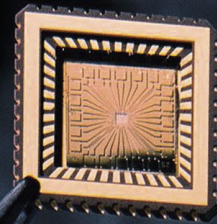


# Rückführung von HF-Messgrößen

Dieser Beitrag der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zeigt, wie die für Rohde&Schwarz wichtige Messgröße „Hochfrequenzleistung“ auf das nationale Primärnormal der Bundesrepublik Deutschland zurückgeführt wird.\* Er verdeutlicht, welcher immenser messtechnischer Aufwand nötig ist, damit schlussendlich Präzisions-Messgeräte mit wettbewerbsfähigen Eigenschaften hergestellt werden können.

\* Ein ergänzender Artikel ab Seite 34 beschreibt am Beispiel der HF-Leistung, welche Anstrengungen Rohde&Schwarz bei seinen Messgeräten unternimmt, damit die relevanten Messgrößen lückenlos und mit geringsten Verlusten an Genauigkeit auf anerkannte nationale Standards rückführbar sind.



# auf nationale Normale



Versuchsaufbau für ein Experiment zur Untersuchung der physikalischen Grundlagen für die Neudefinition der Basiseinheit Ampere (Kühlung mit flüssigem Helium).  
Foto: Marc Steinmetz / VISUM

## Rückgeführte Industriekalibrierungen – Voraussetzung für hohe Qualität und bessere Wettbewerbsfähigkeit

Präzise Messungen sind ein wichtiger Bestandteil der industriellen Qualitätssicherung und Voraussetzung für jede hochwertige Industrieproduktion. Aus den internationalen Normen für Qualitätsmanagementsysteme (DIN EN ISO 9000), aber auch im Zusammenhang mit Forderungen aus der Produkthaftung und dem Umweltschutz ergibt sich, dass Messgeräte kalibriert und damit auf nationale Normale zurückgeführt sein müssen. Auch Prüfergebnisse sind nur dann zuverlässig, wenn sie durch den Einsatz kalibrierter Messgeräte ermittelt wurden.

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ist das oberste Glied der Kalibrierhierarchie in Deutschland (BILD 1) und damit auch für die Darstellung der physikalischen Einheiten zuständig. Zu diesem Zweck betreibt sie physikalische Apparaturen, welche die Darstellung der wichtigsten Messgrößen auf höchstem Genauigkeitsniveau ermöglichen (Primärnormale). Der vom Staat und der Industrie gemeinsam betriebene Deutsche Kalibrierdienst (DKD) ist das nächste Glied in der Kalibrierhierarchie. Mit seinen über 300 akkreditierten Kalibrierlabors ist er für die Kalibrierung industrieller Messgeräte, insbesondere für die in der innerbetrieblichen Qualitätssicherung erforderlichen Gebrauchsnormale zuständig. Die in den DKD-Labors verwendeten Bezugsnormale werden von der PTB unter Bezug auf die Primärnormale kalibriert. PTB und DKD fördern damit die messtechnische Infrastruktur, verbessern die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie und leisten einen wesentlichen Beitrag zum Technologietransfer.

Die von Rohde&Schwarz in München, Memmingen und Köln betriebenen DKD-Labors stellen die Rückführung der in Rohde&Schwarz-Messgeräten relevanten Messgrößen (BILD 2) auf nationale Normale sicher und tragen damit entscheidend zur Qualitätssicherung bei.

### Thermistor-Leistungssensoren als Bezugsnormale für die HF-Leistung

Die Rückführung der für Rohde&Schwarz sehr wichtigen Messgröße „HF-Leistung“ erfolgt in der PTB durch die Kalibrierung spezieller Leistungssensoren, welche die DKD-Labors von Rohde&Schwarz in einem festgelegten Turnus einsenden. Es sind fünf verschiedene Typen, die den Frequenzbereich von 100 kHz bis 50 GHz abdecken. Oberhalb 18 GHz kommen ausschließlich Leistungssensoren mit Hohlleiter-Anschluss zum Einsatz, wobei es sich mit einer Ausnahme durchweg um Thermistor-Leistungssensoren handelt. Dieser Leistungssensortyp ist zwar in der industriellen Messtechnik bereits seit Jahrzehnten verschwunden, wegen seiner

