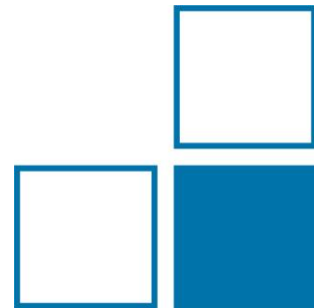


# Fortschritte im Bereich der Phasenrauschmetrologie in der PTB

Nora Meyne, Omid Abed

AG 2.24 – Hochfrequenz-Messtechnik für die Digitalisierung



# Phasenrauschen im FB 2.2

## Historie:

- Wegfall einiger Themengebiete (PTB-Strategie), Zusammenlegung von zwei kleinen AGs:

2.24 - Nichtlineare  
Hochfrequenzmesstechnik für  
die Digitalisierung

Phasenrauschen (im Aufbau)  
Mischer, PIM

2.24 – neu  
Hochfrequenzmesstechnik für  
die Digitalisierung

Wellenformmetrologie, EVM,  
Phasenrauschen

2.25 - Hochfrequenz-  
Messgrößen digitaler  
Kommunikationssysteme

Wellenformmetrologie, EVM  
Channel Sounding

## Mitarbeitende:

- 1.2 WissenschaftlerIn
- 1 Doktorand, 1 PostDoc (bis 31.5.)
- 0.2 Ingenieur

Unterstützung durch FB 4.4 (Zeit und Frequenz)  
Zeitnormale, Zeitübertragung,  
Optische Uhren mit gespeicherten Ionen

- Phasenrauschen
  - Grundlagen und Anwendungen
- Metrologie für Phasenrauschen
  - Ansätze und Anforderungen
  - Ausstattung und erste Messungen
- Vergleiche und Dienstleistungen
  - Zeitplan und Ausblick

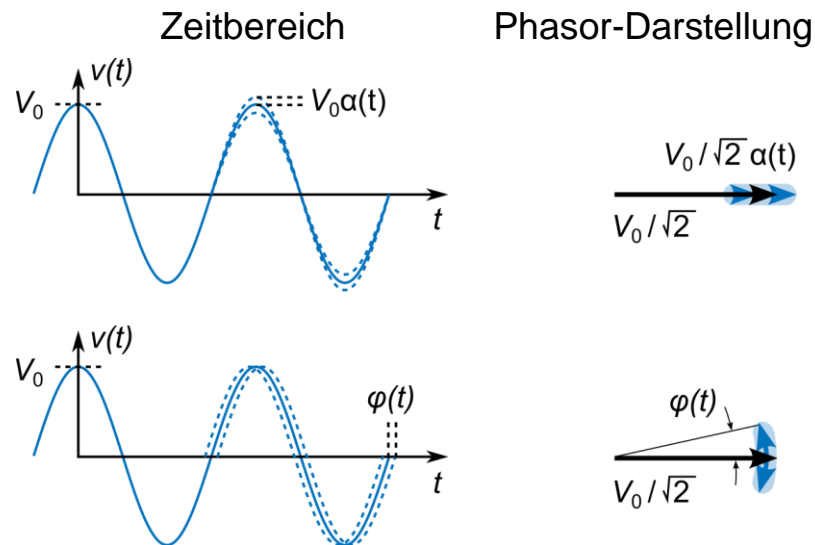
# Phasenrauschen - Grundlagen

- Ein idealer Oszillator erzeugt ein sinusförmiges Signal:  $v(t) = V_0 \cos(2\pi\nu_0 t)$
- In der Realität wird das ideale Signal verzerrt <sup>[1]</sup>:  $v(t) = V_0[1 + \alpha(t)]\cos[2\pi\nu_0 t + \varphi(t)]$

- Amplitude:  $V_0$  in Volt
- Trägerfrequenz:  $\nu_0$  in Hertz
- Amplitudenrauschen:  $\alpha(t)$  dimensionslos
- Phasenrauschen:  $\varphi(t)$  in radian

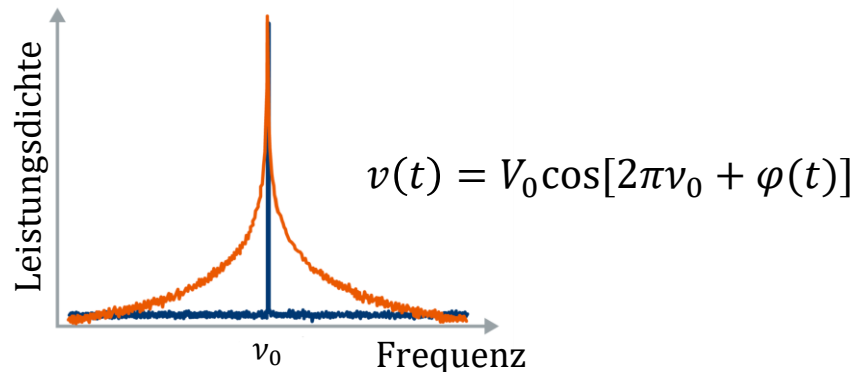
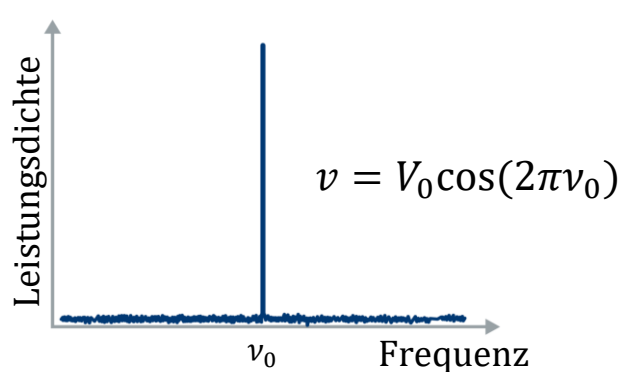
## Annahmen bei 'guten' Quellen

- $\alpha(t)$  und  $\varphi(t) \ll 1$



[1] Rubiola, Enrico. *Phase noise and frequency stability in oscillators*. