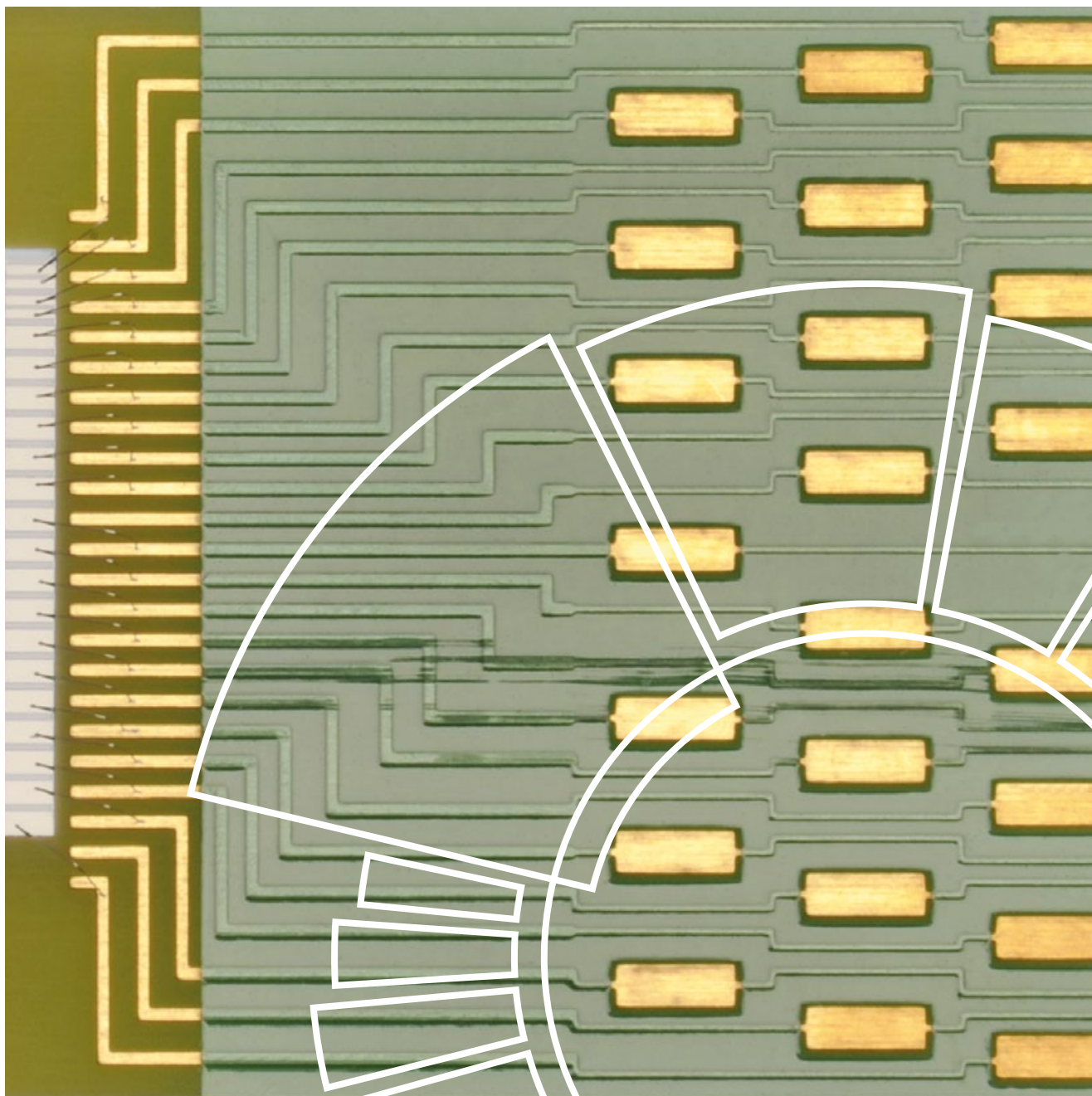


ABTEILUNG 2

## Elektrizität



# Elektrizität

Elektrische Messungen haben Querschnittscharakter. In nahezu allen Bereichen der Industrie, Technik, Wissenschaft und Medizin sowie bei der Umwelt- und Klimabeobachtung werden nichtelektrische Messgrößen in elektrische Größen umgewandelt. Daher nehmen elektrische Messungen eine Schlüsselrolle in der Metrologie ein.

