

Die Eichung von Elektrizitätsleistungsmessern im Amt für Mass und Gewicht

Autor(en): **Koch, P.**

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): **66 (1975)**

Heft 24

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915329>

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 Eichung von Elektrizitätsleistungsmessern im Amt für Mass und Gewicht

Von P. Koch

Beschreibung der wichtigsten theoretischen und messtechnischen Probleme bei der Eichung von Watt- und Wattstundenmetern. Einige besonders interessante Messanordnungen, auch in ausländischen Grundlagenlaboratorien. Die vom eidgenössischen Amt für Mass und Gewicht verfolgte Entwicklungsrichtung wird dargelegt.

Description des problèmes théoriques et techniques les plus importants qui se posent lors de l'étalonnage des wattmètres et des compteurs d'énergie électrique. Quelques dispositifs de mesure particulièrement intéressants mis au point dans les laboratoires de base en Suisse et à l'étranger. Présentation des développements envisagés par le Bureau Fédéral des Poids et Mesures.

621.317.784.089.6

1. Das Amt für Mass und Gewicht (AMG)

Am 23. Dezember 1851 wurde durch Bundesgesetz gleiches Mass und gleiches Gewicht für das ganze Gebiet der Eidgenossenschaft eingeführt. Im Jahr 1862 folgte die Einrichtung einer eidgenössischen Eichstätte in Bern. Aber erst im Jahre 1875 wurde die internationale Meterkonvention geschlossen, der die Schweiz beitrug. Im gleichen Jahr wurde Kraft Art. 40 der Bundesverfassung von 1874 das metrische System für das ganze Gebiet der Eidgenossenschaft verbindlich erklärt. Die Durchsetzung der damit zusammenhängenden Verordnungen war Sache der Kantone und ist es heute noch. Das eidg. Amt für Mass und Gewicht, welches sich aus der Eichstätte entwickelte, hatte vor allem die Aufgabe, die metrischen Masse vom Bureau International des Poids et Mesures in Sèvres bei Paris zu übernehmen und an die Kantone weiterzuleiten.

Die Industrialisierung unseres Landes machte nach und nach die Vermittlung anderer Masse nötig. Ferner muss bedacht werden, dass dem Bund gemäss Bundesverfassung die Oberaufsicht über die Tätigkeit der Kantone auf dem Gebiet von Mass und Gewicht obliegt. Das Pflichtenheft des AMG wuchs deshalb ununterbrochen, und damit sein Personal- und Raumbedarf. Seit etwa 1965 verfügt das Amt in Wabern bei Bern über neue und zweckmässige Laboratorien.

2. Die Tätigkeit der Sektion Elektrik und Elektronik

Die 9 Mitarbeiter der Sektion Elektrik und Elektronik des AMG haben folgende Tätigkeitsgebiete zu betreuen:

a) Laboratorien für Elektrizitätszähler und Wandler. Zulassungs-(System-)Prüfungen der genannten Objekte; technische Inspektion der rund 40 externen Prüfämter, die unter Aufsicht des AMG alle in Betrieb gelangenden Zähler prüfen. Interpretation der Verordnung über Elektrizitätsverbrauchsmesser und Auskunfterteilung darüber. Verfolgung der internationalen Entwicklung auf dem Gebiet dieser Verordnung und Sammeln von Fakten zu deren Erneuerung. Überwachung der provisorisch eingeführten stichprobenweisen Zähler-Nachprüfung.

b) Labor für direkt anzeigende Instrumente. Prüfung aller Volt- und Amperemeter, speziell aber aller Wattmeter, die in den oben erwähnten Prüfämtern als Arbeitsnormale verwendet werden. Führen einer Kartei über diese Arbeitsnormale. Betreuung des zur Definition des Watts bei Wechselstrom benötigten Hauptnormal-(Transfer-)Wattmeters. Neuerdings auch Prüfung von elektronischen Leistungsmessern.

c) Grundlagenlabor. Betreuung der Gleichspannungs- und Widerstandsnormale, periodische Überwachung und periodischer Vergleich mit den Normalen im Bureau International des Poids et Mesures in Sèvres bei Paris, Übertragung dieser Grundwerte auf die dekadisch gestuften Arbeitsnormale und auf die Prüfung von Präzisionsgeräten wie Spannungsteiler, Laborspannungsquellen, Digitalvoltmeter usw. Durchführung von Kapazitäts- und Induktivitätsmessungen bei Tonfrequenz. Vermittlung der Grund Eichungen an die schon genannten technischen Laboratorien.

d) Für die wissenschaftliche Unterstützung der bisher aufgezählten Mitarbeiter, die Überprüfung ihrer Arbeitsmethoden und Hilfsmittel und die Förderung von Entwicklungsarbeiten verfügt die Sektion über einen zweiten Physiker.

e) Die Arbeitsgruppe für technische Elektronik besorgt im Auftrag der eidgenössischen Polizeibehörde die Typenprüfung und periodische Nachprüfung aller von der Polizei verwendeten Geschwindigkeitsmessgeräte («Radar»). Auf dem Gebiet der Akustik werden analog dazu alle Schallpegelmesser der Polizeibehörde überwacht, ferner im Auftrag der eidgenössischen Fahrzeugtypen-Prüfungskommission Prüfungen an Autohupen und für die Interkantonale Heilmittelkontrollstelle Typenprüfungen an Hörprothesen durchgeführt.

f) Für instrumentelle Entwicklungsarbeiten, soweit sie nicht von den Laborgruppen zwischenhinein unternommen werden, bleiben zwei Personen, deren Arbeit zum Teil auch noch von anderen Sektionen in Anspruch genommen wird.

