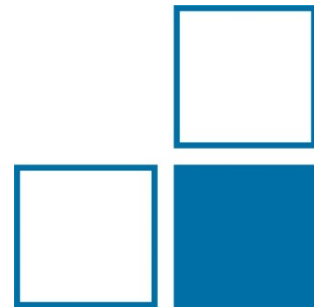


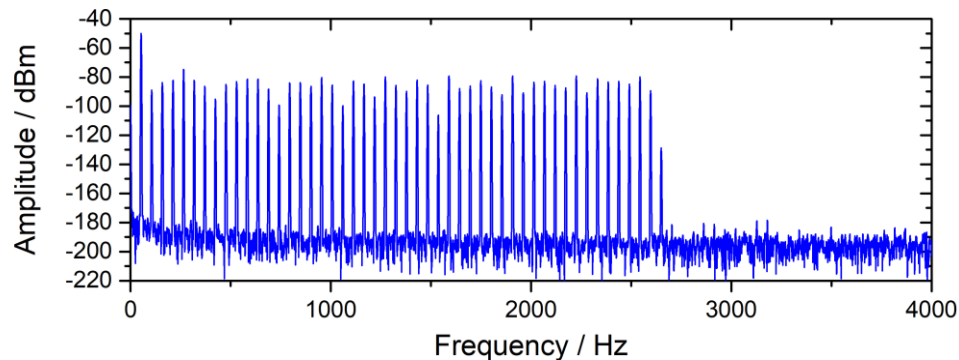
# Realisierung eines Phasennormals mit zwei pulsgetriebenen Josephson-Arrays

Kooperation FB 2.1, 2.3, 2.4 und 2.6

Stephan Bauer, 2.63



- Wozu ein Phasennormal?
- Was rechtfertigt den Einsatz eines pulsgetriebenes Spannungsnormal?
- Erste Ein- und Ausblicke
- Abschätzung der Messunsicherheit



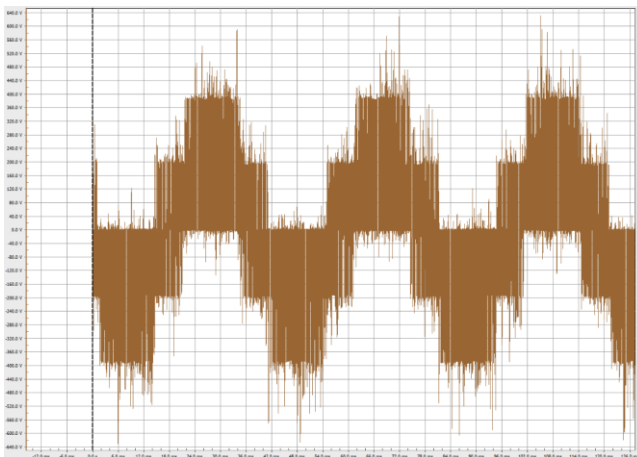
# Wo werden Phasenmessungen benötigt?



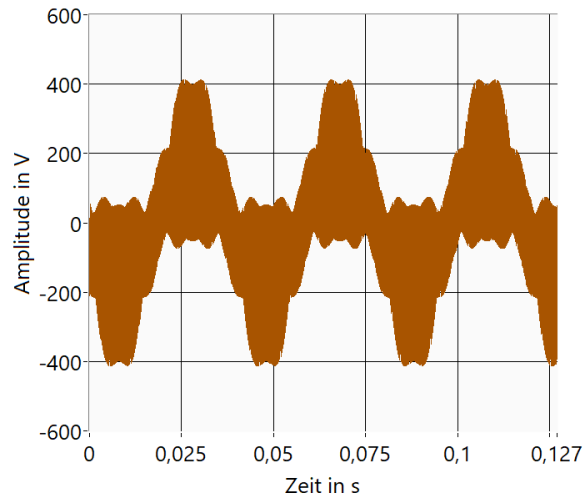
- Elektrische Leistungsmessung
- Dynamische Messung von akustischen Signalen, mechanischen Größen wie Druck, Drehmoment, ....
- Kalibrierung von Phasenmessgeräten und Phasennormalen

