

AC-Quantenvoltmeter für die Industrie

Ralf Behr*, Bernhard Smandek**

Die Bundesregierung beabsichtigt, mit der „Neuen Hightech-Strategie“ mehr Wachstum und Wohlstand durch Wissensvorsprung zu schaffen. Deutschland soll weiterhin Innovationsführer in internationalen Märkten sein. Dabei wird festgestellt, dass ein leistungsstarkes Messwesen Grundvoraussetzung hierfür ist. Denn: Nur das kann hochwertig produziert werden, was auch vermessen werden kann [1].

Die Darstellung und Weitergabe elektrischer Größen – hier der Einheit „Volt“ – nimmt aufgrund ihrer Bedeutung in Energie-, Steuerungs- und Digitaltechnik in dieser Strategie eine offensichtliche Rolle ein. Allerdings ist die Einführung der neuartigen Darstellungsform der Einheit „Volt“ komplex. Sie beruht auf Quanteneffekten, Lithografiertechnologien und ultrakalten Bauelementen. Wie es fast 100 Jahre von der Entwicklung der

* Dr. Ralf Behr,
Arbeitsgruppe 2.63
„Josephson-Effekt,
Spannung“, E-Mail:
ralf.behr@ptb.de

** Dr. Bernhard Smandek,
Q. 33 „Technologietransfer“, E-Mail:
bernhard.smandek@
ptb.de

Tabelle 1:
Historie der wichtigsten Entwicklungen zum Josephson-Spannungsnormale

| Meilensteine, Josephson-Spannungsnormale der PTB und des Technologietransfers | |
|---|--|
| 1962 | B. Josephson postuliert mögliche neue Tunneleffekte zwischen zwei Supraleitern. (1973 Nobelpreis für Physik) |
| 1963 | S. Shapiro weist die Stufen konstanter Spannung unter Mikrowelleneinstrahlung experimentell nach. |
| 1968-1971 | Die PTB beginnt, eine erste 1-V-Spannungsvergleichs-Apparatur auf Basis eines einzelnen Josephson-Kontakts zu entwickeln. |
| 1972 | Vergleiche des BIPM (<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>) mit NSL (Australien), NPL (Großbritannien), NBS (heute NIST, USA) und der PTB stimmen auf besser als 10^{-7} überein. Erste, allerdings weltweit nicht einheitliche, Festlegungen der Josephson-Konstante: $K_J = h/2e$, mit $K_{J-72} = 483594$ GHz/V für die Bundesrepublik Deutschland. |
| 1984 | Die PTB entwickelt zusammen mit dem NBS das erste Josephson-Spannungsnormal-Array für 1 V Gleichspannung mit mehr als 1000 Kontakten und einer Unsicherheit von besser als 10^{-8} . |
| 1990 | Erstes Josephson-Spannungsnormal-Array für 10 V (Gleichspannung) und bis heute gültige Festlegung der Josephson-Konstante $K_{J-90} = 483597,9$ GHz/V. |
| 1995 | Das NIST schlägt programmierbare Josephson-Kontakte für Wechselspannung vor. |
| 1996-1999 | Die PTB transferiert die Technologie für 10-V-Josephson-Gleichspannungsnormale an die PREMA und ans IPHT, heute werden die Schaltungen und Systeme von der Supracon AG vertrieben. |
| 1996-2006 | Die PTB entwickelt programmierbare Josephson-Spannungsnormal-Arrays: 1998 erstes 1-V-Array für Gleichspannung und ab 2001 für Wechselspannung; weltweit erste 10 V für Gleichspannung (2000) und Wechselspannung (2006). |
| 2008-2014 | Die PTB transferiert die Technologie für programmierbare 10-V-Josephson-Schaltungen an die Supracon AG und entwickelt zusammen mit der esz AG und der Supracon AG das AC-Quantenvoltmeter. |
| 2014 | Grundlagenforschung für die nächste Generation: erstes pulsgetriebenes Josephson-Spannungsnormale für 1 V. |
| 2015 | Markteinführung des AC-Quantenvoltmeters durch die Supracon AG. |

Relativitätstheorie zur Nutzung im Fahrzeug-Navigationssystem dauerte, so vergingen auch von der Postulierung des Josephson-Quanteneffektes bis zum ersten Transfer für eine wirtschaftliche Verwertung über drei Jahrzehnte, wie in der Tabelle 1 dargestellt. Heute jedoch nimmt in der elektrischen Quantenmetrologie die Entwicklung von Spannungsnormalen, die auf dem Josephson-Effekt beruhen, für einen größeren Anwenderkreis außerhalb der führenden Nationalen Metrologieinstitute (NMI) eine Vorreiterrolle ein.

Die Rückführung auf eine Naturkonstante hat dabei den „Charme“, praktisch in jedem Laboratorium der Welt das „Volt“ mit höchster Präzision darstellen zu können – vorausgesetzt, die geeignete Technologie steht dem Kalibrierlabor zur Verfügung. Der Weg dorthin soll hier erläutert werden. Das Bild 1 zeigt die Information für Mitarbeiter verschiedener nationaler Institute.

In einem ersten Teil wird auf Schwierigkeiten und Herausforderungen des neuartigen Wirkprinzips, das „differenzielle Abtastsystem“, eingegangen und dargelegt, wie mit höchster metrologischer Präzision der „*proof of principle*“ gelang. Durch gemein-

same Forschungen mit anderen Nationalen Metrologieinstituten wurde das Konzept konsolidiert und verbessert.

In einem zweiten Teil wird exemplarisch beleuchtet, wie durch eine effiziente Verzahnung von europäischen und nationalen Förderprogrammen mit unterschiedlicher Anwendungsnähe konsolidierte Erkenntnisse metrologischer Grundlagenforschung in die Wirtschaft und insbesondere an KMU (kleine und mittlere Unternehmen) transferiert wurden.

Mit einem AC-Quantenvoltmeter bis 10 V und 1 kHz steht bereits ein einzigartiges kommerzielles Gerät zur Verfügung. Wie die Entwicklung absehbar weiter gehen wird, beleuchtet der abschließende Teil des Artikels.

