**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:** 66 (1975)

**Heft:** 8

**Artikel:** Die elektrischen Einheiten Ampère, Volt und Ohm : Definition, Realisierung und Weitergabe

**Autor:** Piller, O. / Bauder, L.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-915282

**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:** 09.07.2025

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

**BULLETIN** des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

# Elektrotechnik – Electrotechnique

## Die elektrischen Einheiten Ampère, Volt und Ohm

### Definition, Realisierung und Weitergabe

Von O. Piller und L. Bauder

537.081

*Die wichtigsten Einheiten in der elektrischen Messtechnik sind das Ampère, das Volt und das Ohm. Ausgehend von den Grundeinheiten des SI-Systems sind ihre Definitionen und Realisationsgenauigkeiten zusammengestellt. Anschliessend werden die Methoden des eidg. Amtes für Mass und Gewicht (AMG) diskutiert, die zur präzisen Weitergabe dieser Einheiten Verwendung finden. Einige Eigenentwicklungen auf dem Gebiete der elektrischen Grundlagenmessungen werden in diesem Zusammenhang näher erläutert.*

*Les unités les plus importantes en métrologie de l'électricité sont l'ampère, le volt et l'ohm. Leurs définitions et leurs précisions de réalisation sont exposées en partant des unités fondamentales du système SI. Les méthodes du Bureau fédéral des poids et mesures, appliquées à une reproduction de ces unités, sont traitées, puis quelques développements internes dans le domaine des mesures électriques de base sont expliqués plus en détail.*

### 1. Die Grundeinheiten

#### *1.1 Allgemeines*

Messen heisst eine physikalische Grösse nach Zahl und Einheit feststellen, somit ist die Messgrösse das Produkt aus einer Zahl und einer Einheit, z. B. 3,3 V, 4 m, 6 A usw. Ein physikalisches Gesetz wiederum stellt eine Beziehung her zwischen physikalischen Grössen; man spricht deshalb von Grössengleichungen. Als Beispiel sei hier das Ohmsche Gesetz aufgeführt

$$U = I \cdot R$$

Die Buchstabensymbole einer Grössengleichung bedeuten physikalische Grössen, z. B. Spannung, Strom, Leistung usw. Zweckmässig wählt man die Einheiten so, dass formal die gleichen Beziehungen zwischen ihnen bestehen wie bei den zugrundeliegenden physikalischen Grössen. Ein solches Einheitensystem nennt man kohärent, z. B. gehören Volt, Ampère und Ohm einem kohärenten System an.

Jedes Gebiet der Physik besitzt ein System von Einheiten, und die Frage stellt sich, wie viele Grundeinheiten man überhaupt braucht, um das jeweilige Gebiet vollständig und widerspruchsfrei zu beschreiben. Diese Frage kann wie folgt beantwortet werden [1...3][1]):

Hat man ein Gebiet der Physik durch $k$ voneinander unabhängiger Gleichungen mit $n$ Grössen dargestellt, so bleiben $(n-k)$ Grössen unbestimmt. Die aus den beobachteten Gesetzmässigkeiten direkt nicht mehr definierten $(n-k)$-Grössen nennt man Grundgrössen. Ihre Zahl ist in den einzelnen Gebieten der Physik verschieden. Zum Beispiel hat man herausgefunden, dass sich in der Mechanik 36 unabhängige Gleichungen mit 39 Grössen aufstellen lassen. Man braucht somit 3 Grundgrössen zur vollständigen und widerspruchsfreien Beschreibung der Mechanik [CGS-System, MKS-System[2])].

Die Elektrodynamik wird durch die 4 Maxwellgleichungen mit 8 Grössen beschrieben. Es resultieren 4 Grundgrössen [4]:

$$\text{rot}\,\vec{H} - \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{j}$$

$$\text{rot}\,\vec{E} + \mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0$$

$$\text{div}\,\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \rho$$

$$\text{div}\,\vec{H} = 0$$

darin

$\vec{H}$ magnetische Feldstärke

$\vec{E}$ elektrische Feldstärke

$\mu_0$ magnetische Permeabilität des Vakuums
$\varepsilon_0$ Dielektrizitätskonstante des Vakuums
$\rho$ elektrische Ladungsdichte
$\vec{j}$ elektrische Stromdichte
$t$ Zeit
$x$ Länge (in rot und div)

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.
[2]) CGS = Centimeter-Gramm-Sekunde,
MKS = Meter-Kilogramm-Sekunde.

Diese Erkenntnis führte 1948 zur Einführung des MKSA-Systems. Vorher versuchte man auch in der Elektrizitätslehre, mit den Grundeinheiten der Mechanik, damals dem CGS-System, auszukommen. Es entstanden Widersprüche – z. B. war das elektrische Watt nicht identisch mit dem mechanischen Watt –, die erst durch die Hinzunahme einer vierten Grundgrösse beseitigt wurden.

In der Technik liegen die meisten Probleme im Bereiche der Mechanik und der Elektrizitätslehre, so dass man mit den 4 Grundgrössen des MKSA-Systems fast auskommt. In der Physik kommen aber je noch eine Grundgrösse hinzu zur Beschreibung der Molekularmechanik und der Wärmelehre; ferner noch eine für die Lichtmessung wegen der Subjektivität des menschlichen Auges. Dies führte zum SI-System[3]) mit den 7 Grundeinheiten [5]. Man wählte, der Zweckmässigkeit wegen, Länge, Masse, Zeit, elektrische Stromstärke, Stoffmenge, Temperatur und Lichtstärke als Grundgrössen. Jeder dieser Grundgrössen wurde eine Grundeinheit zugeordnet. In der Tabelle I sind Grundgrössen und Grundeinheiten des SI-Systems zusammengestellt.

### *1.2 Realisierung der Grundeinheiten*

Um in der Messtechnik mit den Grundeinheiten arbeiten zu können, muss man diese durch Experimente realisieren und an die Messlabors weitergeben. Fig. 1 zeigt die Genauigkeiten, mit denen man die Grundeinheiten heute realisieren, erhalten und weitergeben kann [6].

[3]) SI = Système International d'Unités

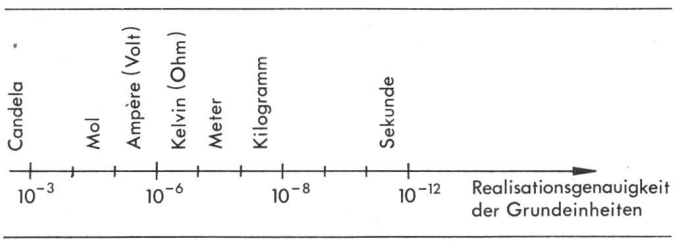



**Fig. 1 Genauigkeit der Realisation der Grundeinheiten**

## 2. Die elektrischen Einheiten

### *2.1 Allgemeines*

Die meistgebrauchten elektrischen Einheiten sind das Ampère, das Ohm und das Volt.