# Umrichtersignale und Phasenfehler

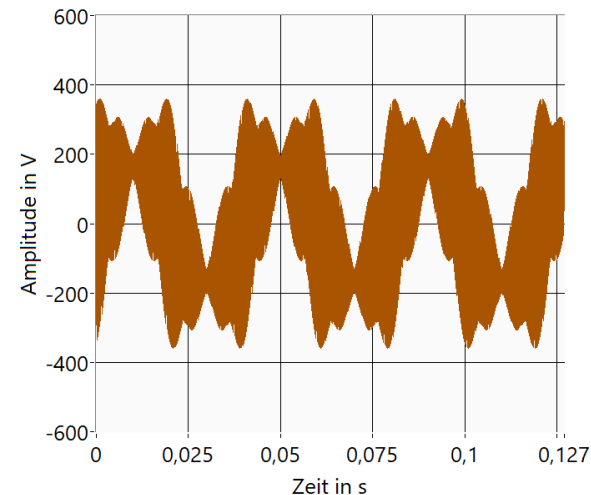
Im Feld gemessenes Signal



Signal mit den 10 größten Harmonischen und ursprünglicher Phasenlage



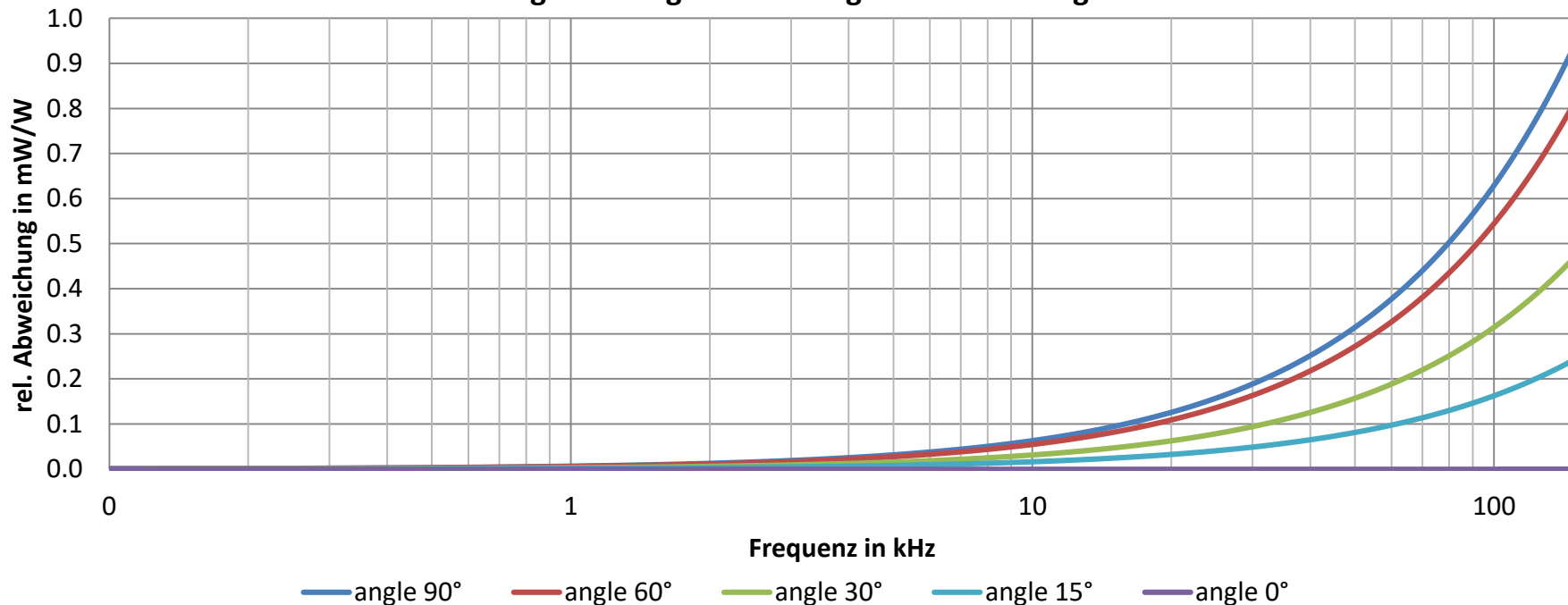
Signal mit den 10 größten Harmonischen mit 0° Phasenlage



Drastische Abhängigkeit des Zeitsignals und somit auch der Leistungsmessung von der Phasenlage!

# Phasenfehler und Leistungsmessung

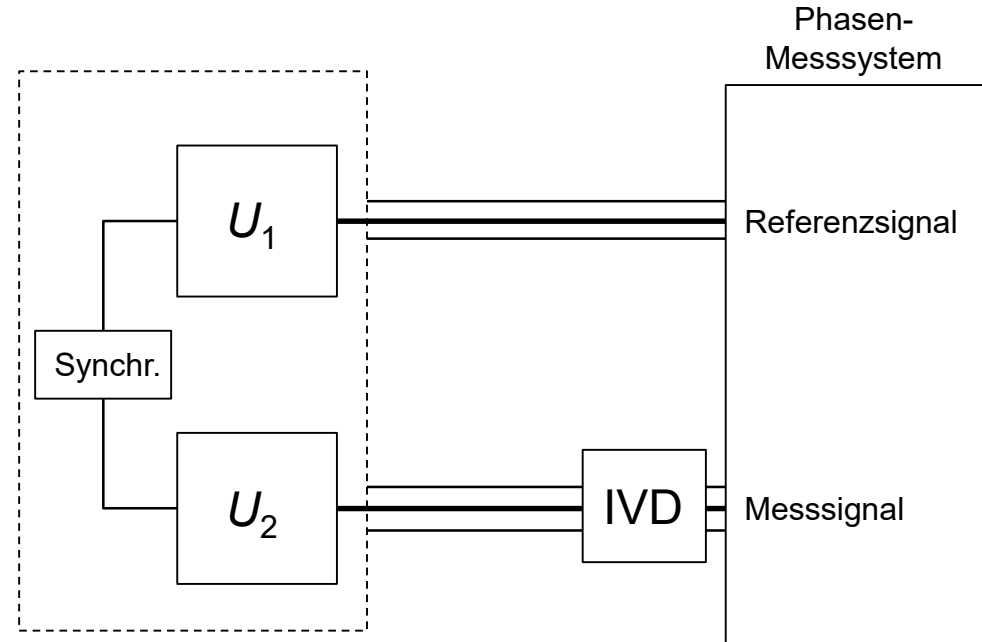
Frequenzabhängigkeit der durch den Phasenfehler verursachten Abweichung bei der Wirkleistungsmessung mit einer Signalverschiebung von 1 ns