## Elektrische Energie



Das Primärnormal der PTB für die elektrische Leistung.

In der Bundesrepublik Deutschland wird jährlich elektrische Energie im Wert von etwa 50 Mrd. Euro abgerechnet, entsprechend einem Verbrauch von rund 480 Mrd. kWh. Damit alles mit rechten Dingen zugeht, messen 42 Mill. Elektrizitätszähler den privaten Verbrauch in Haushalten und 650 000 über Messwandler angeschlossene Zähler den Energieverbrauch in der Industrie. Alle diese Messgeräte sind über eine Kalibrierkette auf das Normal für elektrische Leistung der PTB zurückgeführt. Dieses Normal nutzt das in der PTB entwickelte Verfahren der synchronen Abtastung und weist im weltweiten Vergleich die geringste Messunsicherheit auf. Damit wird sichergestellt, dass beim Verbraucher die elektrische Energie mit der erforderlichen Genauigkeit gemessen wird.

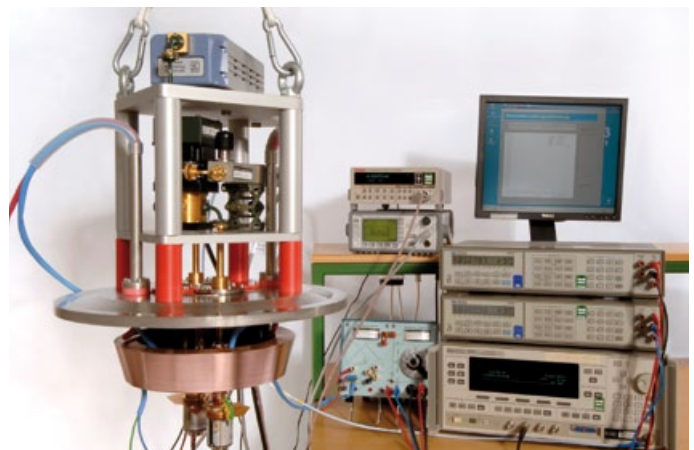
Elektrizitätszähler oder Messwandler, die zu Verrechnungszwecken eingesetzt werden, brauchen eine anerkannte Zulassung. Die PTB führt dazu nationale oder europäische Bauartprüfungen durch und erteilt pro Jahr im Schnitt 70 entsprechende Genehmigungen. Voraussetzung dafür ist, dass die Geräte alle messtechnischen Prüfungen bestanden haben, in denen ihre späteren Einsatzbedingungen möglichst realistisch simuliert werden.

Um die verstärkte Nutzung regenerativer Energien zu fördern und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, führt die PTB Forschungsarbeiten zum Ausbau intelligenter Stromnetze („Smart Grids“), zur Versorgungsqualität und zum verlustarmen Energietransport über große Entfernungen mit Hilfe der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung durch. ■

## Informations- und Kommunikationstechnik

Die Informations- und Kommunikationstechnik spielt eine Schlüsselrolle für die Entwicklung der heutigen Gesellschaft. Sie soll sicherstellen, dass jedermann an jedem Ort und zu jeder Zeit Zugriff auf die benötigte Information hat. Dazu müssen mobile, breitbandige Kommunikationseinrichtungen entwickelt werden, deren Anwendungen vom Verkehrsmanagement über die Umwelt- und Klimabeobachtung bis zur Medizin- und Sicherheitstechnik reichen. Für den Ausbau der Informations- und Kommunikationstechnik werden immer neue Frequenzbereiche erschlossen, da der Bandbreitebedarf neuer Anwendungen stetig zunimmt.