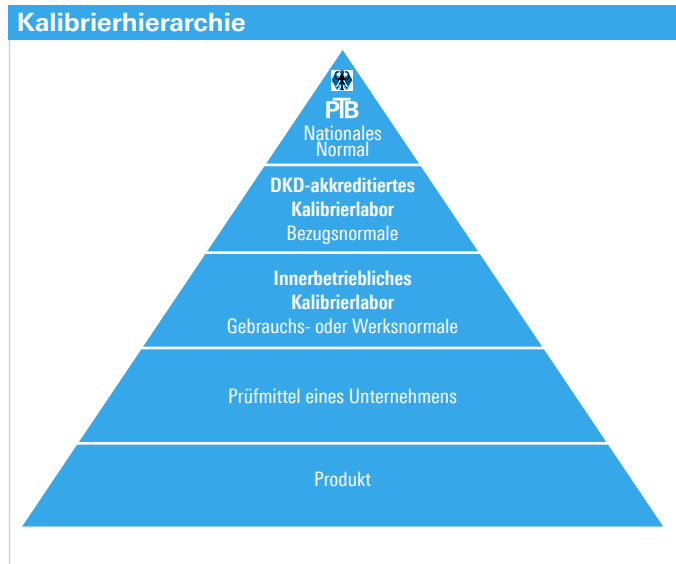


BILD 1 Die Kalibrierhierarchie in Deutschland.

DC-Größen	Gleichspannung, Gleichstromstärke, Gleichstromwiderstand
	Kapazität
NF-Größen	Wechselspannung, Wechselstromstärke
	Wechselspannungs-Gleichspannungs-Transferdifferenz
	Wechselstrom-Gleichstromstärke-Transferdifferenz
HF-Größen	HF-Leistung, HF-Dämpfung, HF-Impedanz
Zeit	Zeitintervall, Frequenz

BILD 2 Akkreditierte Messgrößen der DKD-Labors von Rohde&Schwarz.

hervorragenden Langzeitstabilität jedoch für Kalibrierzwecke vorzüglich geeignet.

Das Funktionsprinzip eines Thermistor-Leistungsmessers macht dies deutlich: Er enthält als leistungsabsorbierendes Element anstelle eines Abschlusswiderstands mit festem Wert einen stark temperaturabhängigen Widerstand (NTC), auch Thermistor genannt. Dieser Thermistor wird mit einer im Grundgerät erzeugten Gleichspannung so weit erwärmt, dass er sich auf einen Widerstandswert einstellt, der dem eines idealen Abschlusses entspricht, im Fall von Koaxialanschlüssen also auf 50 Ω. Wird dem Leistungssensor zusätzlich HF-Leistung zugeführt, so verringert eine Regelschaltung die Gleichspannung so weit, dass der Thermistor seinen Widerstandswert und damit seine Temperatur beibehält. Die im Thermistor in Wärme umgesetzte Leistung bleibt also konstant. Aus der Differenz der beiden Gleichspannungen kann

## Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt – das nationale Metrologieinstitut Deutschlands

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) erfüllt wissenschaftlich-technische Dienstleistungen für die Bürger und ist gleichzeitig technische Oberbehörde für das Messwesen. Ihren Ursprung hat die PTB in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR), die 1887 in Berlin auf Initiativen und nach Ideen von Werner von Siemens und Hermann von Helmholtz gegründet wurde. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Mit ihrer Arbeit sichert und fördert die PTB die Entwicklung und den Einsatz fortschrittlicher und zuverlässiger Messtechnik, wie sie für alle Bereiche in Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft wichtig ist (BILD 3).

### Richtige Messergebnisse und zuverlässige Messtechnik

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Maßangaben und zuverlässigen Messeinrichtungen, z. B. bei allen behördlichen Messungen, die für Zollzwecke oder zur Straßenverkehrsüberwachung vorgenommen werden, im Messwesen im geschäftlichen Verkehr, wo der Bürger als Verbraucher auf richtige Messergebnisse vertraut, sowie bei Messungen in Medizin, Umwelt-, Strahlen- und Arbeitsschutz. Diese Bereiche sind deshalb durch nationale und europäische Rechtsvorschriften geregelt. Messgeräte, die in den Verkehr gebracht werden, müssen eine Bauartzulassung haben. Das betrifft in Deutschland z. B. Waagen, Zapfsäulen, Gas- und Elektrizitätszähler, Taxameter und Verkehrsradar-

geräte. Die PTB nimmt hierzu eine Reihe gesetzlicher Aufgaben wahr, indem sie Bauartprüfungen an Messgeräten durchführt.