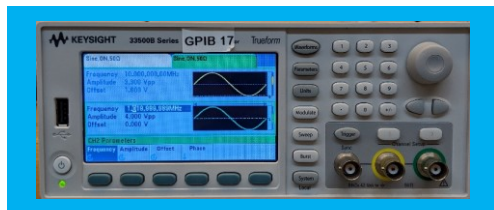
Ziel ist eine Unsicherheit von weniger als  $\pm 1$  ns ( $\pm 0,036^\circ$  bei 100 kHz)

# Phasenkalibrierungen

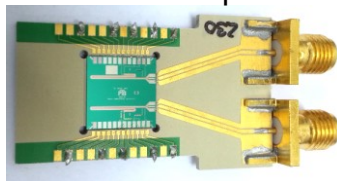
- Verhältnis 1:1
  - Phase 0°
  - Variable Phase
- Verhältnis 1:10
  - Phase 0°
  - Variable Phase
- Genaue Kenntnis vom Spannungsteiler (IVD)



# Phasenmessungen 100 kHz

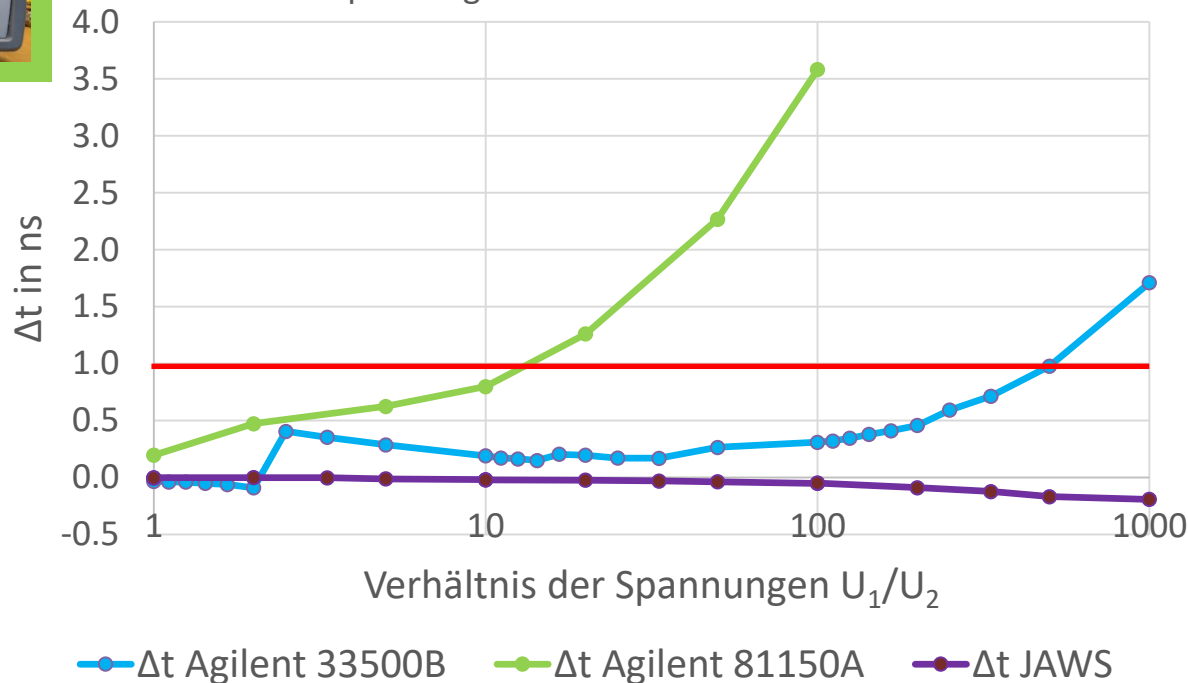


PTB JAWS chip



JAWS für die Messung von Harmonischen der Netzfrequenz in der Leistungsmessungen  
Vorgeschlagen von I. Budovsky (NMIA)

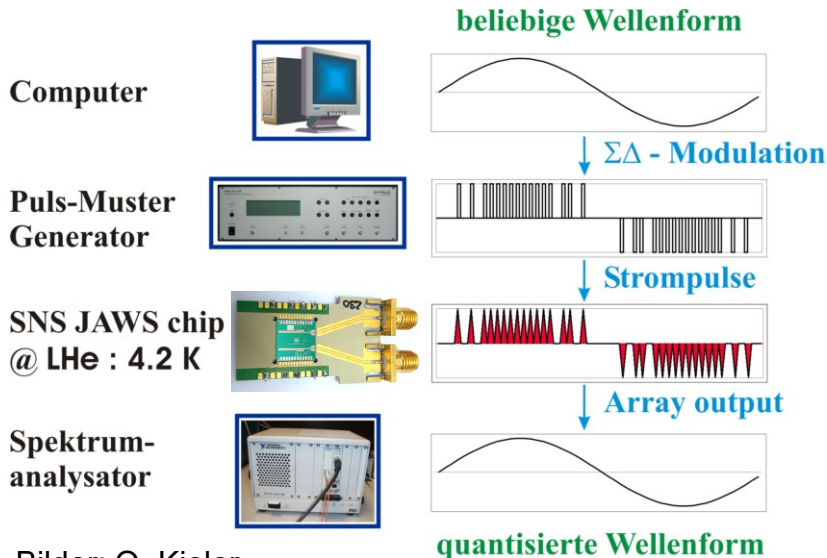
$\Delta t$  zwischen zwei Kanälen verschiedener Signalgeneratoren über dem Spannungsverhältnis bei 100 kHz und 0° Phase



