicht gescheut wird.

Insbesondere auch wegen den nachfolgend beschriebenen neueren Experimenten ist es somit möglich, elektrische Masseinheiten direkt aus fundamentalen Experimenten herzuleiten und auf diese Weise ein konventionelles elektrisches Einheitensystem grosser zeitlicher und lokaler Konstanz zu errichten. Es ist aber noch nicht möglich, zwischen diesem konventionellen System und den mechanischen Einheiten des SI eine Beziehung auf 10^{-6} oder besser herzustellen, weil dafür Kraft- und Längenmessungen in elektromagnetischen Feldern nötig sind.

5. Neuere Experimente

Neuerdings scheint es bald auch unnötig, Normalelemente zu transportieren. Das *Josephson*-Experiment gibt jedem, der es genügend exakt nachvollzieht, einen eindeutigen Spannungswert als Ergebnis. Dieser Wert ist von einer verwendeten Frequenz linear abhängig. Wenn man sich international über den Proportionalitätsfaktor zwischen Frequenz und Spannung einigt, dann erhält jeder Experimentator überall auf der Welt und jederzeit die gleiche Spannung, ohne Transporte und Vergleiche, mit seinen eigenen Mitteln (diese allerdings sind auf mehr als Fr. 100000.– einzuschätzen!).

Vereinfacht dargestellt geht es beim Josephson-Experiment darum, zwei Stücke eines supraleitenden Materials durch eine äusserst dünne Isolationsschicht zu trennen und gleichzeitig mit Gleichstrom sowie mit einer Hochfrequenzschwingung (z.B. von 3 cm Wellenlänge) zu speisen. Die Quantentheorie erklärt, warum der Gleichstrom ohne Überschlag die dünne Isolationsschicht überwinden kann (Tunneleffekt) und die Theorien der Supraleitung zeigen, dass dabei eine feste Relation zwischen der Übergangsspannung und einer auftretenden Hochfrequenzschwingung besteht. Diese Schwingung hat der Experimentator dem System schon aufgezwungen; es zeigt sich, dass die Spannung sich danach richtet. Man erhält etwa 1...10 mV. Über diesen Vorgang, den Josephson-Effekt, gab es in den letzten Jahren mehrere Publikationen; hier sei auf den Artikel von *Piller* hingewiesen [7], der mit seinen Mitarbeitern den Versuch im Amt für Messwesen aufgebaut hat.

Zwei Apparaturen der geschilderten Art wurden in ihren Resultaten verglichen, indem die eine von Paris (BIPM) nach Braunschweig (PTB) zur andern gebracht wurde. Ihre Spannungswerte unterschieden sich, auf gleiche Frequenz bezogen, um weniger als 10^{-7}. Die Frequenz 483549,0 GHz wurde als 1 Volt entsprechend festgelegt und ist seit 1976 die Grundlage des Volt (V_{76-BI}) [8].

Im Sommer 1980 ist durch *Klitzing, Dorda* und *Pepper* ein anderes Experiment beschrieben worden, das geeignet ist, diskrete und von Apparatekonstanten unabhängige Spannungs-Strom-Verhältnisse zu produzieren, also definierbare Widerstandswerte. Auch dieses Experiment verspricht Unsicherheiten von weniger als 10^{-6}, eventuell sogar unter 10^{-7} [9].

6. Gebrauchsnormale

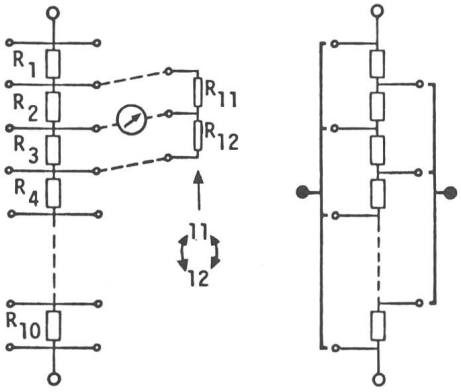
Wie steht es nun mit den einfacheren Gebrauchsnormalen, mit den Apparaten, die sich ein kleineres Laboratorium leisten kann? Als Spannungsbasis mit Langzeitkonstanz kommen in erster Linie immer noch die gesättigten Normalelemente in Frage. Sie altern um weniger als 10^{-6} pro Jahr, haben einen Temperaturkoeffizienten von ca. $40 \cdot 10^{-6}$/K und sind sehr empfindlich auf rasche Temperaturschwankungen sowie einigermassen empfindlich auf Erschütterungen. Beides ist mit einer gut ausgefütterten Kiste behebbar, wenn der Raum im Mittel, das heisst von Tag zu Tag, die gleiche Temperatur hat. Steht mehr Geld zur Verfügung, kann ein thermostatisierter Behälter verwendet werden; dieser sollte aber auch eine Notstromversorgung umfassen. In allen Fällen gehört ein gutes Thermometer zur Ausrüstung.

