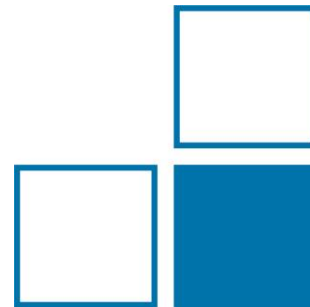
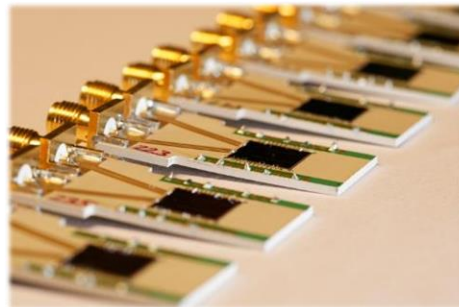
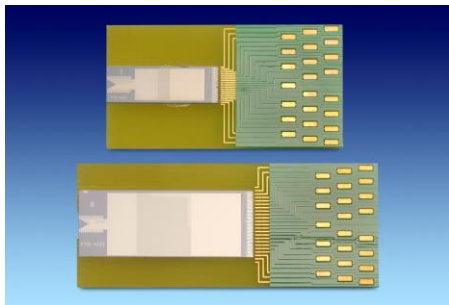


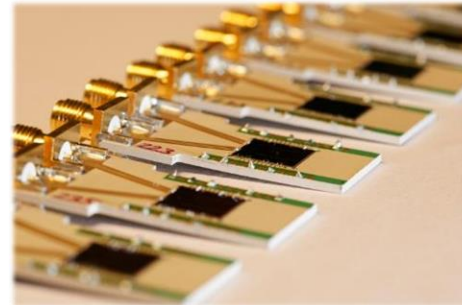
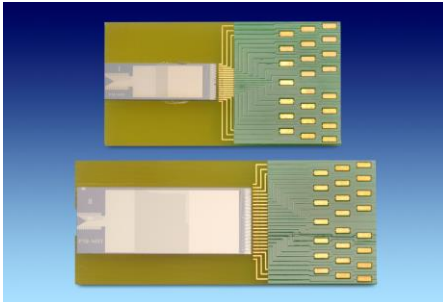
Ein Quantenvoltmeter für Spannungskalibrierungen von DC bis 100 kHz

Ralf Behr



Behr	2010	Quantenspannung im Industrielabor – geht das? Was wird gebraucht? Was darf das kosten?
Supracon	2014	AC Quantenvoltmeter
esz	2018	Der Quantenkalibrator: Möglichkeiten eines Primärnormals im industriellen Kalibrierlabor

- 1. Einleitung & Motivation**
- 2. Frequenzerweiterung bis 100 kHz**
- 3. Aktueller Stand der Forschung**

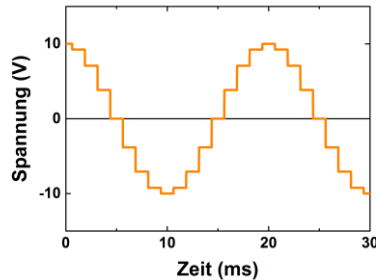


$$V_{AC}(t) = N \cdot (h/2e) \cdot f$$

$N(t)$



Stufenförmig approximierte Wellenformen

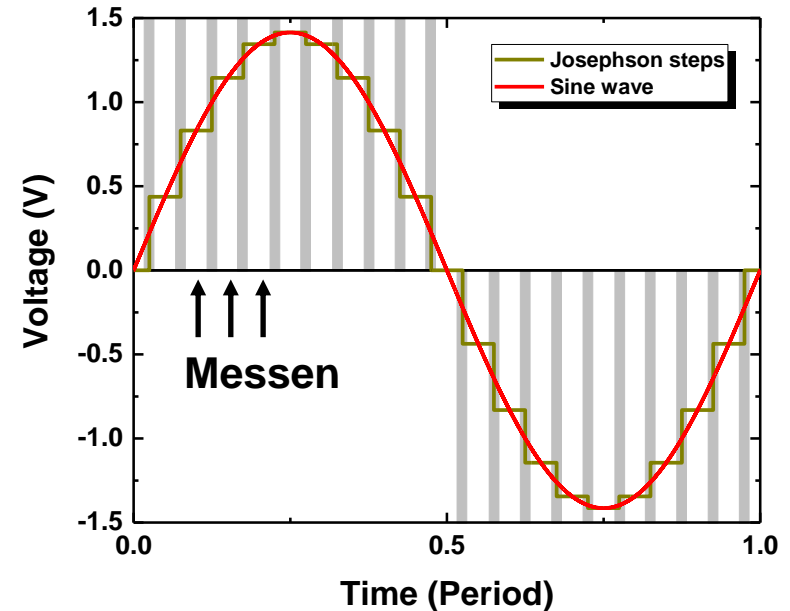


+ 10 V (2006)