### Grundlagen der Metrologie und technologische Innovationen

Die Grundlagenforschung zu physikalischen Fragestellungen der Metrologie nimmt einen großen Umfang in der PTB ein und ist Basis aller Arbeiten. Schwerpunkte sind das Entwickeln nationaler Normale, das Bestimmen von Fundamentalkonstanten, das Nutzen von Quanteneffekten für die Darstellung der Einheiten, das Schaffen von Referenzmaterialien und das Bestimmen von Stoffeigenschaften.

Fundamentalkonstanten sind zeitlich und räumlich unveränderliche Größen. Sie sind daher geeignet, die gesetzlichen SI-Einheiten zu realisieren und zu reproduzieren (BILD 4).

Beispiele für die Rückführung der SI-Einheiten auf Naturkonstanten sind die Darstellung der Spannungseinheit Volt mittels des Josephson-Effekts oder der Widerstandseinheit Ohm mit Hilfe des Quanten-Hall-Effekts. Die Darstellung der Einheiten auf höchstem Niveau ist das Fundament des Messwesens und eine Grundaufgabe der PTB. Mit langfristigen Forschungsarbeiten sichert die PTB die Grundlagen der Metrologie, erweitert wissenschaftliche Erkenntnisse der Physik und trägt zu technischen Innovationen bei.

BILD 3 Gesetzliche Aufgaben der PTB (Auswahl).

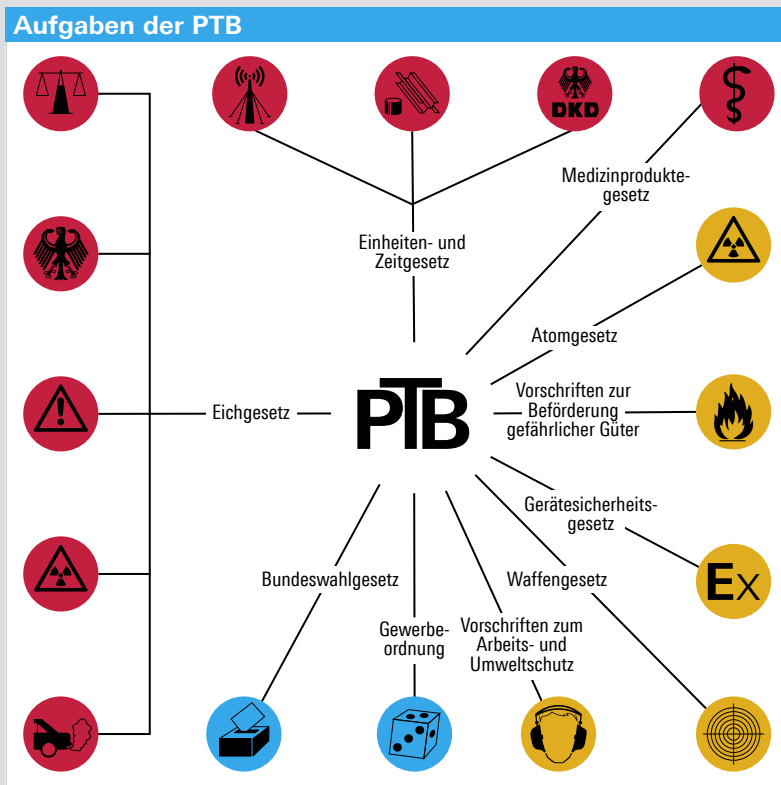
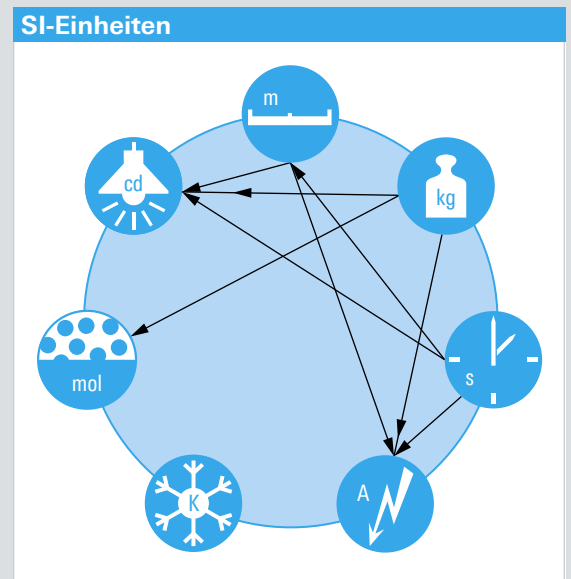


