

Die elektrischen Einheiten und ihre Realisationsgenauigkeit

Autor(en): **Piller, O.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **69 (1978)**

Heft 10

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-914891>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die elektrischen Einheiten und ihre Realisationsgenauigkeiten

Von O. Piller

53.081.1:621.3; 389:621.3;

Die wichtigsten elektrischen Einheiten sind das Ampere, das Volt, das Ohm, das Watt, die Wattsekunde bzw. Kilowattstunde. Es wird gezeigt, wie diese Einheiten aus den SI-Basiseinheiten gebildet werden und welche Methoden das Eidg. Amt für Messwesen verwendet, um sie zu realisieren und an interessierte Stellen weiterzugeben. Dabei werden einige Neuentwicklungen auf dem Gebiete der elektrischen Grundlagenmessung vorgestellt.

Les unités électriques les plus importantes sont l'ampère, le volt, l'ohm, le watt, la watt-seconde ou le kilowattheure. L'auteur montre comment ces unités sont formées en partant d'unités SI et quelles sont les méthodes employées par l'Office fédéral de métrologie pour en réaliser les étalons à transmettre aux intéressés. Quelques nouveaux développements des bases de la métrologie dans le domaine de l'électricité sont présentés.

1. Die elektrische Basis

Ausgehend von den Basiseinheiten des SI¹⁾ werden alle elektrischen Einheiten als algebraische Ausdrücke unter Benutzung der mathematischen Operationen, Multiplikation und Division aus denselben gebildet [1]²⁾. Dabei werden nur die ersten vier, also das Meter, das Kilogramm, die Sekunde und das Ampere benötigt.

Die Basiseinheiten, von der Definition her exakt, können nicht fehlerfrei realisiert werden. Dies führt dazu, dass auch die abgeleiteten Einheiten, oftmals über eine Kette von Experimenten aufgebaut, mit Fehlern behaftet sind. Fig. 1 soll dies illustrieren.

Es ist aus dieser Figur ersichtlich, dass die Einheit Ohm eine gewisse Sonderstellung einnimmt, lässt sie sich doch genauer darstellen als die Basiseinheit Ampere. Der Grund liegt darin, dass zur Realisierung des Ohm der Wechselstromwiderstand einer berechenbaren Kapazität nach *Lampard-Thompson* [2] verwendet wird. Zur Bestimmung der Kapazität braucht man nebst den geometrischen Dimensionen noch die dielektrische Konstante ϵ_0 , die aus der Lichtgeschwindigkeit c und der magnetischen Permeabilität μ_0 , deren Wert durch die Amperedefinition exakt festgelegt wird, errechnet werden kann [3]. Die relativ ungenaue Ampererealisation wird somit nicht benutzt.

Das Volt wird realisiert, indem man 1 A durch 1 Ω schickt. Das Watt und die Ws bzw. kWh werden schlussendlich aus dem Volt, dem Ampere und der Sekunde gebildet. Dabei ist zu beachten, dass das Watt, gebildet aus den elektrischen

Einheiten, identisch ist mit demjenigen, gebildet aus den mechanischen Einheiten [1].

Die Experimente zur präzisen Realisierung der Einheiten sind sehr aufwendig. Aus diesem Grunde schuf man Normalien zur «Speicherung» der einmal realisierten Werte. Fig. 2 zeigt Normalwiderstände des OFMET³⁾ und eine hochmoderne Stromkomparator-Widerstandsmessbrücke zur Weitergabe der Widerstandswerte an die interessierten Stellen.

Der 1-Volt-Wert wird nach wie vor mit Hilfe der klassischen Westonelemente gespeichert. Diese Elemente sind temperaturabhängig und erschütterungsempfindlich. Sie müssen deshalb besonders sorgfältig aufbewahrt werden. Fig. 3 zeigt die Voltbasis des OFMET. In einem grossen Kubus befinden sich 45 Normalelemente, die mit einer aufwendigen Temperaturregelung auf $(20 \pm 0.001)^{\circ}\text{C}$ gehalten werden. Eine automatische Messeinrichtung ermittelt periodisch die Spannungsdifferenzen der Elemente unter sich und speichert diese auf einem Magnetband. Diese Anordnung erlaubt den 1-Volt-Wert über Jahre auf besser als 10^{-7} V konstantzuhalten. Durch internationale Vergleiche, ca. alle 2 Jahre ausgeführt, werden die nationalen Voltstandard einander auf dieselbe Genauigkeitsgrössenordnung angeglichen, dies trotz der Unsicherheit von ca. $3 \cdot 10^{-6}$ im absoluten Wert, die von der Ungenauigkeit der Ampererealisation herrührt.