Das Ampère ist, wie bereits erwähnt, eine Grundeinheit. Das Ohm und das Volt sind abgeleitete Grössen und wie folgt definiert:

1 Ohm (abgekürzt 1 Ω) ist der Widerstand, in dem, bei Durchfluss von 1 Ampère, gerade 1 Watt elektrischer Leistung vernichtet wird.

Wegen der Widerspruchsfreiheit des kohärenten SI-Systems ist das mechanische Watt gleich dem elektrischen Watt:

$$1\ \mathrm{VA} = 1\ \mathrm{W} = 1\ \mathrm{m}^2\ \mathrm{kg}\ \mathrm{s}^{-3}$$

Die Einheit des Ohms ist somit:

$\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{kg} \cdot \mathrm{s}^{-3}\ \mathrm{A}^{-2}$ mit dem Einheitszeichen Ω

*Grundgrössen und Grundeinheiten des SI-Systems* Tabelle I

| Grösse | Einheit | | Definition |
|---|---|---|---|
| | Name | Einheitenzeichen | |
| Länge | Meter | m | Die Basiseinheit 1 Meter ist das 1 650 763,73fache der Wellenlänge der von Atomen des Nuklids $^{86}$Kr beim Übergang vom Zustand $5d_5$ zum Zustand $2p_{10}$ ausgesandten, sich im Vakuum ausbreitenden Strahlung. |
| Masse | Kilogramm | kg | Die Basiseinheit 1 Kilogramm ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps |
| Zeit | Sekunde | s | Die Basiseinheit 1 Sekunde ist das 9 192 631 770fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von Atomen des Nuklids $^{133}$Cs entsprechenden Strahlung. |
| Elektrische Stromstärke | Ampère | A | Die Basiseinheit 1 Ampère ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der, durch zwei im Vakuum parallel im Abstand 1 Meter voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fliessend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde. |
| Thermodynamische Temperatur | Kelvin | K | Die Basiseinheit 1 Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers. |
| Lichtstärke | Candela | cd | Die Basiseinheit 1 Candela ist die Lichtstärke, mit der $\frac{1}{600000}$ Quadratmeter der Oberfläche eines Schwarzen Strahlers bei der Temperatur des beim Druck 101 325 Newton durch Quadratmeter erstarrenden Platins senkrecht zu seiner Oberfläche leuchtet. |
| Stoffmenge | Mol | mol | Die Basiseinheit 1 Mol ist die Stoffmenge eines Systems bestimmter Zusammensetzung, das aus ebenso vielen Teilchen besteht, wie Atome in $\frac{12}{1000}$ Kilogramm des Nuklids $^{12}$C enthalten sind. |

1 Volt ist die Potentialdifferenz, die über einen Widerstand von 1 Ω entsteht, wenn durch diesen gerade 1 Ampère fliesst. Die Einheit des Volt ist:

$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$ mit dem Einheitszeichen V

*2.2 Das Ampère*

Die Definition des Ampère wurde aus theoretischen Gründen so gewählt, dass die Permeabilität des Vakuums $\mu_0$ als Naturkonstante mit dem Wert $4\,\pi \cdot 10^{-7}$ kg m $s^{-2}$ $A^2$ in Erscheinung tritt [2] (Fig. 2).

Eine präzise experimentelle Realisierung des Ampère ist schwierig und kann nur mit Hilfe der Stromwaage ausgeführt werden. Von den unendlich langen Drähten (siehe Definition in Tabelle I) geht man über auf konzentrische Spulen und misst die Kraft über eine hochpräzise Balkenwaage. In Fig. 3 ist eine solche Stromwaage abgebildet, wie sie das NPL (National Physical Laboratory in England) zur Realisierung des Ampère verwendet [7]. Die erreichte Genauigkeit liegt heute bei ca. $3 \cdot 10^{-6}$ (Fig. 1).

Hat man im Grundlagenlabor den genauen Stromwert «gewogen», so wird heute oft mit Hilfe des «Gyromagnetischen Ratio» des Protons dieser Strom überwacht bzw. kann jederzeit realisiert werden [7] (Fig. 4).

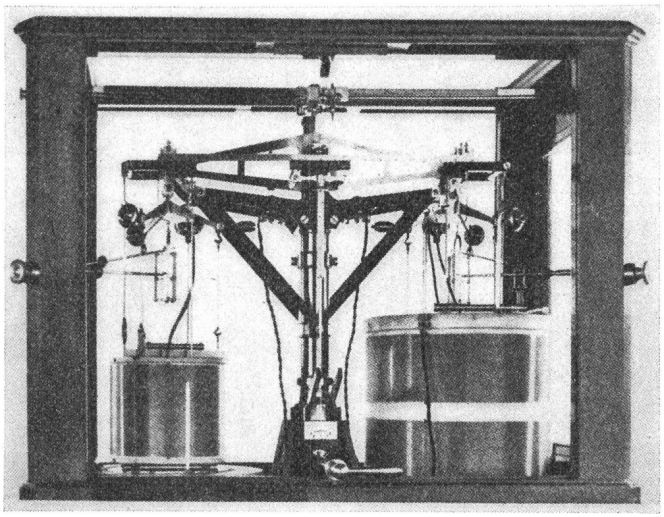


**Fig. 3 Stromwaage zur Realisierung des Ampère (NPL)**

Befindet sich ein Proton in einem Magnetfeld, so erfährt es eine Präzession (Larmorpräzession) um die Feldrichtung. Das «Gyromagnetische Ratio» des Protons ist das Verhältnis zwischen Präzessionsfrequenz und Magnetfeldstärke. Nach den heutigen Erkenntnissen ist dieses Verhältnis eine physikalische Konstante. Hat man nun eine genau bekannte und alterungsbeständige Luftspule, so kann man nach einmaliger Eichung mit der Stromwaage das Ampère über eine Frequenzmessung realisieren. Die Bestimmung der Präzessionsfrequenz geschieht nach der Resonanzmethode von *Bloch* oder *Purcell* [8].

*2.3 Das Ohm*

Die am genauesten realisierbare elektrische Einheit ist das Ohm. Würde man das Ohm nach der Definition (2.1) realisieren, also letzten Endes kalorimetrisch, so erhielte man eine Genauigkeit, die derjenigen des Ampère entspräche.