Das Entwicklungspotential dieser kleinen und stark beschäftigten Gruppe muss sorgfältig eingeteilt werden. Da zudem die Probleme des Amtes meist etwas anders geartet sind als diejenigen der Industrie, müssen sehr häufig auch risikante Lösungsversuche im Alleingang unternommen werden. Um so wichtiger ist es, die Ziele gut zu wählen. Gegenwärtig sind diese Ziele:

– Im Grundlagenlabor: Vermittlung der Grundgrössen und eines möglichst grossen Bereiches von Vielfachen mit einer Unsicherheit von nicht mehr als 10^{-6} (dies allerdings nicht routinemässig!) [1]¹⁾.

– In den Bereichen der industriellen Elektrik: Festlegung des Watts bei 50 Hz mit einer Unsicherheit von nicht mehr als 10^{-4} . Über diese Anstrengungen soll hier berichtet werden.

3. Eichung von Wattmetern

Ein Wattmeter mit Gleichstrom zu eichen, stellt keine grossen Probleme. Das AMG verfügt im interessierenden Bereich über Strom- und Spannungsquellen mit Stabilitäten von ungefähr 10^{-6} (relativ) pro Minute und die nötige Kenntnis von Widerständen und Spannungsteilern, um diese Spannungen direkt mit den Normalelementen zu vergleichen. Die Frage ist nur, ob die Gleichstromeichung bei Wechselstrom auch gilt, das heisst, ob das Wattmeter bis 50 oder mehr Hz als frequenzunabhängig betrachtet werden kann.

Bisher wurde dieses Problem stets so gelöst, dass der Prüfling bei Wechselstrom mit besonderen Laborwattmetern verglichen wird, die eigens für diesen Zweck so gebaut sind, dass ihr Frequenzgang aus theoretischen Berechnungen ermittelt werden kann. Diese Geräte, die unter Verzicht auf jeden nebensächlichen Luxus wie etwa Handlichkeit, Trans-

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

portfähigkeit oder Bereichswahl hergestellt werden, nennt man Transferinstrumente. Ihre Stellung in der Hierarchie der Messmittel entspricht ein wenig der eines Axioms in der Mathematik. Sie können nicht als richtig bewiesen werden. Ihre Bewertung erfolgt anhand der Anwendungsergebnisse. Aber im Grunde ist der Experimentator jedesmal wieder gespannt, wenn er Gelegenheit findet, die Resultate seines Transferwattmeters mit denen eines andern zu vergleichen. Je mehr Vergleiche mit möglichst verschiedenen konzipierten Geräten ein solches Gebilde erfolgreich bestanden hat, um so mehr traut man ihm.

4. Einige Transferwattmeter

Aus dem oben Geschilderten ergibt sich, dass ein Transferwattmeter ein Multiplikator sein muss, der von der Frequenz 0 bis zu einer gewissen oberen Grenzfrequenz frequenzunabhängig oder besser gesagt, mit voraussagbaren Amplituden- und Phasenfehlern arbeiten kann. Als Grundformen solcher Geräte gelten das Dynamometer und das Quadrantelektrometer. Bis jetzt in zweiter Linie folgen elektronische Spannungsmultiplikatoren, wie sie die Analogrechenstechnik verwendet, aber diese Rangfolge könnte sich ändern. Ferner ist es auch mit nur quadrierenden Elementen möglich, eine Multiplikation zu erreichen unter Ausnutzung der Relation

$$(a + b)^2 - (a - b)^2 = 4ab$$

was die Konstruktion thermischer Wechselstrom/Gleichstrom-Umformer ermöglicht.

Um den Frequenzgang eines Dynamometers berechnen zu können, muss man vor allem die Induktivität seines Spannungspfad kennen und der Impedanz des Vorwiderstandes gegenüberstellen. Aber auch die Kapazitäten der Spannungs- und der Stromspulen müssen berücksichtigt werden, und mögliche Wirbelstromeffekte. Hier muss entschieden werden, ob das Messwerk abzuschirmen ist oder nicht. Um gegenseitige Induktionen zwischen den zwei Kreisen zu verhindern, wird dafür gesorgt, dass Strom- und Spannungsspulen stets senkrecht zueinander gehalten werden. Die Drehbewegung zwischen diesen Spulen muss also durch ein Gegendrehmoment verhindert werden, dessen Grösse das Mass für die zu messende Leistung darstellt. Dieses Gegendrehmo-