BILD 4 Die gesetzlichen SI-Einheiten.



das Grundgerät die durch die HF-Leistung substituierte DC-Leistung und damit näherungsweise die HF-Leistung messen. Die Eigenschaften des Thermistors, insbesondere die Stabilität seiner U(I)-Kennlinie, spielen dabei keine Rolle.

Die Ursache dafür, dass die HF-Leistung ohne eine zusätzliche Korrektur nur näherungsweise gemessen werden kann, liegt darin, dass in der Praxis nicht die gesamte HF-Leistung beim Thermistor ankommt, sondern ein Teil davon auf der Zuleitung zum Thermistor aufgrund des Skin-Effekts in Wärme umgesetzt wird. Die Regelschaltung kann diesen Anteil nicht ausgleichen, er ist damit zunächst unbekannt. Das Grundgerät zeigt daher ohne zusätzliche Korrekturmaßnahmen eine mit zunehmender Frequenz immer kleiner werdende Leistung an. Um diesen Effekt bei einer Messung zu berücksichtigen, muss der Anteil der Zuleitungsverluste an der absorbierten HF-Leistung ermittelt werden. Genau hier setzt die PTB bei der Kalibrierung von Thermistor-Leistungssensoren mit dem Einsatz von Mikrokalorimetern an.

### Primärnormal Mikrokalorimeter

Mit einem Mikrokalorimeter (BILD 5 und 6), das aus einem thermisch gut isolierenden Gefäß besteht, können die Dämpfung auf der Zuleitung und die Umwandlungsverluste im Thermistor bestimmt und ins Verhältnis zur absorbierten HF-Leistung gesetzt werden. Dazu wird die vom Leistungssensor innerhalb des Kalorimeters erzeugte Temperaturerhöhung ermittelt, und zwar zunächst bei aus- und dann bei eingeschalteter HF-Leistung. Die Messung wird mit einem elektrischen Thermometer, das aus einer Serienschaltung von Thermoelementen (Thermosäule) besteht, mit Bezug auf einen zweiten passiven Thermistor-Sensor durchgeführt. Bei ausgeschalteter HF-Leistung wird die Erwärmung ausschließlich durch die DC-Leistung verursacht, die den Thermistor auf Nenntemperatur bringt. Bei eingeschalteter HF-Leistung erfolgt eine zusätzliche Erwärmung durch die HF-Leistungsabsorption. Aus der Temperaturänderung und der Gleichspannungsänderung nach Anlegen der HF-Leistung erhält man den effektiven Wirkungsgrad:

$$\text{Effektiver Wirkungsgrad} = \frac{\text{DC-Substitutionsleistung}}{\text{Insgesamt absorbierte HF-Leistung}}$$

Mit Kenntnis dieser Größe lässt sich die Anzeige eines Thermistor-Leistungsmessers frequenzabhängig korrigieren. In der messtechnischen Praxis wird die Korrekturgröße „Effektiver Wirkungsgrad“ in den sogenannten Kalibrierungsfaktor umgerechnet, der die Reflexion des Sensors berücksichtigt und auf die Leistung der einfallenden Welle bezogen ist.

Aufgrund der großen Masse des Sensors liegen die Temperaturänderungen nur im Bereich eines Millikelvins (tausendstel Grad), und die Messzeit zum Erreichen des

thermodynamischen Gleichgewichts beträgt 60 min bis 90 min pro Frequenzpunkt. Daher ist für die Komplettkalibrierung eines Leistungssensors mit typischerweise 40 Frequenzpunkten bei üblicherweise mehreren Frequenzdurchläufen ein Zeitbedarf von einigen Tagen anzusetzen.

Um eine Erwärmung der Anordnung durch HF-Leitungsverluste außerhalb des Sensors zu minimieren, sind in die HF-Zuführungen thermische Isolationsabschnitte eingebaut. Der verbleibende Wärmefluss wird durch aufwendige Computersimulationen modelliert sowie durch Messungen experimentell bestimmt und korrigiert.