Um eine erhöhte Genauigkeit zu erhalten, realisiert man heute das Ohm über berechenbare Kapazitäten. Der australische Physiker *Lampard* hat gezeigt, dass es möglich ist, einen elektrischen Kondensator so zu konstruieren, dass die Kapazität nur von der Länge abhängt [9] (Fig. 5). Da man eine Länge heute sehr genau bestimmen kann (siehe Fig. 1), gelingt es, die Kapazität eines Lampard-Kondensators auf ca. $10^{-8}$ zu bestimmen, falls man die Dielektrizitätskonstante des Vakuums $\varepsilon_0$ so genau kennt.

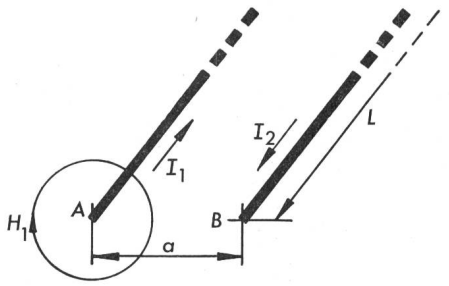



**Fig. 2 Definition des Ampère**

$H_1\,ds = I_1$

$$H_1\Big|_B \frac{I_1}{2\,\pi\,a}$$

Kraft auf Leiter $B$:

$$F = \mu_0 \cdot H_1\Big|_B I_2\,L = \mu_0 \frac{I_1}{2\,\pi\,a} I_2\,L \rightarrow \mu_0 = \frac{F\,2\,\pi\,a}{I_1\,I_2\,L}$$

nach Ampèredefinition:

$F = 2 \cdot 10^{-7}$ $kgms^{-2}$, $L = 1$ m, $a = 1$ m, $I_1 = I_2 = 1$ A

$\rightarrow \mu_0 = 4\,\pi \cdot 10^{-7}$ $kgms^{-2}$ $A^{-2}$

$H_1$ magnetische Feldstärke
$A, B$ hypothetisch angenommene unendlich lange Leiter
$I_1$ Stromstärke im Leiter $A$
$I_2$ Stromstärke im Leiter $B$
$L$ Längenabschnitt auf $A$ und $B$
$a$ Abstand der beiden Leiter
$\mu_0$ magnetische Permeabilität des Vakuums

Aus den Maxwellgleichungen lässt sich folgende Beziehung herleiten [4]:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0\,c^2}$$

$c$ Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$\mu_0$ ist wegen der Ampèredefinition exakt bekannt.
$c$ kennt man mit einer Genauigkeit von $3 \cdot 10^{-9}$ [10].

Über die Beziehung

$$Z = \frac{1}{j\,\omega\,C}$$

kann man, bei bekanntem $C$, mit Hilfe einer Frequenzmessung die Impedanz $Z$ sehr genau bestimmen. Durch Vergleichsmes-

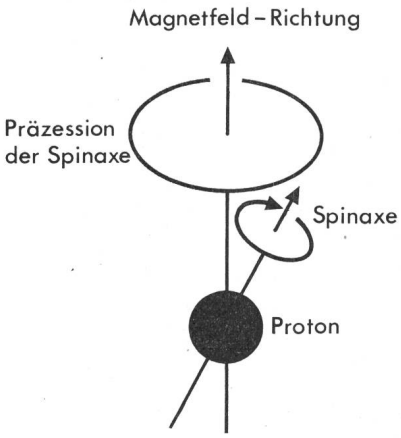



**Fig. 4 Proton im Magnetfeld**

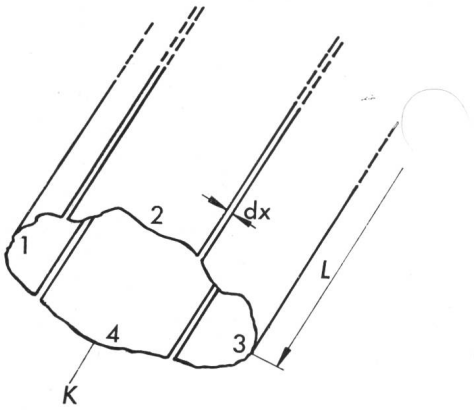



**Fig. 5 Kondensator nach Lampard**

$K$ stetige, geschlossene Kurve
$L$ Länge der zylindrischen Anordnung
$dx$ $dx \rightarrow 0$ (elektrischleitende Mantelfläche aufgetrennt)
$C_{13}$ Kapazität zwischen Elektrode *1* und *3*
$C_{24}$ Kapazität zwischen Elektrode *2* und *4*
es gilt:

$$\exp\left(\frac{-\pi C_{13}}{L \varepsilon_0}\right) + \exp\left(\frac{-\pi C_{24}}{L \varepsilon_0}\right) = 1$$

bei Symmetrie:

$$C_{13} = C_{24} = C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \ln 2}{\pi} L = \frac{1}{\mu_0 \cdot C_2} \cdot \frac{\ln 2}{\pi} L$$

sungen kann der 1-Ohm-Wert schlussendlich von $Z$ abgeleitet werden. Die Genauigkeit des so bestimmten 1-Ohm-Wertes liegt heute bei $10^{-7}$ [11].

Das Ohm wird durch die geschilderten Experimente über eine Längen- und Zeitmessung aus den Grundeinheiten gebildet. Die Masse und das Ampère stecken durch die Ampèredefinition im $\mu_0$ bzw. $\varepsilon_0$. Die relativ ungenaue Realisierung des Ampère konnte somit umgangen werden.

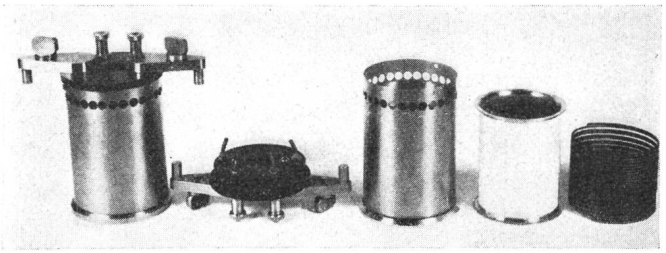


**Fig. 6 Hauptnormalwiderstand von 1 Ω**

Der einmal realisierte Ohm-Wert wird im Labor in hochstabilen 1-Ohm-Widerständen aufbewahrt. Fig. 6 zeigt einen solchen Widerstand, wie ihn das eidg. Amt für Mass und Gewicht (AMG) in grösserer Stückzahl besitzt. Die Widerstände sind aus alterungsbeständigem Material mit kleinem, gutbekanntem Temperaturkoeffizienten (Manganin oder ähnliche Materialien) gefertigt. Fig. 7 zeigt die zeitliche Stabilität von 1-Ohm-Hauptnormalwiderständen des AMG.