Technologisches Konzept

Prinzip des differenziellen Abtastens

Zur Messung von Wechselspannungen nutzt man Abtastverfahren, beispielsweise durch Analog-Digital-Konverter (ADC), bei denen die veränderliche Spannung wiederholt in schneller Folge gemessen (abgetastet) wird. Der Verstärkungsfaktor und die interne Spannungsreferenz des Abtastvoltmeters begrenzen dabei jedoch die erreichbare Unsicherheit, sodass solche Systeme auf Messunsicherheiten im Bereich 10^{-6} begrenzt sind. Dies kann man praktisch vollständig vermeiden, indem die abgetastete Spannung direkt mit der Spannung eines Josephson-Quantennormals verglichen wird, die bei einem Volt besser als 0,1 nV bekannt ist. Im folgenden Bild 2 ist dieses Verfahren illustriert.

Das grundlegende Schaltungskonzept beruht auf der Differenzbildung zwischen dem Quantennormal und der „*Device Under Test*“ (DUT), als dem zu kalibrierenden Spannungsgenerator. Der Komparator gibt nur die Differenz als Messwert nach außen und nicht den hohen Absolutbetrag. Dadurch wird automatisch mit hoher Linearität und sehr hoher Genauigkeit gemessen. Skalierungsprobleme traditioneller ADC treten nicht auf.

Im linken Bereich von Bild 2 erfolgt die Synthese der Wechselspannung bis 10 V mittels programmierbarer Josephson-Reihenschaltungen. Auf dem auf 4,2 K abgekühlten 10-V-Chip befinden sich bis zu 69 632 supraleitende, mit einer Mikrowellenfrequenz von 70 GHz versorgte Tunnel-elemente, sogenannte Josephson-Kontakte. Sie sind auf Segmente mit 1, 2, 4, 8, 16, ... Kontakten verteilt [2]. Schnell schaltbare Stromquellen steuern einzelne Segmente so an, dass quantisierte Teilspannungen erzeugt werden, die sich zur Gesamtspannung addieren. Da ein Schaltvorgang weniger als 100 ns benötigt, kann die sich langsamer ändernde Spannung der DUT, die gemessen werden soll, jederzeit mit einer genau bekannten quantisierten Spannung kompensiert werden.



Bild 1
Vorführung des Supracon-AC-Quantenvoltmeters im Rahmen einer „Knowledge-Transfer-Woche“ im Sommer 2015. Die Veranstaltung fand im Rahmen des europäischen Projektes EMPIR-ACQ-PRO statt und war an Vertreter aufstrebender NMIs gerichtet. Im Bild zu sehen sind Vertreter des FER (Kroatien), CEM (Spanien) und TUBITAK (Türkei).

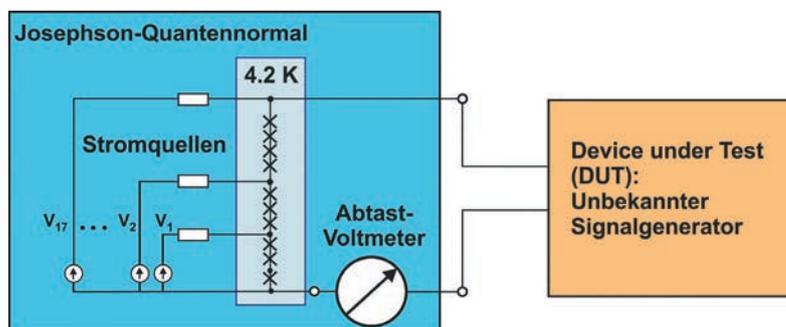


Bild 2:
Wirkprinzip des differenziellen Abtastens. Die blau markierten Bereiche zeigen die Komponenten des AC-Quantenvoltmeters. Der zu kalibrierende AC-Signalformgenerator (DUT) ist in Orange dargestellt.

Bild 3 beschreibt den Vorgang im Zeitbild. Die direkte Messung der Wechselfspannung mit einem Abtastvoltmeter, also einem traditionellem ADC, ist in Bild 3 a gezeigt. Die Messwerte um die Maximalspannungen hängen dabei sehr vom Verstärkungsfaktor und der Linearität des Instruments ab. Das Prinzip der Quantenmessung ist in den Teilen b und c dargestellt. Durch präzise Synchronisierung der zu messenden Wechselfspannung wird die rote Sinuswelle des Signalgenerators in Bild 3 b mit dem stufenförmigen Signal des AC-Quantenvoltmeters (blaue Kurve in Bild 3 b) überlagert. Ein ebenfalls synchronisiertes Abtastvoltmeter (Komparator) misst dann die resultierende, kleine Differenzspannung mit hoher Empfindlichkeit (Bild c). Aus diesen Messungen und den bekannten, quantengenauen Spannungsstufen kann dann die Sinuswelle präzise bestimmt werden. Da in dem System die Stufen zwar eine hohe Präzision im dargestellten Spannungswert besitzen, die Sinuswelle aber nur unzureichend approximieren, wird eine Integration durchgeführt

Erster proof of principle und Validierung

Gehen wir die Komponenten in Bild 2 einzeln durch, so ergibt sich folgendes Bild: Schnell schaltbare Josephson-Systeme sind in der PTB seit 1998 (1 V) und 2006 (10 V) verfügbar, wie in der Tabelle 1 dargestellt. Synchronisierung und Abtast-Null-detektor (Komparator) stellten ebenfalls experimentell handhabbare Einflussfaktoren dar.

Eine Marktübersicht ergab jedoch, dass für die zu kalibrierende Quelle, das DUT, wenige Geräte infrage kommen, wobei es unsicher war, ob die Messunsicherheit ihrer Ausgangssignale klein genug war, um überhaupt einen positiven Test auf das neue Konzept durchführen zu können.

Deshalb wurde hausintern beschlossen, eine hochpräzise Quelle als Signalgenerator zu schaffen: Ein zweites Josephson-System wurde aufgebaut. Dieser Josephson-Generator konnte zum damaligen Zeitpunkt jedoch keine Sinusspannung erzeugen, sondern nur deren Rechtecknäherung [Bild 4].