Die PTB unterstützt diese Entwicklung, indem sie die Hochfrequenz-, Feld- und Antennenmesstechnik zu höheren Frequenzen ausbaut, der Industrie entsprechende Normale zur Verfügung stellt und neue Kommunikationstechniken, wie die Informationsübertragung mit Terahertzwellen, untersucht.



Mikrokalorimeter zur rückgeführten Bestimmung der Kalibrierfaktoren eines W-Band-Leistungsmesskopfes im Frequenzbereich 75 GHz–110 GHz

Durch die zunehmende Verwendung elektromagnetischer Felder zur drahtlosen Kommunikation stellt sich die Frage nach den Auswirkungen der Felder auf die Gesundheit des Menschen. Zur Überwachung der Einhaltung der bestehenden Grenzwerte arbeitet die PTB an Verfahren zur Rückführung

der einschlägigen Messgrößen, wie der spezifischen Absorptionsrate. Um für die Untersuchung der Wirkung elektromagnetischer Felder auf biologisches Gewebe eine verlässliche messtechnische Grundlage zu schaffen, wird das Gebiet der Dosimetrie nichtionisierender Strahlung bearbeitet. ■

## Elektrische Größen für die Industrie

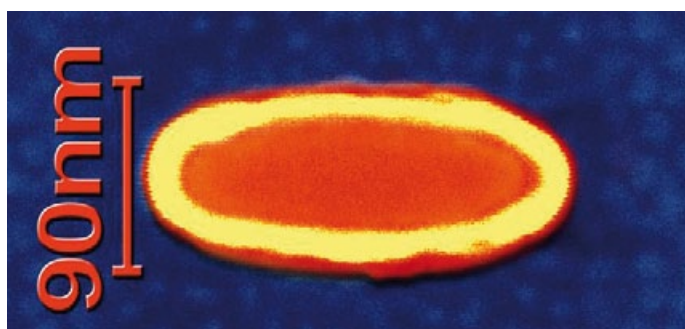
Derzeit sind durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) mehr als 100 Laboratorien in der Industrie für die Kalibrierung von elektrischen und magnetischen Messgrößen akkreditiert. Diese Laboratorien führen ihre Messungen auf die Normale der Abteilung Elektrizität der PTB zurück. Im Allgemeinen wünschen die Kunden von der PTB Kalibrierungen über einen weiten, mehrere Dekaden überspannenden Wertebereich bei unterschiedlichen Messfrequenzen. Dementsprechend groß ist die Anzahl der Messgrößen, für die die Abteilung Normale bereithalten muss. Die primäre Darstellung der elektrischen Einheiten erfolgt jedoch nur für einige Werte und bei einer festen Frequenz (meist bei der Frequenz null, d. h. mit Gleichstrommesstechnik).

Der Aufbau von Einheitenskalen über weite Werte- und Frequenzbereiche ist daher ein wichtiges Arbeitsgebiet der Abteilung. Es kommen diverse Verfahren der klassischen elektrischen Präzisionsmesstechnik zum Einsatz, wie z. B. Komparatorverfahren zur Rückführung von Gleichstrom-Widerständen auf einen bekannten Referenzwiderstand oder Brückenmesstechniken zur Weitergabe der Kapazitäts- und Induktivitätseinheit. Als Referenznormale kommen dabei die in der Abteilung entwickelten Quantennormale zum Einsatz. Wechselspannung und Wechselstrom werden bis zu Frequenzen von 1 MHz mithilfe thermischer Verfahren auf die entsprechenden Gleichstromgrößen zurückgeführt. Für den Wechsel-Gleich-Transfer bei technischen Frequenzen wurden Abtastverfahren entwickelt, die auch für die Kalibrierung des elektrischen Teils der Messkette bei der Rückführung nicht-elektrischer Größen wie Kraft, Druck, Drehmoment, Beschleunigung oder Temperatur verwendet werden.

