

Impedanzmetrologie mit Josephson-Spannungsnormalen

Stephan Bauer*, Luis Palafox**

Bedeutung von Impedanzmessung

Haben Sie heute schon ein Tablet oder ein Smartphone benutzt? Dann haben Sie bereits bei einer Impedanzmessung mitgemacht. Die Koordinaten der Berührungen werden aufgrund von Kapazitätsänderungen ermittelt. Widerstände, Induktivitäten und Kondensatoren sind den meisten Menschen ein Begriff. In der Elektrotechnik spricht man allgemeiner von Impedanzen, da man jedem dieser Bauteile einen frequenzabhängigen Wechselstromwiderstand (Impedanz Z) zuordnen kann. Zum Beispiel die Kapazitätsänderung – verursacht durch den Druck auf eine bewegliche Elektrode in einem kapazitiven Drucksensor. Die Messung von Impedanzen spielt eine zentrale Rolle in der Messtechnik, da viele Sensoren andere Messgrößen in eine äquivalente Impedanz umwandeln, welche dann durch weitere Messtechnik erfasst wird³. Die am häufigsten anzutreffenden Impedanzmessungen messen Kapazitäten und elektrische Widerstände wie zum Beispiel bei Touchscreens.

Die Messung von Impedanzen ist wegen ihrer großen Verbreitung in Produkten unserer Alltagswelt von besonderer Bedeutung. Dabei kann die Messung von Impedanzen mithilfe verschiedener Methoden durchgeführt werden [1], wobei all diese Methoden Wechselspannungen verwenden. So liefern kommerziell erhältliche Messgeräte (LCR-Meter) schnelle Ergebnisse in einem weiten Frequenzbereich bis einige MHz, allerdings liegen die Unsicherheiten deutlich höher als die der in beinahe allen Metrologieinstituten verwendeten koaxialen Impedanzmessbrücken [2]. Diese manuell betätigten Impedanzmessbrücken basieren auf induktiven Spannungsteilern und erreichen hervorragende Unsicherheiten von einigen 10^{-9} . Allerdings muss die Brücke manuell für jede Frequenz neu abgeglichen werden. Diese Prozedur ist sehr aufwendig und die induktiven Spannungsteiler schränken außerdem die Bandbreite, bei der diese Brücken sehr präzise funktionieren, auf den Frequenzbereich von 500 Hz bis 10 kHz ein. Ebenfalls sind die Impedanzverhältnisse durch die Transformatorwicklungen festgelegt und die Phase zwischen den Spannungen auf 0° oder 180° begrenzt.

Daher ist es das Ziel der Entwicklung neuer Impedanzmessbrücken, den Übergang von Messungen bei vorgegebenen Spannungsverhältnissen und festen Phasenwinkel zu beliebigen Spannungsverhältnissen und Phasenwinkeln über den gesamten Audiofrequenzbereich (20 Hz bis 20 kHz) oder sogar zu noch höheren Frequenzen zu erreichen [3]. Dieser Übergang kann mit zwei verschiedenen Arten von Impedanzmessbrücken erreicht werden. Auf der einen Seite sind es digitale Impedanzmessbrücken, welche auf der Basis von Digital-Analog-Wandlern arbeiten. Diese Variante der Impedanzbrücke schließt die Lücke zwischen den schnellen und flexiblen LCR-Metern und den komplexen und hochpräzisen koaxialen Messbrücken. Die Messungen lassen sich dank der Automatisierung schnell durchführen und liefern über einen weiten Frequenz- und Impedanzbereich Unsicherheiten von 10^{-6} und besser [4]. Auf der anderen Seite sind Impedanzmessbrücken, welche als Spannungsquellen Josephson-Spannungsnormale verwenden [5], die durch die fast beliebige Auswahl von Spannungs- und Phasenverhältnissen einen wichtigen Vorteil besitzen. Mit den in der PTB entwickelten Josephson-Messbrücken ist der Abgleich einfach und vor allem automatisierbar.

Im Weiteren erläutert dieser Artikel zunächst das Grundprinzip einer Impedanzmessbrücke auf Basis von Josephson-Spannungsnormalen, bevor auf die beiden an der PTB realisierten Typen von Messbrücken genauer eingegangen wird.