Ein weiterer Schritt zur Verbesserung der Speicherung und Überwachung des Volt ist die Verwendung des Josephson-effektes. Im Jahre 1962 zeigte der britische Physikstudent *Josephson*, dass schwach gekoppelte Supraleiter ganz bestimmte Quanteneffekte aufweisen [4]. Werden zwei von einem Gleichstrom durchflossene schwach gekoppelte Supraleiter in ein elektromagnetisches Feld gebracht, so entsteht zwischen

1) Système international d'Unités.
2) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.
3) Office fédéral de métrologie, Eidg. Amt für Messwesen, OFMET; Abkürzung auch auf deutsch gebräuchlich.

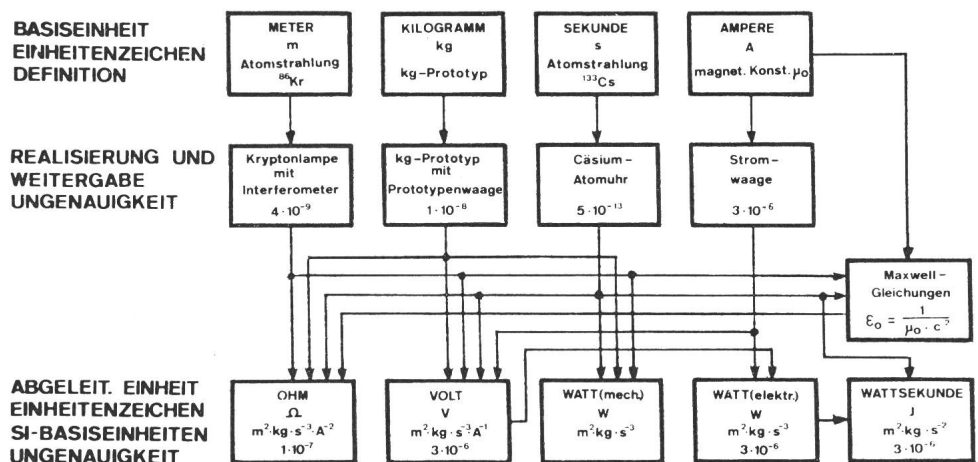


Fig. 1
Praktische Ableitung der elektrischen Einheiten aus den Basiseinheiten

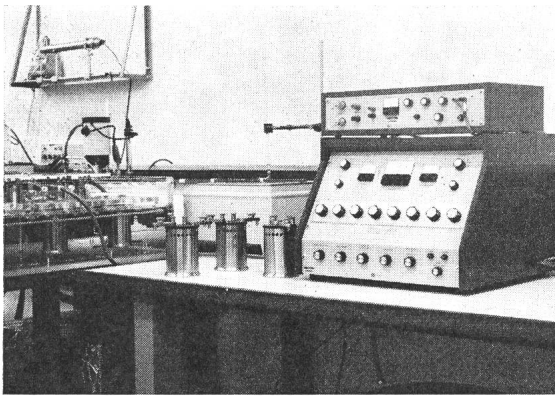


Fig. 2 Normalwiderstände mit Widerstandsmesseinrichtung des OFMET

In der Bildmitte sind 3 Normalwiderstände höchster Präzision ersichtlich. Rechts davon befindet sich die Widerstandsmesseinrichtung, links erkennt man einen Teil des thermostatisierten Ölbad, in dem sich die zu messenden Widerstände befinden.

diesen beiden Supraleitern eine Gleichspannung, die mit zunehmendem Strom in Stufen steigt. Die so entstehenden Stufen sind äquidistant, und es gilt die Beziehung:

$$h \cdot \nu = 2 \cdot e \cdot U$$

- h Plancksche Konstante
- ν Frequenz des EM-Feldes
- e Elektronenladung
- U Stufenspannung

Diese Entdeckung erlaubt es heute, auf sehr elegante Art Gleichspannungen mit einer Reproduzierbarkeit von besser als 10^{-8} zu erzeugen. Fig. 4 zeigt die sich im Aufbau befindliche Josephsonapparatur des OFMET.

