

Elektrische Quantennormale und praktische Messtechnik – Einführung und Übersicht

Uwe Siegner*

Die Metrologie, die Wissenschaft vom exakten Messen, nutzt in zunehmendem Maße Quanteneffekte und Quantentechniken [1]. Aufbauend auf den Fortschritten in der Atom- und Festkörperphysik, der Lasertechnik und Nanotechnologie sind Metrologen heute in der Lage, einzelne Quantenanregungen, wie Photonen, Elektronen oder Flussquanten, zu manipulieren und zu detektieren. Mithilfe dieses quantenmetrologischen Ansatzes lassen sich Einheiten auf Fundamentalkonstanten beziehen, so wie bereits im Jahre 1900 von Max Planck vorgeschlagen [2]. Derart definierte Einheiten sind universell, d. h. unabhängig von Artefakten, Materialeigenschaften und dem Ort. Eine etwaige zeitliche Drift ist vernachlässigbar. Sie ist durch eine etwaige zeitliche Änderung der Fundamentalkonstanten gegeben, für die nach heutiger Kenntnis eine obere Grenze im Bereich 10^{-16} pro Jahr angegeben werden kann [3]. Um diese Vorteile zu nutzen, plant die Meterkonvention, das Internationale System der Einheiten (SI) ab 2018 durch die Festlegung des Zahlenwertes von Konstanten zu definieren [4]. Die Bedeutung von Quantennormalen zur Darstellung und Weitergabe der SI Einheiten wird dadurch in Zukunft noch größer werden.

In der elektrischen Metrologie werden Quantennormale bereits heute in starkem Maße zur Reproduzierung und Bewahrung der elektrischen Einheiten genutzt. Das Volt, Einheit der elektrischen Spannung, wird mithilfe des Josephson-Effektes reproduziert. Zur Reproduzierung des Ohms, der Einheit des elektrischen Widerstandes, wird der Quanten-Hall-Effekt genutzt. Beide Quanteneffekte hängen nicht von den jeweils verwendeten Materialsystemen und den Details der verwendeten nanoelektronischen Schaltungen ab – die jeweiligen Ergebnisse stimmen auf dem Niveau von 10^{-9} und besser überein. Dieser Umstand zusammen mit der seit 1990 internatio-

nal geltenden Festlegung der Konstanten, die zur Auswertung der Quanteneffekte benutzt werden (konventionelle Josephson-Konstante K_{J-90} und konventionelle von-Klitzing-Konstante R_{K-90}), hat zu einer weltweiten Harmonisierung von Spannungs- und Widerstandsmessungen geführt. Davon hat die gesamte elektrische Messtechnik profitiert.

Die direkte Nutzung des Josephson- und des Quanten-Hall-Effektes war jedoch über lange Jahre nur sehr spezialisierten Instituten, in der Regel den nationalen Metrologie-Instituten an der Spitze der Kalibrierkette, möglich. Die Gründe dafür sind vielfältig. Zur Erzeugung metrologisch nutzbarer Josephson-Spannungen mit Amplituden in der Größenordnung 1 V bis 10 V müssen 10 000 bis 100 000 Josephson-Kontakte in einer Serienschaltung integriert werden. Eine verlässliche, industrietaugliche Fertigungstechnologie hierfür ist erst in den letzten Jahren entwickelt worden. Alternativ können mehrere Josephson-Schaltungen synchronisiert betrieben werden, sodass sich ihre Ausgangsspannungen addieren. Diese komplexe Messtechnik hat erst vor Kurzem beträchtliche Fortschritte gemacht. Die metrologische Nutzung des Quanten-Hall-Effektes in gebräuchlichen anorganischen Halbleiter-Heterostrukturen, wie GaAs/AlGaAs, erfordert besondere Messbedingungen: Temperaturen von 1 K und darunter und hohe Magnetfelder von etwa 10 T. Dies macht die Nutzung des Quanten-Hall-Effektes apparativ aufwendig und teuer. Abhilfe schaffen können neue Materialien, in denen ein robuster Quanten-Hall-Effekt bei höheren Temperaturen und niedrigeren Magnetfeldern auftritt. Ein solches Material ist Graphen, eine Schicht hexagonal koordinierter Kohlenstoffatome mit der Dicke einer oder weniger Atomlagen. Graphen findet seit wenigen Jahren Anwendung in der elektrischen Metrologie.