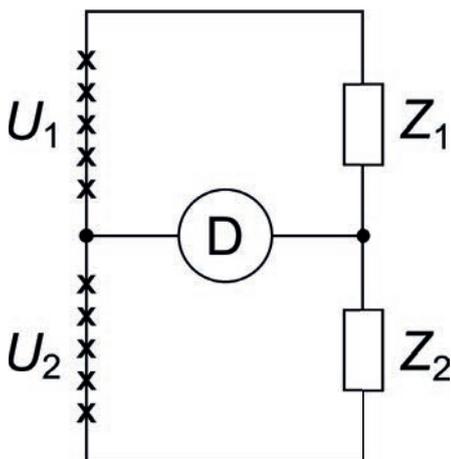
Grundprinzip von Impedanzmessbrücken auf Basis von Josephson-Spannungsnormalen

Der Abgleich einer Impedanzmessbrücke, wie in Bild 1 dargestellt, erfolgt immer so, dass durch beide Impedanzen Z_1 und Z_2 der gleiche Strom fließt. Dabei können die beiden Impedanzen z. B. zwei elektrische Widerstände, zwei Kapazitäten oder aber jede erdenkliche Kombination von Impedanzen sein. In diesem Fall ist die Spannung, gemessen am Detektor D zwischen Innen- und Außenleiter, null. Im abgeglichenen Zustand gilt, dass das Verhältnis der Impedanzen gleich dem

* Dr. Stephan Bauer, Arbeitsgruppe 2.63 „Josephson-Effekt, Spannung“, E-Mail: stephan.bauer@ptb.de

** Dr. Luis Palafox, Arbeitsgruppe 2.63 „Josephson-Effekt, Spannung“, E-Mail: luis.palafox@ptb.de

Bild 1: Grundprinzip einer Impedanzmessbrücke. Die Kontakte der Josephson-Spannungsnormale werden durch die X dargestellt und liefern die Spannungen U_1 und U_2 . Die Brückenspannung wird mithilfe eines Lock-in-Detektors (D) gemessen.



Verhältnis der Spannungen ist:

$$U_1/U_2 = -Z_1/Z_2$$

Als Detektor wird meistens ein Lock-in-Detektor verwendet, welcher in einem sehr schmalen Frequenzband um die eingestellte Brückenfrequenz misst. Im Allgemeinen erfolgt der Abgleich direkt über das Verhältnis und die Phasenlage der beiden Spannungen.

Bei Impedanzbrücken kann der Messstrom und die Messspannung entweder über dieselbe Leitung oder aber durch separate Leitungen fließen. Im ersten Fall spricht man dann von einer 2-Tor-Anordnung. Neben dem Vorteil eines einfacheren Aufbaus gibt es jedoch einen wesentlichen Nachteil. Bedingt dadurch, dass die Spannungsmessung in diesem Fall nicht stromlos erfolgen kann, werden die Messergebnisse durch die parasitären Impedanzen der Kabel und Stecker beeinflusst. Um diese Unsicherheit zu eliminieren, müssen Strom und Spannung über separate Kabel geführt werden. Da diese Methode vier Anschlüsse an

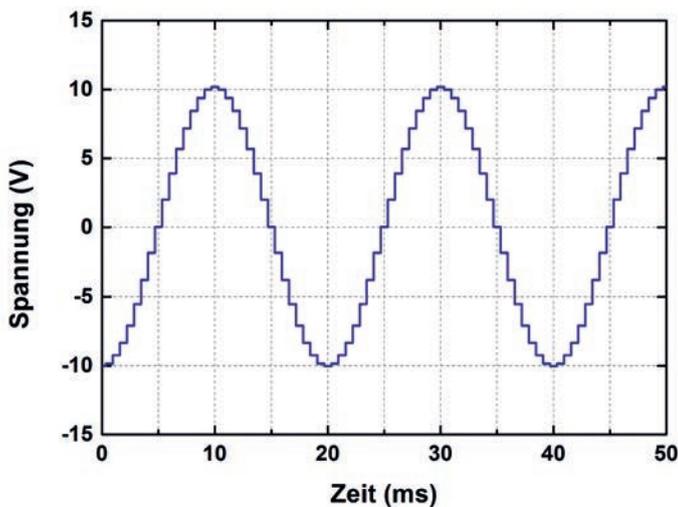


Bild 2: Beispiel einer durch 32 Stufen angenäherten Sinusspannung mit einer Amplitude von 10 V

jeder Impedanz (zwei für Strom und zwei für Spannung) benötigt, spricht man von einer 4-Tor-Definition. Dieser Brückentyp liefert zwar deutlich präzisere Ergebnisse, ist allerdings auch komplexer im Aufbau. An der PTB wurden bereits Impedanzbrücken sowohl als 2-Tor- und als 4-Tor-Varianten erfolgreich aufgebaut und eingesetzt.