- Transienten

DC - 1 kHz

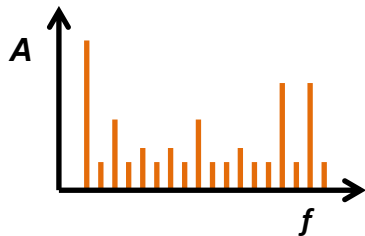
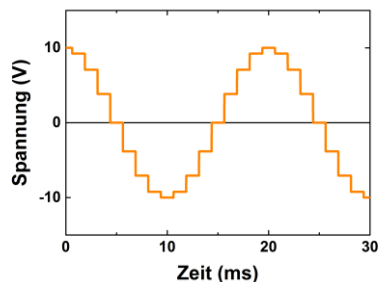
Methode: differentielles Sampling



$$V_{AC}(t) = N \cdot (h/2e) \cdot f$$



Stufenförmig approximierte Wellenformen



+ 10 V (2006)

- Transienten

DC - 1 kHz

- Harmonische

AC Quantenvoltmeter

Spezifikationen:

DC: bis 10 V

mit 1×10^{-10} Unsicherheit

AC: 0.2 V(RMS) – 7.2 V(RMS)

10 Hz – 1 kHz,

voll automatisch,

mit 2×10^{-8} Unsicherheit

DC System



AC Spannungsnorm

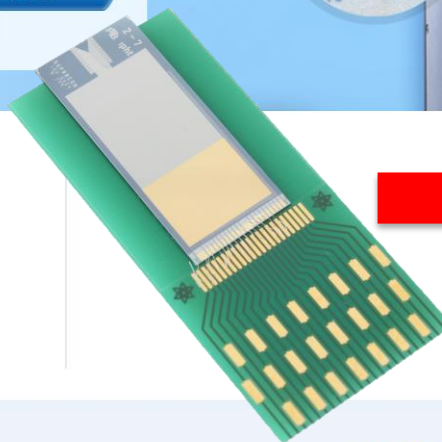
WELTNEUHEIT: PRIMÄRNORMAL FÜR AC SPANNUNGEN

Das Supracon AC Quantum Voltmeter ist das erste kommerziell verfügbare Primärnormal für Spannungen von $\pm 10,1$ V von dc bis kHz Frequenzen

MEHR...

Neuigkeiten

- Kompakte 18-Kanal-Bias-Quelle
- Supracon AG – Jetzt auch ein Ausbildungsbetrieb
- F&E-Projekt DESMEX erfolgreich abgeschlossen
- Innovative nicht-invasive Technologien für die Erkundung natürlicher Ressourcen



SQUID Normale



Turnkey System

- Automatisiert
+ interne Testroutinen
- Erspart Rückführung
- Sehr geringe
Messunsicherheiten
- Hohe Effizienz
- Vielseitig



Quantenvoltmeter

Entwickler von esz und Supracon aus Jena sowie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig arbeiten an einem industriellen AC/DC-Josephson-Quantenvoltmeter. Bei einem Vergleich mit dem Josephson-Normal der PTB erzielte das Josephson-Normal von esz und Supracon im Gleichspannungsbetrieb bei 10 Volt eine Übereinstimmung von $4,4 \text{ nV}$ ($4,4 \cdot 10^{-10}$). Der Wechselspannungsbetrieb ergab eine Übereinstimmung von wenigen Milli-onstel. // HEH

ELEKTRONIK PRAXIS

www.elektronikpraxis.de

Wissen.
Impulse.
Kontakte.

need power? think GlobTek.de

22

B19126

17. November 2015 € 12,00

AC/DC-JOSEPHSON-QUANTENVOLTMETER

Auf dem Weg zu Europas genauestem Kalibrierlabor

Mit dem Josephson-Effekt lassen sich Spannungen sehr genau darstellen. Um die Genauigkeiten in der Metrologie weiter zu verbessern, arbeiten die Supracon AG aus Jena, die Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig sowie die esz AG calibration & metrology seit Anfang 2011 am weltweit ersten industriell genutzten AC/DC-Josephson-Quantenvoltmeter. Ende September führten die drei Partner einen bilateralen Vergleich zwischen zwei Josephson-Standards durch. Dabei sollten



Genaues Prüflabor: Die esz entwickelt das weltweit erste industriell genutzte AC/DC-Josephson-Quantenvoltmeter.

die beantragten Messungen für Gleich- und Wechselspannung bestätigt und von der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) akkreditiert werden.