2. Die Wechselstromgrößen

Das OFMET als Staatsinstitut hat nebst der Realisierung und der Aufbewahrung der Einheiten auch die Aufgabe, diese an interessierte Stellen weiterzugeben. Auf dem elektrischen Gebiet werden neben den Gleichstromgrößen in grossem Masse auch die äquivalenten Wechselstromgrößen verlangt.

Spezielle Einheiten für die Wechselstromgrößen gibt es nicht. Diese werden, basierend auf äquivalenter Wirkung, an die eingangs aufgeführten Gleichstromeinheiten angeschlossen. Experimentell geschieht dies mit sog. Transferinstrumenten, die prinzipiell in 4 Hauptgruppen eingeteilt werden können [5]:

- elektrostatische Instrumente, deren Wirkungsweise auf der Kraftwirkung zwischen Ladungen beruht;
- elektrodynamische Instrumente, deren Wirkungsweise auf der Kraftwirkung zwischen stromführenden Leitern beruht;
- elektrothermische Instrumente, bei denen ein Effekt ausgenutzt wird, der durch die Heizwirkung eines Stromes hervorgerufen wird;
- Multiplikatoren, die die Momentanwerte von Strom und Spannung miteinander multiplizieren und von 0 Hz bis zur Messfrequenz frequenzunabhängig oder mit bekanntem Frequenzgang arbeiten.

In den letzten Jahren wurden grosse Anstrengungen unternommen, um Transferinstrumente zu bauen, die den gesteigerten Genauigkeitsanforderungen genügen [6]. Für die Strom-

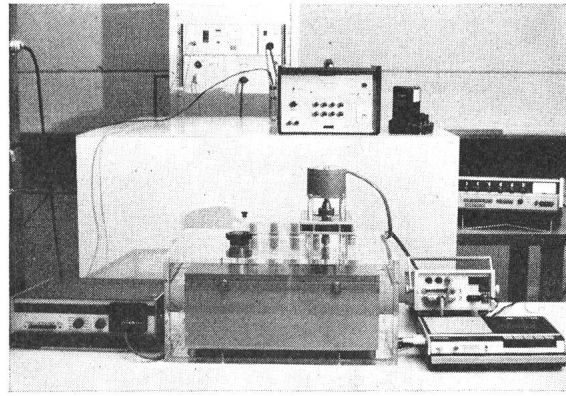


Fig. 3 Spannungsbasis des OFMET

Im grossen Kubus befinden sich die 45 Normalelemente. Davor erkennt man die Umschalteneinheit in einem Plexiglasbehälter gefüllt mit Silikonöl. Links davon befindet sich das Nanovoltmeter zur Erfassung der Spannungsdifferenzen zwischen den Normalelementen, und rechts davon erkennt man die Instrumente zur Datenregistrierung. Im Hintergrund ist die Elektronik für die automatische Messung und für die Temperaturregelung ersichtlich.

bzw. Spannungsmessung wurden Thermalkonvertoren entwickelt, die Transfergenauigkeiten von besser als $1 \cdot 10^{-6}$ zulassen. Ein Thermalkonvertor ist ein elektrothermisches Instrument, bei dem ein Heizdraht abwechselnd mit Gleich- und Wechselstrom beschickt und die erzeugte Wärme mittels Thermoelementen gemessen wird. Fig. 5 zeigt solche Thermalkonvertoren mit dem zugehörigen, vom OFMET gebauten Messgerät.

Der Handel mit elektrischer Energie setzt die Möglichkeit einer präzisen Leistungsmessung voraus. Die Steigerung der Energiekosten führte deshalb zwangsläufig, insbesondere bei Grossverbrauchern, zum Wunsche nach erhöhter Messgenauigkeit. Präzisere Elektrizitätszähler wurden entwickelt, im speziellen elektronische, die mit noch präziseren Transferinstrumenten geeicht werden müssen. Aus diesem Grunde wurden in einigen Staatsinstituten grosse Anstrengungen unternommen, um hochgenaue Transferinstrumente für die elektrische Leistungsmessung zu bauen [7...10].