Alle Verfahren werden ständig weiterentwickelt, um die aktuellen Anforderungen der Kunden der PTB zu erfüllen. ■



Kryostromkomparator-Messtechnik zum Vergleich von Gleichstrom-Widerständen für den Aufbau der Ohm-Skala.



Elektronenmikroskopische Aufnahme einer nanostrukturierten magnetischen Speicherzelle eines MRAM (Magnetic Random Access Memory).

## Magnetismus

Magnetische Effekte und Materialien sind unverzichtbar für Schlüsseltechnologien wie die elektrische Energietechnik, die Datenspeicherung oder die Sensorik. Daher bietet die PTB die Kalibrierung von magnetischen Feldgrößen und von wichtigen Kenngrößen magnetischer Werkstoffe an. Die Kalibrierungen werden rückgeführt auf das Primärnormal der PTB für die Einheit der magnetischen Flussdichte, die basierend auf dem gyromagnetischen Verhältnis des Protons in Wasser dargestellt wird. Im Rahmen des Technologietransfers unterstützt die PTB Unternehmen im Bereich der magnetischen Messtechnik, z. B. bei der Entwicklung von Magnetspulen, die spezielle Feldverteilungen erzeugen.

Ein aktives Forschungsgebiet ist die Messtechnik für nanomagnetische Strukturen und Systeme, die in der Datenspeicherung und Sensorik verwendet werden. Die Weiterentwicklung dieser Technologien erfordert unterstützende Messtechnik. Zur zeitaufgelösten Messung von Ummagnetisierungsprozessen mit Pikosekundenauflösung wurden daher verschiedene Magnetowiderstands-Messverfahren und induktive Verfahren realisiert. Neben der Bestimmung von Schaltzeiten können da-

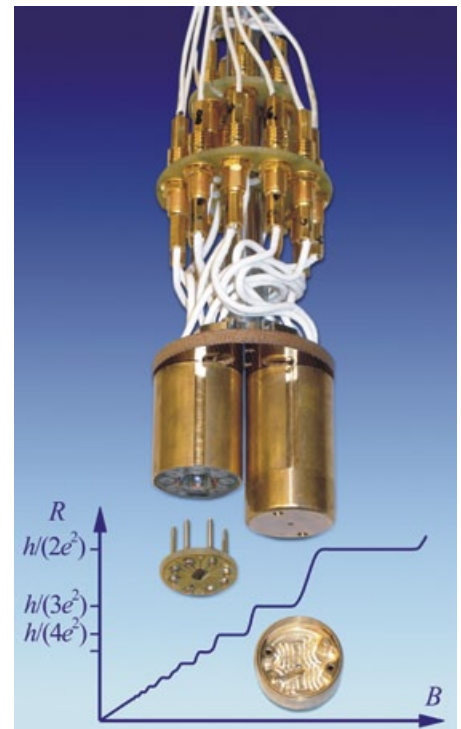
mit wichtige Kenngrößen metallischer und halbleitender ferromagnetischer Nanosysteme bestimmt werden. Ein Beispiel ist der kritische Strom in nanomagnetischen Speicherzellen, deren Magnetisierung durch spinpolarisierte Ströme geschaltet wird. Die Standardisierung und Rückführung dieser Messmethoden sowie die Untersuchung der zugrunde liegenden mikroskopischen Phänomene sind aktuelle Arbeitsrichtungen. ■

## Elektrische Quantennormale

Quantennormale basieren auf makroskopischen Quanteneffekten wie dem Josephson- und dem Quanten-Hall-Effekt, mit deren Hilfe sich die Einheiten von Spannung und Widerstand auf Fundamentalkonstanten zurückführen lassen. Sie erlauben die Reproduzierung elektrischer Einheiten mit einer Genauigkeit, die mit klassischen Verfahren nicht erreicht werden kann. Im Reinraumzentrum der PTB entwickelt und fertigt die Abteilung Quantennormale für Spannung und Widerstand für Anwendungen in der Gleichstrom- und Wechselstrom-Messtechnik. Die Arbeiten haben das Ziel, Quantennormale zunehmend für die Realisierung und Weitergabe der elektrischen Einheiten über erweiterte Werte- und Frequenzbereiche nutzbar zu machen.