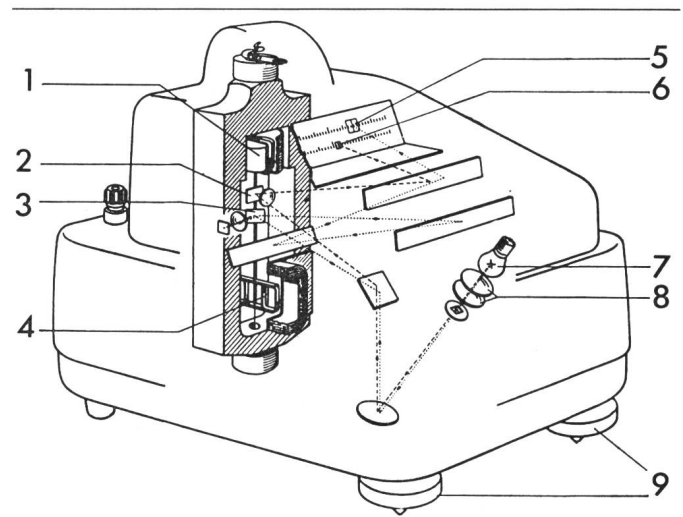


Fig. 1 Innerer Aufbau des Transferwattmeters von Goerz, Wien

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 Drehspulsystem | 6 unempfindliche Lichtmarke |
| 2 Spiegel für kurzen Zeiger | 7 Lampe |
| 3 Spiegel für langen Zeiger | 8 Kondensator |
| 4 Dynamometer | 9 Stellfüsse |
| 5 empfindliche Lichtmarke | |

ment kann auf verschiedene Arten erzeugt werden: durch Torsion der elastischen Spulenaufhängung; mit Hilfe eines separaten Drehspulmesswerkes auf der gleichen Drehachse; durch Verwendung zweier identischer Dynamometersysteme, von denen das eine die Wechselstromleistung misst und das andere eine Gleichstromleistung; endlich ist es möglich, die Kompensation in einem einzigen Dynamometer (oder allgemein Multiplikator) durchzuführen, indem in ihm eine Wechselstromleistung und eine Gleichstromleistung so superponiert werden, dass sie in entgegengesetzter Richtung wirken [2; 3].

Das AMG verwendet ein Gerät von Goerz in Wien (Fig. 1), in welchem die Kompensation durch ein separates Drehspulsystem erzeugt wird. Die Stärke seines Magneten, die als Systemkonstante in die Eichung eingeht, wird ermittelt, indem die Stromstärke gesucht wird, welche das Dynamometer und das Gleichstrommesswerk im Gleichgewicht hält, wenn der Strom in Serie alle drei Spulen durchfließt (Fig. 2).

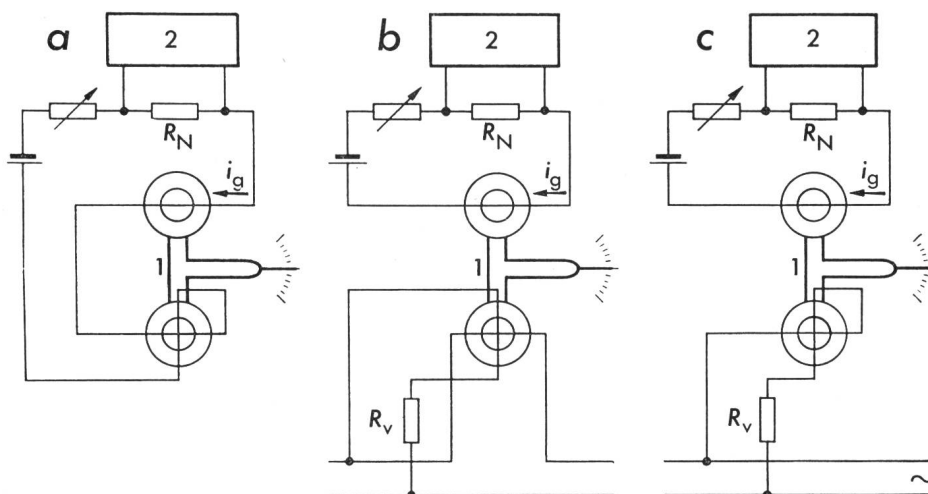


Fig. 2

Beschaltung des Transferwattmeters

- | | |
|-------|---|
| a | Eichung |
| b | Leistungsmessung |
| c | Spannungsmessung |
| R_N | Normalwiderstand |
| R_V | Vorwiderstand Spannungspfad |
| i_g | Gleichstrom zur Drehmoment-Kompensation |
| 1 | Transferwattmeter, beweglicher Teil |
| 2 | Kompensator (Messung von i_g) |

Da dieser Strom im einen System quadratisch wirkt, im andern linear und proportional zur Stärke des Magneten, kann letztere in einer äquivalenten Stromstärke angegeben werden. Die Lieferfirma garantiert für das Gerät eine Genauigkeit, deren Fehler, je nach Leistungsfaktor, zwischen 0,3 und 0,7 ‰ liegen soll. Dies zu überprüfen ist die grosse Herausforderung an den Benutzer. Wenn er sich dabei nicht auf theoretisches Nachrechnen der Fehlerbetrachtung beschränken will, braucht er dafür ein gleichwertiges aber möglichst nach andern Prinzipien arbeitendes Vergleichsinstrument.

Bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Deutschland wird ein sehr ähnliches Gerät verwendet, welches mit zwei identischen Dynamometersystemen arbeitet [4]. Der Konstrukteur gibt dafür einen Fehler von nur ca. 0,1 ‰ an. Das Gerät schien jedoch von demjenigen der Firma Goerz zu wenig verschieden, um dazu als wirklich unabhängiges Vergleichssystem zu gelten.