Nach diesem Funktionsprinzip führt die PTB Leistungskalibrierungen im Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 50 GHz durch. Es stehen dafür verschiedene Typen von Mikrokalorimetern zur Verfügung, u. a. eines für das 7-mm-Koaxialleitungssystem und drei für die Hohlleiterbänder von 18 GHz bis 50 GHz. Weitere Kalorimeter für höhere Frequenzen befinden sich zur Zeit im Aufbau.

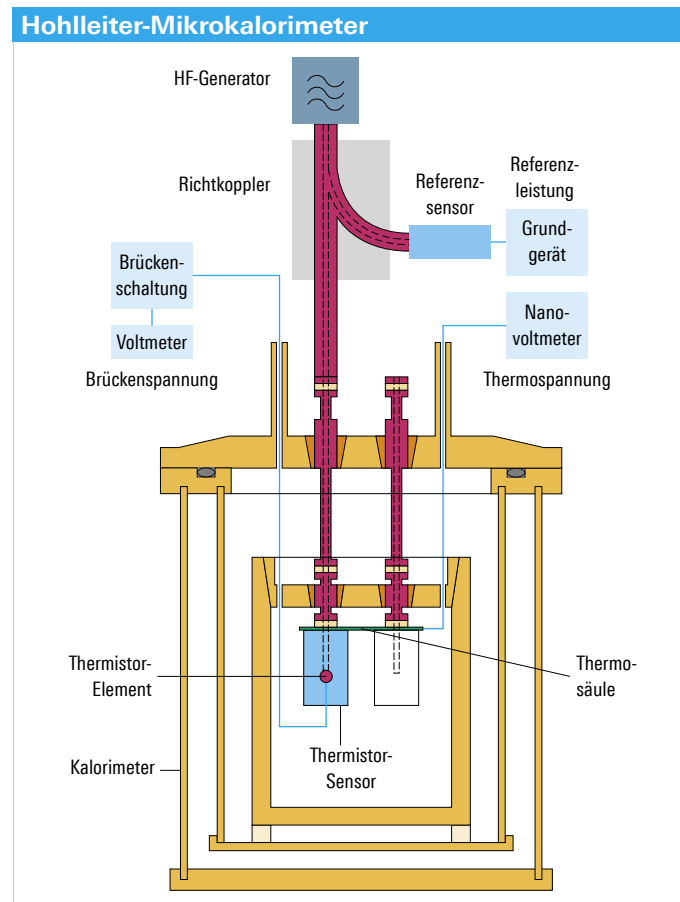


BILD 5 Hohlleiter-Mikrokalorimeter zum Bestimmen des effektiven Wirkungsgrads von Thermistor-Sensoren.

BILD 6 Hohlleiter-Mikrokalorimereinsatz mit Thermistor-Leistungssensoren.