Für die Messgröße Spannung steht die Entwicklung binär gestufter und pulsgetriebener Josephson-Reihenschaltungen für die Erzeugung beliebiger Kurvenformen mit fundamentaler Genauigkeit im Vordergrund. Der PTB ist es gelungen, eine Technologie zu entwickeln, die die Herstellung binär gestufter programmierbarer Josephson-Reihenschaltung mit 10 V Ausgangsspannung mit hoher Fertigungsausbeute erlaubt (SNS-Technologie). Die messtechnischen Entwicklungen konzentrieren sich auf den Einsatz dieser binär gestuften Josephson-Spannungsnormale zum Aufbau von Impedanzskalen und zur Weitergabe der Spannungseinheit bei technischen Frequenzen. Letztere Thematik wird in einem Technologietransferprojekt gemeinsam mit Partnern aus der Industrie bearbeitet.

Der Quanten-Hall-Effekt ist etabliert für die Reproduzierung des Gleichstrom-Widerstands, rückgeführt auf die Elementarladung und die Planck-Konstante. Für präzise Wechselstromanwendungen des Quanten-Hall-Effekts hat die PTB eine spezielle Schirmungstechnik für Quanten-Hall-Widerstände entwickelt, um störende Effekte zu unterdrücken, die Präzisionsmessungen verhindern würden. Mit einer speziellen Messbrücke ist es gelungen, die Kapazität mit einer Unsicherheit auf den Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekt zu beziehen, die besser ist als die Unsicherheit der klassischen Kapazitätsdarstellung. Daher soll die Kapazitätsskala der PTB in Zukunft von dieser Quantenkapazität abgeleitet werden. ■

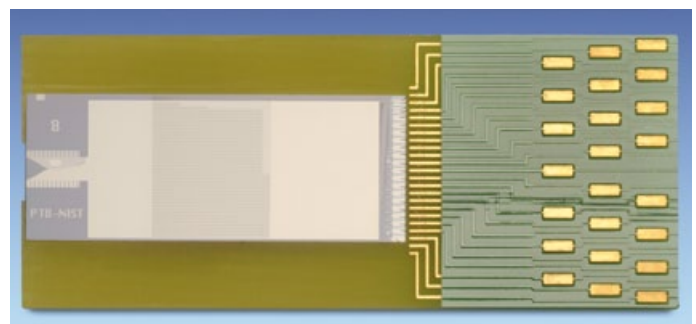


Halter für zwei geschirmte Quanten-Hall-Widerstände, die das Herzstück eines Quantennormals für die Kapazität bilden. Das Diagramm zeigt die Quantenstufen eines Quanten-Hall-Widerstandes.



l.: Molekularstrahl-epitaxie-Anlage zur Herstellung von Halbleiter-Quantennormalen wie Quanten-Hall-Widerständen.

r.: Programmierbares Josephson-Spannungsnormal in SNS-Technologie mit 70 000 Josephson-Kontakten und einer Ausgangsspannung von 10 V.



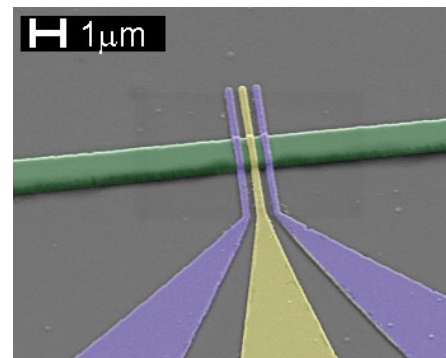
## Umsetzung der neuen Definition des Ampere

Die Meterkonvention plant, die SI-Basiseinheit Ampere basierend auf der Elementarladung neu zu definieren. Zur praktischen Umsetzung der geplanten Neudefinition entwickelt die PTB Quantenstromnormale. Aus messtechnischen Gründen müssen deren Stromstärken im nA-Bereich liegen.