In England wird am National Physical Laboratory (NPL) in Teddington ein Elektrometer als Multiplikator verwendet (Fig. 3) [5]. Da es heutzutage einfach ist, aus einem Strom eine genau proportionale und relativ hohe Spannung mit Hilfe von Verstärkern zu erzeugen, und da es sich hier um ein wirklich von Dynamometern verschiedenes System handelt, wurde vor einigen Jahren beim NPL nach der Möglichkeit eines Nachbaus in der Schweiz gefragt. Die Mitarbeiter des NPL haben aber davon entschieden abgeraten mit dem Hinweis auf die konstruktiven Schwierigkeiten, welche sich aus dem kleinen Drehmoment einerseits und den mechani-

schen Problemen eines genügend formstabilen Systems andererseits ergeben. Es sah damals so aus, als ob sich aus der Verwendung von quadrierenden thermischen Multiplikationssystemen, welche vor kurzem entwickelt worden waren, wesentlich bessere Resultate ergeben sollten [6]. Leider kam ein solches Gerät mit der erforderlichen Präzision nicht auf den Markt.

Zu der Lagerung elektromechanischer Geräte ist folgendes zu erwähnen. Man kann ein drehbares System an Spannbändern aufhängen, die gleichzeitig die Positionierung und die elastische Rückführung als Aufgaben übernehmen. Als Alternative kann man das System für beide Aufgaben separat ausrüsten, also z. B. mit Spitzenlagern und speziellen Rückführfedern. Vom Prinzip aus scheint letzteres die bessere Lösung: die Lagerung ist stark und eindeutig, die nur einer Aufgabe dienenden Federn haben vermutlich die konstantere Rückführkraft. Neuere Untersuchungen zeigen aber, dass neben Reibung und unpräziser Zentrierung auch nichtlineare dynamische Effekte auf die Null-Lage mechanischer Instrumente einwirken können, speziell, dass ein Drehsystem unter dem Einfluss von Vibrationen systematisch in einer Drehrichtung auswandern kann [7; 8]. Das bedeutet, dass die Sicherheit der Nullpunktlage vom Pegel der Erschütterungen am Messort abhängig wird, wenn die Drehpunkt-lagerung nicht geeignet konstruiert ist. Dies ist ein Grund dafür, für hohe Präzision nach nicht mechanischen Geräten zu suchen.

Thermische Umformer sind, speziell für die Messung hochfrequenter Ströme, seit längerer Zeit bekannt. Nimmt man an, dass die Temperaturänderung proportional zur Verlustleistung steigt, und ferner, dass diese Leistung genau mit dem Quadrat des Stromes zunimmt, dann könnte eine Kombination von Heizelement und Thermolement ein Gleichspannungssignal abgeben, welches zum Mittelwert des Quadrates des Stromes, also zum Effektivwert, proportional wäre. Leider stimmen die Annahmen nur, solange die Temperaturänderungen klein sind, weil sonst Widerstandsvariationen im Heizelement und nichtlineare Wärmeverluste, z. B. durch Strahlung, als Fehlerquellen auftreten. Wenn aber zwecks Linearisierung der Effekt klein gehalten werden muss, dann wird er einerseits elektrisch nicht genau messbar und andererseits durch Umwelteinflüsse gestört. Bei der Gleichstromeichung des Gebildes können auch noch Wärmetransporte infolge des Peltiereffektes eine Rolle spielen [9]. Die Idee der Engländer war nun, eine grosse Zahl solcher Umformer auf kleinem Raum in Serie zu schalten, wodurch einerseits die zu messende Thermospannung um einen Faktor zwischen 10 und 100 vergrössert wird, andererseits die infolge des Peltiereffektes transportierte Wärme in $(n-2)$ von n Fällen einfach zum Nachbarelement gelangt und folglich nicht verlorengeht [10]. Die Realisation der Idee ergab sich aus dem Prinzip der gedruckten Schaltung (Fig. 4).

Über drei isolierten Stützen, die als Kanten eines Prismas wirken, werden auf einem Trägerdraht durch galvanische Deposition spiralig angeordnete Thermolemente erzeugt. Dass der Trägerdraht als Nebenschluss zum deponierten Thermolement wirkt, ist bei passender Wahl der Querschnitte unbedeutend, kann sogar zur Kompensation von Einflüssen der Umgebungstemperatur benützt werden. Die Enden der Thermolemente befinden sich immer bei den