Bei einem Direktvergleich mit dem Josephson-Normal der PTB erzielte das Josephson-Normal von esz und Supracon im Gleichspannungsbetrieb bei 10 Volt eine Übereinstimmung von $4,4 \text{ nV}$ ($4,4 \cdot 10^{-10}$). Im Wechselspannungsbetrieb ergab der Direktvergleich eine Übereinstimmung weniger Millionstel. Das über-

trifft den Stand traditioneller Messtechnik um ein Vielfaches. Solche Vergleichsmessungen sind aufwendig, dementsprechend selten und finden üblicherweise nur unter metrologischen Staatsinstituten statt. Seit dem Direktvergleich befindet sich esz bei den Messgrößen Gleich- und Wechselspannung auf Augenhöhe mit den hochgenauen Instituten und ist auf dem Weg Europas genauestes Kalibrierlabor zu werden. // HEH

esz calibration & metrology

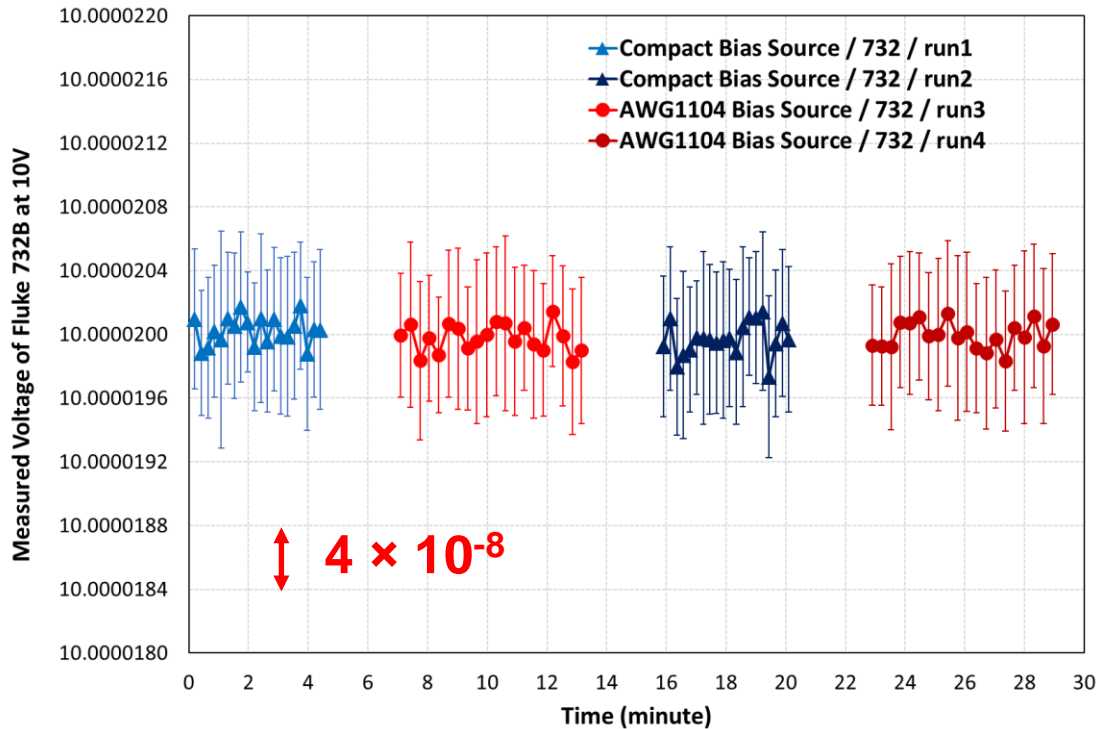
Kalibriert:

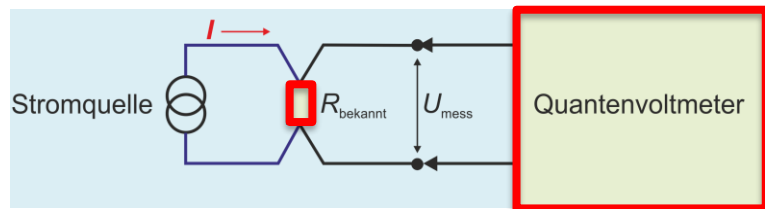
- Zener Spannungsnormale
- DVMs Linearitäten
- Gleich- und Wechselspannungsnormale
- Thermokonverter
- Gleich- und Wechselstromstärken
- Widerstandsverhältnisse