D. Georgakopoulos, I. Budovsky, S. P. Benz and G. Gubler,  
*IEEE TIM*, vol. 68, no. 6, pp. 1927-1934, 2019

# Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer

- Josephson-Effekt (Brian D. Josephson 1962)
- Digital-Analog-Umsetzer basierend auf einem Quanteneffekt
- Vorgabe des Signals im Zeit- oder Frequenzbereich möglich

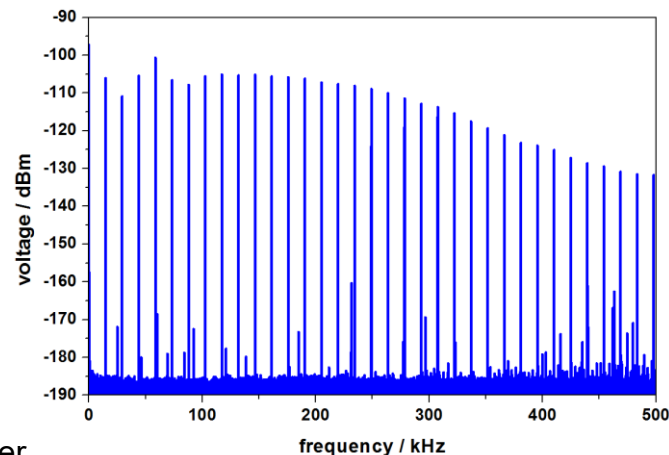
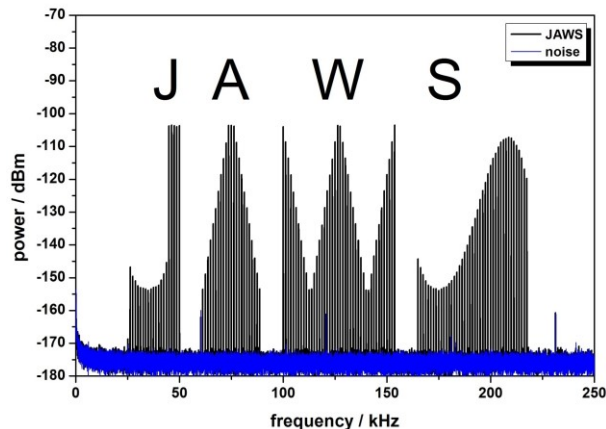
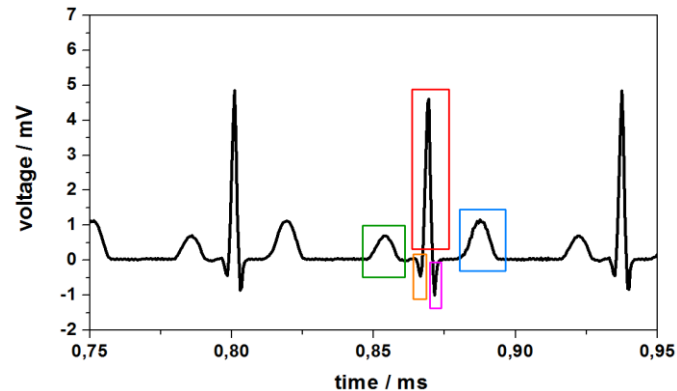
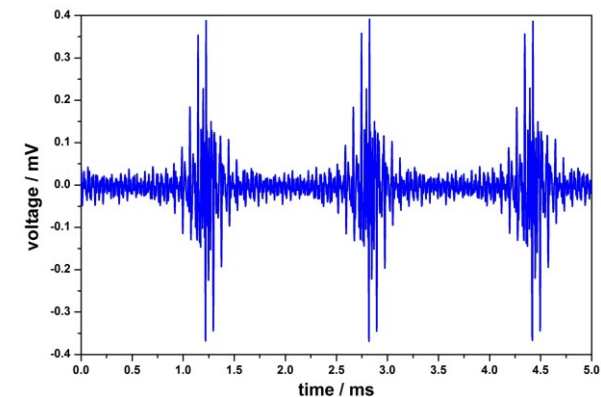


Bilder: O. Kieler

Benz S P and Hamilton C A  
1996 APL **68** 3171-3173

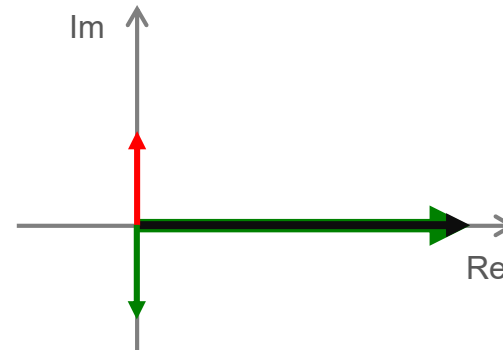
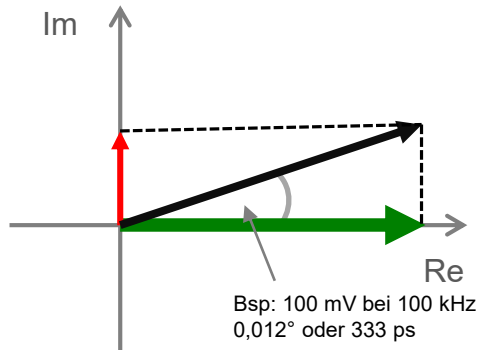


# Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer



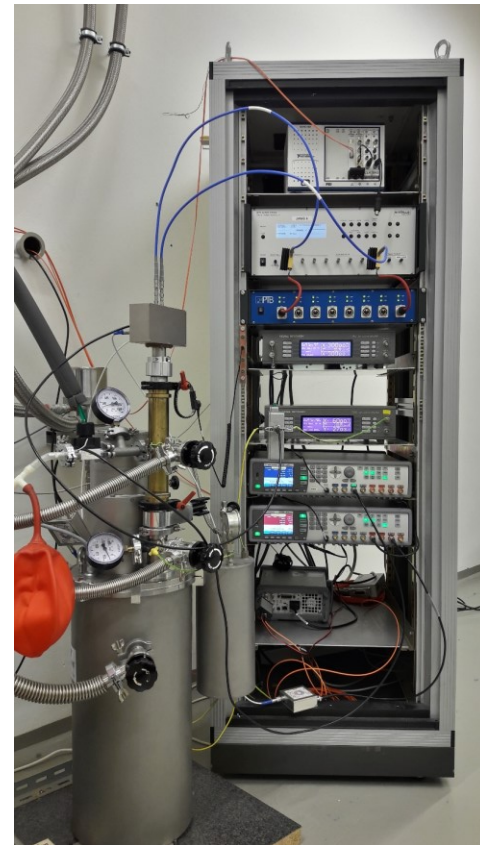
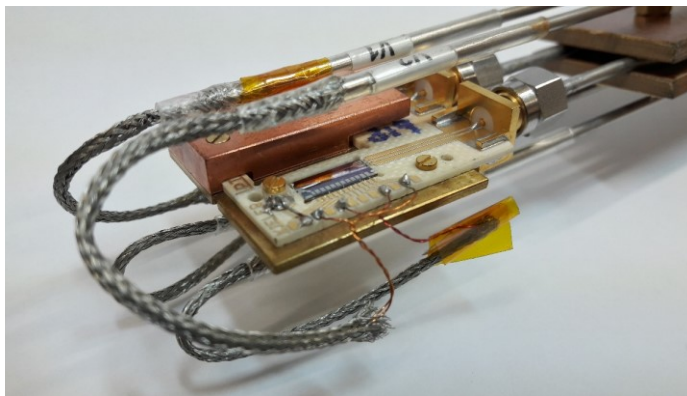
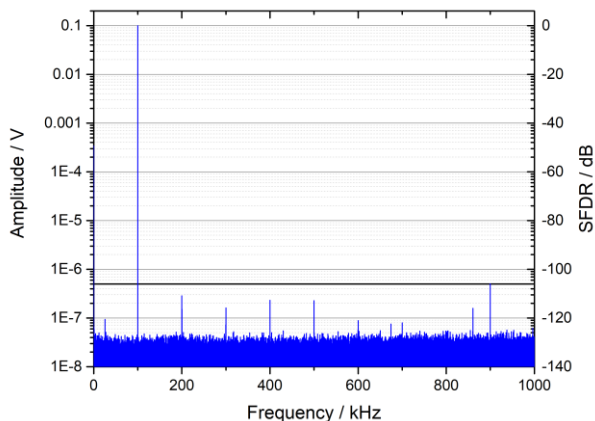
Bilder: O. Kieler

- Für die Erzeugung höherer Amplituden (ab etwa 20 mV) wird ein zusätzlicher „*Kompensationsstrom*“ benötigt
- Dieser sorgt für einen Spannungsabfall über der Induktivität des koplanaren Wellenleiters
- Erzeugung einer um  $180^\circ$  zum induktiven Spannungsabfall phasenversetzten Spannung



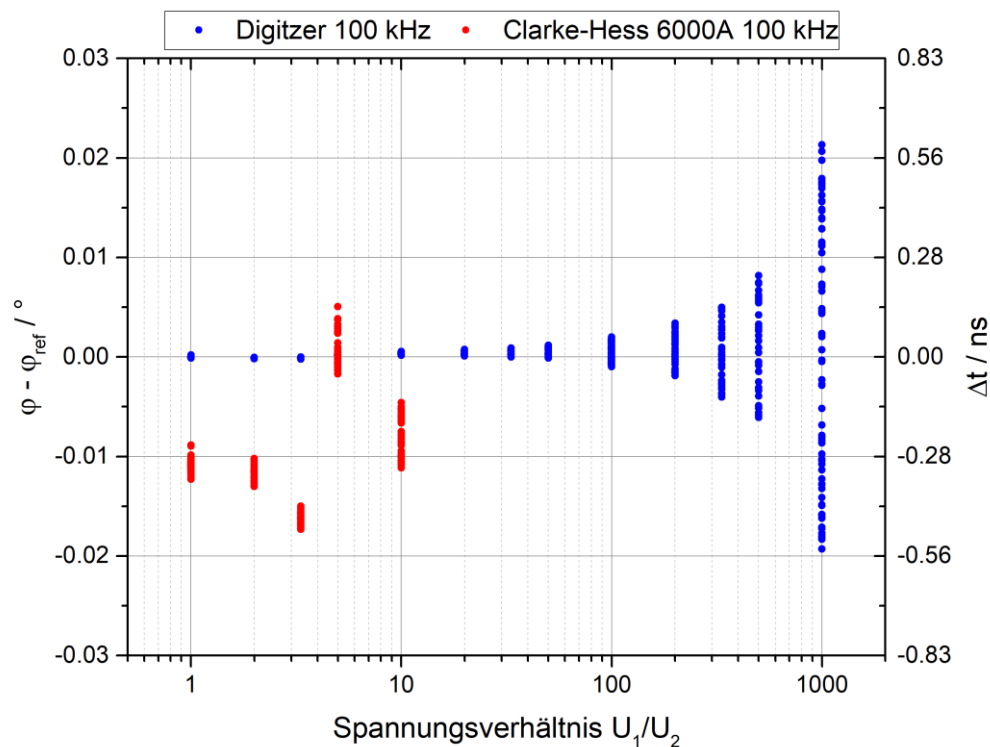
# Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer

- Zwei unabh. Spannungen bis 100 mV ( $U_1$  &  $U_2$ )
- Vorteile: hohe spektrale Reinheit, langzeitstabil, hohe Auflösung, ...
- Phasenlage über die Programmierung der Signalform oder über Pulsgenerator einstellbar

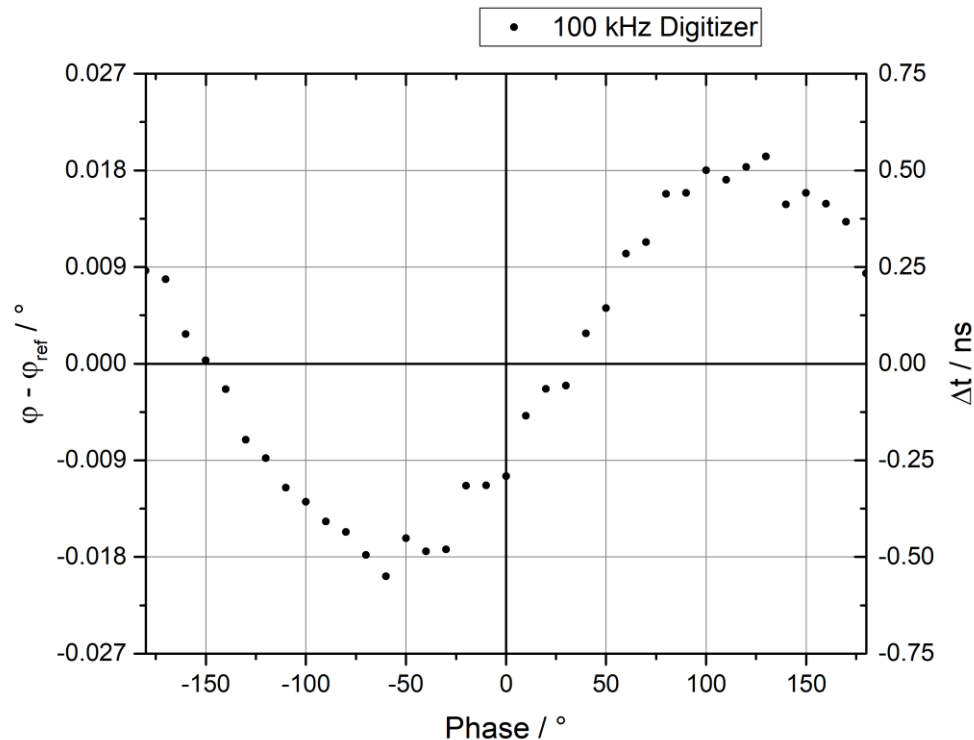


- PXI5922 basiertes Messsystem von M. Schmidt (FB 2.3) oder Clarke-Hess 6000A Phase Meter
- Die erzeugten Wellenformen können mit 200 fs Auflösung gegeneinander verschoben werden (7,2  $\mu$ Grad bei 100 kHz Signalfrequenz)
- Zunächst Abgleich der beiden Systeme damit zwischen beiden Spannungen  $\Delta t \leq 25$  ps
- Spannungsverhältnisse und Phasen werden automatisch eingestellt und gemessen

- Phasenvorgabe in  $10^\circ$  Schritten
- Spannungsverhältnisse 1:1 bis 1000:1
- Referenzspannung 100 mV
- $\pm 1$  ns auch bei 1000:1 Verhältnis (Unsicherheiten?)