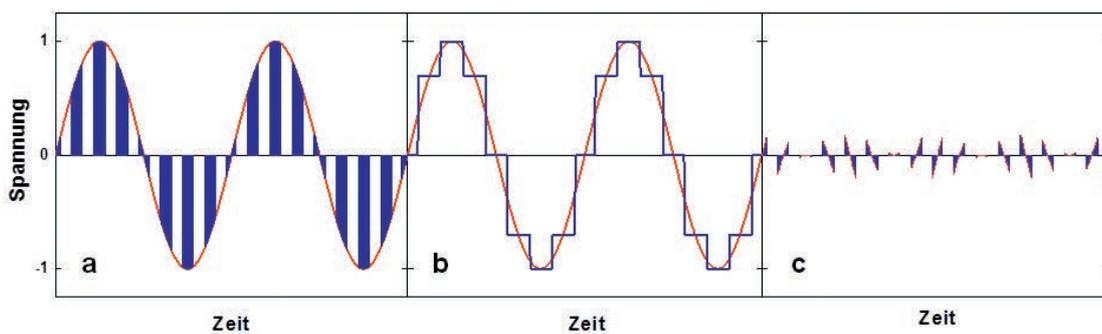


Bild 3: Schematische Darstellung des differenziellen Abtastens. In 3 a ist das direkte Abtasten gezeigt, in 3 b die Überlagerung der Wechselfspannung (rote Sinuswelle) mit den Spannungsstufen des Josephson-Normals und in 3 c die verbleibenden Differenzspannungen.

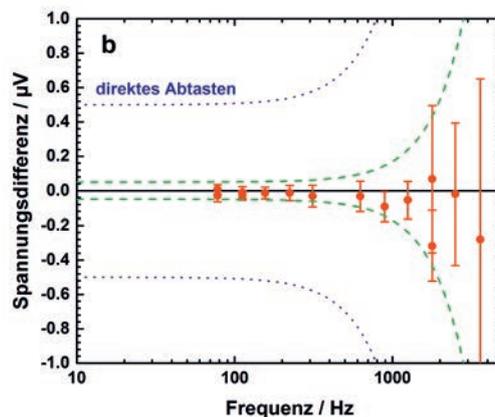
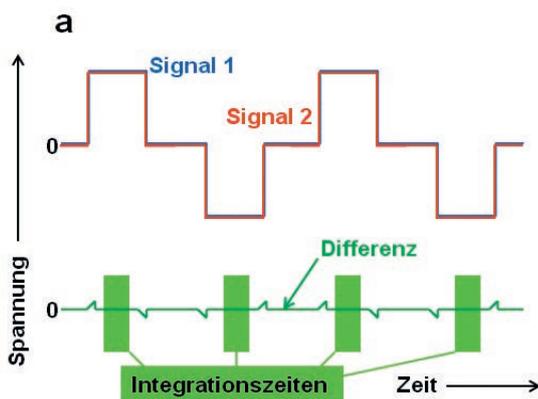
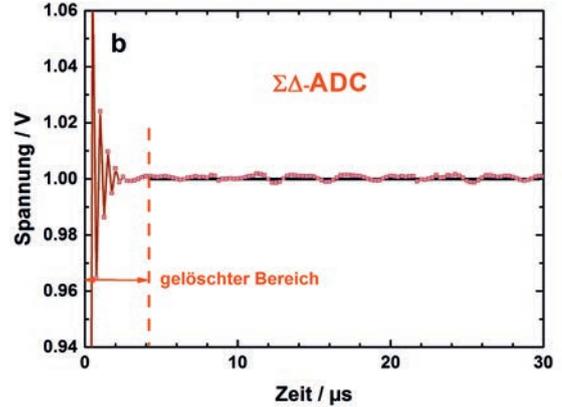
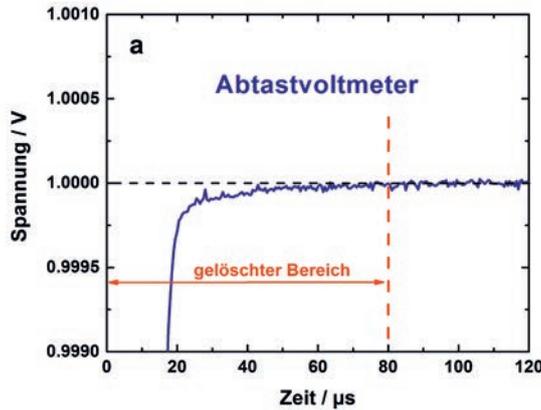


Bild 4 a, b: Ergebnis des ersten Vergleichs von zwei Josephson-Quellen mit differenziellen Abtastverfahren. In 4 a ist im oberen Teil der Kurvenverlauf der beiden Josephson-Systeme gezeigt, unten die Differenzspannung mit den Integrationsfenstern des Abtastvoltmeters. In 4 b sind die Messergebnisse für den Frequenzbereich von 80 Hz bis 3,5 kHz gezeigt. Die gestrichelte grüne Linie zeigt den Verlauf der Messunsicherheit für das AC-Quantenvoltmeter im Vergleich zum direkten Abtastverfahren mittels ADC (blau gepunktete Linie).

und der Durchschnittswert mit dem des Quantenvoltmeters verglichen. Die Integrationsfenster können dabei über verschiedene Verzögerungen auf die quantisierten Stufen zentriert werden. Auch sind Phasenverschiebungen der Wellenformen gegeneinander und die Anzahl der Josephson-Stufen pro Periode leicht variierbar. Auf diese Weise kann zum Beispiel die Unabhängigkeit des Messergebnisses von den Einstellungen des Abtast-Nulldetektors geprüft werden.

Diese einfache Wellenform hat nur wenige Transienten pro Periode und bietet lange Integrationszeiten. Die etwas unterschiedlichen Transienten der beiden Josephson-Normale verursachen kleine Spannungsspitzen (Peaks), die von der zeitlichen Positionierung der Integrationszeiten, als grüne Rechtecke in Bild 4 dargestellt, ausgeblendet werden. Erste Messungen mit programmierbaren 1-V-Josephson-Arrays ergaben hervorragende Übereinstimmungen mit den theoretisch berech-

Bild 5 a, b:
 5a zeigt das typische Einschwingverhalten eines Abtastvoltmeters. Innerhalb der ersten 20 μs nähert sich das Abtastvoltmeter dem neuen Wert bis auf 10^{-4} . Dann setzt eine lange Zeitkonstante ein. Erst nach etwa 80 μs wird der neue Wert vollständig erreicht. Der für das Quantenvoltmeter genutzte $\Sigma\Delta$ -ADC in 5b zeigt ein höheres Rauschen (siehe die Auflösung der Skala). Die Einschwingzeit zeigt das typische Schwingen nach den Transienten durch den FIR-Filter. Es wird eine Einschwingzeit von etwa 4 μs erreicht.



neten Werten. Die relativen Messunsicherheiten von $5 \cdot 10^{-8}$ für Frequenzen von 10 Hz bis 1 kHz waren ebenfalls sehr gut [3]. Sie sind bereits eine Größenordnung besser als mit direktem Abtastverfahren mittels ADC (siehe blau gepunktete Linie in Abb. 4 b).

Eine Herausforderung stellten die Schaltvorgänge von weniger als 100 ns dar. Diese führen zu Wechselwirkungen mit den Eingangsfiltern der Abtastvoltmeter. Das Bild 5 stellt zwei Methoden der Filterung durch das Abtastvoltmeter dar. In Bild 5 a wird eine Nivellierung der Spannungsspitzen über eine Integrationszeit von einigen zehn Mikrosekunden erreicht. Der Nachteil ist hier, dass ein System, das auf den kHz-Bereich abzielt, mit Integrationszeiten von bis zu 100 μs bereits eine ungünstige Abtast-Signalrate besitzt. Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung von $\Sigma\Delta$ -ADC mit hoher Abtastrate bis zu 10 MS/s vorteilhaft ist, weil es das Messen bis in den kHz-Bereich mit dem AC-Quantenvoltmeter ermöglicht. Deren Nachteile, wie geringere Stabilität und schlechtere Linearität, werden weitestgehend durch das differenzielle Messverfahren aufgewogen. Kurze Integrationszeiten der Filter führen zu typischen Einschwingzeiten vor und nach den Transienten, hier am Beispiel von FIR-Filtern (*finite impulse response filter*) in $\Sigma\Delta$ -ADC dargestellt (Bild 5 b). Durch ein Löschen der Daten um die Transienten

herum können diese Einflüsse der Transienten sehr gut ausgeblendet werden. Im folgenden Abschnitt soll auf die Verifizierung des differenziellen Abtastens eingegangen werden.

Testkalibrierung eines kommerziellen AC-Spannungsgenerators

Nach dem grundlegenden Nachweis der Verbesserung der Messunsicherheit in den unteren nV-Bereich (Bild 4 b) und der Lösung des Filterproblems aufgrund der schnellen Schaltvorgänge (Bild 5) wurde ein als Kalibrator verwendetes Präzisionsinstrument (Fluke 5720A) mittels des neuen AC-Quantenvoltmeters kalibriert. Der Messaufbau ist im Bild 6 dargestellt. Zugleich wurde diese Kalibrierung mittels des derzeitigen, genormten Rückführungsverfahrens über einen Thermokonverter, in Bild 6 als TC bezeichnet, unabhängig überprüft. Die Rückführung mittels Thermokonverter stellt das gegenwärtig genutzte Verfahren dar. Es ist seit Jahrzehnten in vielen Nationalen Metrologieinstituten im Einsatz [4]. Die AC-DC-Transferdifferenz ist mit einer Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-7}$ bekannt [5]. Das AC-DC-Verfahren hat jedoch den offensichtlichen Nachteil, dass hier Effektivwerte gemessen werden, eine Überprüfung der Signalform jedoch nicht erfolgen kann.

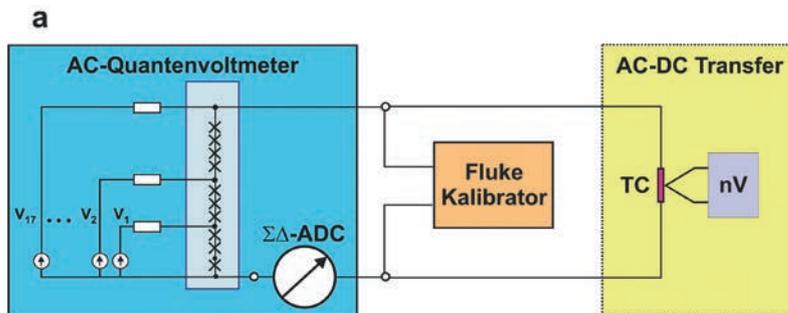
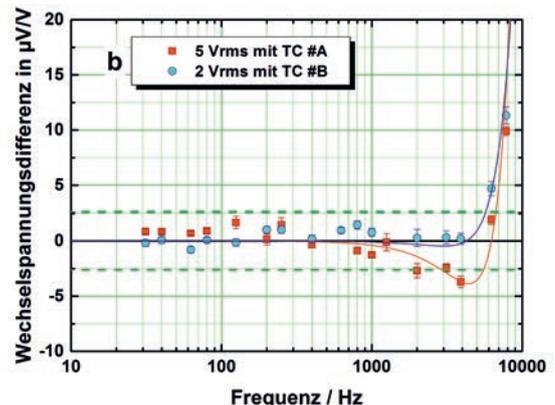


Bild 6 a, b:
 Messaufbau für den Vergleich von differenziellem Abtasten und AC-DC-Transfermessungen mit einem Thermokonverter (TC) und Nanovoltmeter (nV). Das Messergebnis (b) zeigt die gute Übereinstimmung beider Methoden von besser als $3 \mu\text{V/V}$ für alle Frequenzen bis 3 kHz. Für die AC-DC-Transfermessungen wurden zwei TC mit unterschiedlichem Heizwiderstand verwendet.