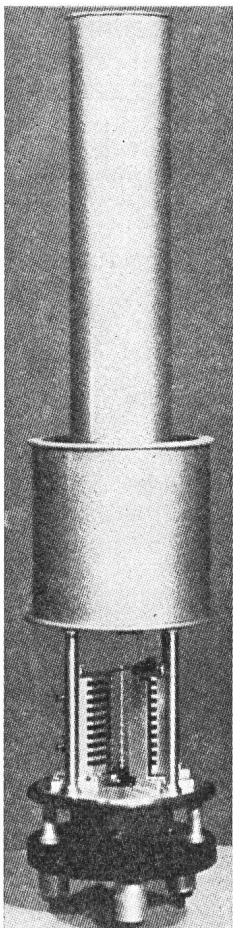


Fig. 3
Elektrometer des NPL

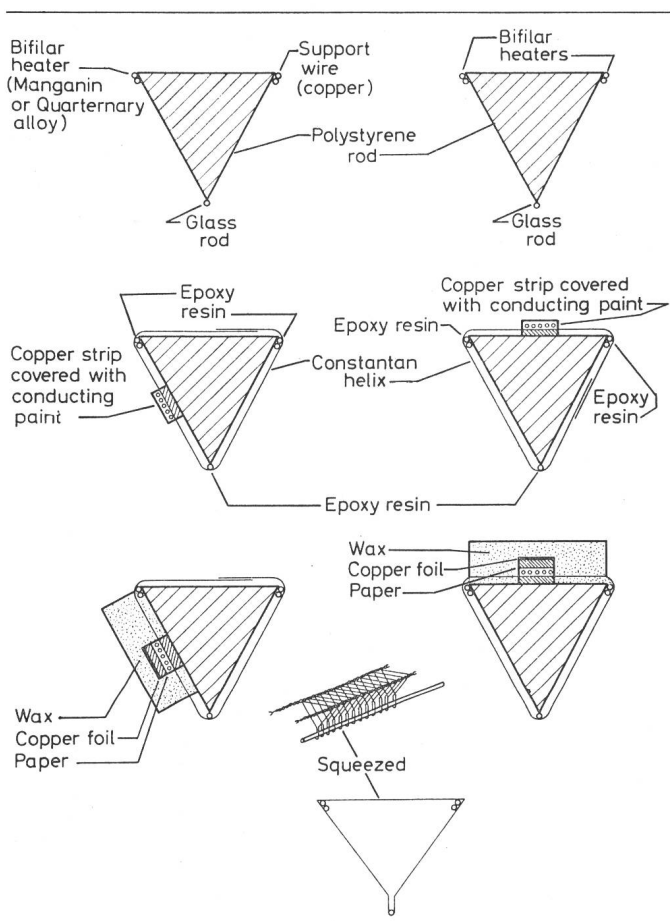


Fig. 4 Werdegang eines Mehrfach-Thermoumformers [11]

links: Einzelheizeranordnung
rechts: Doppelheizeranordnung
(Differential-Umformer)

Die Thermoelemente werden durch elektrochemisches Plattieren auf dem Trägerdraht erzeugt.

gleichen zwei Kanten, die verschieden beheizt werden können, so dass an den Enden der Spirale die Thermospannung

$$U = nk (T_1 - T_2)$$

zur Verfügung steht. Damit ist die Differenzbildung aus zwei zu ihren Strömen quadratischen Heizfunktionen schon vorbereitet. Aus

$$(I_1 + I_2)^2 - (I_1 - I_2)^2 = 4 I_1 I_2$$

hätte sich ein ideales Wattmeter ergeben müssen. 1969 konnte man am Salon des Composants Electroniques in Paris Prototypen solcher Umformer sehen, die als noch zu wenig quadratisch arbeitend bezeichnet wurden. Die Elemente sind immer noch nur als Einzelstücke zu kaufen.

Eine neue Methode der Multiplikation ergibt sich aus dem Aufschwung der Analogrechentechnik seit dem letzten Weltkrieg. Die zunächst komplizierten Multiplikationsschaltungen sind seit rund 10 Jahren als transistorisierte vergossene Moduln zu kaufen, und ihre Genauigkeit nahm ständig zu. Diese Entwicklung führte in letzter Zeit zu sehr genauen elektronischen Wattmetern (und Energiemessern) für Wechselstrom, und es ist zu erwarten, dass ein Transfer-Gerät auf dieser Basis bald zur Verfügung steht [11; 12].

Die digitale Rechentechnik bietet ebenfalls Möglichkeiten zur Leistungsmessung, vorausgesetzt, dass für genügend ra-

ches und genaues Erfassen der Momentanwerte in Strom- und Spannungszweig gesorgt ist. Die aus der Oszilloskopie bekannte «sampling»-Technik zeigt, wie die genügende zeitliche Auflösung auch mit genauen und damit meist langsamen Schaltungen zu erreichen ist, nämlich durch stroboskopisches – eventuell sogar durch stochastisches – Abtasten [13; 14]. Es scheint, dass z. B. das National Bureau of Standards in den USA entsprechende Versuche aufgenommen hat.

Das AMG war ursprünglich entschlossen, die Verfahren der analogen und der digitalen Multiplikation zu erproben. Es stellte aber dann diese Projekte zurück, als sichtbar wurde, dass eine namhafte Schweizer Firma in derselben Richtung arbeitet. Statt dessen wurde die verfügbare Entwicklungsleistung darauf verwendet, die für den Betrieb präziser Wattmeter erforderlichen Bedingungen zu untersuchen und zu realisieren.

5. Betriebsprobleme bei Leistungsmessern

Wechselstromleistung pulsiert, bei symmetrischen Kurvenformen mit der doppelten Netzfrequenz, normalerweise also mit 100 Hz. Wenn ein Gerät eine bestimmte Genauigkeit, und somit auch eine entsprechende Auflösung erreichen soll, muss es die Pulsationen genügend stark ausfiltern.

Ein elektromechanisches Gerät arbeitet dabei meist als Schwingensystem zweiter Ordnung, soweit nicht noch mit Elastizitäten innerhalb des beweglichen Teiles gerechnet werden muss. Je nachdem, wie stark dieses System die 100 Hz abschwächen soll, ergibt sich die maximale Eigenfrequenz der Drehbewegung und damit der Verlauf der Antwort auf eine Veränderung der zugeführten Leistung. Versucht man, zwei Geräte ungleichen Zeitverhaltens mit Hilfe einer Quelle ungenügender Stabilität untereinander zu vergleichen, so droht bald einmal zwischen den zwei ablesenden Experimentatoren Streit auszubrechen.