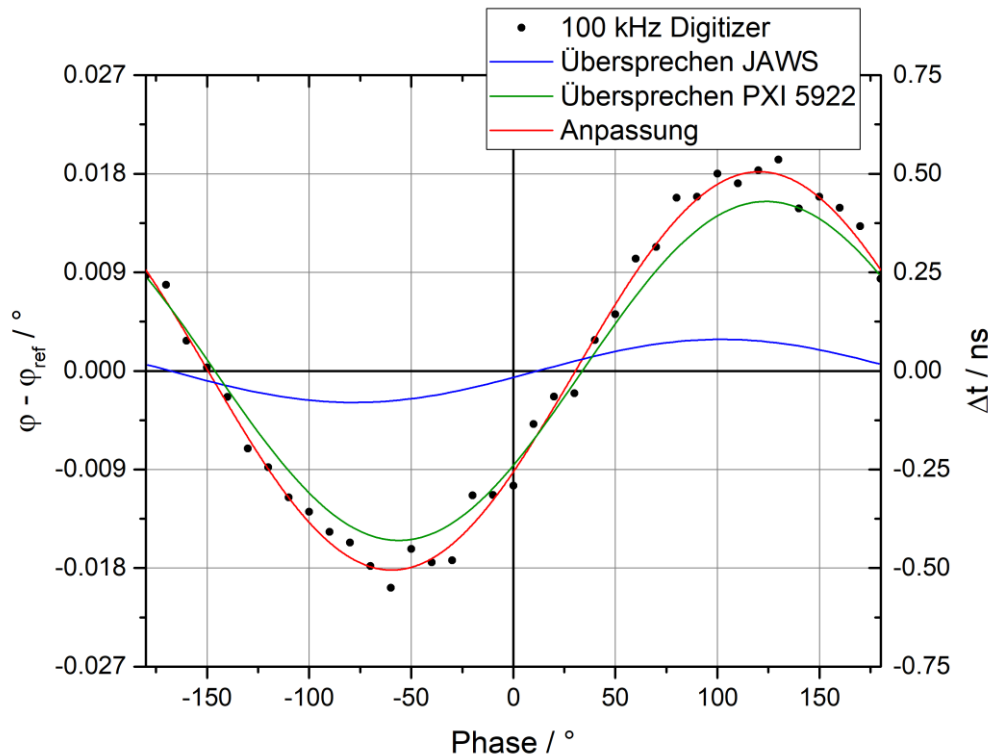


- Phasenabhängige Abweichung beider Messsysteme gegen JAWS
- Simulationen schließen die Auswertesoftware als Ursache vorerst aus
- Vielleicht ein Übersprechen?



- Das Übersprechen im JAWS System wurde gemessen:  
(Array 1 mit 100 mV & Array 2 aus) :
  - -146 dB bei 100 kHz
  - < -180 dB bei 10 kHz (Grenze der Messauflösung)
- Das Übersprechen der NI PXI 5922 ist spezifiziert mit weniger als -110 dB bei 100 kHz
  - Gemessen mit einem 100 mV Signal bei 100 kHz wurden etwa -131 dB

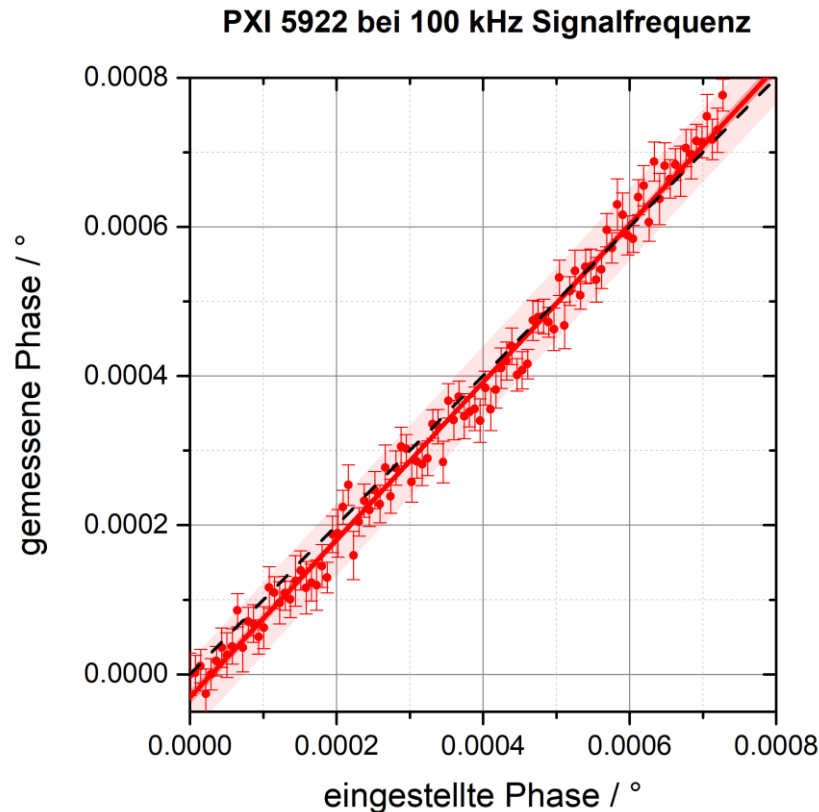
- Einfluss durch JAWS
  - $\pm 80$  ps (Amplitude & Phase)
- Einfluss durch PXI 5922
  - $\pm 430$  ps (nur Amplitude)
- Weitere Untersuchungen für eine vollständige Evaluierung nötig



