Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 108 (2017)
Heft: 11

Artikel: Überbrückung der Frequenzlücke
Autor: Pythoud, Frédéric / Mortara, Alessandro
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-791376

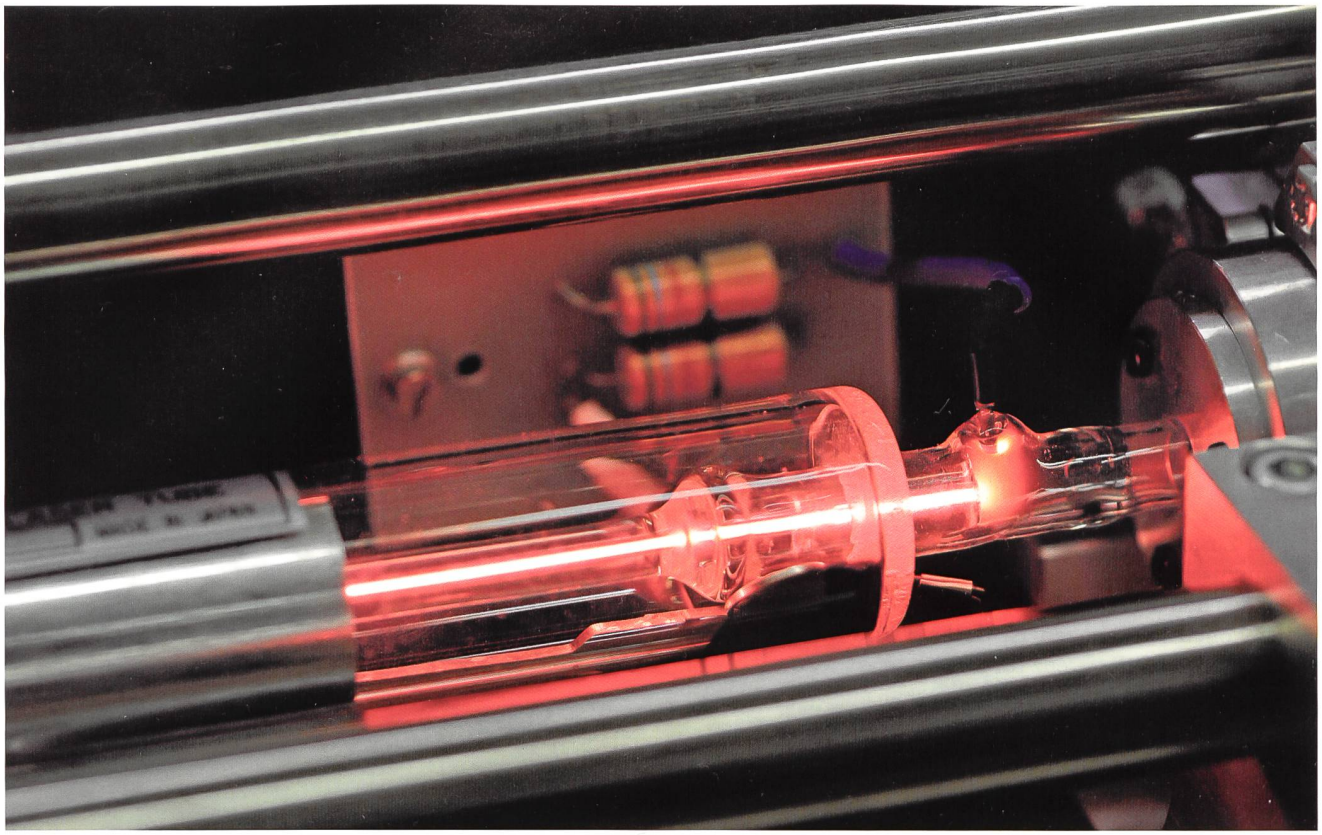
Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch



Der für Messungen an elektrischen Hochfrequenzsignalen benötigte Meter wird mittels eines Lasers realisiert.

Bild: Metas

Überbrückung der Frequenzlücke

Unterschiedliche Referenzen | Je nach Frequenzbereich werden elektrische Einheiten unterschiedlich realisiert. Die metrologischen Referenzen für niedrige Frequenzen basieren auf Quanteneffekten, diejenigen für hohe Frequenzen auf Watt und Meter. Dazwischen gibt es eine messtechnische Lücke. Wie gelingt die Kalibrierung von Messgeräten über diese Lücke hinweg?

TEXT FRÉDÉRIC PYTHOUD, ALESSANDRO MORTARA

Wer elektrische Grössen genau messen will, braucht dazu kalibrierte Messgeräte. Kalibrieren bedeutet in der Metrologie, ein Messinstrument mit einer absoluten Referenz zu vergleichen, die auf das internationale Einheitensystem (SI) rückführbar ist. Das ist die Aufgabe der nationalen Metrologieinstitute, in der Schweiz des Eidgenössischen Instituts für Metrologie, Metas. Nationale Metrologieinstitute realisieren auf das SI rückführbare, absolute Referenzen (Primärnormale) und geben die Masseinheiten so in der erforderlichen Genauigkeit den Anwendern weiter.