* Dr. Uwe Siegner,
Abteilung 2 "Elektrizität", E-Mail:
uwe.siegner@ptb.de

Im vorliegenden Band der PTB-Mitteilungen wird dargestellt, dass elektrische Quantennormale in den letzten Jahren erheblich praxistauglicher geworden sind. Einige Quantennormale werden bereits kommerziell angeboten und von Kalibrierlaboratorien eingesetzt. Kalibrierketten können dadurch verkürzt und Kalibrierungen automatisiert werden, was den Zeitaufwand und die Kosten senkt. Die Entwicklung praxistauglicher elektrischer Quantennormale ist einer der Eckpunkte der Strategie der europäischen Metrologieorganisation EURAMET e. V. im Bereich Elektrizität und Magnetismus. Die PTB arbeitet intensiv an der Umsetzung dieser Strategie, sowohl durch eigene Forschung und Entwicklung als auch im Rahmen von Technologietransfer-Programmen mit Partnern aus der Industrie.

Einen Schwerpunkt dieser Entwicklung bilden Josephson-Normale für Wechselspannungsmessungen. Im Beitrag von J. Kohlmann und O. Kieler wird die Fertigungstechnologie für Josephson-Spannungsnormale behandelt. Basierend auf der Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb-Technologie zur Herstellung von SNS-Josephson-Kontakten (S: Supraleiter, N: Normalleiter) können heutzutage programmierbare binäre Josephson-Wechselspannungsnormale mit Ausgangsspannungen von 10 V mit hoher Fertigungsausbeute hergestellt werden. Derartige Schaltungen bestehen aus etwa 70 000 Josephson-Kontakten. Die Fertigungstechnologie wurde erfolgreich in die Industrie transferiert. Die Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb-Fertigungstechnologie findet auch Anwendung für pulsgetriebene Josephson-Spannungsnormale. Pulsgetriebene Normale ermöglichen im Unterschied zu programmierbaren binären Josephson-Normalen die Erzeugung beliebiger Wellenformen, insbesondere auch spektral reiner Sinussignale.

Programmierbare binäre Josephson-Wechselspannungsnormale sind eine Kernkomponente von Quantenvoltmetern zur Messung von Wechselspannungen. Solche „AC-Quantenvoltmeter“ erlauben die automatisierte Messung von Wechselspannungen bis zu Frequenzen von etwa 1 kHz mithilfe von Abtastverfahren. Die Unsicherheit ist dabei 10⁻⁶ und besser. Erfasst wird die komplette Wellenform, nicht nur der Effektivwert wie bei den etablierten thermischen Verfahren zur Wechselspannungsmessung. Über den Stand der Entwicklung von AC-Quantenvoltmetern und den erfolgreichen Transfer der Technologie in die Industrie berichten R. Behr und B. Smandek.

Mit pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormalen lassen sich Form und Spektrum von Wechselspannungen exakt vorgeben. Das macht sie für metrologische Anwendungen besonders attraktiv. Lange Zeit waren jedoch die Spannungsamplituden auf wenige 100 mV begrenzt. Durch den synchronisierten Betrieb von bis zu acht

Josephson-Schaltungen konnte die Spannungsamplitude kürzlich auf 1 V erhöht werden. Diese Entwicklung, Messungen zur Verifizierung der Quantengenauigkeit pulsgetriebener Josephson-Spannungsnormale und erste messtechnische Anwendungen werden in dem Artikel von O. Kieler ausführlich beschrieben.