Der Einsatz von Quantennormalen zur Erzeugung der Spannungen auf beiden Seiten der Brücke sorgt für eine rauscharme und stabile Spannungsversorgung, deren Absolutwerte durch die verwendete Mikrowellenfrequenz bestimmt werden. Letztere ist durch die Verbindung zur Atomuhr auf besser 10^{-10} bekannt. Durch die Verwendung zweier unabhängiger Spannungsquellen können sowohl die Spannungsverhältnisse als auch die Phase zwischen den beiden Spannungen fast beliebig frei gewählt werden. Aktuelle Impedanzmessbrücken auf Basis von Josephson-Spannungsnormalen erreichen eine vergleichbare Genauigkeit wie die Transformator-basierten, jedoch mit dem wichtigen Vorteil des breiteren Frequenzbereichs der Messungen, der insgesamt kürzeren Messzeit und der vergleichsweise einfachen Automatisierbarkeit des Abgleichs. An der PTB werden zwei verschiedene Josephson-Spannungsnormale für Impedanzmessungen eingesetzt. Im Folgenden werden diese beiden Varianten vorgestellt sowie ihre Vorteile und Beschränkungen diskutiert.

Impedanzmessbrücken mit programmierbaren Spannungsnormalen

Für die Messung von Impedanzverhältnissen mit einer Messbrücke auf Basis von programmierbaren Spannungsnormalen werden an der PTB Rechteckspannungen verwendet. Es ist prinzipiell auch möglich, stufenweise angenäherte Sinusspannungen zu verwenden (siehe Bild 2). Jedoch ist dann die Zeit auf einer quantisierten Spannungsstufe geringer. Bei beiden Spannungsformen hat die Form der Flanken beim Anstieg und Abfall der Spannung einen nicht zu vernachlässigen Einfluss auf die Messgenauigkeit. Allerdings wird der Einfluss der Flanken durch den Einsatz eines Lock-in-Detektors verringert.

Für den Abgleich der Messbrücke werden die Wechselspannungsamplituden der beiden Josephson-Schaltungen über die verwendete Anzahl von Josephson-Kontakten und die eingestrahlte Mikrowellenfrequenz variiert sowie die Phasenlage der synthetisierten Spannungen über eine Verzögerungselektronik mit einer Auflösung von 1 ps eingestellt (siehe Bild 3). Beides geschieht softwaregesteuert und somit vollautomatisch. Somit lassen sich z. B. Impedanzverhältnisse bei 20 Frequenzen innerhalb von nur 30 Minuten messen.

Für 1:1-Verhältnisse von 10-k Ω -Widerständen und 100-pF-Kapazitäten wurde das Verfahren in hervorragender Weise demonstriert. Mit diesem

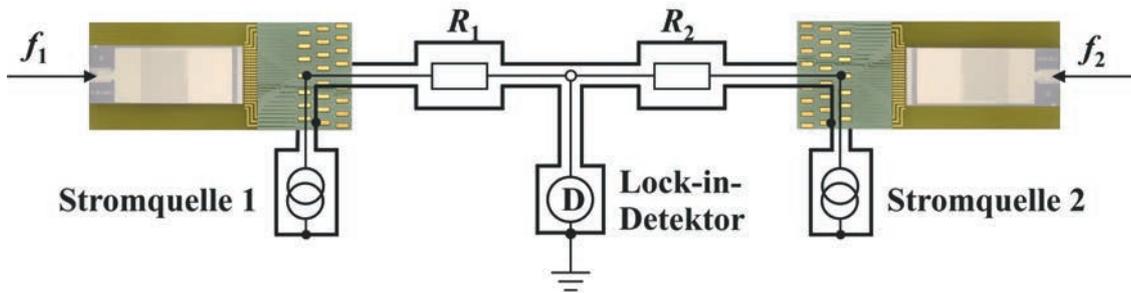


Bild 3: Schematischer Aufbau der Messbrücke auf Basis von programmierbaren Spannungsnormalen. Über die Variation der Mikrowellenfrequenzen f_1 und f_2 werden die quantisierten Spannungen eingestellt und die Brücke abgeglichen. Die Synchronisierung der Stromquellen 1 und 2 und Verzögerungselektronik erlaubt einen Phasenabgleich für Wechselspannungen.