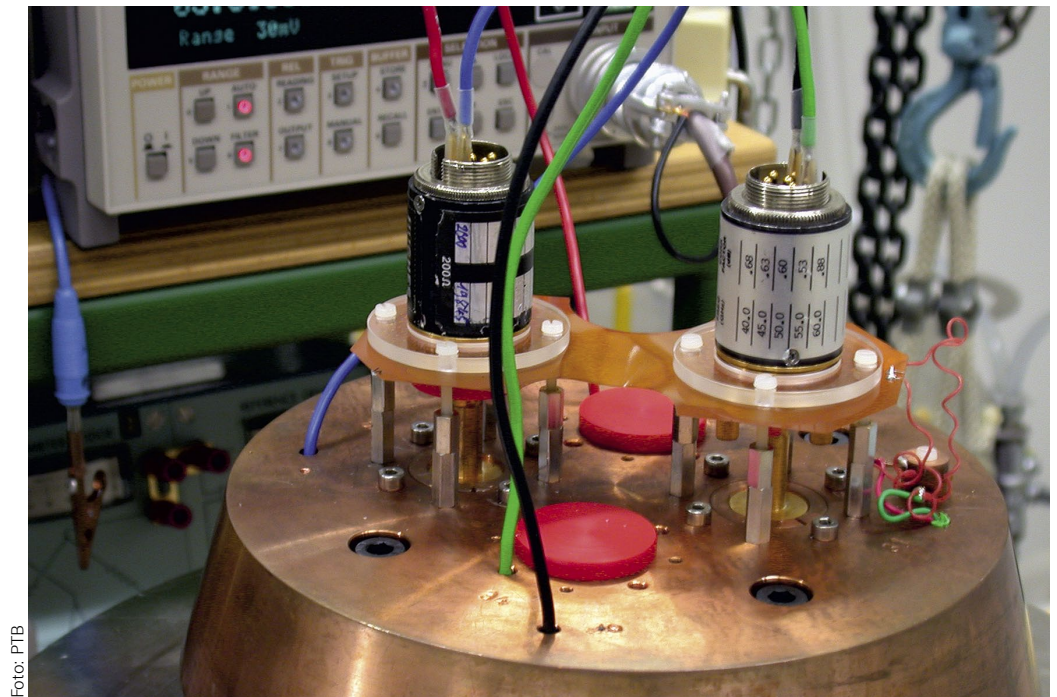


Foto: PTB

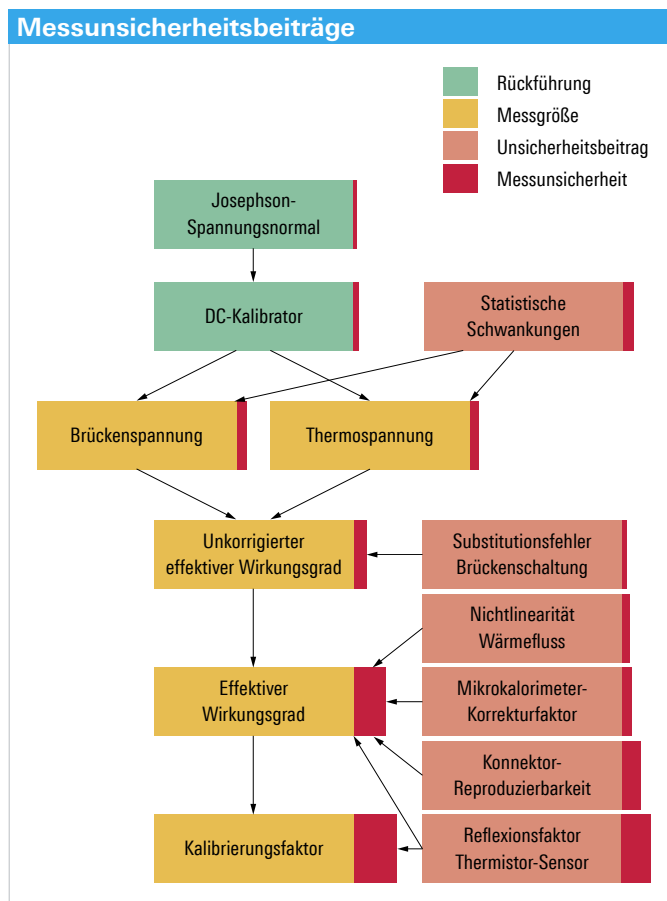


BILD 7 Rückführung und Messunsicherheitsbeiträge bei der Kalibrierung des effektiven Wirkungsgrades im Mikrokalorimeter.

### Rückführungskette und Messunsicherheit

BILD 7 illustriert die Rückführung der bei der Mikrokalorimeter-Kalibrierung auftretenden Messgrößen „Brückenspannung“ und „Thermospannung“ auf die Basiseinheit Spannung, welche über den Josephson-Effekt dargestellt wird. Darüber hinaus sind die dominierenden Messunsicherheitsgrößen und ihr Beitrag zur Gesamtmessunsicherheit qualitativ dargestellt. Es ist anzumerken, dass das Verhältnis zwischen den erweiterten relativen Messunsicherheiten der Basiseinheit Spannung (im Bereich  $10^{-9}$ ) und des effektiven Wirkungsgrades von Thermistor-Sensoren (im Bereich  $5 \times 10^{-3}$ ) mehrere Größenordnungen beträgt. Dies liegt an den Eigenschaften von Hochfrequenzschaltungen wie z.B. Fehlanpassung, Leitungsverlusten und einer begrenzten Konnektor-Reproduzierbarkeit, die selbst mit großem messtechnischen Aufwand nicht eliminierbar sind.

Dr.-Ing. Rolf Judaschke,  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt