

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Erhöhung der Ausgangsspannung des Quanten-Wechselspannungsnormals durch Steigerung der Integrationsdichte

Um die Komplexität pulsgetriebener 1-V-Josephson-Schaltungen zu verringern, wurden erstmals 4-fach gestapelte Kontakte und längere Ketten eingesetzt. Dadurch konnte die Anzahl der Josephson-Kontakte auf 14 000 pro Schaltung erhöht werden. Es wurden 4 statt 2 Schaltungen pro Chip integriert. In einem ersten Test wurde auf einem Chip mit 41 600 Kontakten eine Ausgangsspannung von mehr als 0,5 V RMS erzeugt. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Erste Josephson-Schaltungen für das Projekt „elektronisches Kelvin“ konzipiert und hergestellt

Für das in diesem Jahr gestartete Projekt „elektronisches Kelvin“ wurden Designs für geeignete Josephson-Schaltungen konzipiert und daraus mehrere Layouts erstellt. Erste Schaltungen wurden gefertigt und können demnächst charakterisiert werden. Mit bereits vorhandenen Schaltungen älteren Designs wurden exemplarisch Wellenformen synthetisiert, die eine synthetische Rauschspannung repräsentieren. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Geringere Unsicherheiten bei AC-DC-Transfermessungen bis 1 MHz mit dem JAWS in einem Mini-Kryostat

Bei Kalibrierungen mit Josephson-Wechselspannungen ist bei höheren Frequenzen der Einfluss der Kabel zwischen Chip und Prüfling zu berücksichtigen. Durch Halbierung der Kabellänge auf 0,6 m in einem Mini-Kryostaten gelang es in gemeinsamen Messungen mit dem VSL (Niederlande), die AC-DC-Transferdifferenz bei 1 MHz um mehr als eine Größenordnung auf 700 $\mu\text{V}/\text{V}$ zu reduzieren (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Al/AIO_x/Al-SQUID-Reihenschaltung als On-chip-Mikrowellenfilter gegen Einzelquanten-Streifelder bei mK-Temperaturen

Ein hocheffizienter On-chip-Mikrowellenfilter wurde für den Einsatz in Einzelquanten-Schaltungen bei $T \sim 100$ mK entwickelt. Der Filter besteht aus einer Reihenschaltung mit bis zu 40 Josephson-Interferometern (sogenannten „SQUIDs“) und zeich-

net sich durch einen variablen, frequenzabhängigen Unterdrückungsfaktor $g \sim 10^1 \dots 10^4$ für Photonen-Streifelder im Frequenzbereich $f \sim 100$ GHz bis 200 GHz aus. (S. Lotkhov, FB 2.4, sergey.lotkhov@ptb.de)

3D-Vektor-nanoSQUID-Detektor für die räumliche Erfassung des magnetischen Moments von Nanoteilchen

Eine vollständige Untersuchung von magnetischen Nanoteilchen erfordert hochempfindliche, dreidimensionale Sensorsmesstechniken. Die Magnetfeldsensoren sollten dabei nicht viel größer als die Objekte selbst sein. Dank der an der PTB vorhandenen Technologie zur Herstellung von NanoSQUIDs auf Basis von überdämpften Josephson-Kontakten wurde die Entwicklung eines kombinierten Detektors möglich. (V. Morosh, FB 2.4, viacheslav.morosh@ptb.de)

Frequenzmultiplexing von RF-SETs für Einzel-elektronenexperimente

Für die Realisierung des neuen Quantenstandards für das Ampere werden hybride Schaltungen aus halbleitenden Einzelektronenpumpen und metallischen Einzelektronentransistoren (SET) entwickelt. Die SETs sind in der Lage, einzelne Elektronen zu detektieren, und dienen dazu, die Genauigkeit der Pumpen zu validieren. Durch die Verwendung von RF-SETs kann eine höhere Bandbreite realisiert werden. (D. Reifert, FB 2.4, david.reifert@ptb.de)

Parametrischer Wanderwellen-Verstärker mit Dreiwellenmischung auf der Basis einer Serienschaltung von Einzelkontakt-SQUIDs