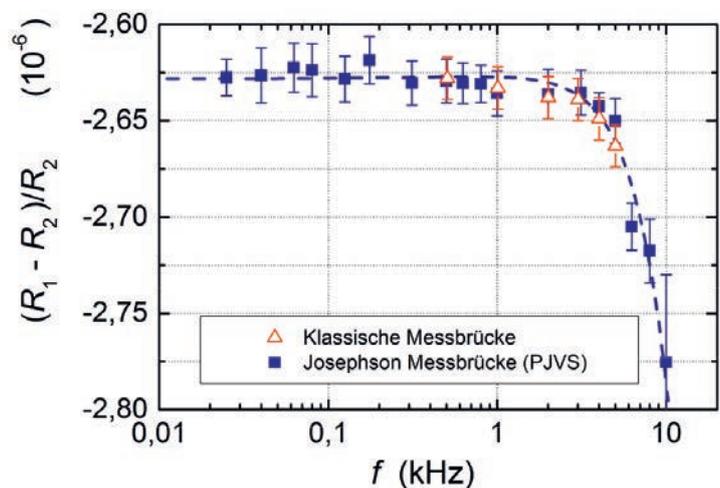
Typ der Josephson-Impedanzmessbrücke wurde das Widerstandsverhältnis über den Frequenzbereich von 25 Hz bis 10 kHz mit einer Messunsicherheit von etwa $2 \cdot 10^{-8}$ gemessen. Ein Vergleich der Messergebnisse mit den Ergebnissen einer Messbrücke auf Basis von induktiven Spannungsteilern zeigt eine exzellente Übereinstimmung (siehe Bild 4) [5]. Auch für Kapazitätsverhältnisse liegt die Unsicherheit im kHz-Bereich unter $4 \cdot 10^{-8}$, steigt dann – entsprechend der Impedanz $1/\omega C$ – mit kleiner werdender Frequenz an und erreicht eine Unsicherheit von etwa $2 \cdot 10^{-7}$ bei 25 Hz. Auch für die Messung des Verhältnisses von 10-pF- zu 100-pF-Kapazitäten wurde diese Impedanzmessbrücke bereits erfolgreich eingesetzt.

Als Weiterentwicklung der 2-Tor-Impedanzmessbrücke wurde eine 4-Tor-Anordnung aufgebaut. Durch Optimierung der Widerstandswerte $R_{1,S}$ und $R_{2,S}$ (siehe Bild 5, rot) konnte eine Brücke entwickelt werden, bei der das Öffnen der Schalter 1–3 (Bild 5, blau) keinen Einfluss auf den Brückenabgleich hat. Damit sind die Definitionsbedingungen für eine 4-Tor-Messung erfüllt. Ein Abgleich der Josephson-Impedanzmessbrücke bei hohen Frequenzen ermöglicht es dann, innerhalb von etwa 60 Minuten halbautomatische Messungen über einen Frequenzbereich von 25 Hz bis 10 kHz durchzuführen, wobei eine relative Messunsicherheit von weniger als 10^{-7} erreicht wird.

Beide Ausführungen der programmierbaren Impedanzmessbrücken liefern bei gleichen Impedanzen ($R:R$ oder $C:C$) hervorragende Ergebnisse im Frequenzbereich zwischen 25 Hz und 10 kHz. Zu höheren Frequenzen ist die Messunsicherheit limitiert durch die verwendeten Rechteckspannungen und deren Flankenform während der Schaltvorgänge. Dadurch ist die Zeit auf einer quantisierten

Spannungsstufe bei hohen Frequenzen zu kurz und die Unsicherheiten der nicht idealen Flanken dominiert.

Der Vergleich von ungleichen Impedanzen ($R:C$ oder $R:L$), auch Quadraturmessungen genannt, bildet einen bedeutenden Teil der Impedanzskalen und der Rückführungsketten [1]. Die erreichbare



Unsicherheit mit Rechteckspannungen ist aber grundlegend beschränkt. Selbst wenn ein perfekter Abgleich bei der Grundfrequenz erreicht wird, begrenzen die harmonischen Obertöne die Empfindlichkeit des Lock-in-Detektors und damit die Unsicherheiten auf einige 10^{-6} . Um diese Beschränkung zu umgehen, ist die Verwendung von Sinusspannungen mit hoher spektraler Reinheit unerlässlich. Dies ist durch den Einsatz von pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormalen möglich und eine solche an der PTB realisierte Impedanzmessbrücke wird im folgenden Abschnitt behandelt.

Bild 4: Frequenzabhängiges Impedanzverhältnis von zwei 10-k Ω -Widerständen. Die Daten der Josephson-Messbrücke sind mit blauen Vierecken und die Daten der transformatorbasierten Messbrücke mit roten Dreiecken gekennzeichnet. [5]