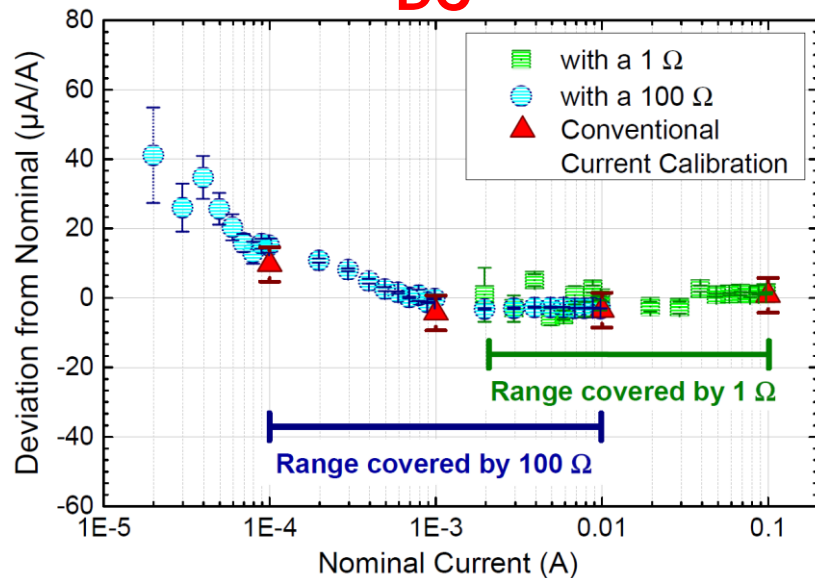
Zener Kalibrierungen mit dem AC Quantenvoltmeter

DC Kalibrierungen, z.B. Fluke 732B

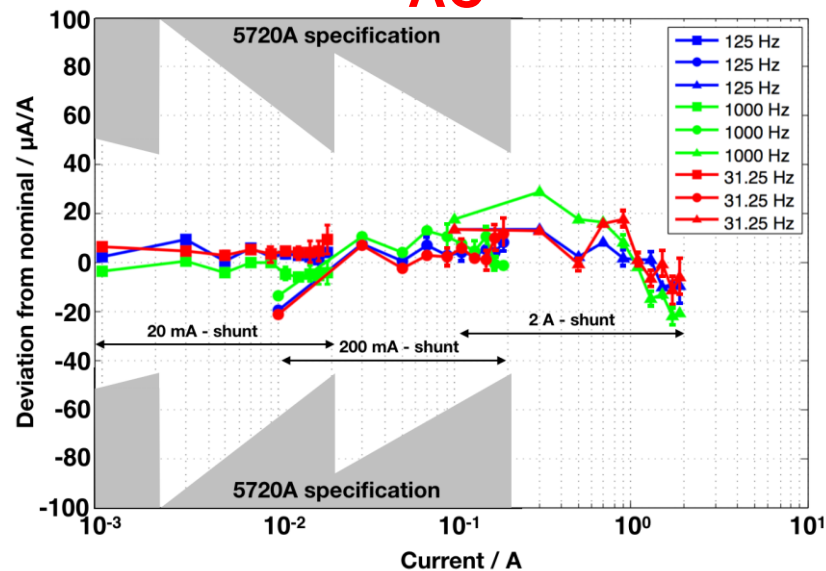


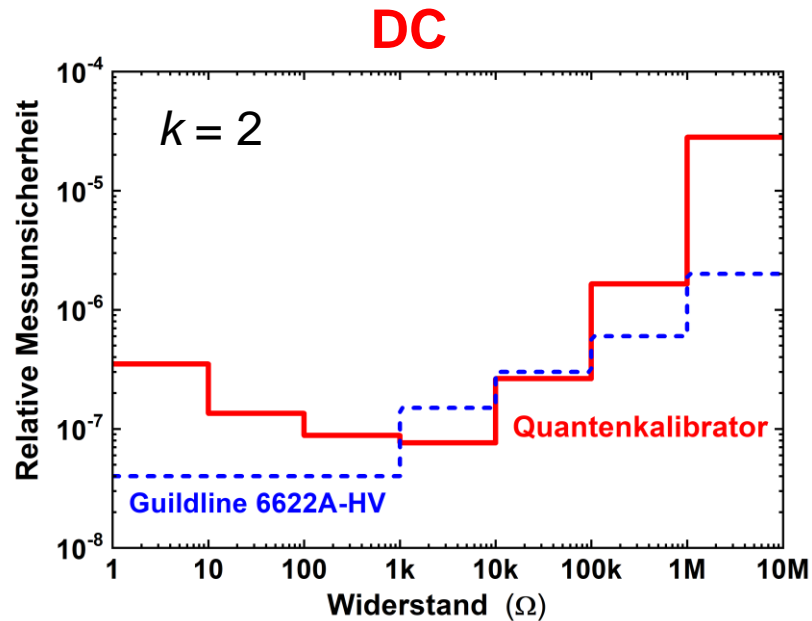
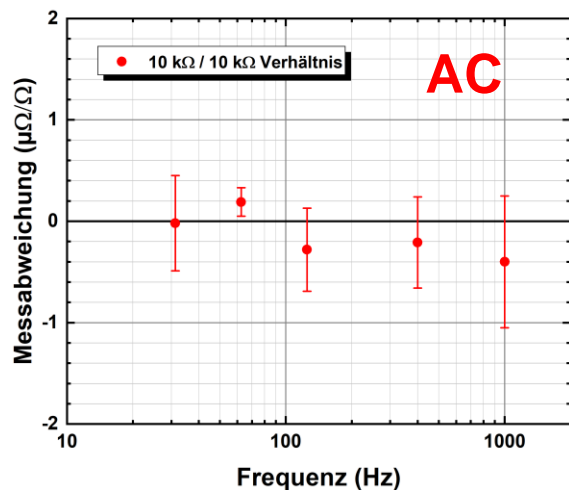
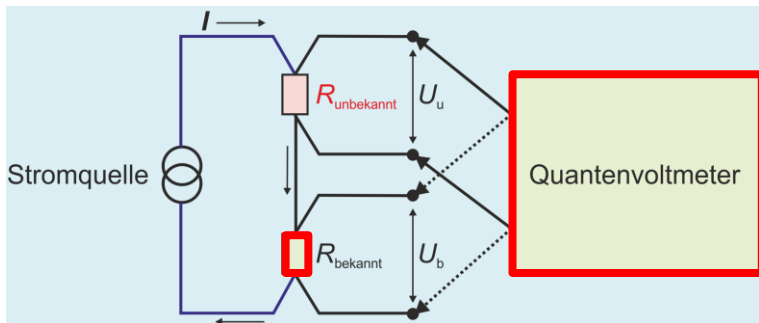