Nach Entwicklung der Messprozeduren, der Analyse- und Auswertesoftware stimmten die Messergebnisse typischerweise auf einige 10^{-6} mit der Spezifikation ($15 \cdot 10^{-6} \mu\text{V/V}$) des Kalibrators überein. Durch wechselseitiges und gleichzeitiges Messen der AC- und DC-Spannungen am Fluke-Kalibrator und am TC konnten dann die Wechselspannungsmessungen der beiden Methoden miteinander verglichen werden [6]. Das Ergebnis dieser Messungen mit zwei Thermokonvertern ist für Frequenzen von 30 Hz bis 8 kHz in Bild 6b gezeigt. Man erkennt die gute Übereinstimmung beider Methoden, die für alle Frequenzen bis 2 kHz innerhalb von $2,5 \mu\text{V/V}$ liegt. Abhängig vom Heizwiderstand der Thermokonverter (Ohm'sche Last, $TC_{\#A}$ hat 200Ω und $TC_{\#B}$ 500Ω) treten für höhere Frequenzen Abweichungen auf, die auf ein resonantes Verhalten hindeuten, deren Ursache zurzeit noch Gegenstand weiterer Untersuchungen ist.

Eine genaue Unsicherheitsbetrachtung zeigte, dass die erreichte Messunsicherheit immer noch durch die Stabilität des Kalibrators limitiert ist, wie im vorherigen Teil beschrieben. Daher blieb trotz der vielversprechenden Ergebnisse die Frage, wo das Unsicherheitslimit des AC-Quantenvoltmeters für Sinuswellen liegt. Mit der Entwicklung eines neuartigen pulsgetriebenen 1-V-Josephson-Spannungsnormals [7] ergab sich die Möglichkeit, weltweit erstmals einen direkten Vergleich dieser zwei Quantennormale der PTB durchzuführen. Das Ergebnis des Vergleichs ergab eine hervorragende Übereinstimmung für Frequenzen bis 1 kHz, insbesondere bei 250 Hz von $3,5 \pm 12 \cdot 10^{-9}$ [8]. Die gute Übereinstimmung bestätigt das große Potenzial des AC-Quantenvoltmeters, das in den ersten Voruntersuchungen gefunden wurde (siehe Abb. 4b). Es zeigt auch, dass das



Bild 7: Ein kommerzieller Präzisions-Kalibrator (Bildmitte) wird durch den PTB-AC-Quantenvoltmeter-Laboraufbau im Wechselspannungsmodus kalibriert; Ergebnis des europäischen iMERA-plus-Projektes JOSY.

Messen von Sinuswellen nach allen Optimierungsprozessen nicht eingeschränkt ist.

Bild 7 zeigt das AC-Quantenvoltmeter im PTB-Labor. Im Hintergrund ist der Probenstab in eine Kanne mit flüssigem Helium getaucht. Darauf ist ein kompakter 70-GHz-Mikrowellensynthesizer montiert. Davor sind vier der fünf 4-fach-Stromquellen erkennbar. Vorne rechts ist die $\Sigma\Delta$ -ADC im PXI-Chassis zu sehen, rechts der Monitor mit der Kontrollsoftware und in der Mitte ein Fluke-5720A-Kalibrator [9].

In der Tabelle 2 sind die Vor- und Nachteile des AC-Quantenvoltmeters dem konventionellen AC-DC-Transfer mittels Thermokonverter gegenübergestellt. Insbesondere der Vorteil der etwa 60-fach kürzeren Messdauer bei gleichzeitig fast 50-fach besserer Messunsicherheit machten das AC-Quantenvoltmeter für die esz AG so interessant, dass sie die Initiative ergriff. Sie kontaktierte die PTB und schlug ein gemeinsames Projekt vor, mit dem Ziel, solch ein System in den eigenen Laboren installieren zu lassen.

Tabelle 2
Vor- und Nachteile des AC-Quantenvoltmeters gegenüber der traditionellen Rückführung mittels AC-DC-Transfer. Die grünen Felder deuten Vorteile an, die orangefarbenen Nachteile.

| Vergleich der Methoden der AC-Spannungsmesstechnik | | |
|--|---|--------------------------------------|
| | Klassisch: AC-DC Transfer | Neu: AC-Quantenvoltmeter |
| Relative Messunsicherheit (1 V, 500 Hz) | $5 \cdot 10^{-7}$ | 10^{-8} |
| Messdauer | 60 Minuten | 1 Minute |
| Messbare Signalparameter | Effektivwert | Komplette Kurveninformation |
| Frequenzbereich | 10 Hz bis 1 MHz | DC – 2 kHz |
| Spannungsbereiche | 1 V – 3 V (direkt), 1 mV – 1000 V (über Teiler) | 1 mV – 7 V (direkt) |
| Skalierung | Skalierung | Erweiterung über Teiler wird erprobt |

Die Transferkette

Als Innovationssystem wird gemeinhin das Zusammenwirken staatlicher Rahmenmaßnahmen, öffentlicher Forschung und privater Entwicklungsarbeit verstanden. Die Innovation selbst ist im strengen Sinne dann das neue Produkt oder die neue Dienstleistung, die tatsächlich in den Markt eingeführt wird. In diesem Sinne ist das an die Firma Supracon AG transferierte System eine aus der PTB hervorgegangene Innovation – mit Alleinstellungsmerkmal auf dem Weltmarkt. Dabei wurde im Zuge des ein Jahrzehnt dauernden Prozesses auf völlig unterschiedliche Programme und Förderkonzepte zurückgegriffen, um das letztendliche Ziel zu erreichen.

Von der Grundlage zur Anwendung

Wie bereits mit den ersten Einträgen der Tabelle 1 dargelegt, ist die PTB als Ressortforschungseinrichtung des Bundes damit beauftragt, moderne Messtechnik gerade auch im Bereich der Grundlagenforschung weiterzuentwickeln, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft zu sichern. Beispielsweise schreibt das Einheiten- und Zeitgesetz im § 6 explizit vor, dass die PTB wissenschaftliche Forschung im Bereich des Messwesens betreibt und den Technologietransfer fördert. In diesem Rahmen ist sie grundfinanziert und entwickelt im freien wissenschaftlichen Austausch neue Messkonzepte. So wurde bereits 2001 die Idee für ein quantenbasiertes, differenzielles Abtastverfahren geboren und erste Untersuchungen gestartet. Eine Patentanmeldung [10] zur Wahrung der PTB-Rechte erfolgte 2002, die auch 2005 zur

erwarteten Erteilung führte; dies war nicht unerwartet und gilt für 84 % der PTB-Anmeldungen. Es dauerte etwa 4 Jahre, bis die Idee messtechnisch umgesetzt werden konnte. 2006 wurde sie dann auf der *Conference on Precision Electromagnetic Measurements* (CPEM) in Turin präsentiert und veröffentlicht [3]. Andere NMIs erkannten sofort das große Potenzial dieser Idee und begannen mit der Erforschung der Messmöglichkeiten [11–15].