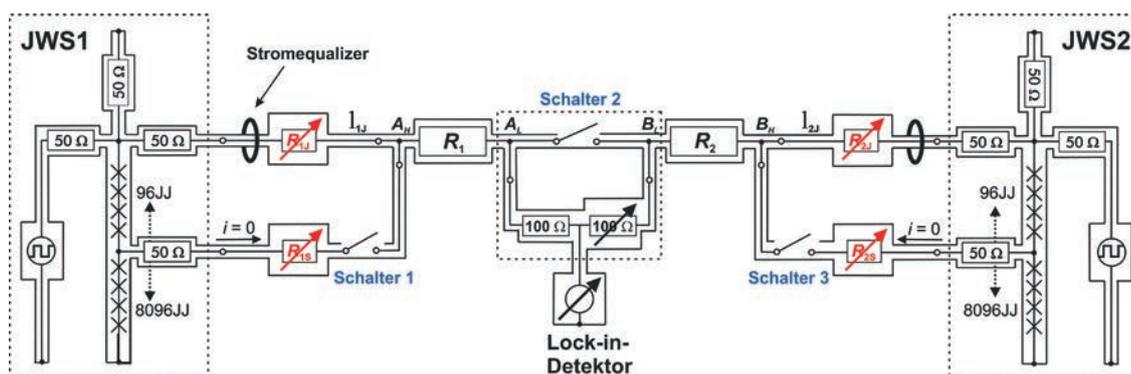


Bild 5: Schematischer Aufbau der 4-Tor-Messbrücke auf Basis von programmierbaren Spannungsnormalen

Impedanzmessbrücken mit pulsgetriebenen Spannungsnormalen

Durch den Einsatz von pulsgetriebenen Spannungsnormalen (*Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer*, JAWS) stehen, wie im vorherigen Beitrag von Oliver Kieler im Detail beschrieben, erstmals spektral sehr reine (besser 120 dBc) Sinusspannungen für eine Josephson-Impedanzmessbrücke zur Verfügung (siehe Bild 6). Damit entfällt prinzipiell die oben genannte Einschränkung der programmierbaren Spannungsnormale bei der Quadraturmessung (*R-C-Verhältnisse*). Darüber hinaus sollten prinzipiell auch höhere Frequenzen mit kleinen Unsicherheiten möglich sein. Ein deutlicher Unterschied ist hier auch die

maximale Spannung. Sie liegt nicht wie bei den programmierbaren Impedanzmessbrücken bei einer Spitzenspannung von 10 V, sondern bei etwa 100 mV bis 150 mV. Um dennoch vergleichbare Signal-zu-Rausch-Verhältnisse zu erreichen, muss bei der Messbrücke mit pulsgetriebenen Spannungsnormalen ein Abgleich der Brücke im nV-Bereich oder darunter erfolgen. Aufgrund der hohen spektralen Reinheit und der zeitlichen Stabilität der Ausgangsspannungen ist dies möglich und lediglich durch die Stabilität der Impedanznormale und deren thermisches Rauschen beschränkt.

Bedingt durch den Pulsbetrieb und die geringeren Ausgangsspannungen wird nur wenig elektrische Leistung in die Josephson-Schaltungen

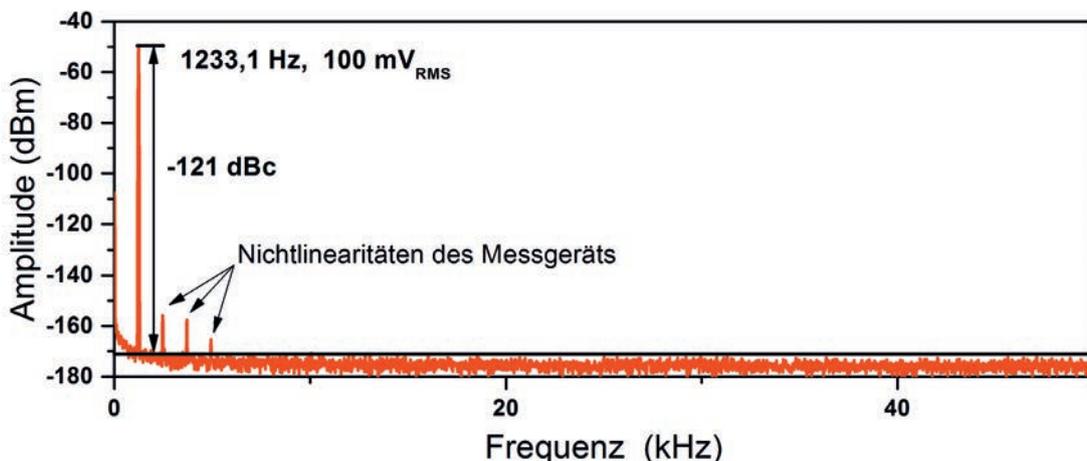


Bild 6: Spektrum einer im Kleinkühler generierten Sinusspannung mit einem Effektivwert von 100 mV und einer Frequenz von 1233,1 Hz. Die drei Obertöne werden durch das Messsystem aufgrund von Nichtlinearitäten angezeigt, aber nicht vom Spannungsnormal erzeugt.