DC



AC

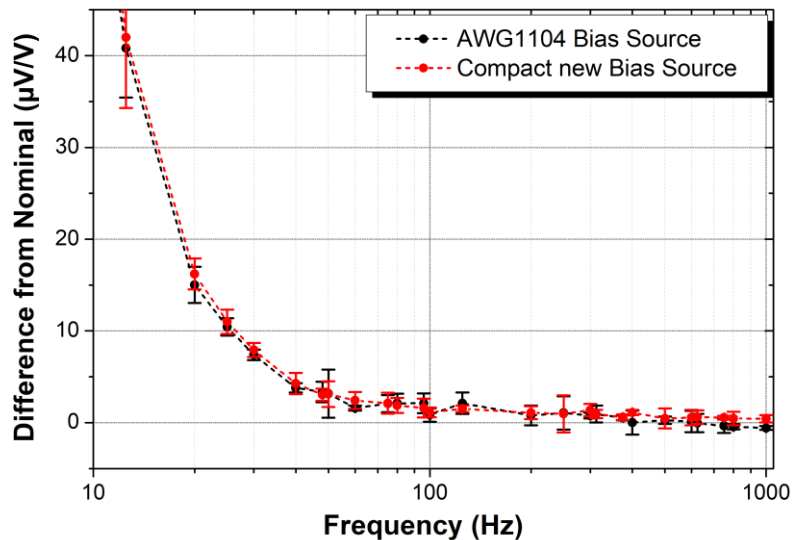
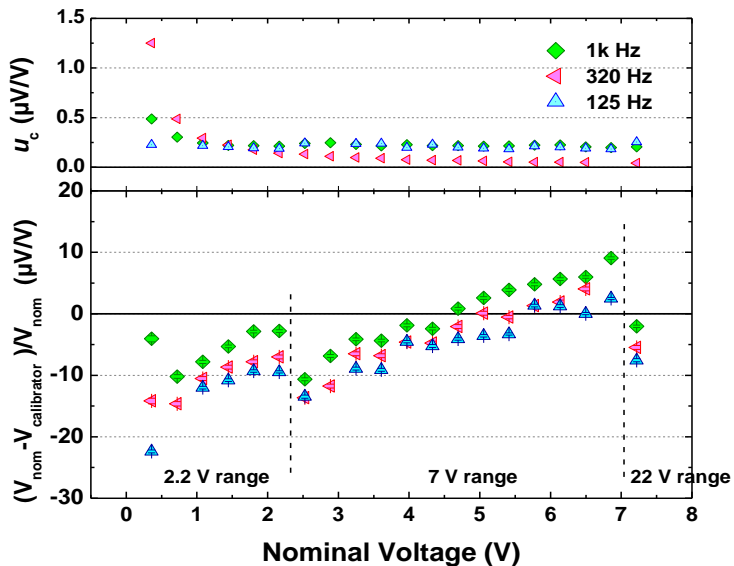