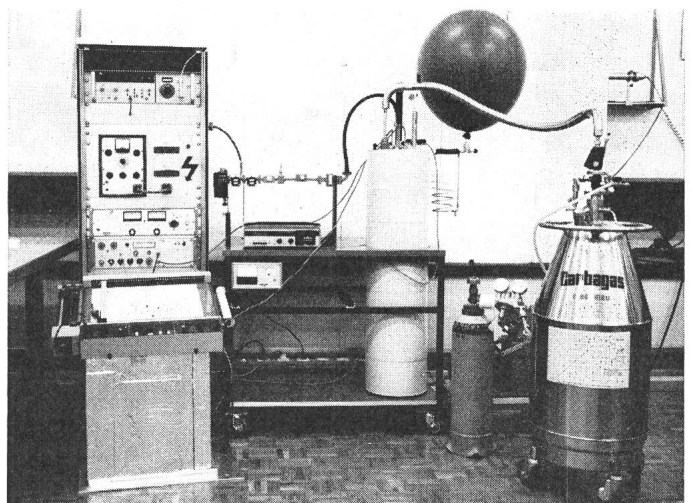


Fig. 4 Im Aufbau befindliche Josephsonapparatur des OFMET

In der Bildmitte, eingebaut im Laborwagen, befinden sich der Tieftemperaturkryostat und die Mikrowelleneinrichtung. Links davon sind in einem Rackgestell die Klystronspeisung, der Frequenzstabilisator, die Josephsonjunction-Speisung und der Frequenzmesser untergebracht. Rechts erkennt man das Flüssighelium-Transportgefäss und einen Helium-Auffangballon

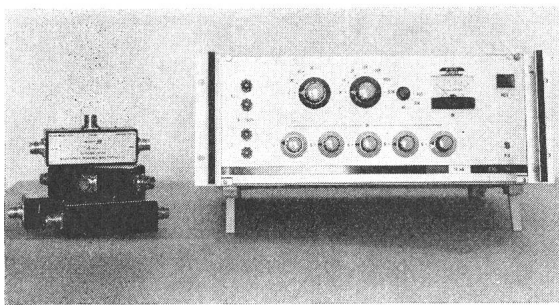


Fig. 5 Thermalkonvertoren mit Messgerät für Wechselstrom- und Wechselspannungsmessung

Im OFMET wurde dafür ein Kalorimeter entwickelt. Seine Wirkungsweise ist in Fig. 6 dargestellt [11]. An zwei identischen Heizköpfen des Kalorimeters werden Gleich- und Wechselstromleistung angelegt. Dadurch entstehen Wärmeflüsse in den beiden, ebenfalls identischen Stegen. Die Grundplatte wird mittels eines Thermostaten auf konstanter Temperatur gehalten. Die Temperaturdifferenz in den Wärmestegen, erzeugt durch die Wärmeflüsse, werden mit Thermoelementen gemessen. Die beiden Heizköpfe sind ausgelegt für 240 W (240 V, 1 A). Mit Hilfe von eingebauten Induktivitäten und Kapazitäten lassen sich folgende $\cos \varphi$ -Werte induktiv und kapazitiv bilden: 0.75, 0.5 und 0.25. Fig. 7 zeigt das Kalorimeter ohne Wärmeisolation. Die Transfergenauigkeit des Gerätes ist besser als $2.5 \cdot 10^{-5}$ bei $\cos \varphi = 1$ und $5 \cdot 10^{-5}$ bei $\cos \varphi = 0.5$.

Die Fehlerangaben von Transfergeräten beruhen letzten Endes auf einer Schätzung, bei Berücksichtigung aller denkbaren Fehlereinflüsse. Aus diesem Grunde wurden verschiedene internationale Vergleichsmessungen ausgeführt, an denen sich das OFMET beteiligte. Die Ergebnisse sind noch nicht vollständig vorhanden und werden später publiziert.

Eine wesentliche Voraussetzung für solche Transferexperimente sind hochstabile Gleich- und Wechselstromspeisungen. Gleichstromspeisungen, die den gestellten Anforderungen genügen, sind käuflich erhältlich, nicht aber Wechselstromquellen, die nebst Amplitudenstabilität und minimalem Oberwellengehalt noch die benötigte Leistung abgeben. Das OFMET hat aus diesem Grunde eine hochstabile, vollelektronische

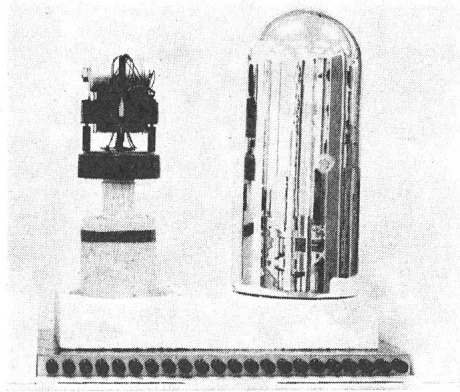


Fig. 7 Aufbau des OFMET-Kalorimeters
Entfernt sind die äussere Isolation und ein Dewargefäss

nische (3 + 3)-phasige Spannungs- und Stromquelle gebaut [12], die ausser zu Transferexperimenten auch zur Speisung einer ebenfalls eigenentwickelten Zählereichstation Verwendung findet. Fig. 8 zeigt die Resultate von Stabilitätsmessungen an dieser Speisung.