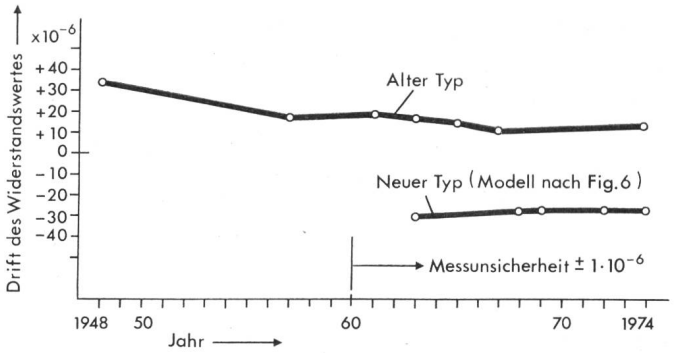



**Fig. 7 Typische Stabilität von Hauptnormalwiderständen des AMG**

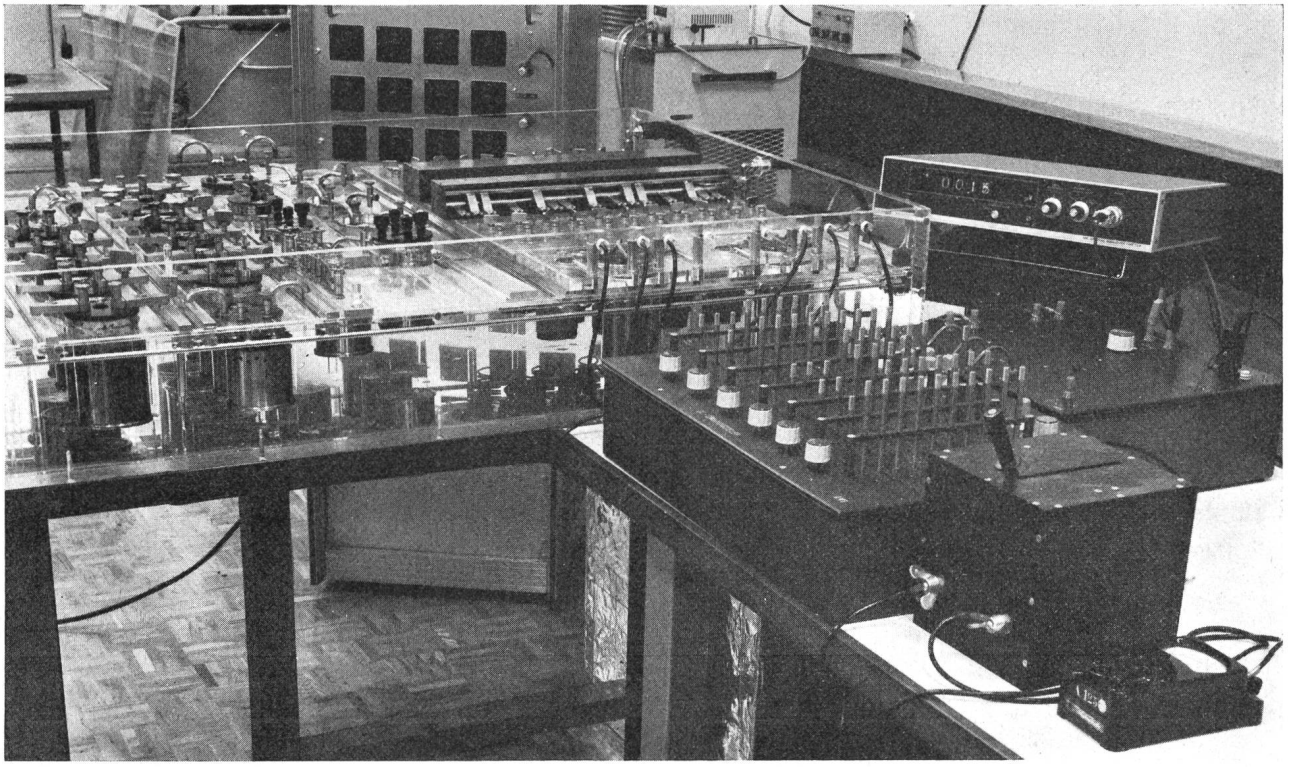


**Fig. 8 Aufbewahrung des nationalen Ohm im AMG**

Fig. 8 zeigt die Aufbewahrung des nationalen Ohm im AMG. In einem auf (20 ± 0,02) °C stabilisierten Ölbad befinden sich die 1-Ohm-Hauptnormalwiderstände und die dekadisch gestuften Normalwiderstände.

Durch periodische Vergleichsmessungen unter den einzelnen Widerständen und zwischen dem AMG und dem BIPM (Bureau International des Poids et Mesures in Paris) wird der 1-Ohm-Wert laufend überwacht. Diese Vergleichsmessungen werden in Bern mit der im AMG entwickelten Widerstandsmesseinrichtung ausgeführt (Fig. 9). Diese Messeinrichtung arbeitet im Gebiete von 1 Ω bis 10 kΩ mit einer Genauigkeit von ca. $2 \cdot 10^{-7}$. Daneben stehen dem AMG klassische Thomson- und Wheatstonebrücken mit einer Genauigkeit von ca. $10^{-6}$ zur Verfügung.

Die dekadisch gestuften Widerstandswerte werden nach der Methode von *Hamon* [12] mit hoher Genauigkeit von 1-Ohm-Hauptnormal abgeleitet und ebenfalls in Normalwiderständen aufbewahrt. Die Methode von *Hamon* besteht darin, dass man 10 Widerstände mit gleichem Nennwert und kleiner Streuung parallel, serieparallel und in Serie schaltet (Fig. 10). Man erhält so die Widerstandsverhältnisse 0,1 : 1 : 10 mit einer Genauigkeit von $10^{-7}$ bis $10^{-8}$. In Fig. 10 ist eine solche Transfereinrichtung abgebildet, wie sie im AMG Verwendung findet.

### *2.4 Das Volt*

Das Volt wird heute am genauesten realisiert, wenn man 1 Ampère durch 1 Ohm schickt. Man erreicht so eine absolute Genauigkeit von besser als $3 \cdot 10^{-6}$. Das Volt könnte aus den Grundgrössen mit Hilfe des Elektrometers bestimmt werden.

Beim Elektrometer misst man die elektrische Spannung über die Kraftmessung. Diese erreichte aber bis heute nicht die gewünschte Präzision, doch sind gegenwärtig Arbeiten im Gange, die eine Genauigkeit von besser als $10^{-6}$ anstreben [13].

Das realisierte Volt wird im Labor in den klassischen Normalelementen (NE) aufbewahrt (Fig. 11).

Das NE besitzt eine elektrochemische Spannung von ca. 1,0186 V. Die Spannungskonstanz eines guten NE ist besser als $10^{-6}$/Jahr (Fig. 12). Der Temperaturkoeffizient beträgt ca. $-40 \cdot 10^{-6}$/°C bei 20 °C.