Parametrische Verstärker mit Josephson-Kontakten (JPAs) sind etablierte Werkzeuge für die Quanten-Informationstechnologie, wo besonders ein Bedarf an sehr breitbandigen Systemen besteht. Wir schlagen einen einfachen Wanderwellen-JPA vor, der sich durch hohe Verstärkung, große Bandbreite und geringes Rauschen am Quantenlimit auszeichnet, und stellen erste experimentelle Ergebnisse dazu vor. (A. Zorin, FB 2.4, alexander.zorin@ptb.de)

Ultra-dünner Kohlenstoffkondensator

In Zusammenarbeit mit der Universität Bielefeld wird ein substrat-freier Kohlenstoffkondensator im Nanometerbereich (*All-Carbon Nano Capacitor*, ACNC) entwickelt. Bei diesem umweltfreundlichen Konzept wird Graphen als Elektrodenmaterial und

eine Kohlenstoffnanomembran als Dielektrikum verwendet. (T. Weimann, FB 2.4, thomas.weimann@ptb.de)

Charakterisierung symmetrischer Photodetektoren

Symmetrische Photodetektoren, die für neuartige optische Kommunikationssysteme wichtig sind, wurden mit einem laserbasierten Netzwerkanalysator charakterisiert. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

Untersuchung der Anisotropierelaxation in Halbleitern

Ultraschnelle, optisch induzierte Ströme in Halbleitern ermöglichen die Untersuchung von Anisotropierelaxation mit einer Zeitauflösung im Subpikosekunden-Bereich. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

Detektion einzelner Elektronen aus einer Einzelladungspumpe nun auch im Magnetfeld möglich

Die in der PTB entwickelten Einzelelektronenpumpen ermöglichen den kontrollierten Transport einzelner Elektronen, die sich in situ detektieren lassen. Diese Form der Einzelladungsdetektion gelingt nun auch erstmals in einem äußeren Magnetfeld, das für die Präzision der Einzelelektronenquellen eine wichtige Rolle spielt. (L. Freise, FB 2.5, lars.freise@ptb.de)

Hervorragende Präzisionsmessungen an Graphen-Widerstandsnormalen aus Graphen-Monolagen

An der PTB ist es gelungen, Graphen auf einem Siliziumkarbid-Substrat großflächig und kontrolliert so abzuscheiden, dass dabei keinerlei Doppellagen mehr entstehen. Elektrische Präzisionsmessungen haben gezeigt, dass sich dieses Monolagen-Graphen hervorragend zur Herstellung von Quanten-Hall-Widerstandsnormalen eignet. (K. Pierz, FB 2.5, klaus.pierz@ptb.de)

Interferometrische VNA-FMR-Messungen mit verbesserter Empfindlichkeit

Mit einem interferometrischen Verfahren konnte die Empfindlichkeit breitbandiger ferromagnetischer Resonanzmessungen (FMR) um fast zwei Größenordnungen gesteigert werden. Auf diese Weise können zukünftig die magnetischen Eigenschaften einzelner Nanostrukturen mit FMR-Messungen untersucht werden. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

Einzelelektronenpumpe auf Basis einzelner Dotieratome

Einzelelektronenpumpen transportieren einzelne Elektronen mit hoher Frequenz und erzeugen so einen quantisierten Strom. Die PTB ist bereits führend in der Herstellung und Vermessung solcher Einzelelektronenpumpen aus Galliumarsenid. Nun konnte ein neuartiger Typ einer Einzelelektronenpumpe durch Nutzung einzelner Dotieratome in Silizium-basierten Nanostrukturen realisiert werden. (T. Wenz, FB 2.5, tobias.wenz@ptb.de)

Direkte Rückführung eines 10-nF-Kapazitätsnormals auf den Quanten-Hall-Widerstand mithilfe einer pulsgetriebenen Josephson-Impedanzmessbrücke

Die neue Impedanzmessbrücke der PTB nutzt spektral reine, quantengenaue Sinusspannungen, die von pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen (JAWS) erzeugt werden. Messungen mit dieser Brücke zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit Impedanzmessbrücken klassischer Bauart. Nun wurde diese Messbrücke erstmals genutzt, um ein 10-nF-Kapazitätsnormal direkt auf den Quanten-Hall-Widerstand zurückzuführen. (S. Bauer, FB 2.6, stephan.bauer@ptb.de)