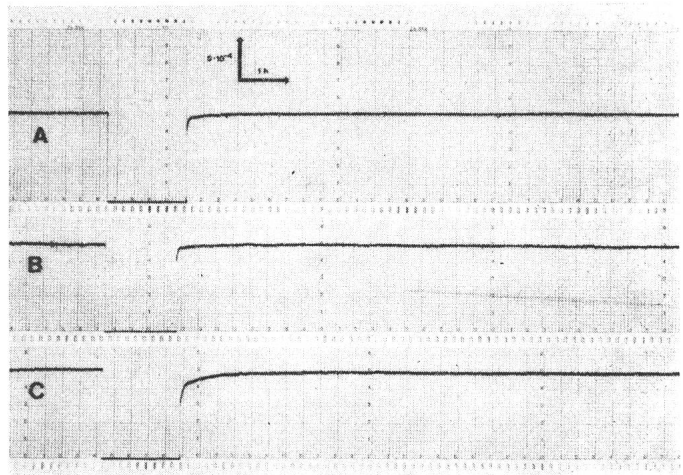


Fig. 8 Stabilität der AC-Speisung des OFMET
A Spannungsausgang ohne Last
B Spannungsausgang bei 250 VA kapazitiver Last
C Stromausgang bei 200 W ohmscher Last
Während 1,5 h wurde die Anlage abgeschaltet.
Die Raumtemperatur blieb während der Messung innerhalb $\pm 1^\circ\text{C}$

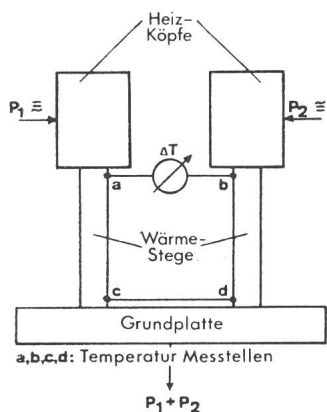


Fig. 6 Prinzipskizze des OFMET-Kalorimeters für elektrische Leistungsmessung

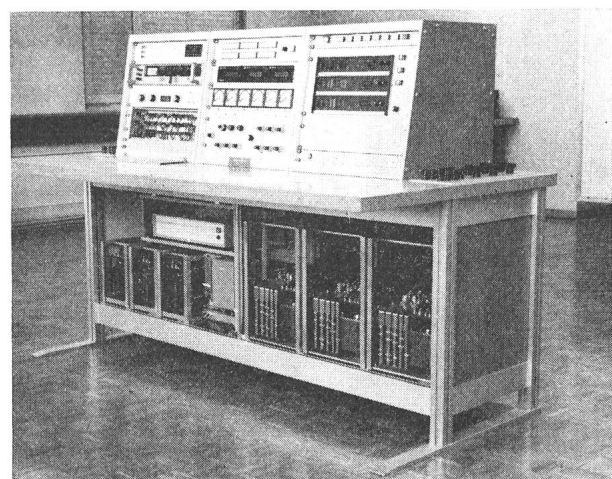


Fig. 9 Die im OFMET entwickelte vollelektronische Zählereichstation

In Fig. 9 ist die vollelektronische Zählereichstation abgebildet. Diese neue Station wird den gesteigerten Genauigkeitsanforderungen auf dem Gebiete der Elektrizitätszähler gerecht. Als Normal besitzt sie ein elektronisches Wattmeter, das auf dem Prinzip des Time-Division-Multiplikators arbeitet [13]. Dieses Wattmeter wird periodisch mit dem OFMET-Kalorimeter überprüft.