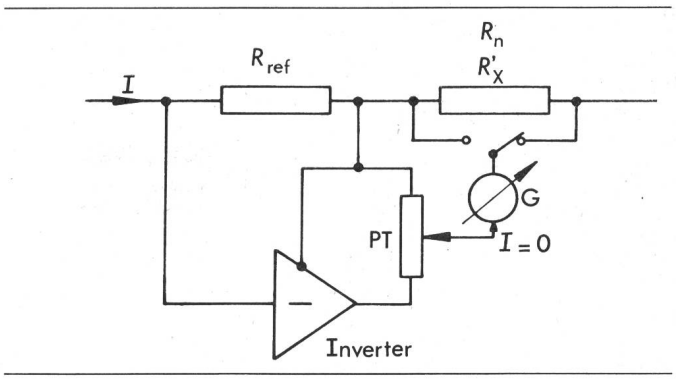
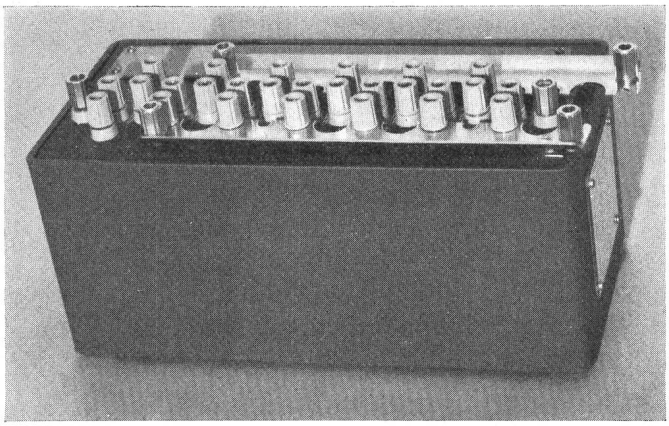



**Fig. 9 Hochpräzise Widerstandsmesseinrichtung des AMG**

$R_{ref}$ Referenzwiderstand
$PT$ siebenstelliger Spannungsteiler nach Fig. 16 und 17
Messung in Substitution:
$R_n \rightarrow R_x$
$R_n$ Normalwiderstand
$R_x$ zu messender Widerstand

Das nationale Volt wird im AMG in einer NE-Bank von ca. 50 Stück aufbewahrt. Die NE befinden sich in einem Ölbad, das eine Temperaturstabilität von ca. 0,02 °C besitzt (Fig. 13). Periodische Vergleichsmessungen unter den NE und zwischen dem AMG und dem BIPM sorgen dafür, dass der 1-Volt-Wert erhalten bleibt. Die Vergleichsmessungen werden nach dem Kompensationsprinzip ausgeführt. Fig. 14 zeigt das Messprinzip und einen modernen Kompensationsapparat, wie er im AMG Verwendung findet. Dieser erlaubt NE-Vergleichsmessungen mit einer Genauigkeit von ca. $10^{-7}$.

Eine neue, sehr präzise Methode zur Überwachung der NE-Spannung wurde möglich durch die Entdeckung des Josephsoneffektes [14]. *Josephson* zeigte 1962 theoretisch, dass beim Durchfluss eines Gleichstromes durch zwei Supraleiter, die durch eine sehr dünne Isolierschicht ($10^{-9}$ m) getrennt sind (Tunneleffekt), eine Potentialdifferenz entsteht, die begleitet ist durch Emission oder Absorption von elektromagnetischer Strahlung im Mikrowellengebiet. Diese Potentialdifferenz tritt in Stufen in Erscheinung, und es gilt folgende Beziehung:



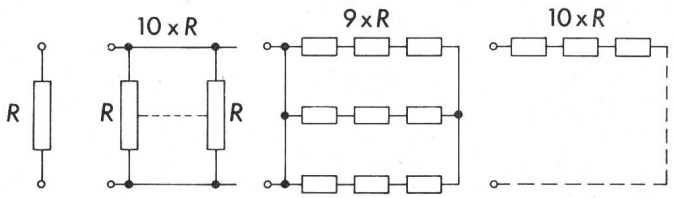



**Fig. 10 Widerstandstransfereinrichtung nach Hamon**

$R$ = Sollwert $\quad R_p = \frac{R}{10}(1 + \Delta m + \delta) \quad R_{sp} = R\left(1 + \Delta m + \delta + \frac{\Delta d}{10}\right) \quad R_S = 10\,R\,(1 + \Delta m)$

$R_n$ = Istwert $\quad \approx \frac{R}{10}(1 + \Delta m) \quad \approx R\left(1 + \Delta m + \frac{\Delta d}{10}\right)$

$R_n = R\,(1 + \Delta n) \quad \Delta m = \frac{1}{10}\sum_{n=1}^{10} \Delta n \quad \Delta d = \frac{R_{sp}}{R_{10}} - 1$

$\delta$ vernachlässigbarer Term höherer Ordnung
$n$ Numerierung der Widerstände
$R_{sp}$ Widerstandswert der Serie-Parallel-Schaltung
$R_{10}$ zehnter Widerstand

$$U = n \frac{2e}{h} \nu$$

worin

$U$ Potentialdifferenz

$\frac{2e}{h}$ phys. Konstante

$e$ Elektronenladung

$h$ Planksche Konstante

$\nu$ Frequenz der elektromagnetischen Strahlung

$n$ 1, 2, 3...

$$\left(\frac{2e}{h} = 483{,}6 \cdot 10^{12}\ \mathrm{Hz/V}\right)$$

Da die Energielücke zwischen supraleitendem und normalleitendem Band nur einige Millielektronenvolt beträgt, sind die Potentialdifferenzen auf einige Millivolt begrenzt.

Die theoretischen Voraussagen von *Josephson* wurden durch die Experimente von *Taylor* [15] 1965 bestätigt. Mit Hilfe dieses Effektes wurde es möglich, eine Gleichspannung zu erzeugen, die direkt proportional einer Frequenz ist. Über Spannungsteiler kann man die NE-Spannung mit der Josephson-Gleichspannung vergleichen [16] (Fig. 15).