Erste Messergebnisse der neuen pulsgetriebenen Josephson-Impedanzmessbrücke

Eine neue Impedanzmessbrücke an der PTB nutzt die spektral sehr reinen Sinusspannungen, die mit pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen erzeugt werden. Schon in den ersten Messungen mit dieser Brücke zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung mit anderen Josephson-Impedanzmessbrücken und mit kommerziellen Geräten. (S. Bauer, FB 2.6, stephan.bauer@ptb.de)

Hohe Beteiligung an der wichtigsten Fachkonferenz der elektrischen Metrologie: CPEM 2016

Die Abteilung *Elektrizität* der PTB beteiligte sich in hohem Umfang an der Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), welche vom 10.-15. Juli 2016 in Ottawa (Kanada) stattgefunden hat. Die CPEM ist die wichtigste Fachkonferenz auf dem Gebiet der elektrischen Präzisionsmetrologie. (H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

Heliumverflüssiger für die PTB in Braunschweig

In der Abteilung *Elektrizität* wurde im Mai 2016 ein Heliumverflüssiger in Betrieb genommen, der den PTB-Standort Braunschweig im Routinebetrieb mit Flüssighelium versorgt. Die Anlage deckt vor allem den Bedarf der Forschung, Entwicklung und An-

wendung von elektrischen Quantennormalen. Von der höheren Versorgungssicherheit mit Flüssighelium profitieren aber auch andere Arbeitsgebiete der PTB. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz.ahlers@ptb.de)

Graphen für die zukünftige Realisierung der Kapazitätseinheit

Graphen weist neben interessanten elektrischen Eigenschaften auch einen Quanten-Hall-Effekt auf, der für die Metrologie von großem Interesse ist, sowohl für die Realisierung der Widerstandseinheit Ohm als auch für die Realisierung der Kapazitätseinheit Farad. Eine an der PTB für herkömmliche GaAs-Proben entwickelte Schirmungsmethode wurde nun auch erfolgreich mit einer Graphen-Probe genutzt. (J. Schurr, FB 2.6, juergen.schurr@ptb.de)

Verbesserter Weltrekord bei Stromstärkemessung an Einzelelektronenpumpen

Die PTB hat ihren Weltrekord aus dem Vorjahr übertroffen, bei dem elektrische Ströme aus Einzelelektronenpumpen mit einem speziellen Messverstärker mit höchster Genauigkeit gemessen wurden. Die neue Bestmarke von 0,16 $\mu\text{A}/\text{A}$ relativer Messunsicherheit wurde durch Verbesserungen des experimentellen Aufbaus erreicht. Zudem wurde das Ergebnis in einer deutlich verkürzten Messzeit erzielt. (H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

Präziser Mikrovoltgenerator auf Basis eines pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormals

Auf Basis eines pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormals wurde ein präziser Mikrovoltgenerator entwickelt. Dieser Generator kann als Teil eines 1-V-Systems den Spannungsbereich bis hinunter zu 10 nV abdecken. Mit automatisierten Messungen wurde die hervorragende Eignung für einfache, aber quantengenaue Kalibrierungen von Nanovoltmetern und Lock-in-Verstärkern nachgewiesen. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

Erste metrologische Anwendung des 1 V Josephson Arbitrary Waveform Synthesizers der PTB

In einer ersten metrologischen Anwendung wurde der neue 1 V Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer (JAWS) der PTB zur Kalibrierung von Thermokonvertern genutzt. Dabei wurde ein Transkonduktanzverstärker des NMI Australien für die AC-DC-Messungen eingesetzt. (L. Palafox, FB 2.6, luis.palafox@ptb.de)

Weiterentwicklung des AC-Quantenvoltmeters zum Quantenkalibrator

Das AC-Quantenvoltmeter, ein auf dem Josephson-Effekt beruhendes Gleich- und Wechselspannungsmesssystem, wurde bereits früher zu einem industriellen Kalibrierlabor transferiert und dort akkreditiert. Im Rahmen eines Technologietransferprojekts wurde es zu einem Quantenkalibrator weiterentwickelt. Dafür wurden nur in Kalibrierlaboren ohnehin zur Verfügung stehende Geräte eingesetzt. (M. Bauer, FB 2.6, martin.bauer@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Umstellung auf verbesserten Messplatz für Brückennormal-Kalibrierungen ist abgeschlossen