- Automatisiert
- 4 Widerstandsnormale

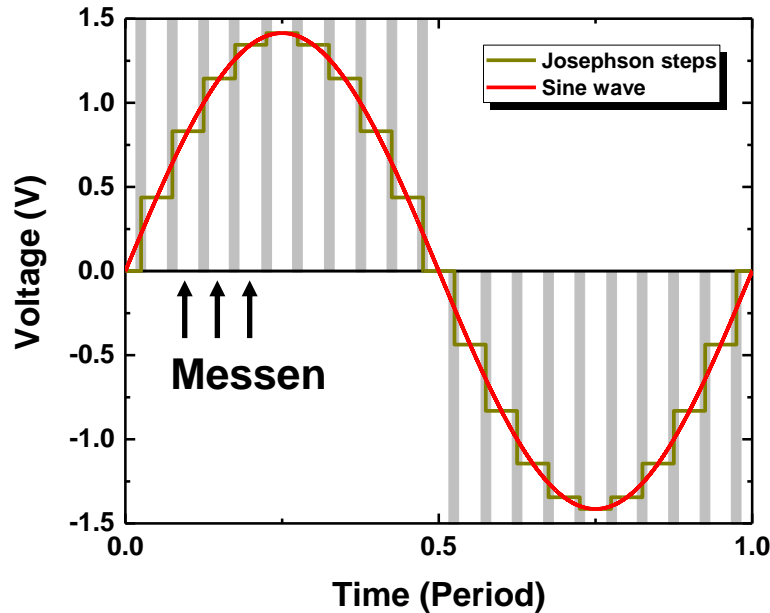


- Schnell: 1 Messpunkt = 1 Minute



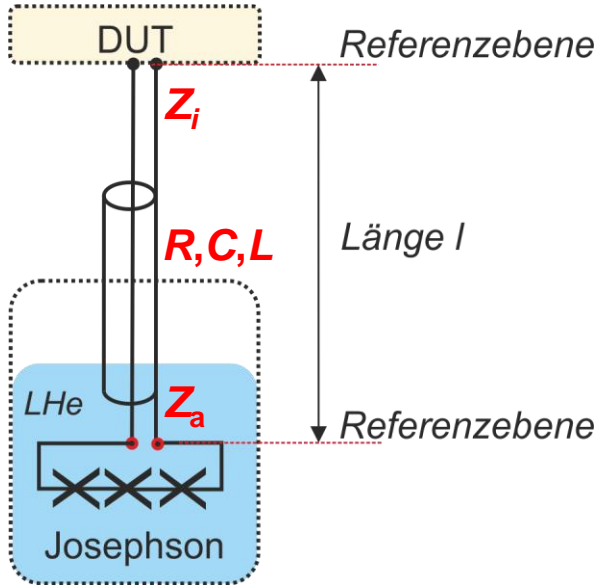
Wieso nicht zu höheren Frequenzen?

Methode: differentielles Sampling



Entwicklungsschritte:

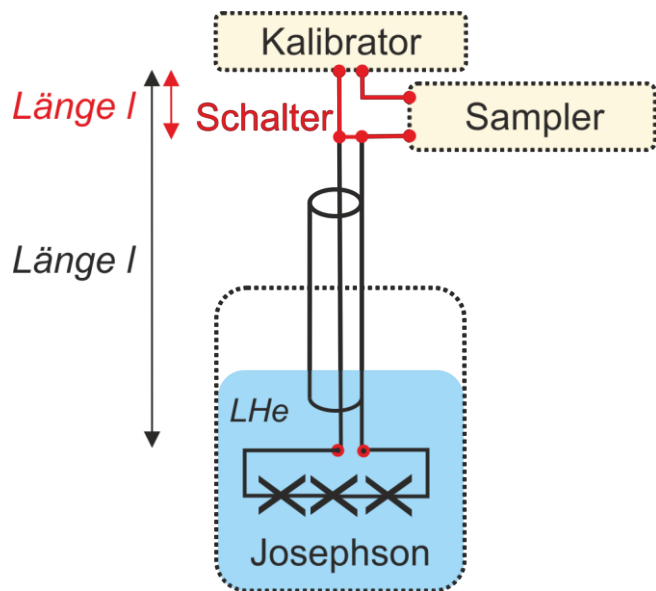
- differentielles Sampling → Sub-Sampling
- Filterkorrektur des Samplers
- Kabelkorrektur