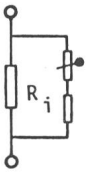
Normalelemente sollte man mindestens paarweise, lieber zu dritt, besitzen, damit sie untereinander verglichen werden können und damit weitergearbeitet werden kann, wenn eines zur Prüfung geschickt wurde. Die Prüfung eines Normal-

elementes im Amt für Messwesen kostet ungefähr Fr. 100.– und dauert bei rechtzeitiger Voranmeldung etwa 3...6 Wochen. Diese lange Zeit ist zur Prüfung der Stabilität nötig.

Halbleiter-Referenzen, also Schaltungen mit Zenerdioden, altern auf weniger kontrollierbare Art. Als guten typischen Wert kann man ungefähr 10^{-5}/Jahr ansehen. Sie sind unempfindlich auf Stösse und auf elektrische Belastungen, also das Richtige für den Produktionsbereich. Ihre grössere Komplexität macht dafür eine häufigere Kontrolle nötig. Als Hilfsstromquellen für Kompensatoren, aber auch als billige Spannungsreferenz eignen sich grosse Quecksilber- oder auch Lithium-Batterien gut. Quecksilber-Batterien vom Format der grossen zylindrischen Taschenlampenbatterien haben eine Kapazität von über 10 Ah und altern unbelastet nach einer gewissen Anfangsphase um einige 10^{-6} pro Tag. Sie sind als Spannungsreferenzen etwas auf Erschütterungen und Druckschwankungen empfindlich, vermutlich wegen des mechanischen Verhaltens kleiner Quecksilbertropfen.

Ein gutes Digitalvoltmeter ist heutzutage billiger als ein Kompensator, oder bei vergleichbaren Preisen eher etwas genauer. Es hat den Nachteil der grösseren Komplexität und sollte nicht ohne Überwachung als Normal verwendet werden. Aber auch Kompensatoren müssen von Zeit zu Zeit auf Drift ihrer Teilerwiderstände und auf Qualität der Kontakte überprüft werden. Wenn das Digitalvoltmeter einen Widerstandsmessbereich hat, lohnt es sich, auf Vier-Draht-Messung zu achten. Bei der Möglichkeit von Spannungsverhältnismessungen ist ein isolierter Eingang für die als Nenner verwendete Spannung sehr wertvoll.





$$R_i = R_o \cdot (1 + f_i)$$

$$\Sigma(R_i) = R_o \cdot (n + \Sigma(f_i))$$

$$\Sigma\left(\frac{1}{R_i}\right) \approx \frac{1}{R_o} \cdot (n - \Sigma(f_i))$$

$$\Sigma(R_i) : \frac{1}{\Sigma\left(\frac{1}{R_i}\right)} \approx n^2 - (\Sigma(f_i))^2$$

Fig. 4 Widerstandsnetzwerke für Präzisionsmessungen

Eine Kette von (zum Beispiel 10) einregulierbaren Widerständen lässt sich mit zwei weiteren solchen Widerständen durch Bildung von Wheatstoneschen Brücken abgleichen. Die zwei Hilfswiderstände werden durch Austausch ihrer Positionen auf Gleichheit geprüft. Nach Abschluss der Abgleicharbeiten bildet die Kette einen sehr präzisen Spannungsteiler. Bei einer Parallelschaltung der Widerstände wirken sich die restlichen prozentualen Fehler in erster Ordnung gleich aus wie bei der Serieschaltung. Das Widerstandsverhältnis der beiden Schaltungen ist also sehr genau gleich $1 : n^2$

Exakte Teile einer Spannung können mit einer Kette von abgleichbaren Widerständen relativ billig hergestellt werden. Mit einer Kette von 10 Widerständen sind alle Zehntel, Viertel und Neuntel (Dezimalbrüche 0,nnnnnn...) erzeugbar. Die Linearität eines Messgerätes lässt sich auf diese Weise recht gut überprüfen. Für den Abgleich der Kette genügen zwei zusätzliche Widerstände, die je zwei benachbarte der Kette zu einer Wheatstone-Brücke ergänzen (Fig. 4). Der Wechsel von Serie- zu Parallelschaltung von n gleichen Widerständen gibt ein Widerstandsverhältnis $n^2:1$ (Fig. 4).