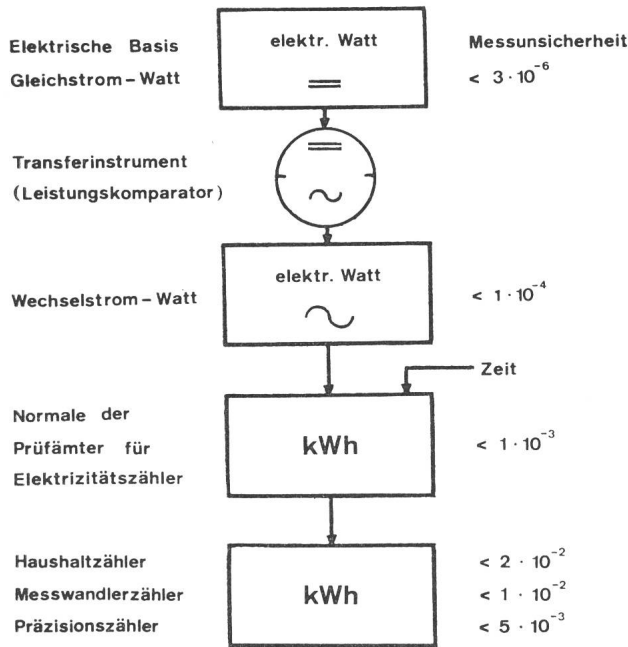


Fig. 10 Anschluss der Haushaltzähler an die elektrische Basis des OFMET

In Fig. 10 sind schematisch die einzelnen Übergänge von der Gleichstrombasis des OFMET bis zur Prüfung der Haushaltzähler in den Elektrizitätszähler-Prüfmestern der Schweiz zusammengefasst. Es ist aus dieser Figur auch ersichtlich, dass jede Genauigkeitssteigerung der Messgeräte auf der Verbraucherseite zwangsläufig eine ganze Kette von Verbesserungen in den Übergängen verlangt. Dies ist der Grund, weshalb das OFMET in den letzten Jahren, von der elektrischen Basis her aufbauend versucht, Schritt für Schritt die Genauigkeit der einzelnen Stufen um ca. den Faktor 10 zu verbessern. Einige Glieder dieser Messkette sind bereits entstanden, weitere werden in naher Zukunft noch fertiggestellt.

Literatur

- [1] O. Piller: Das internationale Einheitensystem SI. NZZ Beilage Forschung und Technik -(1977)150 vom 29. Juni, S. 47.
- [2] A. H. Thompson: An absolute determination of resistance based on a calculable standard of capacitance. Metrologia 4(1968)1, p. 1...7.
- [3] O. Piller und L. Bauder: Die elektrischen Einheiten Ampère, Volt und Ohm. Bull. SEV/VSE 66(1975)8, S. 413...420.
- [4] B. D. Josephson: Possible new effects in superconductive tunneling. Physics Letters 1(1962)7, p. 251...253.
- [5] P. Koch: Die Eichung von Elektrizitätsleistungsmessern im Amt für Mass und Gewicht. Bull. SEV/VSE 66(1975)24, S. 1347...1352.
- [6] F. J. Wilkins: Vielfach-Thermoumformer als Wechselstrom/Gleichstrom-Transfer-Instrument. Messtechnik 78(1968)10, S. 258...265.
- [7] R. Friedl: Elektrodynamische Leistungswaage für die Prüfung von Elektrizitätszählern und Leistungsmessern. Zeitschr. Instrumentenkunde 67(1959)12, S. 318...323.
- [8] G. Schuster: A high-resolution electrodynamic AC-to-DC power transfer instrument. IEEE Trans. IM 23(1974)4, p. 330...333.
- [9] G. Schuster: Thermal measurement of AC power in comparison with the electrodynamic method. IEEE Trans. IM 25(1976)4, p. 529...533.
- [10] R. De Vrè et C. Vastrade: La mesure précise de la puissance en courant alternatif. Méthode de l'étalonnage des wattmètres statiques. Communication III-4 au colloque internationale sur l'électronique et la mesure, Paris, mai, 1975.
- [11] O. Piller und L. Bauder: A differential calorimeter for AC power measurement. CPEM Digest 1976 Conference on precision electromagnetic measurement, June 28...July 1, 1976, Boulder/Colorado, 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.
- [13] H. Vonarburg: Statische Messumformer für elektrische Leistung. Landis und Gyr Mitt. -(1969)8, S. 14...24.

Adresse des Autors

Dr. Otto Piller, wissenschaftlicher Adjunkt, Eidg. Amt für Messwesen, 3084 Wabern.