Beim Vergleich integrierender Wattmeter (also Elektrizitätszähler) untereinander kann man die Messzeit gross gegenüber den Zeitkonstanten machen, und das geschilderte Problem würde entfallen. Will man aber auf diesem Wege eine Eichung der Geräte aufbauen, dann muss man doch von den separaten Grössen Leistung und Zeit ausgehen, muss also die Leistung während der Messzeit konstant halten. Dies wäre mit Gleichstrom leichter zu erreichen, aber vorläufig fehlt das frequenzunabhängig bis zu Gleichstrom brauchbare Wattsekundenmeter, welches direkt als Energie-Transfergerät einsatzfähig wäre.

Man kann es drehen wie man will, wenn mit Leistungstransfergeräten gearbeitet werden soll, muss eine genügend stabile Wechselstromleistung während genügend langer Zeit zur Verfügung stehen. Diese Stabilität muss sowohl für die Amplituden von Strom und Spannung, als auch für den Phasenwinkel und die Frequenz vorhanden sein.

Eine besondere Stellung nimmt bei den besprochenen Eichungen der Klirrfaktor ein. Es gibt experimentelle Untersuchungen an Zählern, welche zeigen, dass die Eichung dieser Geräte mit Hilfe von Wattmetern durch vernünftige grosse Anteile von Oberwellen nicht stark verfälscht wird [15; 16]. Dies hat mit dem mathematisch beweisbaren Sachverhalt zu tun, dass das Produkt einer Oberwelle (z. B. im Strom) mit einer Grundwelle (in der Spannung oder auch im Strom) im Zeitmittel (über jede Periode erneut) Null ergibt. Es muss also die gleiche Harmonische in beiden Eingän-

gen des Multiplikators auftreten, damit sie stören kann, und dann errechnet sich ihr Leistungsanteil, analog zu dem der Grundwelle, zu $U_n I_n \cos \Phi_n$. Wenn nun die Klirrfaktoren von der Grössenordnung 3 % sind, ergibt dies, bezogen auf die Leistung der Grundwelle, Fehler der Grössenordnung 0,03², also etwa 0,1 %, wobei allerdings die Unterschiede in den Phasenwinkeln von Grundwelle und Oberwelle noch zu berücksichtigen wären.

Abweichungen von diesem theoretisch erfassbaren Verhalten sind in zwei Richtungen möglich: einmal sind Leistungsmesser allgemein Geräte, die eher Tiefpass-Charakter haben, in denen also höhere Frequenzen zusätzlich abgeschwächt werden, was die Situation noch verbessert. Zum andern aber kann es auch vorkommen, dass diese Geräte nichtlineare Elemente enthalten und dadurch selber die Harmonischen erzeugen, welche an ihrem Eingang vielleicht noch fehlten. Wenn dies in beiden Kanälen des Multipliziergerätes geschieht, ist nichts mehr zu retten. Wenn aber nur ein Eingang auf diese Art fehlerhaft ist, ist es wesentlich, dass die Stromversorgung dem andern nicht die gleiche Harmonische zuführt.

Für die Messgenauigkeit an sich weniger nötig, aber für einen raschen Ablauf der Arbeit wichtig, ist die Starrheit der von den Quellen abgegebenen Spannungs- und Stromvektoren, das heisst die Unabhängigkeit ihrer Amplituden und Phasen von der momentanen Belastung. Dies bedingt Quellen von sehr kleinem (U) bzw. sehr grossem (I) Innenwiderstand.

6. Stromversorgung mit Verstärkern

Die erwähnten Überlegungen, zusammen mit vorhandenen Erfahrungen im Bau elektronischer Geräte, führten dazu, dass sich das AMG zum Bau einer vollständig neuen Zählerprüfstation entschloss, deren Speisung rein elektronisch durch je 3 Spannungs- und Stromverstärker erfolgt. Dieses Vorhaben war gemessen an den relativ kleinen Möglichkeiten des Amtes, recht bedeutend. In der Tat erforderte es eine Investition von etwa 3 bis 4 Mann-Jahren, hat also die Entwicklungskapazität der Sektion Elektrik und Elektronik fast so lange in Anspruch genommen. Andererseits war klar, dass die Bedürfnisse des Amtes als Grundlagen-Institut kaum alle durch ein käufliches Serie-Produkt erfüllt werden könnten. Dazu war voraussehbar, dass in nächster Zeit ein wesentlicher Schritt in Richtung Messgenauigkeit getan werden müsste, eine Prognose, die sich durch das Aufkommen der neuen elektronischen Leistungsmesser sehr rasch als richtig erwies. Die Anlage, deren definitive Gestaltung noch einige Monate beanspruchen wird, ist soweit vollendet, dass sie zu ersten Messungen verwendet werden konnte.

7. Gegenwärtiger Stand

Heute ist die Stromversorgung gebaut, in den Einzelgeräten definitiv, als System noch provisorisch zusammengestellt. Die Verstärker leisten ca. 250 VA bei beliebig kapazitiver oder induktiver Last. Die maximalen Spannungen in den verschiedenen Bereichen betragen $n \cdot 75 \text{ V}$ (75...300). Die Strombereiche sind 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 20; 40; 60; 80; 120; 160 A.