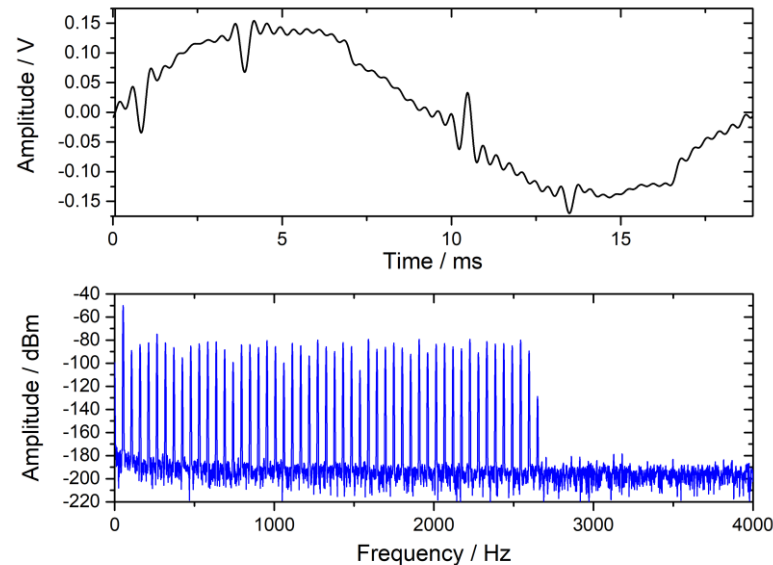
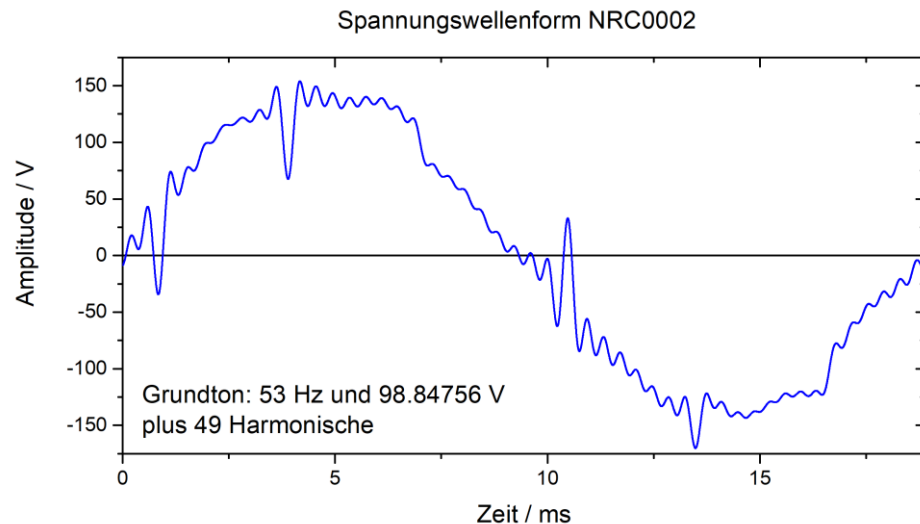


- Induktiver Spannungsabfall bekannt und kompensiert auf etwa 10% u( $U_{\text{ind}}$ )  $\approx 2\mu\text{V}$  (bei 100 mV)  $\Rightarrow 32\text{ ps}$
- Übersprechen JAWS etwa 5 nV bei 100 kHz  $\rightarrow 80\text{ ps}$  (1:1000) kann auch korrigiert werden
- Einfluss der Phaseneinstellung des PPG Ausgangs 10 ps (konservative Abschätzung)
- Erste Abschätzung 173 ps ( $k=2$ ) 1:1000 (größte Unsicherheit für alle Frequenzen)

- PXI System zeigt eine Auflösung von ungefähr  $100 \mu\text{Grad}$  (100 kHz)
- Unsicherheit des Phasenmesssystems scheint durch das Übersprechen zwischen den Messkanälen dominiert zu sein
- Messungen mit zwei Messkarten



# CIPM Key Comparison CCEM-K13



- Spannungswellenform NRC0002 mit 1000-fach kleinerer Amplitude nachgebildet
- Laufender Vergleich mit Ziel der Messung von Betrag und Phasenlage der Harmonischen

- Die genaue Messung von Phasen ist essentiell in vielen Feldern der Metrologie
- Das Wissen und die Fähigkeiten aus vier Fachbereichen konnte genutzt werden
- JAWS als sehr gute Möglichkeit ein flexibles Phasennormal zu realisieren
- Erste Messungen zeigen bereits sehr überzeugende Ergebnisse
- Abgeschätzte Messunsicherheit  $\pm 200$  ps ( $k=2$ )

- Details müssen weiter untersucht werden:
  - Phasenwinkel abhängige Abweichungen
  - Signalprogrammierung (Genauigkeit der Phasenvorgabe)
- Eine vollständige Unsicherheitsbilanz muss erstellt werden
- Vergleich mit dem aktuellen Phasenmesssystem der PTB
- Variationen von Frequenzen und Wellenformen
- Realisierung einer Rückführung von Phasenkalibrierungen für Frequenzen bis 150 kHz und Spannungsverhältnisse bis 1000:1

## **FB 2.1**

Florian Beug  
Axel Kölling  
Harald Moser  
Rolf Judaschke

## **FB 2.3**

Matthias Schmidt

## **FB 2.4**

Oliver Kieler  
Kathrin Störr  
Judith Felgner  
Rolf Gerdau

## **FB 2.6**

Ralf Behr  
Susanne Gruber  
Jonas Herick  
Marco Kraus  
Luis Palafox  
Yaowaret Pimsut  
Hansjörg Scherer  
Michael Busse  
Gerd Muchow  
Torsten Stöcker



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Stephan Bauer

Telefon: 0531 592-2633

E-Mail: [stephan.bauer@ptb.de](mailto:stephan.bauer@ptb.de)

[www.ptb.de](http://www.ptb.de)



Stand: 09/2020