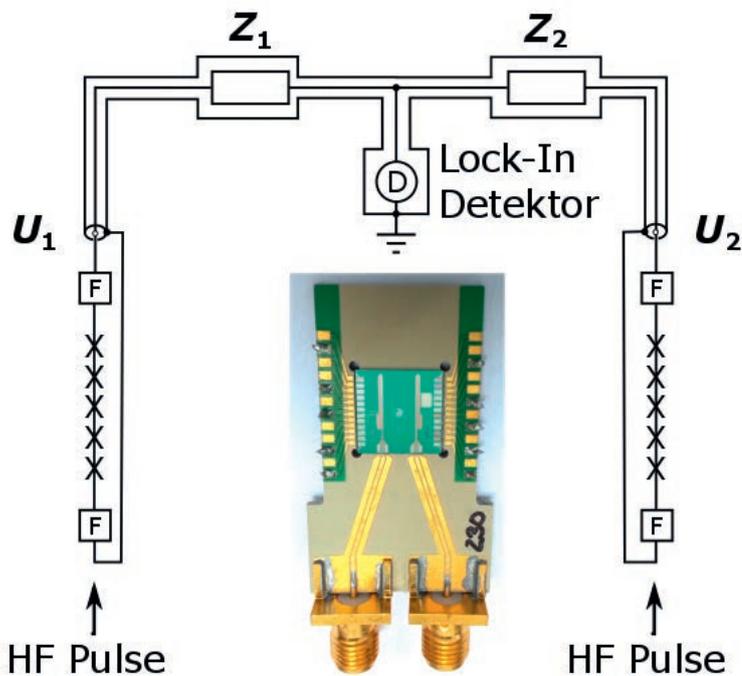


Bild 7: Schematischer Aufbau der Impedanzmessbrücke auf der Basis von zwei pulsgetriebenen Spannungsnormalen. In der Mitte ist ein Chip mit zwei Josephson-Schaltungen samt Trägerplatine zu sehen.

eingebraucht. Daher ist ein Betrieb der Schaltungen nicht nur im flüssigen Helium, sondern auch in einem geschlossenen Kühlkreislauf (Kleinkühler) möglich. Das macht den Einsatz einer solchen Messbrücke, sowie der pulsgetriebenen Spannungsnormale im Allgemeinen, besonders für Kalibrierlabore und Institute ohne Heliumrückgewinnung interessant, da keine Versorgung mit flüssigem Helium nötig ist. Für die an der PTB aufgebaute Impedanzmessbrücke wird ein sogenannter Pulsrohrkühler verwendet. Der Chip mit den Josephson-Schaltungen befindet sich, wie auch beim Betrieb mit flüssigem Helium, in einem Probenhalter, allerdings werden die Schaltungen im Falle des Kleinkühlers nicht durch flüssiges, sondern durch gasförmiges Helium gekühlt. Durch die geringere Wärmeleitfähigkeit des Gases entsteht ein Temperaturgradient zwischen dem Kühlsystem und der Schaltungen von etwa 0,5 K – 0,8 K. Darüber hinaus können die Josephson-Schaltungen, aufgrund der begrenzten Kühlleistung eines solchen Systems, nicht bis zur maximalen Spannung genutzt werden. Dennoch konnten schon Effektivspannungen bis zu 125 mV gleichzeitig von zwei Schaltungen in diesem System erzeugt werden.

In der aktuellen Konfiguration der Messbrücke werden zwei JAWS-Schaltungen mit je 9000 Josephson-Kontakten auf einem gemeinsamen Chip verwendet. Die hohe Kontaktzahl erlaubt es, dass Spannungen mit einem Effektivwert von 20 mV allein unter der Verwendung von Mikrowellenpulsen erzeugt werden können (Einzelheiten zum Betrieb des pulsgetriebenen Spannungsnormals sind im vorherigen Beitrag beschrieben). Dadurch ist eine sehr übersichtliche Messanordnung möglich (Bild 7). Bei der Verhältnismessung von gleichen Impedanzen ($R:R$ oder $C:C$) wird, wie auch bei den Messbrücken auf Basis von programmierbaren Spannungsnormalen, der Brückenabgleich über das Spannungsverhältnis und die Phaseneinstellung erreicht. Der wesentliche Unterschied ist hier, dass die Spannung nicht über die Mikrowellenfrequenz, sondern über das Pulsfolgemuster eingestellt wird.

Es wurden Verhältnismessungen an zwei 10-k Ω -Widerständen und 10-nF-Kondensatoren durchgeführt. Die Ergebnisse des ermittelten Widerstandsverhältnisses bei 20 mV und unterschiedlichen Frequenzen wurde mit den Ergebnissen einer Impedanzmessbrücke auf Basis von programmierbaren Josephson-Normalen verglichen (siehe Bild 8). Beide Messbrücken zeigen eine Übereinstimmung im Bereich von einem Teil in 10^7 . Dabei ist anzumerken, dass aufgrund der 2-Tor-Messung der Einfluss der Kontaktwiderstände an den Steckverbindern der Widerstandsnormale den wesentlichen Beitrag zur Unsicherheit liefert.