Die elektrischen Einheiten weisen bezüglich ihrer Realisierung interessante Besonderheiten auf. Der Grund dafür ist, dass selbst die genauesten Gleichspannungsreferenzen ungeeignet sind als Referenzen für Hochfrequenzsignale. Die Referenzen für elektrische Einheiten müssen deshalb nicht nur bei Gleichspannung realisiert werden, sondern bei jeder Frequenz, die für die heutigen Anforderungen der Industrie benötigt wird – meist von Gleichspannung bis etwa 100 GHz.

Die Realisierung elektrischer Einheiten

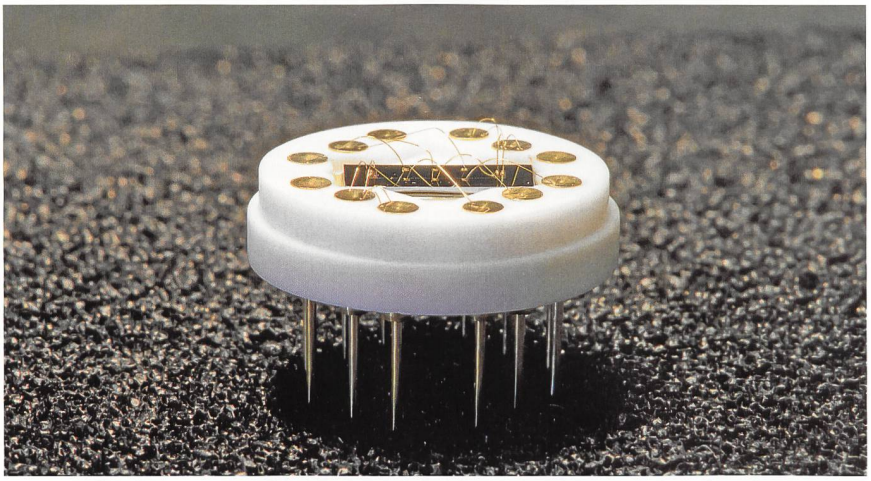
Das Metas realisiert die elektrischen Primärnormale mit Methoden, die auf zwei Quanteneffekten basieren: dem Josephson-Effekt (Spannung) und dem Quanten-Hall-Effekt (Widerstand).[2,3] Beide Effekte werden experimentell bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (wenige Kelvin) erzeugt und

sind international als absolute Referenzen für elektrische Einheiten akzeptiert. Sie erreichen eine relative Unsicherheit von weniger als 10^{-9}. Leider können diese Referenzen nicht bei Frequenzen über einem GHz eingesetzt werden. Bei solchen Frequenzen ist die Wellenlänge des Signals so klein (ca. 30 cm), dass sie dieselbe Grössenordnung aufweist wie der Versuchsaufbau selbst. Aufgrund von Interferenzen im Kabel, die das zurückkehrende Signal an jeder Unstetigkeit innerhalb des Aufbaus verursacht (Stecker, Übergang vom Kabel zu anderen Komponenten), hängt die Spannung wesentlich davon ab, an welcher Stelle sie gemessen wird. Um alle Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem Messort auszuschliessen, misst man die ausgehenden und die reflektierten Signale.

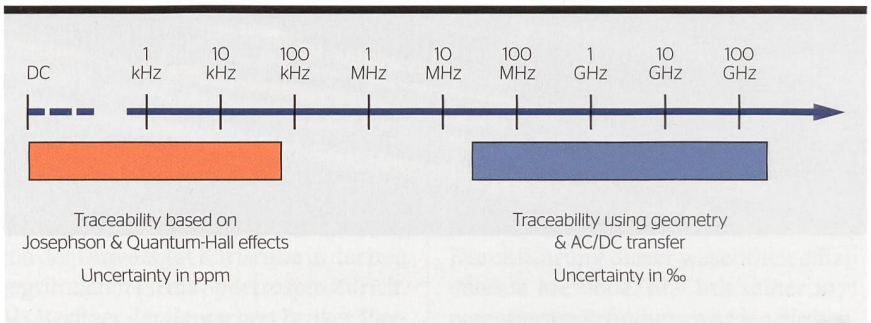
Bei hohen Frequenzen ist deshalb nicht das Volt die Referenz für die Signalamplitude, sondern das Watt. Der Wert wird mit Hilfe des AC/DC-Transfers ermittelt, indem man die Verlustwärme eines Hochfrequenzsignals mit der eines bekannten Gleichspannungssignals vergleicht. Um dabei die Leistung bei hoher Frequenz präzise zu messen, muss die Impedanz des Übertragungssystems (Koaxialkabel, Wellenleiter) exakt bekannt sein. Die Referenz für die Hochfrequenzimpedanz ergibt sich aus der mechanischen Dimension (Geometrie) einer idealen Übertragungsleitung, einer sogenannten Luftleitung. Es mag seltsam erscheinen, dass elektrische Hochfrequenzsignale direkt von der Realisierung des Meters abhängen, zumal sich dies unmittelbar auf die Messgenauigkeit der Referenzen für Hochfrequenzen auswirkt. Die Hochfrequenzreferenz für die Signalstärke hat eine typische Genauigkeit von wenigen Promillen.