Impedanzmessbrücken dienen der Bestimmung von Impedanzverhältnissen rückgeführt auf Spannungsverhältnisse. In klassischen Impedanzmessbrücken werden die Spannungsverhältnisse mithilfe induktiver Teiler bestimmt. Alternativ können die Spannungen bzw. Spannungsverhältnisse mit Josephson-Spannungsnormalen bestimmt werden. Solche „Josephson-Impedanzmessbrücken“ bieten viele praktische Vorteile: Es lassen sich die Verhältnisse gleicher und unterschiedlicher Impedanzen messen, die Messung ist automatisierbar und kann über einen weiten Frequenzbereich erfolgen. Sowohl programmierbare binäre Josephson-Spannungsnormale als auch pulsgetriebene Josephson-Spannungsnormale kommen dabei zum Einsatz. Josephson-Impedanzmessbrücken sind das Thema des Artikels von S. Bauer und L. Palafox.

Für praxistaugliche Quanten-Hall-Widerstandsnormale wird ein Material mit einem zweidimensionalen Elektronensystem benötigt, das auch bei höheren Temperaturen, höheren Strömen und moderaten Magnetfeldern einen robusten Quanten-Hall-Effekt zeigt. Ein solches Material ist monolagiges Graphen. In dem Artikel von K. Pierz und M. Kruskopf wird die Herstellung von Graphen durch Dekomposition von SiC beschrieben. Für Quanten-Hall-Widerstandsnormale werden relativ große monolagige Graphenschichten benötigt. Bei deren Herstellung kommt der Substratvorbehandlung große Bedeutung zu. Auf die dafür entwickelten Verfahren wird besonders eingegangen. Die Magnetotransporteigenschaften von Quanten-Hall-Widerstandsnormalen aus Graphen werden in dem Artikel von F. J. Ahlers und J. Schurr adressiert. Graphenschichten zeigen hochreproduzierbare Widerstandswerte in Gleichstrommessungen. Auch erste Wechselstrommessungen haben vielversprechende Ergebnisse geliefert, deren Potenzial für die Impedanzmetrologie zurzeit intensiv untersucht wird.

Der letzte Artikel dieses Bandes von H. Scherer und D. Drung behandelt die Verstärkung kleiner Ströme und die Messung kleiner Stromstärken mit einem neuartigen Transimpedanzverstärker. Die Messungen werden auf den Quanten-Hall- und den Josephson-Effekt rückgeführt. Dabei liegt die Unsicherheit unter 10⁻⁷. Trotz seiner „Quantenwurzeln“ kann der Verstärker bei Raumtemperatur betrieben werden und ist praxistauglich. Entsprechende Geräte sind kommerziell erhältlich.

Abschließend sollen noch zwei weitere Punkte erwähnt werden, die die hohe Praxisrelevanz elektrischer Quantennormale illustrieren. Nach der Revision des SI wird das Kilogramm basierend auf der Planck-Konstante dargestellt und das Kelvin basierend auf der Boltzmann-Konstante. Zur Kilogrammdarstellung werden dann Wattwaagen eingesetzt werden, die mechanische und elektrische Leistung vergleichen. Die elektrische Leistung wird dabei rückgeführt auf Josephson-Spannungsnormale und Quanten-Hall-Widerstandsnormale. Zur Darstellung des Kelvins und zur Temperaturmessung kann Johnson-Rauschthermometrie eingesetzt werden. Das dazu erforderliche gut charakterisierte Quasi-Rauschsignal wird mithilfe von Josephson-Spannungsnormalen erzeugt. Das „elektronische Kilogramm“ und das „elektronische Kelvin“ zeigen, dass die Bedeutung praxistauglicher elektrischer Quantennormale in Zukunft noch steigen wird und über die elektrische Messtechnik hinausgeht.

Literatur

- [1] Ernst O. Göbel und Uwe Siegener, *Quantum Metrology, Foundation of Units and Measurements*, Wiley (2015), ISBN 978-3-527-41265-5.
- [2] Max Planck, *Ueber irreversible Strahlungsvorgänge*, Ann. Physik **1**, 69 (1900).
- [3] N. Huntemann, B. Lipphardt, Chr. Tamm, V. Gerginov, S. Weyers und E. Peik, *Improved limit on a temporal variation of m_p/m_e from comparison of Yb^+ and Cs atomic clocks*, Phys. Rev. Lett. **113**, 210802 (2014).
- [4] J. Stenger und J. H. Ullrich, *Für alle Zeiten ... und Culturen*, Physik Journal **13**, Nr. 11, 27 (2014).