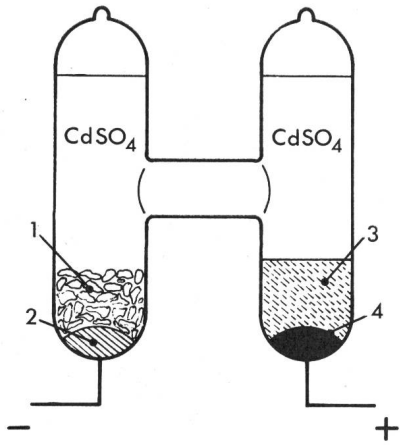



**Fig. 11 Klassisches Normalelement zur Aufbewahrung des Volt**

*1* Kristalle von Kadmiumsulfat
*2* Kadmiumamalgam
*3* Paste aus Merkurosulfat
*4* Quecksilber

Langwierige Vergleichsmessungen unter den einzelnen Zellen der NE-Bank zur Erhaltung des 1-Volt-Wertes werden somit in naher Zukunft wegfallen.

Der Anschluß beliebiger Gleichspannungen an den 1-Volt-Wert geschieht über hochpräzise Spannungsteiler. Solche Teiler müssen absolut kalibrierbar sein, um dieser Aufgabe gerecht zu werden.

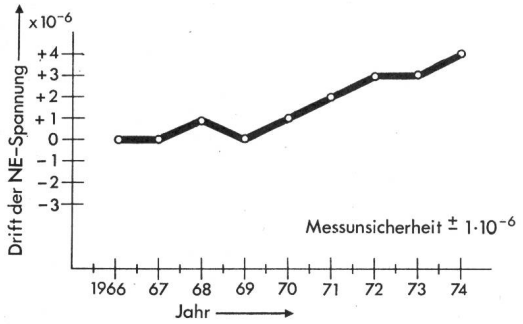



**Fig. 12 Typische Stabilität eines Normalelementes des AMG**

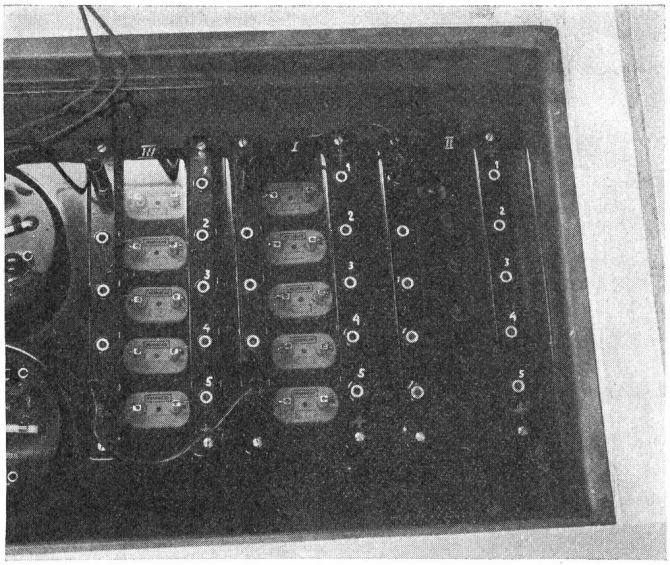


**Fig. 13 Aufbewahrung des nationalen Volt im AMG**

Im AMG wurden zwei solche Teiler entwickelt. Der eine, ein sogenannter Parallelteiler, ist ein siebenstelliger Niederspannungsteiler mit einer absoluten Genauigkeit von besser als $10^{-7}$, bezogen auf den Skalenendwert. Der andere, als Kaskadenteiler [17] gebaut, erlaubt Spannungen bis zu 1000 V mit einer Genauigkeit von $2 \cdot 10^{-6}$ an den 1-Volt-Wert anzuschliessen. Fig. 16 zeigt die Prinzipskizze des Parallelteilers. Mittels quecksilberbenetzter Reedkontakte können die einzelnen Widerstände von M aus entweder nach L oder H geschaltet werden. Der Abgleich des Teilers geschieht so, daß man die einzelnen 10-kΩ-Widerstände durch Vergleich in einer Brückenschaltung alle auf den gleichen Wert bringt. Durch Bildung eines 1-kΩ-Widerstandes aus den jeweils abgeglichenen 10-kΩ-Widerständen kann dann die Serieschaltung dieses 1-kΩ-Widerstandes mit dem 9-kΩ-Widerstand ebenfalls auf denselben Wert gebracht werden. Als Widerstandsmaterial wurde Manganindraht verwendet und die Widerstände vor dem Einbau einem Alterungsprozess unterzogen. Die Stabilität der einzelnen Widerstände ist besser als $10^{-6}$/Monat.

Um Temperatureinflüsse und Thermokräfte klein zu halten, befindet sich der Teiler in Paraffinöl. Fig. 17 zeigt eine Aufnahme dieses Teilers, wie er auch in der Widerstandsmesseinrichtung nach Fig. 9 verwendet wird. In Fig. 18 sind die Prinzipskizze des Kaskadenteilers und eine Aufnahme des fertigen Gerätes dargestellt.

Beim Kaskadenteiler geht man aus von einem festen Widerstandswert, in unserem Fall von 1 kΩ, und baut durch Widerstandsvergleiche in einer Brückenschaltung höhere Widerstandswerte auf. Der grosse Vorteil dieser Anordnung liegt darin, dass der Teiler jeweils mit der Betriebsspannung abgeglichen werden kann. Auch in diesem Teiler sind die Widerstände aus Manganindraht hergestellt und einem Alterungsprozess unterzogen. Der Teiler befindet sich in Paraffinöl.

### 3. Schlussbemerkungen

Die absolute Genauigkeit des Realisierens der elektrischen Einheiten ist, verglichen mit den mechanischen, eher bescheiden und wird in naher Zukunft nicht wesentlich verbessert werden können. Aus diesem Grunde werden unter den grösseren nationalen Eichämtern periodisch Vergleichsmessungen mit

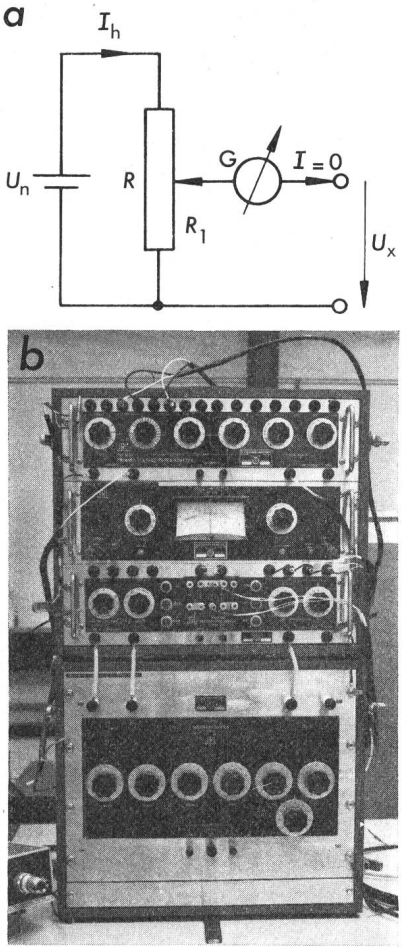



**Fig. 14 Spannungsmessung nach dem Kompensationsprinzip (*a*) und moderner Kompensationsapparat (*b*)**

$$U_x = U_n \frac{R_1}{R}$$

$U_n$ Hilfsspannung
$I_h$ Hilfsstrom
$R$ Teilerwiderstand
$R_1$ Teilwiderstand
$I$ Galvanometerstrom
$U_x$ zu messende Spannung