Zwei Welten ohne Überschneidungen

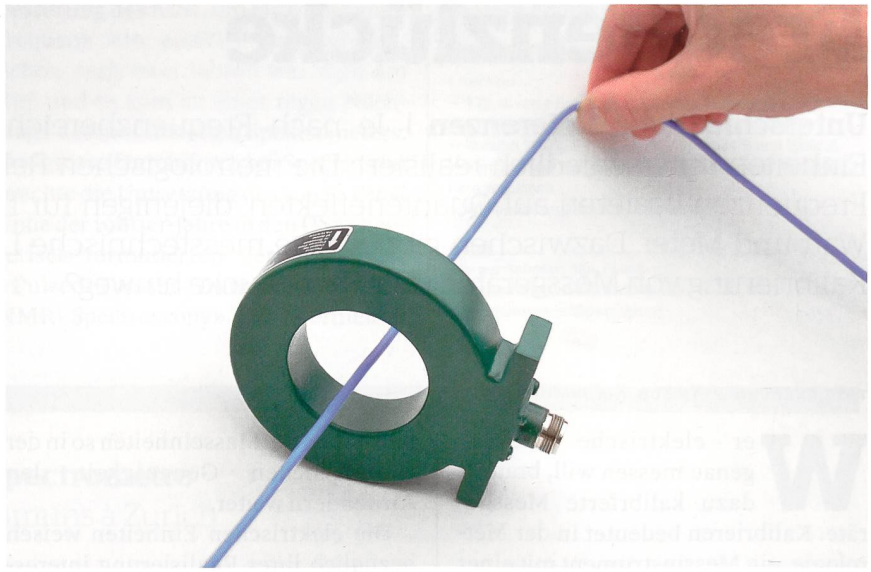
Bei der Realisierung der elektrischen Einheiten über den Frequenzbereich haben wir es mit zwei getrennten Welten zu tun: Einerseits mit Gleichspannungsreferenzen, die mit berechenbaren Komparatoren auf ca. 50–100 kHz erweitert werden können, und zweitens mit Hochfrequenzreferenzen auf der Basis von Leistungs- und Impedanzmessungen. Interessant ist vor allem das Fehlen jeglicher Überschneidungen zwischen diesen beiden grundverschiedenen Welten, denn Welleneffekte müssten ab 50 kHz



Die elektrische Einheit Ohm wird durch den Quanten-Hall-Effekt in einem elektrischen Schaltkreis bei Temperaturen unter 4 K realisiert.



Die Realisierung eines DC-Volts unterscheidet sich komplett von der Realisierung eines Volts bei einer Frequenz von 1 GHz – in der Mitte klafft eine Lücke.



Stromzangen sind Spannungswandler, die einen Frequenzbereich von wenigen Hz bis zu mehreren MHz abdecken können. Die Spannung am Anschluss ist proportional zu dem durch die Zange fliessenden Strom.
Für die Hochfrequenz-Kalibrierung dient als «Stromquelle» ein HF-Generator. Das Signal wird zunächst am Ausgang des «Kalibrieradapters» und danach am Ausgang der Zange selbst gemessen. Die Transferimpedanz der Zange wird unter Berücksichtigung der Streuparameter der Vorrichtung berechnet. Dieses Verfahren stellt eine erhebliche Verbesserung der CISPR-Methode dar, weil sie Feinkorrekturen für die Schätzung von Reflexionsverlusten und Stehwellenverhältnissen ermöglicht.[1]

berücksichtigt werden, was bei einem Niederfrequenzmesssystem schwer möglich ist. Zudem wird die Hochfrequenzimpedanz mit Luftleitungen realisiert (Referenz-Koaxialleitern), deren Länge auf maximal etwa 50 cm begrenzt ist, was ihre Übertragbarkeit auf Frequenzen über 40 MHz einschränkt.

Mit Stromzangen über die Frequenzlücke

Trotz der Frequenzlücke können elektrische Messungen in diesem Frequenzbereich durchgeführt werden. Die dazu notwendigen Referenzen erhält man durch Interpolation der Werte stabiler elektrischer Komponenten über die Frequenzlücke hinweg. Allerdings lässt sich die Messunsicherheit der Referenz innerhalb der Lücke nicht mit derselben Präzision beurteilen wie ausserhalb.