Fehler $\sim I^2 f^2$ typisch 200 $\mu\text{V/V}$ bei 100 kHz

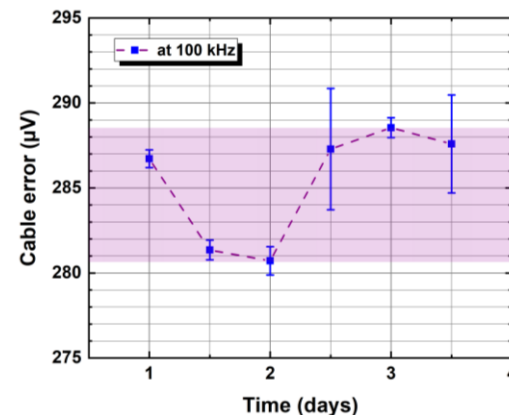
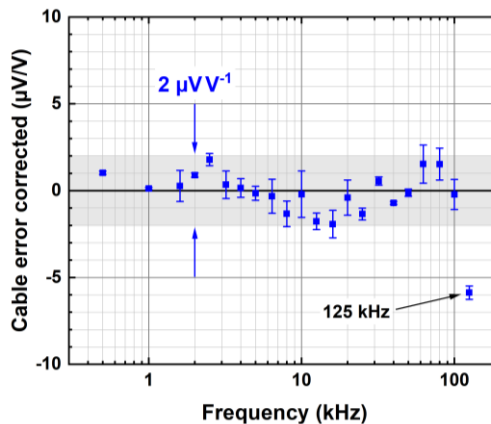
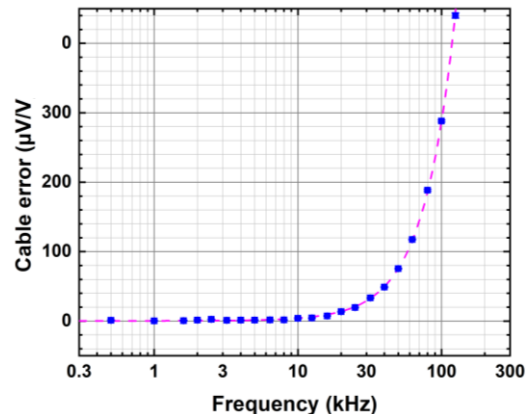
- 1) **DUT** bei 1 MHz bekannt \rightarrow woher?
- 2) Theor. Korrektur (Z_i , Z_a , R , C , L) \rightarrow stabil?
- 3) **Z-Anpassung + NIC** \rightarrow Verbesserung?
- 4) **Impedance – Matching** \rightarrow umständlich?
- 5) \rightarrow Messung

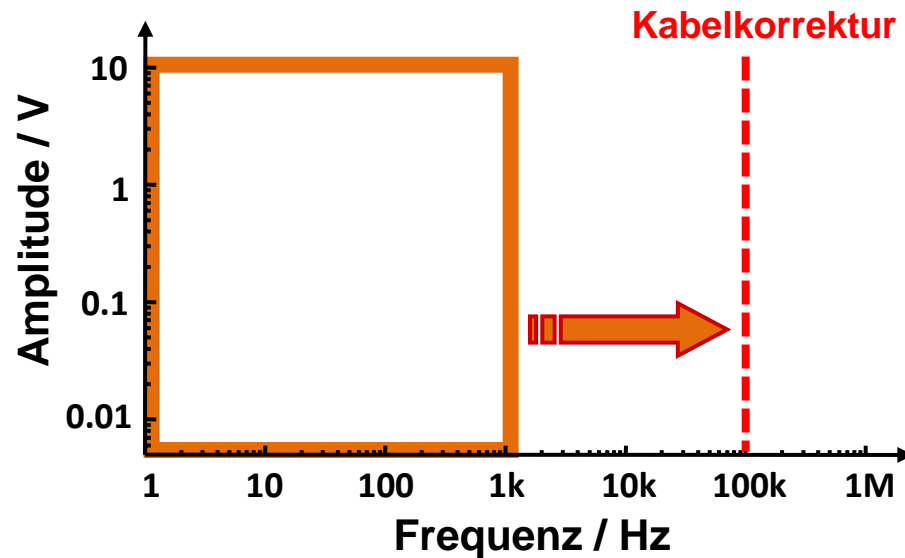
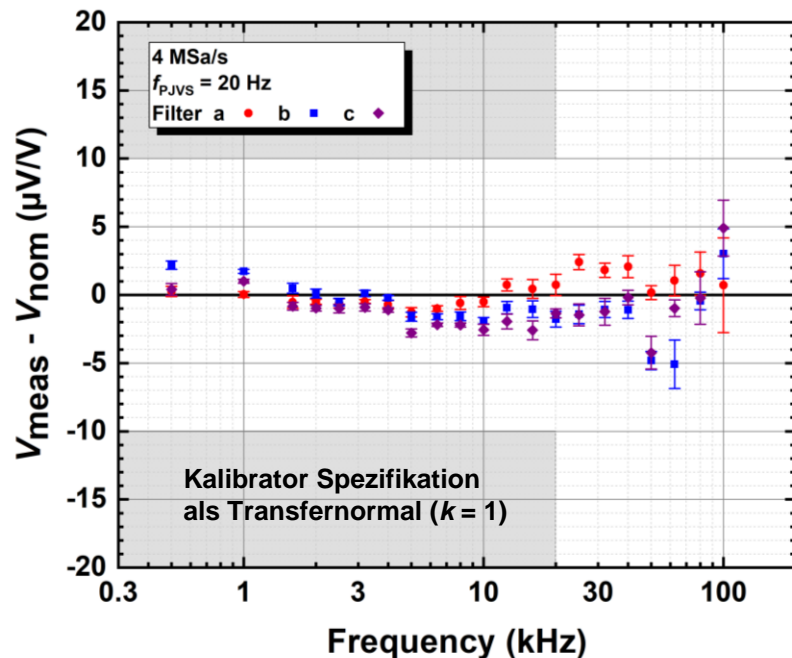
Kabelkorrektur mit Schalter