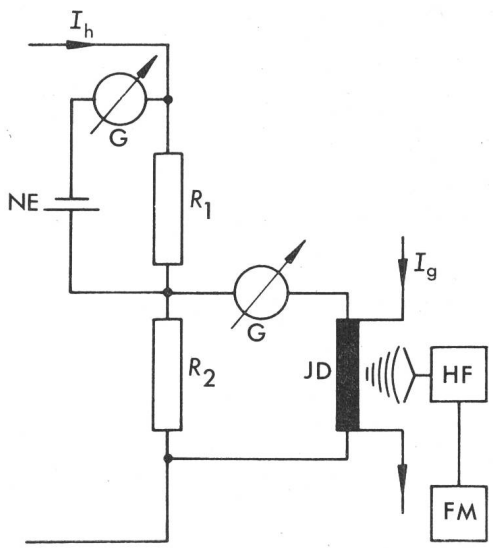



**Fig. 15 Josephsonexperiment zur Überwachung des 1-V-Wertes**

| | | | |
|---|---|---|---|
| *JD* | Josephsondiode | $R_1/R_2$ | präziser Spannungsteiler |
| $I_g$ | JD-Gleichstrom | *G* | Galvanometer |
| *HF* | Mikrowellensender | $I_h$ | Hilfsstrom |
| *FM* | Frequenzmesser | *NE* | Normalelement |

Widerstands- und Spannungshauptnormalen durchgeführt, die zum Ziele haben, wenigstens relativ zueinander mit einer Genauigkeit von besser als $10^{-7}$ zu messen.

Bei der Verwendung des Josephsoneffektes zur Überwachung der Spannungsnormale wird es genügen, einander die jeweilige Josephsonfrequenz zu übermitteln, was solche Vergleichsmessungen wesentlich erleichtert.

Der Wunsch in der Metrologie, die Bezugsgrössen jederzeit und an jedem Ort zu realisieren, führt immer mehr zur Abkehr von den «altehrwürdigen», wohlbehüteten Prototypen. Neben dem Meter und der Sekunde kann man heute die elektrische Spannung und über den Lampardkondensator das Ohm auf Naturkonstanten beziehen. Diese Tatsache wird dazu führen, dass schon in naher Zukunft auf der ganzen Erde Volt, Ohm und Ampère mit einer relativen Genauigkeit von besser als $10^{-7}$

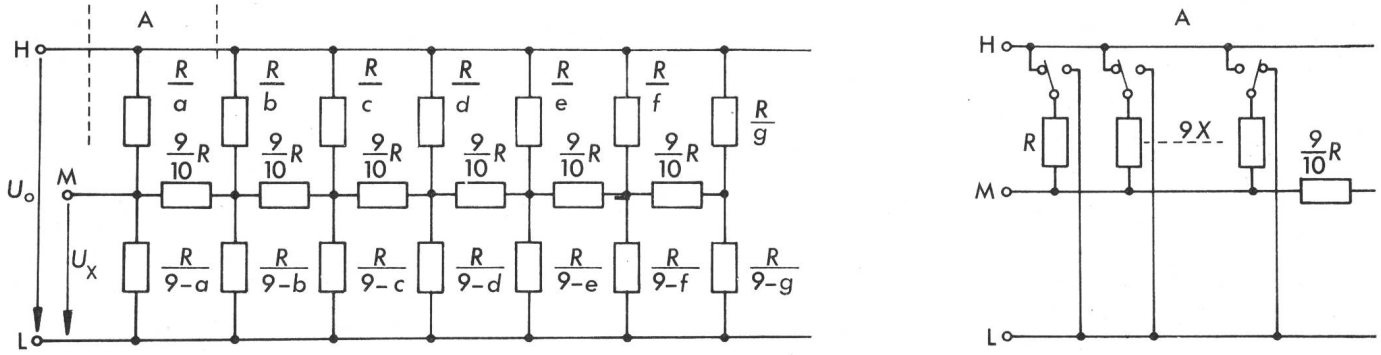



**Fig. 16 Prinzip des Parallelteilers**

$$U_x = U_0 \frac{a \cdot 10^6 + b \cdot 10^5 + c \cdot 10^4 + d \cdot 10^3 + e \cdot 10^2 + f \cdot 10^1 + g \cdot 10^0}{10^7}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $a, b, c, d, e, f$ | $= 1, 2 \ldots 9$ | $U_0$ | Eingangsspannung |
| $g$ | $= 1, 2 \ldots 10$ | $U_x$ | Ausgangsspannung |
| $R$ | $= 10\ \mathrm{k\Omega}$ | $H, L$ | Anschlussklemmen |