Ein einfaches Instrumentarium, das auf überwachbare Weise in den gebräuchlichsten Messbereichen Gleichspannung-, Gleichstrom- und Widerstandsmessungen auf einige 10^{-5} gestattet, lässt sich mit relativ bescheidenen Mitteln zusammenstellen. Teurer wird die Messung von Wechselspannungen, speziell wenn diese nicht sinusförmig sind. Bei der Leistungsmessung wurden in den letzten Jahren die alten Zeigerinstrumente weitgehend durch elektronische Multiplikatoren verdrängt, welche Ungenauigkeiten von etwa 10^{-4} aufweisen. Leider ist ihre Überprüfung durch den Besitzer schwierig [10; 11; 12]. Wenige Typen sind mit Verstärkereingängen ausgerüstet, die auch für Gleichspannungen geeignet sind. Diese wenigen Geräte haben normalerweise zwei gleichberechtigte und vertauschbare Signalpfade im Multiplikator und lassen sich so auf Phasenfehler kontrollieren. Die Amplitudenprüfung ist mit Gleichspannung möglich, ebenfalls die Linearitätsprüfung. Durch Zusammenschalten der Multiplikatoreingänge lassen sich die Effektivwerte von Spannungen und Strömen messen. Voraussetzung sind allerdings frequenzunabhängige Widerstände, die wieder ein Problem für sich darstellen. Die Frequenzunabhängigkeit der Schaltung muss theoretisch abgeschätzt werden. All dies ist recht arbeitsintensiv, aber es ist der Preis, der für eine sichere Messgrundlage zu entrichten ist. Die übrige grosse Mehrzahl der elektronischen Leistungsmesser ist mit Strom- und Spannungswandlern in den Eingangskreisen unsymmetrisch aufgebaut und lässt sich nur durch Vergleich mit Geräten der ersten Sorte prüfen.

7. Überprüfung der Messmittel

Kein Messmittel ist brauchbar, wenn es nicht in zweckentsprechenden Abständen überprüft wird. Es ist vernünftig, dafür einen Zeitplan anzulegen. Viel ist schon zu erreichen durch periodischen und protokollierten Vergleich ähnlicher Geräte. Dies verlangt aber die Zusammenfassung grösserer Bestände in eine Überwachungsgruppe. Wenn diese Vergleiche Unstimmigkeiten zeigen, dann ist der Zeitpunkt gekommen, einzelne der Geräte an eine Prüfstelle höherer Autorität zu senden. Es wäre aber falsch, dieser Stelle alle Geräte zu unterbreiten, sie würde nur überlastet und dadurch auf eine tiefere Qualitätsstufe heruntergezogen. Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Notwendigkeit eines pyramidenförmigen Aufbaus für die Übermittlung der richtigen Messwerte. Auf der andern Seite muss berücksichtigt werden, dass jede Zwischenstufe die Genauigkeit der Übermittlung reduziert. Viele Leute sind der Meinung, dass die Normale jeder Zwischenstufe 10mal genauer sein sollten als die Prüflinge. Ich denke, dass dies kaum möglich ist, und dass ein Faktor 4 oder 5 genügen muss. Auch dann bietet die Messwertvermittlung von einem Landesnormal bis zu den vielen Geräten der Produktionsstufe noch sehr grosse Probleme, die das Eidgenössische Amt für Messwesen gegenwärtig ausserordentlich stark beschäftigen.

Literatur

[1] Einheiten-Verordnung vom 23. November 1977. SR 941.202. Sammlung der eidgenössischen Gesetze –(1977)II, S. 2405...2424.

[2] *D. Bender* und *W. Schlesok:* Neue Aspekte bei der Absolutbestimmung des Ampere mit der Stromwaage. Metrologia 10(1974)1, S. 1...8.

[3] *A.M. Thompson* and *D.G. Lampard:* A new theorem in electrostatics and its applications to calculable standards of capacitance. Nature (London) 177 (1956)4515, p. 888.

[4] *K.M. Evenson* a.o.: Accurate frequencies of molecular transitions used in laser stabilization: the 3.39-µm transition in CH_u and the 933–10.18-µm transition in CO_2. Applied Physics Letters 22(1973)4, p. 192...195.

[5] *P.T. Olsen* a.o.: The realization of the ampere at NBS. Conference on Precision Electromagnetic Measurements, CPEM Digest 1980, p. 43...45.

[6] *B.P. Kibble, R.A. Smith* and *I.A. Robinson:* The moving coil experiment—a progress report. Conference on Precision Electromagnetic Measurements, CPEM Digest 1980, p. 46.

[7] *O. Piller, L. Bauder* und *U. Weilenmann:* Eine Anwendung der Josephsoneffekte in der elektrischen Präzisionsmesstechnik. Bull. SEV/VSE 71(1980)3, S. 122...125.

[8] Recommandation approuvée E2. Procès-Verbaux de la 64e session du Comité International des Poids et Mesures, 1975.

[9] *K. v. Klitzing, G. Dorda* and *M. Pepper:* New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance. Physical Review Letters 45(1980)6, p. 494...497.

[10] *P. Koch:* Die Eichung von Elektrizitätsleistungsmessern im Amt für Mass und Gewicht. Bull. SEV/VSE 66(1975)24, S. 1347...1352.

[11] *O. Piller* and *L. Bauder:* A differential calorimeter for AC-power measurement. Conference on Precision Electromagnetic Measurements, CPEM Digest 1976, p. 84...85.

[12] *P. Fehlmann* and *P. Koch:* A (3+3)-phase voltage and current source of high stability. IEEE Trans. IM 25(1976)4, p. 544...546.

Adresse des Autors

Prof. *P. Koch,* Vizedirektor Eidg. Amt für Messwesen, Lindenweg 50, 3084 Wabern.