Verzerrungsmessungen ergeben Oberwellenanteile von -70 bis -84 dB, je nach Betriebszustand. Es ist mit der Anlage möglich, ein Dynamometer oder die neuen elektroni-

schen integrierenden Wattmeter über längere Zeit auf konstanter Anzeige zu halten, das heisst, mit Schwankungen von weniger als $2 \dots 4 \cdot 10^{-5}$. Damit ist die Ausgangslage für einen Vergleich hochpräziser Instrumente geschaffen. Die für einen solchen Vergleich je nach Messbereich notwendigen Wandler (deren Fehlervektor nur einige hundertstel Promille des Messwertes betragen darf) sind in einer ersten, konventionellen Ausführung gebaut. Falls nötig, sollen sie später durch elektronische Wandler ersetzt werden, also Gebilde, in denen die Magnetisierungsleistung für den Kern von einem Hilfskreis mit Verstärker aufgebracht wird [17].

8. Festlegung des Watt bei Wechselstrom

Während dem Bau der erwähnten Verstärker-Stromquelle hat leider die Entwicklung von Transfer-Wattmetern nicht in gleichem Masse Fortschritte erzielt. Ein elektronisches Transfer-Wattmeter (oder -Wattstundenmeter) befindet sich bei mindestens einer Firma im Bau, ist aber noch nicht lieferbar. Die Übertragung der in auswärtigen Instituten (z. B. in der PTB) durchgeführten Grundmessungen mit Hilfe von transportablen Eichgeräten wurde versucht, führte aber in ihren Ergebnissen eher zu wachsenden Unsicherheiten.

Dagegen erlaubt es die ausserordentliche Stabilität und Verzerrungsfreiheit der Verstärker, zwei bisher wenig verwendete Messverfahren wieder aufzugreifen. Beim einen werden die Spitzenwerte (oder Mittelwerte) von Strom und Spannung gemessen, sowie die Phasenverschiebung aus einer Zeitdifferenz der Null-Durchgänge oder aus einem Vektordreieck ermittelt. Das so entstehende Produkt $U I \cos \Phi$ zeigte in Vorversuchen recht gute Übereinstimmung mit unserem Transferwattmeter Goerz (ca. $\pm 0,02 \%$ bei $\cos \Phi = 1$ und $\pm 0,04 \%$ bei $\cos \Phi = \pm 0,5$).

Das zweite Verfahren besteht darin, ein elektrisches Kalorimeter abwechselnd mit Gleich- und Wechselstrom zu betreiben und die Heizleistungen zu vergleichen. Diese an und für sich sehr naheliegende Methode bedingt allerdings Stromquellen, welche die geforderten Amplituden mit genügender Genauigkeit über Stunden hinweg konstant halten, da die in Frage kommenden thermischen Zeitkonstanten fast eine Stunde betragen und eine Annäherung des stationären Zustandes auf 0,01 % einer Wartefrist von etwa 9 Zeitkonstanten oder einem Arbeitstag entspricht. Mit Verstärkern ist ein solcher Betrieb mit Schwankungen (innerhalb der letzten 2 h) von weniger als $\pm 0,01 \%$ möglich.

Literatur

- [1] O. Piller und L. Bauder: Die elektrischen Einheiten Ampère, Volt und Ohm. Definition, Realisierung und Weitergabe. Bull. SEV/VSE 66(1975)8, S. 413...420.
- [2] A. Palm: Elektrische Messgeräte und Messeinrichtungen. 4. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1963.
- [3] P. M. Pflüger und H. Jahn: Elektrische Messgeräte und Messverfahren. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1965.
- [4] R. Friedl: Elektrodynamische Leistungswage für die Prüfung von Elektrizitätszählern und Leistungsmessern. Zeitschrift für Instrumentenkunde 67(1959)12, S. 318...323.
- [5] F. J. Wilkins: Vielfach-Thermoumformer als Wechselstrom/Gleichstrom-Transfer-Instrument. Messtechnik 76(1968)10, S. 258...265.
- [6] F. L. Hermach: Thermal converters as AC-DC transfer standards for current and voltage measurements at audio frequencies. J. Res. NBS 48(1952)2, p. 121...138.
- [7] E. Merz: Auswanderungserscheinungen in erschütterten, drehschwingungsfähigen Messwerken. Teil I. ATM -(1968)384, S. 5...10.
- [8] E. Merz: Auswanderungserscheinungen in erschütterten, drehschwingungsfähigen Messwerken. Teil II. ATM -(1968)385, S. 29...32.
- [9] F. C. Widdis: The theory of Peltier- and Thomson-effect errors in thermal a.c.-d.c. transfer devices. Proc. IEE Part C. 109(1962)16, p. 328...334.