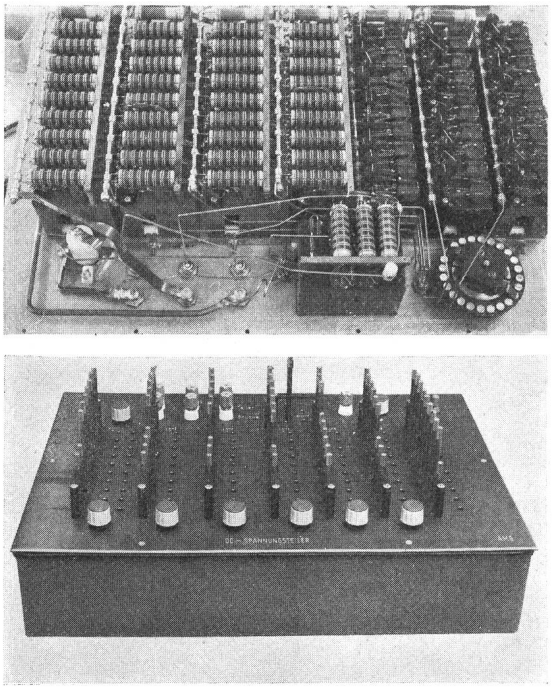


**Fig. 17 Siebenstelliger Parallelteiler**

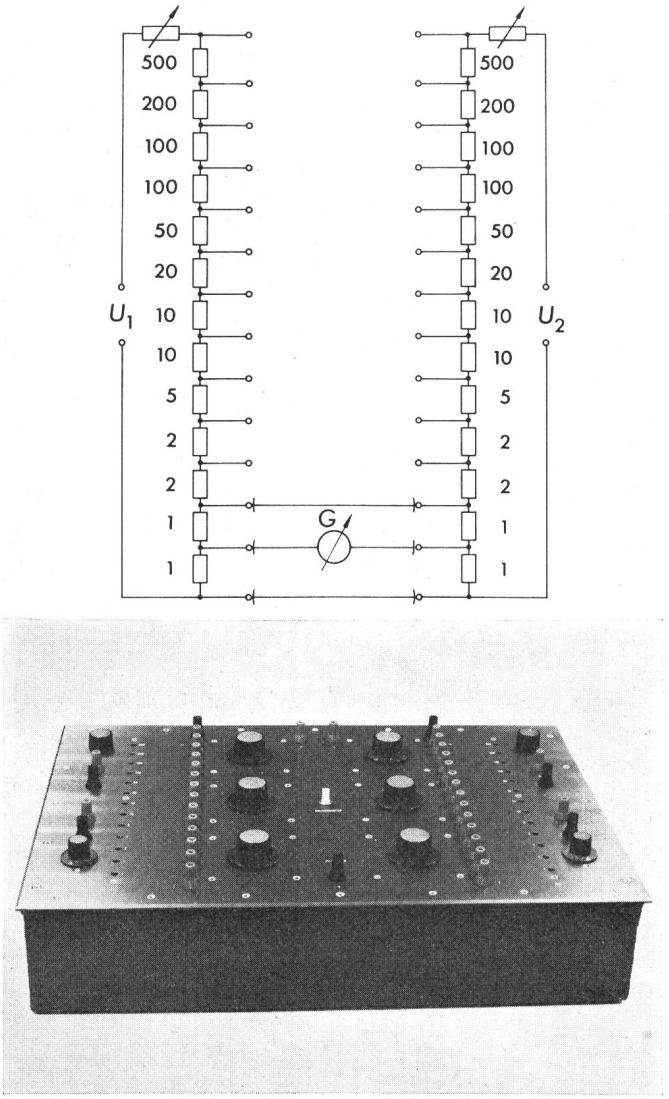



**Fig. 18 Kaskadenteiler für Spannungen bis zu 1000 V**
$U_1$, $U_2$ Speisespannung

realisiert werden können. Heute liegt diese Genauigkeit bei einigen $10^{-6}$.

Im eidg. Amt für Mass und Gewicht gilt heute:

$1\ \Omega_{AMG} = 1\ \Omega_{BIPM} \pm 1\ \mu\Omega$ [4])
$1\ V_{AMG} = 1\ V_{BIPM} \pm 2\ \mu V$

Daran können Spannungs- und Widerstandswerte mit folgender Genauigkeit angeschlossen werden:

| Bereich | Anschlussgenauigkeit an die Bezugsgrösse |
|---|---|
| 1 µV bis 1 V | ± 0,1 µV |
| 1 V bis 100 V | ± 1 ppm |
| 100 V bis 1000 V | ± 5 ppm |
| 0,01 Ω bis 100 Ω | ± 1 ppm |
| 100 Ω bis 10 kΩ | ± 2 ppm |
| 10 kΩ bis 100 kΩ | ± 3 ppm |

Gleichströme werden nach dem Ohmschen Gesetz aus Spannung und Widerstand bestimmt.

Obige Genauigkeitswerte werden nur auf Wunsch bestimmt. Routinemessungen sind 5...10mal ungenauer.

Die Autoren danken Dr. *P. Koch* für wertvolle Diskussionsbeiträge und *E. Pfeuti, A. Meier* und *H. Metzger,* aus der AMG-Werkstatt, für die präzise Ausführung der mechanischen Arbeiten.

[4]) BIPM = Bureau International des Poids et Mesures, Paris.

**Literatur**

[1] *U. Stille:* Messen und Rechnen in der Physik. Grundlagen der Grösseneinführung und Einheitenfestlegung. 2. Auflage. Braunschweig, Vieweg-Verlag, 1961.
[2] *L. Merz:* Grundkurs der Messtechnik. Teil 1: Das Messen elektrischer Grössen. 3. Auflage. München und Wien, R. Oldenbourg Verlag, 1971.
[3] *W. H. Westphal:* Die Grundlagen des physikalischen Begriffssystems. Physikalische Grössen und Einheiten. Braunschweig, Vieweg-Verlag, 1965.
[4] *A. Sommerfeld:* Vorlesungen über theoretische Physik. Band III: Elektrodynamik. 4. Auflage. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1964.
[5] Richtlinien des Rates vom 18. Oktober 1971 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Einheiten im Messwesen (71/354 EWG). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften -(1971)29.10., Nr. L 243/29.
[6] Encyclopaedic dictionary of physics. Supplementary volume 4. Oxford a.o., Pergamon Press, 1971.
[7] *B. N. Taylor, D. N. Langenberg* and *W. H. Parker:* The fundamental physical constants. Scyentific American 223(1970)4, p. 62...78.
[8] *R. P. Feynman, R. B. Leighton* and *M. Sands:* The Feynman lectures on physics. Vol. III: Quantum mechanics. 4th edition. Reading/Massachusetts and London, Addison-Wesley, 1970.
[9] *D. Lampard:* A new theorem in electrostatics with applications to calculable standards of capacitance. Proc. IEE Part C: Monographs 104(1957)6, p. 271...280.
[10] Superconducting sensor advances RF metrology. National Bureau of Standards, Technical News Bulletin 57(1973)1, p. 3...4.
[11] *A. M. Thompson:* An absolute determination of resistance based on a calculable standard of capacitance. Metrologia 4(1968)1, p. 1...7.
[12] *B. V. Hamon:* A 1-100 Ω build-up resistor for the calibration of standard resistors. Journal of Scientific Instruments 31(1954)12, S. 450...453.
[13] Cinq années d'activité. Bulletin d'Information du Bureau National de Métrologie -(1974)1, numéro spécial.
[14] *B. D. Josephson:* Possible new effects in superconductive tunneling. Physics Letters 1(1962)7, p. 251...253.
[15] *B. N. Taylor* a. o.: On the use of the Josephson effect to maintain standards of electromotive force. Metrologia 3(1967)4, p. 89...98.
[16] *B. F. Field, T. F. Finnegan* and *J. Toots:* Volt maintenance at NBS via Ze/h: A new definition of the NBS volt. Metrologia 9(1973)4, p. 155...166.
[17] *B. W. Petley:* Towards a quantum voltage standard. Contemporary Physics 12(1971)5, p. 453...470.

**Adresse der Autoren:**

*O. Piller* und *L. Bauder,* Eidg. Amt für Mass und Gewicht, 3084 Wabern.