Für die Kalibrierung von Brückennormalen wurde die Umstellung auf einen verbesserten Messplatz erfolgreich abgeschlossen. Der verbesserte Messplatz ermöglicht Brückennormal-Kalibrierungen in einem Frequenzbereich von 225 Hz bis 5 kHz bei deutlich verringertem Kalibrieraufwand. Im Vergleich zu der zuvor verwendeten Kalibriereinrichtung liefert dieser Messplatz unverändert kleine Unsicherheiten für Hochpräzisionsmessungen bei 225 Hz und stabilere Kalibrierbedingungen mit verringerter Unsicherheit zu hohen Messfrequenzen bis 5 kHz. (F. Beug, FB 2.1, florian.beug@ptb.de)

Weiterentwickeltes dynamisches Brückennormal für ein erweitertes Kalibrierangebot dynamischer Brückenverstärker

Für die Kalibrierung von dynamischen Brückenverstärkern wurde ein weiterentwickeltes dynamisches Brückennormal an den Fachbereich *Akustik und Dynamik* der Abteilung *Mechanik und Akustik* übergeben. Damit wird dort ein Kalibrierangebot für frequenzabhängige sinusförmige Signale sowie für besondere Signalformen (z. B. ein dynamisches Signal mit konstantem Untergrund oder beliebige nicht-sinusoidale Signale) entwickelt. (F. Beug, FB 2.1, florian.beug@ptb.de)

Verbesserte Kalibrierung kleiner Wechselstromstärken

Das Dienstleistungsangebot zur Einheiten-Weitergabe und Beratung für DAkkS-Laboratorien und andere NMIs wurde durch die Entwicklung und Inbetriebnahme von neuen Normalen für den Wechselstromstärke-Gleichstromstärke-Transfer verbessert. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

DC-Kalibrierung von AC-DC-Strommesswiderständen

Die geringere Messunsicherheit neuer AC-DC-Strommesswiderstände wird nur erreicht, wenn auch ihr Widerstand bei Gleichstrom genau bestimmt wird. Da Widerstandsmessbrücken bei hohen Stromstärken dafür ungeeignet sind, wurde ein Verfahren entwickelt, das eine erweiterte Kalibrierunsicherheit von $3 \cdot 10^{-6}$ erreicht. Nach weiterer Optimierung werden damit Werte $< 1 \cdot 10^{-6}$ möglich sein. (B. Schumacher, FB 2.1, bernd.schumacher@ptb.de)

Neue Hohlleitermikrokalorimeter und Leistungstransferstandards für den Millimeterwellenbereich

Für den Frequenzbereich 75 GHz bis 110 GHz wurde ein neuartiges Hohlleitermikrokalorimeter aufgebaut und in Betrieb genommen. (R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

Neuartige Messtechnik für Streuparametermessungen bis 110 GHz

Für den Frequenzbereich 0,1 GHz bis 110 GHz wurde ein neuartiger Streuparametermessplatz aufgebaut und in Betrieb genommen. (R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

Einflüsse der Freifeldmessplatzeigenschaften auf die Antennenkalibrierung

Zusammen mit der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg werden Fehlereinflüsse bei der Kalibrierung von Antennen auf Freifeldmessplätzen untersucht. Dabei sollen Messunsicherheitsbeiträge und ihre Auswirkungen sowohl auf die Abnahmemessung des Freifeldes als auch auf die eigentliche Antennen-Kalibrierung quantifiziert werden, um eine weitere Optimierung von Freifeldmessplätzen zu ermöglichen. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Neues Verfahren zur Bestimmung des Phasenzentrums und zur Korrektur der Mehrwegeausbreitung bei der Antennenkalibrierung