Das Verhältnis zweier 10-nF-Kapazitäten wurde ebenfalls bei 20 mV und bei einer Frequenz von 1591,5 Hz bestimmt. Der Vergleich mit einer kommerziellen Messbrücke bei 1600 Hz zeigt eine Übereinstimmung von $2 \cdot 10^{-8}$. Darüber hinaus wurden Quadraturmessungen ($\omega RC = 1$) mit den 10-k Ω -Widerständen und den 10-nF-Kondensatoren bei einer Frequenz von etwa 1591 Hz durchgeführt. Hierbei wird das Puls muster für die Erzeugung der beiden Spannungen nicht verändert, sondern die Signalfrequenz über den Systemtakt (etwa 15 GHz) angepasst um die Bedingung $\omega RC = 1$ zu erfüllen. Durch die Änderung des Systemtakts ändert sich auch die Ausgangsspannung geringfügig, da dies für beide Spannungen in gleichem Maße erfolgt, hat dies jedoch keinen Einfluss auf die Messung.

Für eine von anderen Messsystemen unabhängige Überprüfung der neuen Messbrücke wurden sowohl die Verhältnisse $C_1:C_2$ ($R_1:R_2$) direkt gemessen als auch alle möglichen Kombinationen der Impedanznormale in Quadratur. Aus den gewonnenen Daten der Quadraturmessungen konnten die Verhältnisse der Widerstände und Kondensatoren berechnet und mit den direkt gemessenen verglichen werden. Die Ergebnisse

in 10^{-6}	$(R_1-R_2)/R_2$	$(C_1-C_2)/C_2$
Direkte Messung	$-2,94 \pm 0,05$	$+8,03 \pm 0,01$
Quadratur	$-3,03 \pm 0,30$	$+8,10 \pm 0,10$
Differenz	+0,09	-0,07

Tabelle 1: Vergleich zwischen der direkten Messung der Impedanzverhältnisse und der Bestimmung aus den Quadraturmessungen. Die angegebenen Unsicherheiten sind Typ-A-Unsicherheiten.

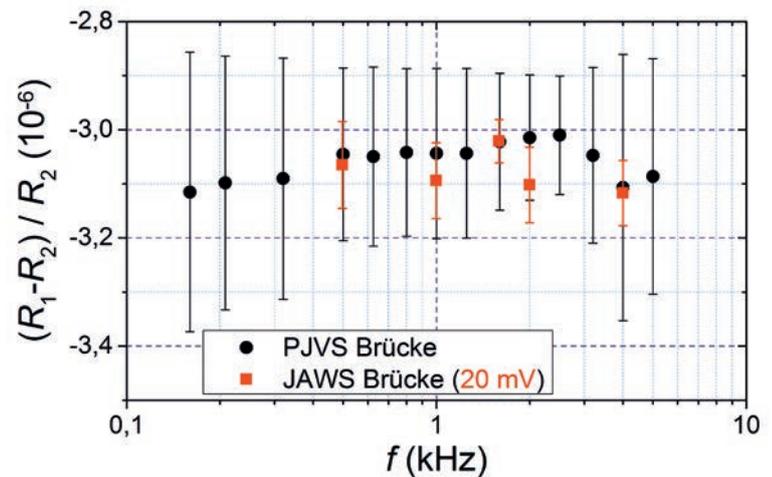


Bild 8: Vergleich des gemessenen Widerstandsverhältnisses von zwei 10-k Ω -Widerständen. Die Ergebnisse der Messbrücke auf der Basis von programmierbaren Josephson-Normalen (PJVS) sind in schwarz und die der pulsgetriebenen in rot dargestellt. Bei den angegebenen Unsicherheiten handelt es sich lediglich um die statistischen Unsicherheiten.

zeigen eine hervorragende Übereinstimmung (siehe Tabelle 1) und zeigen somit, dass mit der neuen Impedanzmessbrücke an der PTB auch Quadraturmessungen mit herausragender Präzision durchgeführt werden können.

Ein weiterer Meilenstein ist die Kombination der Messbrücke mit dem Quanten-Hall-Widerstand. Als weltweit einziges Institut betreibt die PTB den Quanten-Hall-Widerstand auch bei Wechselspannungen. Dadurch ist es möglich, eine Impedanz mittels Josephson-Spannung direkt auf den Quanten-Hall-Widerstand zurückzuführen. In einer ersten Messreihe wurden Quadraturmessungen bei etwa 1233 Hz mit einer Effektivspannung von 20 mV durchgeführt. Bei diesen Messungen wurde die Kapazität eines Kondensators mit einem Nennwert von 10 nF bestimmt. Es wurde eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von einer transformatorbasierten koaxialen Impedanzmessbrücke im Bereich von weniger als einem Teil in 10^7 erreicht.