Zur Bestätigung der Kalibrierfähigkeit über die Frequenzlücke hinweg wurden die mit Nieder- und Hochfrequenztechniken erhaltenen Kalibrierfaktoren verglichen. Der Prüfling war ein Zangenstrommesser Pearson 110 A. Diese Stromzange misst indirekt die elektrische Stromstärke anhand des Magnetfeldes, das den Leiter umgibt. Nur ein kleiner Teil der Hochfrequenzmessungen ist formal auf SI-Einheiten rückführbar, da die meisten in der Lücke liegen (50 kHz bis 50 MHz). Die Experimente zeigen, dass im Überschneidungsbereich zwischen 10 kHz und 80 kHz die maximale Abweichung zwischen beiden Kalibrierfaktoren etwa 0,2–0,3 % beträgt. Die detaillierte Unsicherheitsrechnung ergibt für die Methode bei über 10 kHz typische Messunsicherheiten von 0,5 %.

Kalibrierservice: State of the Art

Der Vergleich zwischen Kalibrierungen von Stromzangen in hohen und tiefen Frequenzen belegt, dass das Metas in der Lage ist, die Frequenzlücke zu überbrücken. Dieser Kalibrierservice steht unseren Kunden nun zur Verfügung. Eine Stromzangenkalibrierung ist möglich von 5 Hz bis 400 MHz, bei typischen Stromstärken von 20 A, bei tiefen Frequenzen bis 0,5 A bei 400 MHz. Die Messunsicherheiten der beim Metas durchgeführten Kalibrierung von Stromzangen sind international als Stand der Technik anerkannt.

Referenzen

[1] Alessandro Mortara, Frédéric Pythoud, «Wideband accurate calibration of a current probe», Conference on precision electromagnetic measurements (CPEM), 1–6 July 2012, Washington DC, USA; Conference digest S. 484.

[2] B. Jeckelmann, B. Jeanneret, «Application de l'effet Hall quantique à la métrologie», OFMET info 4/2, S. 8–14, 1997.

[3] B. Jeanneret, A. Rüfenacht, F. Overney, «The Josephson Locked Synthesizer: a State of the Art Quantum Based AC Voltage Source», METinfo 18/1, S. 4–9, 2011.

[4] CISPR 16-1-2, «Anforderungen an Geräte und Einrichtungen. Teil 1-2: Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit», Ausgabe 1.2.2006.

Autoren

Dr. **Frédéric Pythoud** leitet das EMV-Labor bei Metas.
→ Metas, 3003 Bern-Wabern
→ frederic.pythoud@metas.ch

Dr. **Alessandro Mortara** leitet das Labor für Gleichstrom und Niederfrequenz bei Metas.
→ alessandro.mortara@metas.ch

RÉSUMÉ

La couverture du gap de fréquence

Des références différentes

Les unités électriques sont réalisées différemment selon leur domaine de fréquences. Les références métrologiques pour les basses fréquences reposent sur les effets quantiques et celles relatives aux hautes fréquences sont basées sur le watt et le mètre. La valeur de ces dernières est déterminée à l'aide d'un transfert AC/DC, un processus au cours duquel les pertes thermiques d'un signal à haute fréquence sont comparées à celles d'un signal en tension continue déterminé. Entre ces deux domaines se trouve toutefois une lacune métrologique.

Malgré cette lacune, il est possible de réaliser des mesures électriques dans ce « gap » de fréquences. Les références nécessaires sont obtenues par interpolation des valeurs de composants électriques stables d'une extrémité à l'autre du gap de fréquence. Toutefois, l'incertitude de mesure de la référence dans le gap de fréquence ne peut pas être évaluée avec la même fiabilité que celle déterminée en dehors de ce dernier. Afin de confirmer la faculté d'étalonnage dans ce gap, les facteurs de correction obtenus par le biais des techniques à basse et haute fréquence sont comparés. NO

teconia

Swissness für Ihre Sprachkommunikation

TQ-SERVICES
Teconia Quality Services

Sprachkommunikation mit Weitblick
- Sprachübertragungen (Übersetzungen)
- Technische Kommunikation
- Marketing Kommunikation

TQ-TOOLS
Teconia Quality Tools

Leistungsstarker Support
- TQ-Proof
- TQ-Convert
- TQ-Term ... und vieles mehr

» **Für Mitglieder von Electrosuisse und VSE:** Fragen Sie nach unseren Spezialkonditionen.

Teconia GmbH • Poststrasse 3 • CH-9100 Herisau • T +41 71 352 32 30 • F +41 71 352 32 31 • info@teconia.com • www.teconia.com