Im Rahmen einer Bachelor-Arbeit wurden neue Verfahren zur robusten Schätzung der Lage des Phasenzentrums und zur Korrektur von Effekten der Mehrwegeausbreitung bei der Antennenkalibrierung implementiert und validiert. Dies ist ein wichtiger Schritt hin zu einer Antennenkalibrierung mit geringer Messunsicherheit, die zukünftig von der PTB angeboten werden soll. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Netzwerkanalyse in Zeit- und Frequenzbereich erstmalig erfolgreich verglichen

Ein aus koaxialen und koplanaren Komponenten bestehendes Hochfrequenz-Bauteil ist erstmalig mit zwei völlig unterschiedlichen Netzwerkanalyse-Verfahren charakterisiert worden. Für Frequenzen im Bereich 10 GHz bis 110 GHz wurde eine gute Übereinstimmung zwischen konventionellen Netzwerkanalysatormessungen im Frequenzbereich und laserbasierten elektrooptischen Messungen im Zeitbereich erzielt. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

Entwicklung eines Messsystems für die Bestimmung der Verlustleistung von Komponenten zur Leistungssteuerung in Energieversorgungsnetzen

Die derzeit bei der Energieübertragung eingesetzten Komponenten für die Steuerung der Blindleistung wie beispielsweise Drosseln oder Kondensatoren weisen eine nicht zu vernachlässigende Verlustleistung auf. Die dadurch über die gesamte Betriebszeit akkumulierte Verlustenergie erreicht beträchtliche Größenordnungen. (E. Mohns, FB 2.3, enrico.mohns@ptb.de)

Neues Verfahren zur Bestimmung der Ausrichtung von Magnetfeldsonden

Die meisten Magnetfeldsonden messen die magnetische Flussdichte nur in einer Richtung oder, wenn sie aus mehreren Einzelsensoren bestehen, jeweils nur in Richtung jedes Einzelsensors. Die exakte Richtung der Einzelsensoren ist aber bislang nur schwer zu bestimmen. Mit einem neuen Messaufbau kann die exakte Ausrichtung aller Einzelsensoren zueinander nun präzise bestimmt werden. (N. Rott, FB 2.5, nicolas.rott@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Zusammenarbeit von PTB und Industrie bei der Entwicklung einer Testumgebung für das Smart Metering

Die PTB, der Netzbetreiber Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH (Mitnetz Strom) in Halle und das Unternehmen exceeding solutions, ein Spin-Off der Hochschule Merseburg, werden bei der Entwicklung einer Testumgebung für Smart-Meter-Gateways zusammenarbeiten. (C. Leicht, FB 2.3, christoph.leicht@ptb.de)

Rückführung virtueller Zählpunkte

Diskrete Messpunkte für elektrische Energie ermöglichen nur die Bestimmung der am jeweiligen Punkt geflossenen Energiemenge. In bestimmten Anwendungsfällen ist es aber notwendig, aus mehreren realen Energiezählern mithilfe von Berechnungsvor-

schriften virtuelle Zählpunkte zu bilden. In der PTB wird derzeit ein rückgeführter Prüfstand für abrechnungsrelevante virtuelle Zählpunkte aufgebaut. (M. Schmidt, FB 2.3, matthias.schmidt@ptb.de)

Metrologische Untersuchung von Reizstoffsprüngeräten und Elektroimpulsgeräten

Das Waffengesetz überträgt der PTB die Aufgabe, Reizstoffsprüngeräte (RSG) und Elektroimpulsgeräte (EIG) bezüglich der Einhaltung von Grenzwerten charakteristischer Merkmale zu untersuchen und zu zertifizieren. Dazu werden geeignete Mess- und Prüfverfahren entwickelt und die elektromedizinischen Wirkungen und Gefahren der EIG werden erforscht. (X. Guo, FB 2.3, xiaofei.guo@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Europäisches Metrologieforschungsprogramm: Erfolgreicher Abschluss von drei Projekten und Start eines neuen

Vom 18. bis 20. Mai fand in Prag ein Dissemination Workshop statt, bei dem die Ergebnisse von drei Forschungs- und Entwicklungsprojekten vorgestellt wurden, in denen im Rahmen des Europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP von Juni 2013 bis Mai 2016 Fragestellungen auf dem Gebiet verschiedener elektrischer Messgrößen bearbeitet wurden. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz.ahlers@ptb.de)