Diese sehr vielversprechenden Messungen gewähren einen ersten Einblick in das große Potenzial der Impedanzmessbrücke auf Basis von pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen. Es ist geplant, die Messspannung weiter zu erhöhen, um somit direkt das Signal-

zu-Rausch-Verhältnis zu optimieren. Dies erfolgt durch den Einsatz neuer Josephson-Schaltungen mit noch höheren Kontaktzahlen, durch Schaltungen mit einem anderen Design und durch die Optimierung der Sekundärelektronik und der Kühlung des Chips.

Eine Einschränkung dieser Brücke ist die 2-Tor-Definition, welche die Unsicherheiten bei der Messung von niedrigen Impedanzen erhöht. Diese Limitierung kann durch eine Erweiterung der pulsgetriebenen Impedanzmessbrücke auf eine 4-Tor-Anordnung aufgehoben werden, da in dieser Anordnung die Strom- und Spannungsdefinitionen durch getrennte Leitungen erfolgen. Eine solche Erweiterung der pulsgetriebenen Josephson-Impedanzmessbrücke ist geplant und soll in Zukunft die Messunsicherheit insbesondere bei niedrigen Impedanzen weiter reduzieren. Beim Einsatz des Systems zu höheren Frequenzen hat die Impedanz der verwendeten Kabel einen immer größeren Einfluss auf das Messergebnis. Daher werden für Frequenzen jenseits des Audibereichs (Frequenzen größer 20 kHz) kompakte Systeme mit kurzen Kabellängen benötigt.

Durch die Entwicklungen im Bereich von Quanten-Hall-Widerständen auf der Basis von Graphen wird es in Zukunft möglich sein, dass die Kombination von Josephson-Impedanzmessbrücken und dem Quanten-Hall-Widerstand in einem kompakten Messaufbau bei der Temperatur von flüssigem Helium realisiert werden kann. Dadurch entfallen auf Seite des Quanten-Hall-Widerstandes die aufwendigen Kryostate, und Kabellängen können deutlich reduziert werden.

Zusammenfassung

Durch die Verwendung von Josephson-Spannungsnormale als Spannungsquellen in Impedanzmessbrücken stehen erstmals rauscharme und fundamental genaue Spannungen für die Impedanzmessung zur Verfügung. Die frei einstellbaren Spannungs- und Phasenverhältnisse ermöglichen es, beliebige Impedanzverhältnisse zu messen. Beide an der PTB realisierten Varianten von Josephson-Impedanzbrücken zeigen untereinander und zu transformatorbasierten Messbrücken eine sehr gute Übereinstimmung. Die Automatisierung dieser Systeme erleichtert den Betrieb und ermöglicht Messungen über einen weiten Frequenzbereich in kurzer Zeit. Die Entwicklung dieser Systeme ist noch längst nicht abgeschlossen, und für die Zukunft ist noch eine Steigerung der Leistung zu erwarten, vor allem im Bereich der

pulsgetriebenen Impedanzmessbrücken. Insbesondere wird hier die Kombination mit dem Graphen-AC-Quanten-Hall-Widerstand die Rückführung von Impedanzen auf Quantennormale in einem sehr kompakten System ermöglichen.

Danksagung

Diese Arbeiten wurden zum Teil mit finanzieller Unterstützung durch die Europäische Union im Rahmen von EMRP JRP SIB53 AIM QuTE ausgeführt. Das EMRP wird gemeinsam von den EMRP-Teilnehmerstaaten innerhalb von EURAMET und der Europäischen Union finanziert.

Literatur

- [1] L. Callegaro, *Traceable Measurements of Electrical Impedance*, IEEE Instrum. Meas. Mag. **18**, Heft 6, 42–46 (2015).
- [2] S. Awan, B. Kibble und J. Schurr, *Coaxial Electrical Circuits for Interference-Free Measurements*, IET electrical measurement, Band 13, Institution of Engineering and Technology, (2011).
- [3] *Automated impedance metrology extending the quantum toolbox for electricity*, European Metrology Research Programme (EMRP), Project SIB53 AIM QuTE, 2013–2016
<https://www.ptb.de/emrp/aimqute.html>
(Letzter Zugriff am 19.10.2016).
- [4] L. Callegaro, V. D'Elia, M. Kampik, D. B. Kim, M. Ortolano und F. Pourdanesh, *Experiences With a Two-Terminal-Pair Digital Impedance Bridge*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **64**, Heft 6, 1460–1465 (2015).
- [5] J. Lee, J. Schurr, J. Nissilä, L. Palafox und R. Behr, *The Josephson Two-Terminal-Pair Impedance Bridge*, Metrologia **47**, Heft 4, 453–459 (2010).