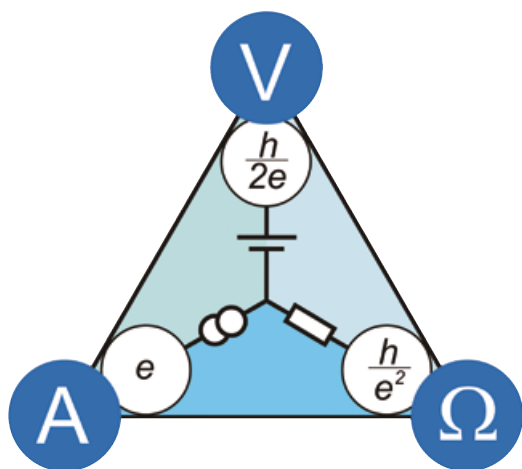
In den Quantenstromnormalen werden einzelne Elementarladungen bei Betriebsfrequenzen im GHz-Bereich kontrolliert durch mesoskopische Schaltungen transportiert. Halbleiter-Einzelelektronenpumpen haben sich bezüglich Betriebsfrequenz, theoretisch vorausgesagter Fehlerrate und der Anforderungen an die Betriebsbedingungen als sehr vielversprechender Ansatz erwiesen. Die PTB arbeitet an der Optimierung des Elektronentransports durch einen einzelnen Transportkanal sowie an der Parallelisierung mehrerer Kanäle zur Erhöhung der Stromstärke.

Um die Fehlerrate beim Transport einzelner Elementarladungen mit kleinen Unsicherheiten (besser als  $10^{-7}$ ) unabhängig zu bestimmen, werden hochempfindliche, quantenlimitierte Elektrometer zur Detektion einzelner Elementarladungen entwickelt. Diese Einzelladungsdetektoren sollen mit den Quantenstromnormalen kombiniert werden. Eine solche Kombination stellt ein „selbstreferenziertes“ Quantenstromnormal mit integrierter Fehlerdetektion dar und damit eine direkte „quellenbasierte“ Umsetzung der neuen Ampere-Definition.

Als Messgerät für die praktische Umsetzung der neuen Definition wird ein Quanten-Amperemeter entwickelt. In diesem Konzept werden Messungen der Stromstärke auf die Messung von Josephson-Spannungen an Quanten-Hall-Widerständen zurückgeführt. ■



Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Halbleiter-Einzelelektronenpumpe: Transportkanal (grün eingefärbt), Steuerelektroden (violett, gelb).



Verknüpfung elektrischer Einheiten mit Fundamentalkonstanten im quantenmetrologischen Dreieck,  $e$  ist die Elementarladung,  $h$  die Planck-Konstante.

## Grundlegende Quantenexperimente

Zur Absicherung der Grundlagen eines zukünftigen auf Fundamentalkonstanten, wie der Elementarladung und der Planck-Konstante, bezogenen Einheitensystems müssen grundlegende Quantenexperimente durchgeführt werden.

Im Bereich der elektrischen Metrologie arbeitet die PTB daran, die Konsistenz der Beschreibung des Josephson-Effekts, des Quanten-Hall-Effekts und des Einzelladungstransports durch die Elementarladung und die Planck-Konstante zu überprüfen. Dazu werden im sogenannten quantenmetrologischen Dreieck eine Josephson-Spannung, ein Quanten-Hall-Widerstand und ein Einzelelektronenstrom betrachtet. In dem Experiment wird der Spannungsabfall, den ein Einzelelektronenstrom beim Durchgang durch einen Quanten-Hall-Widerstand verursacht, verglichen mit der Josephson-Spannung, die man erwartet, wenn die heutige Beschreibung der Quanteneffekte exakt richtig ist. Aus diesem Vergleich lassen sich Obergrenzen für etwaige Abweichungen bestimmen. Angestrebt wird eine Unsicherheit besser als  $10^{-7}$ . Daher müssen alle Komponenten des quantenmetrologischen Dreiecks mit hoher Genauigkeit vor dem Experiment charakterisiert werden, was insbesondere für die Einzelelektronenstromquelle eine große experimentelle Herausforderung darstellt. ■