Um die internationale Zusammenarbeit zu stärken, konnten in einem Vorläuferprogramm des heutigen *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR) unter dem Titel „*Next generation of quantum voltage systems for wide range applications*“ (JOSY – iMERA-plus) mit neun weiteren Nationalen Metrologieinstituten insgesamt 3,3 Millionen Euro eingeworben werden. Dieses Einzelprojekt der anwendungsnahen Forschung diente der Erzeugung eines Labormusters, das, basierend auf neuartiger, im Projekt entwickelter oder kommerziell verfügbarer Komponenten, alle messtechnischen Ergebnisse eines zukünftigen Produktes bereits liefern kann. Das EMPIR-Programm stellt im Rahmen des 70-Milliarden-Euro-Forschungsprogramms „Horizont 2020“ der europäischen Union solchen Projekten Mittel zur Verfügung, die im Rahmen breiter, öffentlicher metrologischer Forschung ihren Beitrag zum strategischen Ziel der „*Innovation Union*“ leisten.

Das Projekt war so erfolgreich, dass der in Bild 7 dargestellte Laboraufbau im Zuge des europäischen Projektes ein Erstinteresse bei der esz AG, einem der bedeutenden Kalibrierlabore Deutschlands, und bei der KMU Supracon AG, einem Spezialisten für die Nutzung des Josephson-Effektes, weckte.

Transfer in die Industrie

In der nächsten Transferstufe wurden spezielle Programme der vorwettbewerblichen Forschung genutzt. Diese werden mit der Begrifflichkeit „Validierung“ verbunden: Der Transfergegenstand muss so aufbereitet werden, dass eine spätere Entwicklung zu einem Produkt durch eine Firma wahrscheinlich erscheint. Die gegenwärtig größten Programme dieser Art sind das zentrale Innovationsprogramm Mittelstand ZIM des BMWi und das themenzentrierte Programm KMU-innovativ des BMBF mit zusammen über 0,5 Mrd. Euro Jahresetat. Das wesentlich kleiner aufgelegte „Validierung des technologischen und gesellschaftlichen Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung“ (VIP+) ermöglicht Forschungsinstituten auch ohne Industriepartner eine stark anwendungsorientierte Forschung.

Das hier genutzte Programm „Messen, Normen, Prüfen, Qualitätssicherung“ (MNPQ) des BMWi

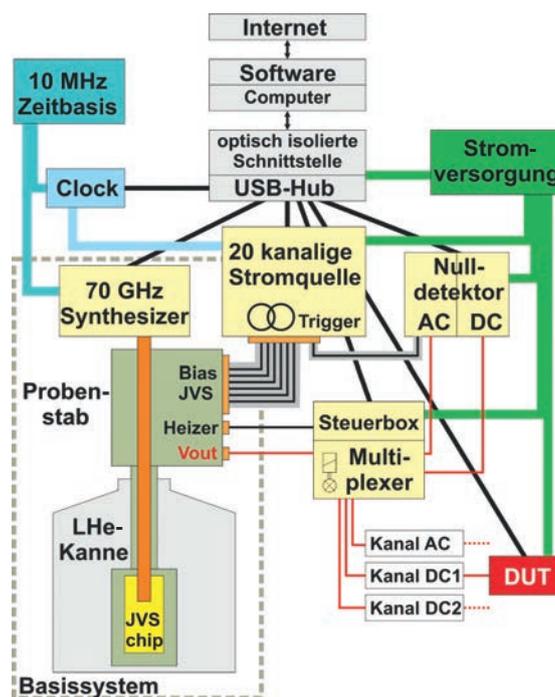


Bild 8:
Schematischer
Aufbau des AC-
Quantenvoltmeters
(Supracon)

platziert sich in der Mitte dieser Programme. Hier muss das Firmeninteresse durch Mitarbeit und einen monetären Beitrag zum Projekt nachgewiesen werden; der wesentliche Teil der Arbeiten erfolgt in der PTB. Das neue, 2015 von der PTB aufgelegte Validierungsprogramm „Transfer Metrologischer Technologien“ (TransMeT) stellt einen ähnlichen Rahmen bereit wie das 2015 ausgelaufene MNPQ-Programm. Grundgedanke all dieser Programme ist, dass die Weiterentwicklung mit hohem Risiko behaftet ist und vom KMU nicht allein geleistet werden kann.

Zwei aneinander anschließende MNPQ-Programme wurden für die Jahre 2008–2014 eingeworben, um mit den Industriepartnern esz AG und Supracon AG ein Josephson-Messsystem für Gleich- und Wechselspannungen – ein AC-Quantenvoltmeter – für den Einsatz in industriellen Kalibrierlaboratorien zu entwickeln. Die erste Projekt-Phase zielte dabei auf die Herstellungstechnologie der Josephson-Elemente, die zweite auf Struktur, Aufbau und Software des Komplettsystems. Die Erweiterung des Produktportfolios der Supracon AG durch ein moderneres System, das auch Wechselspannungen kalibrieren kann, war ein logischer Schritt. Die esz AG als eines der größten Kalibrierlabore mit im Boot zu haben half sehr, eine zielgerichtete Entwicklung durchzuführen, die direkt die Bedürfnisse der Anwender erfüllt. Mit diesem neuen System werden die wesentlichen Vorteile von Normalen, die auf elektrischen Quanteneffekten basieren, nun auch für industrielle Laboratorien verfügbar: Kleinste Messunsicherheiten ohne aufwendige Rekalibrierungen verbessern die Leistung bei erhöhter Wirtschaftlichkeit [16].