- [10] *F. J. Wilkins, T. A. Deacon and R. S. Becker*: Multijunction thermal converter. An accurate d.c./a.c. transfer instrument. Proc. IEE 112(1965)4, p. 794...805.
- [11] *F. Tschappu*: Die Verwendung des elektronischen Präzisionszählers als Gleichlast-Impuls-Eichzähler. Landis & Gyr-Mitteilungen, Elektrizität 19(1972)1, S. 17...20.
- [12] *H. Kohler, R. Stark und K. Walter*: Elektronischer Prüfzähler mit Time-Division-Multiplizierer. Siemens Z. 47(1973)12, S. 863...866.
- [13] *G. Kraus*: Zur Vorgeschichte der «Stochastisch-Ergodischen Messtechnik». Norma Technische Informationen 9(1972)1, S. 10.
- [14] *W. Wehrmann*: Das U-Functionmeter – ein stochastisches Vielfachmessgerät für die Signal- und Datentechnik. Norma Technische Informationen 9(1972)1, S. 11...18.
- [15] *G. Glaus*: Der Einfluss von Oberschwingungen auf die Anzeigegenauigkeit von Elektrizitätszählern. ATM -(1965)351, S. 85...90.
- [16] *F. Tschappu*: Messmethoden zur Bestimmung des Einflusses von Netzoberwellen auf die Messgenauigkeit der Elektrizitätszähler. Teil I. ATM -(1968)385, S. 33...36.
- [17] *R. Friedl*: Stromwandler mit elektronischer Fehlerkompensation. Messtechnik 76(1968)10, S. 241...250.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. *Pierre Koch*, Vizedirektor des eidg. Amtes für Mass und Gewicht, 3084 Wabern.

Lord John Napier (Neper) 1550–1617

Sir Archibald Napier, der Herr vom Schloss Merchiston bei Edinburgh, war noch nicht 16 Jahre alt, als ihm sein Sohn John geboren wurde. Mit 13 Jahren ging dieser für einige Zeit an das College St. Salvator in St. Andrews. Als 1563 seine Mutter starb, wurde John auf Anraten ihres Bruders, des Bischofs von Orkney, zur weitem Ausbildung nach Flandern oder Frankreich geschickt; darüber ist aber nichts weiteres bekannt. 1571 kehrte er nach Schottland zurück und heiratete im Jahr darauf. Den jungen Eheleuten wurde am Endrick Water das Schloss Gartnes gebaut, wo John Napier bis zum Tode seines Vaters lebte.

Schon bald nach der Heirat fing Napier mit mathematischen Studien an, doch wurden diese Arbeiten erst 1830 veröffentlicht. 1579 starb seine Frau, die ihm einen Sohn und eine Tochter geschenkt hatte. Bald darauf nahm er sich eine zweite Frau aus Perthshire, mit der er 5 Söhne und 5 Töchter zeugte.

Die Bewirtschaftung seiner und seines Vaters Ländereien beanspruchten ihn in dieser Zeit stark, dazu kam das Gezänk mit rebellierenden Pächtern. Nachdem Heinrich VIII. in England die Reformation eingeführt und eine eigene Staatskirche gegründet hatte, kam es zu langen Religionsstreitigkeiten. Napier war gegen den Katholizismus eingestellt. Von 1588 bis 1593 verfasste er eine Streitschrift, in der er König James VI. von Schottland (ab 1603 auch König von England) aufforderte, die weltweiten Ungeheuerlichkeiten zu reformieren und damit in der eigenen Familie und am Hof zu beginnen. Diese Schrift wurde ins Holländische, Französische und Deutsche übersetzt und fand weite Verbreitung.

Besorgt um die Sicherheit des Landes sann Napier auf Mittel zur Verteidigung und erfand dazu einen Brennspeigel, eine Kanone sowie schliesslich einen kugelsicheren Wagen, der von der Bemannung bewegt und durch Schießscharten verteidigt werden konnte. Ausser vor Anthony Bacon, dem ältern Bruder des Philosophen Francis Bacon, hielt er diese Erfindungen geheim. 1594 nahm Napier seine mathematischen Studien wieder auf. Sein grosses Verdienst ist die Erfindung der Logarithmen, die er zunächst «künstliche» Zahlen im Gegensatz zu den natürlichen nannte. Aus einem Brief eines Freundes Napiers an Tycho Brahe in Prag weiss man, dass er damals das Prinzip der natürlichen Logarithmen schon konzipiert hatte. Er brauchte aber noch volle 20 Jahre, um deren Theorie, ihre Berechnung und vor allem die Tabellen zu vollenden. In diese Zeit fällt auch die Einführung der dezimalen Brüche durch Napier.

Nach dem Tod seines Vaters (1608) übersiedelten die Napiers ins Stammschloss von Merchiston.

1614 erschien lateinisch geschriebenes Werk über die Logarithmen, das er Prinz Charles, dem nachmaligen König Charles I., widmete. Edward Wright übersetzte das Werk ins Englische.

Henry Briggs, ein Lehrer am Gresham College zu London, verwendete die Logarithmen sofort im Unterricht. Dabei stellte er fest, dass diese noch leichter anwendbar wären, wenn als Basis die Zahl 10 anstelle der Zahl e gewählt würde. Er setzte sich 1615 mit Napier in Verbindung, und dieser stimmte dem Vorschlag zu. Er versprach, zu den Briggschen Logarithmen eine Erklärung zu schreiben, kam aber nicht mehr dazu. Anfang 1617 machte sich Napier daran, das «langweilige Rechnen» überflüssig zu machen, indem er kleine Stäbchen aus Elfenbein herstellen liess. Diese, man nannte sie «Napiers bones» (Napiers Beine), waren Vorläufer unserer Rechenschieber.

Am 4. April 1617 starb Napier, überarbeitet und von Gicht gequält. Briggs publizierte seine Logarithmentabelle gegen Ende des gleichen Jahres. Die Logarithmen gaben Anlass zu einem Aufschwung der Wissenschaften, indem Rechnungen möglich wurden, die vorher kaum durchführbar gewesen wären.

H. Wüger



Larousse Paris (Hulton)