# Fachbereiche und Kontakt

## Abteilungsleiter

Dr. Uwe Siegner  
Telefon: (0531) 592-2010  
E-Mail: uwe.siegner@ptb.de

## Fachbereich 2.1 Gleichstrom und Niederfrequenz

- Gleichstrommesstechnik
- Verhältnismessungen, Abtastverfahren
- Wechselstrom-Gleichstrom-Transfer, Impedanz

Dr. Jürgen Melcher  
Telefon: (0531) 592-2100  
E-Mail: juergen.melcher@ptb.de

## Fachbereich 2.2 Hochfrequenz und Felder

- Elektromagnetische Felder und Antennenmesstechnik
- Hochfrequenzmesstechnik
- Grundlagen der Streuparametermesstechnik

Dr. Thorsten Schrader  
Telefon: (0531) 592-2200  
E-Mail: thorsten.schrader@ptb.de

## Fachbereich 2.3 Elektrische Energiemesstechnik

- Grundlagen der elektrischen Energiemesstechnik
- Hochspannungsmesstechnik
- Leistung und Energie, Prüfstellenwesen
- Konformitätsbewertung Messgeräte für Elektrizität
- Messwandler

Dr. Martin Kahmann  
Telefon: (0531) 592-2300  
E-Mail: martin.kahmann@ptb.de

## Sekretariat

Kirsten Schulz  
Telefon: (0531) 592-2011  
Telefax: (0531) 592-2015  
E-Mail: kirsten.schulz@ptb.de

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Abteilung 2: Elektrizität  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
www.ptb.de

## Fachbereich 2.4 Quantenelektronik

- Logistik und Betrieb Reinraumzentrum
- Einzelladungs- und Einzelflussquanten-Schaltungen
- Schaltungen für Josephson-Spannungsnormale
- Nanostrukturen für technische Anwendungen
- Makroskopische Quantenobjekte

Dr. Alexander Zorin  
Telefon: (0531) 592-2400  
E-Mail: alexander.zorin@ptb.de

## Fachbereich 2.5 Halbleiterphysik und Magnetismus

- Magnetische Messtechnik
- Nanomagnetismus
- Niedrigdimensionale Elektronensysteme
- Terahertz-Optik

Dr. Hans Werner Schumacher  
Telefon: (0531) 592-2500  
E-Mail: hans.w.schumacher@ptb.de

## Fachbereich 2.6 Elektrische Quantenmetrologie

- SET, Stromstärke und Ladung
- Quanten-Hall-Effekt, Widerstand
- Josephson-Effekt, Spannung

Dr. Franz Josef Ahlers  
Telefon: (0531) 592-2600  
E-Mail: franz-josef.ahlers@ptb.de

Aufgabe der Abteilung Elektrizität ist die Darstellung und Weitergabe der elektrischen und magnetischen Einheiten. Dazu führt die Abteilung Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der elektrischen Präzisionsmesstechnik durch. Grundlage für diese Arbeiten ist eine auf die Erfordernisse der elektrischen Quantenmetrologie zugeschnittene Nanotechnologie für die In-House-Fertigung von Supraleiter- und Halbleiter-Quantennormalen. Durch grundlegende Untersuchungen von Quantenphänomenen in Festkörpern erarbeitet die Abteilung die Basis für die elektrische Metrologie von morgen.

Die elektrischen und magnetischen Einheiten werden an Kalibrierlaboratorien der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAKKS) und der Industrie, an Landes-eichbehörden und staatlich anerkannte Prüfstellen für Messgeräte für Elektrizität sowie Universitäten und Forschungsinstitute weitergegeben. Die Abteilung berät Politik, Gesellschaft und Wirtschaft in Fragen der elektrischen Messtechnik und unterstützt die Industrie im Rahmen des Technologietransfers bei der Lösung messtechnischer Probleme. ■