Fehlerreduzierung
 $\approx (l/l)^2 \approx 170$

Messung





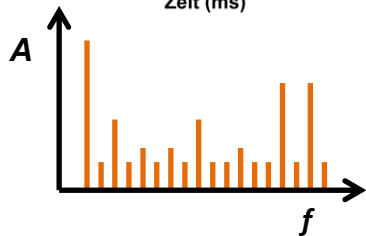
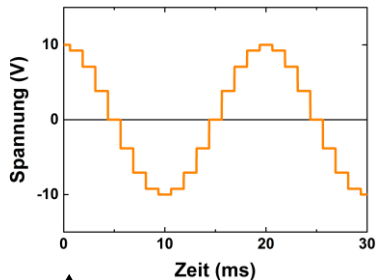
- alle Daten bis 100 kHz sind innerhalb $\pm 5 \mu\text{V/V}$ des nominellen Messwerts

Programmierbar *versus* Pulsgetrieben

$$V_{AC}(t) = N \cdot (h/2e) \cdot f$$

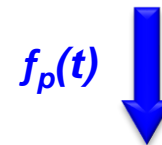


Stufenförmig approximierte Wellenformen

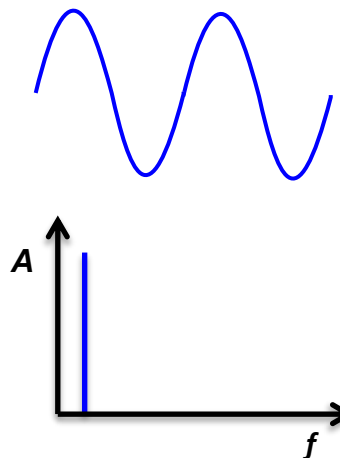


DC - 1 kHz
+ 10 V (2006)
- Transienten
- Harmonische

$$V_{AC}(t) = N \cdot (h/2e) \cdot f$$

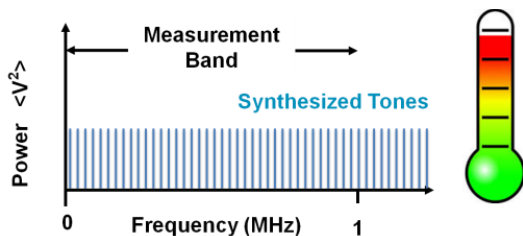


Quantisierte arbiträre Wellenformen

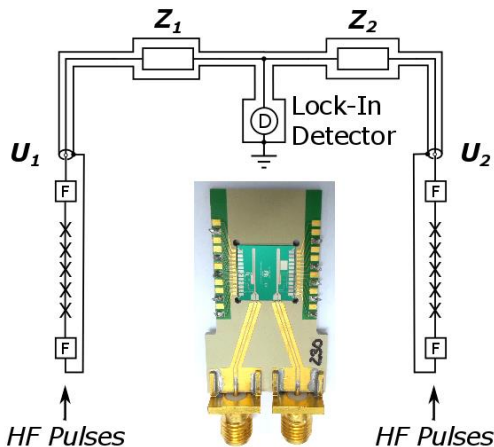


DC - 1 MHz
+ 1,5 V
+ keine Transienten
+ reine Spektren
+ Synthesizer!

Elektronisches Kelvin



Impedanz-Messbrücken



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Weitere erfolgreiche Anwendungsbeispiele:

+ ADC Charakterisierungen



+ AC-DC Transfer



+ Impedanz-Messbrücken



+ Phasenmessungen



+ Spektrum-Analysen



+ Teiler-Kalibrierungen



+ Spannungsverhältnisse



+ Elektronisches Kelvin



+ ... und weitere

- Quantennormale bringen viele Vorteile!
- Frequenzerweiterung bis 100 kHz
- Technologietransfer mit **pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen**
- Anwendungen werden in QTZ System implementiert

- Wäre es interessant, solch ein System mal zu testen?
- Gibt es Anwendungen, die wir mal testen sollten?



Kontaktieren Sie mich!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



P. Fleischmann
A. Böck
L. Schaidhammer
M. Bauer



M. Schubert und M. Starkloff

Quantenelektronik

O. Kieler, Hao Tian, F. Müller,
J. Kohlmann, R. Wendisch,
T. Weimann, R. Gerdau, P. Duda,
K. Störr, J. Felgner, M. Bieler

Elektrische Quantenmetrologie

L. Palafox, S. Bauer, M. Kraus, Y. Pimsut, J. Schurr,
J. Herick, J. Lee, S. Gruber, H. Preißler, G. Muchow,
T. Stöcker, M. Busse, J. Schurr, H. Scherer

Anwendungen

T. Funck, S. Weimann, F. Beug, M. Schmidt,
... und viele mehr!



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig and Berlin**

Bundesallee 100
38116 Braunschweig



Dr. Ralf Behr
Telefon: 0531 592-2630
E-Mail: ralf.behr@ptb.de



www.ptb.de

Stand: 5/21