Das System ist schematisch in Bild 8 dargestellt und in Bild 9 bei seinem Einsatz in der esz AG. Es basiert auf Josephson-Schaltungen, die in der PTB hergestellt werden und ist für Spitzenspannungen bis ± 10 V und Frequenzen bis 2 kHz ausgelegt. Es enthält eine Reihe von zusätzlichen Funktionen und Eigenschaften, die einem Anwender die Bedienung erleichtern. Dabei liegt ein großes Augenmerk auf der Gewährleistung, dass die gemessenen Werte richtig sind.

Verifikationsmessungen können am System permanent mit der nachfolgenden Methodik durchgeführt werden: Die Quantisierung der Spannungsstufen der binär geteilten, programmierbaren Josephson-Arrays (s. a. vorhergehenden Beitrag von J. Kohlmann und O. Kieler) kann durch Variation der angelegten Stromstärke immer leicht überprüft werden. In einer Messung, bei der das größte Bit mit 34816 Josephson-Kontakten gegen alle kleineren geschaltet wird, kann dies mit sehr hoher Auflösung geschehen. Die Summe aller kleineren Bits ($1 + 1 + 1 + 2 + 4 + 8 + 17 + 34 + 68 + 136 + 272 + 544 + 1088 + 2176 + 4352 + 8704 + 17408$) ergibt wieder

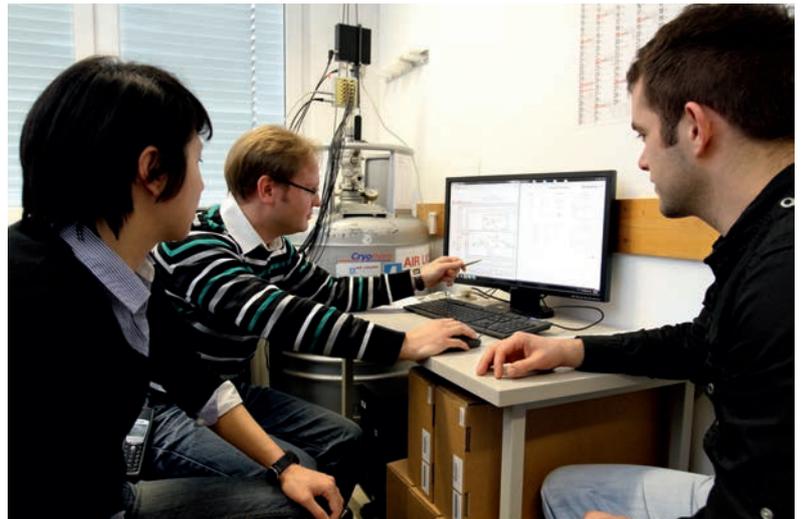


Bild 9: Dr. Jinni Lee (PTB, links), Andreas Böck (esz AG) und Michael Starkloff (Supracon AG) diskutieren Kalibrierergebnisse des AC-Quantenvoltmeters bei der esz AG in Eichenau

genau die gleiche Anzahl an Josephson-Kontakten. Damit heben sich die beiden 5-V-Spannungen auf.

Falls das System einen Fehler feststellt, werden die Messungen sofort angehalten, und eine Systemüberprüfung wird gestartet. Ein Beispiel ist das sogenannte *Fluxtrapping*, was bedeutet, dass ein Magnetfeld in die supraleitenden Kontakte eingedrungen ist und so deren Stromtragfähigkeit unterdrückt. Mit einem Heizer in der Nähe des Josephson-Arrays lässt sich das Array kurzzeitig automatisch aufwärmen, um so den magnetischen Fluss, der in den supraleitenden Strukturen eingefroren ist, zu entfernen und dann die Kalibrierungen fortzusetzen.

All diese Funktionen erleichtern nicht nur den Kalibrierbetrieb, sondern erlauben es auch, dass die Kalibrierungen von geschulten Technikern ohne detaillierte physikalische Hintergrundkenntnisse durchgeführt werden können. Wie diese Messungen aussehen, ist in Bild 10 gezeigt. Hier wurde das neue esz-AC-Quantenvoltmeter mit dem AC-Quantenvoltmeter der PTB verglichen.

Das AC-Quantenvoltmeter kann darüber hinaus auch kommerzielle Gleichspannungsnormale (DC-Referenzen und -Voltmeter) kalibrieren und deckt damit ebenfalls den Bereich kommerziell erhältlicher Gleichspannungs-Quantenvoltmeter ab. Bei einem direkten 10-V-Vergleich zwischen einem DC-Quantenvoltmeter und dem neuen

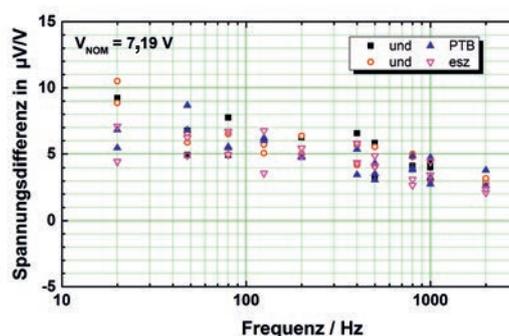


Bild 10: Beispiel für den Vergleich der AC-Quantenvoltmeter der esz AG und der PTB mittels eines Fluke-5720A-Kalibrators als Transferrnormal bei einer Spannung von 7,19 V und verschiedenen Frequenzen

AC-Prototyp wurde in 15 Minuten Messzeit innerhalb der Unsicherheit von 0,1 nV/V keine signifikante Abweichung festgestellt.

Nach Ende der Förderphase vergingen noch einige Jahre, bis das System in den Markt eingeführt werden konnte. Auch nach Ende der Förderphase mussten die Firmen direkt, insbesondere bei der Reinraumfertigungstechnologie, erhebliche Mittel investieren.

Durch Vor-Ort-Tests im akkreditierten Kalibrierlabor des Projektpartners esz AG wurde das neue AC-Quantenvoltmeter für den praktischen Gebrauch optimiert. Unter Einbeziehung der Anwenderinformationen ist es nun zu einem komplett automatisierten, anwenderfreundlichen Messsystem weiterentwickelt worden und wird bereits kommerziell angeboten [17]. Das esz-AC-Quantenvoltmeter ist inzwischen vom DAkkS für Gleich- und Wechselspannungsmessungen akkreditiert worden [18].

Ausblick

Die Entwicklung des AC-Quantenvoltmeters für den Industrieinsatz zeigt, dass sich Hartnäckigkeit und langer Atem in der elektrischen Quantenmetrologie auszahlen können. Durch die Unterstützung der PTB ist die esz AG mit dem AC-Quantenvoltmeter auf dem Weg zu Europas genauestem Kalibrierlabor. Die Supracon AG bietet dieses System mit einer Lizenz der PTB auf dem Weltmarkt an, zuvor ist hier nur das amerikanische NIST als staatliche Institution als Anbieter eines Laboraufbaus tätig gewesen.

Die Entwicklung des AC-Quantenvoltmeters wurde durch ein modulares Konzept betrieben. Eine Erweiterung des Systems bis hin zu einem universellen „Quantenkalibrator“ für Spannungs-, Widerstands- und Stromstärkenormale läuft bereits seit 2014 als Projekt mit der esz AG und der Supracon AG, ebenfalls gefördert durch das bereits erwähnte MNPQ-Programm. Ein wesentlicher Aspekt für die weitere Verbreitung von elektrischen Quantennormalen ist der Betrieb in einem geschlossenen Kleinkühlersystem, um von der teilweise schwierigen Versorgung mit flüssigem Helium unabhängig zu werden. Auch hier hat es in den letzten Jahren bereits sehr gute Fortschritte gegeben.

Die Weiterentwicklung der pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormale wird langfristig zu noch besseren Wechselspannungsnormalen führen (zum aktuellen Stand der Forschungsarbeiten siehe den Beitrag von O. Kieler). Diese werden dann in der Lage sein, einen größeren Frequenzbereich abzudecken und sehr präzise beliebige Wellenformen zu erzeugen. Beide Eigenschaften werden die Tür zu neuen Messsystemen in der elektrischen Quantenmetrologie aufstoßen.

Literatur

- [1] Bundesregierung, *Die neue Hightech Strategie – Innovationen für Deutschland*, Bundesministerium für Bildung und Forschung (Herausgeber), 11055 Berlin, www.hightech-strategie.de, 42 (2016).
- [2] F. Müller, T. Scheller, R. Wendisch, R. Behr, O. Kieler, L. Palafox und J. Kohlmann, *NbSi barrier junctions tuned for metrological applications up to 70 GHz: 20 V arrays for programmable Josephson voltage standards*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23**, Heft 3, 1101005 (2013).
- [3] R. Behr, L. Palafox, G. Ramm, H. Moser und J. Melcher, *Direct comparison of Josephson waveforms using an ac quantum voltmeter*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **56**, Heft 2, 235–238 (2007).
- [4] M. Klönz, *Die Entwicklung von Vielfachthermokonvertern für die Präzisionsmessung des Effektivwerts von Wechselspannung und Wechselstromstärke*, PTB-Mitteilungen **112**, Heft 3, 207–213 (2002).
- [5] <http://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt2/abt2-messmoeglichkeiten.html> (Letzter Zugriff am 31.10.2016).
- [6] J. Lee, R. Behr, L. Palafox, A. Katkov, M. Schubert, M. Starkloff und A. C. Böck, *An AC quantum voltmeter based on a 10 V programmable Josephson array*, Metrologia **50**, 612–622 (2013).
- [7] O. F. Kieler, R. Behr, R. Wendisch, S. Bauer, L. Palafox und J. Kohlmann, *Towards a 1 V Josephson arbitrary waveform synthesizer*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **25**, Heft 3, 1400105 (2015).
- [8] R. Behr, O. Kieler, J. Lee, S. Bauer, L. Palafox und J. Kohlmann, *Direct comparison of a 1 V Josephson arbitrary waveform synthesizer and an ac quantum voltmeter*, Metrologia **52**, 528–537 (2015).
- [9] PTB news, *AC-Quantenvoltmeter für die Industrie*, Heft 2, 4–5 (2013).
- [10] R. Behr, G. Ramm, *Verfahren zur Kalibrierung von Spannungsmessmitteln und zur Messung von Spannungen periodischer Spannungssignale sowie Mess- und Kalibriervorrichtung*, DE 102 26 412 B4 (2002).
- [11] A. Rüfenacht, C. J. Burroughs und S. P. Benz, *Precision sampling measurements using ac programmable Josephson voltage standards*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 044704 (2008).
- [12] A. Rüfenacht, C. J. Burroughs, S. P. Benz, P. D. Dresselhaus, B. D. Waltrip und T. L. Nelson, *Precision differential sampling measurements of low-frequency synthesized sine waves with an AC programmable Josephson voltage standard*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **58**, 809–815 (2009).
- [13] M.-S. Kim, K.-T. Kim, W.-S. Kim, Y. Chong und S.-W. Kwon, *Analog-to-digital conversion for low-frequency waveforms based on the Josephson voltage standard*, Meas. Sci. Technol. **21**, 115102 (2010).

- [14] J. M. Williams, D. Henderson, J. Pickering, R. Behr, F. Müller und P. Scheibenreiter, *Quantum-referenced voltage waveform synthesiser*, Sci. Meas. Technol. IET **5**, 167–174 (2011).
- [15] A. Rüfenacht, C. J. Burroughs, P. D. Dresselhaus und S. P. Benz, *Differential sampling measurement of a 7 V RMS sine wave with a programmable Josephson voltage standard*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **62**, 1587-1593 (2013).
- [16] M. Starkloff, M. Schubert, J. Lee, A. Wintermeier, A. C. Böck, P. Fleischmann, L. Palafox und R. Behr, *An AC Josephson voltage standard for frequencies up to the kHz range tested in a calibration laboratory*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **64**, Heft 6, 1620–1626 (2015).
- [17] Supracon AG – <http://www.supracon.com/>
(Letzter Zugriff am 17.10.2016).
- [18] esz AG AG – <https://www.esz-ag.de/>
(Letzter Zugriff am 17.10.2016).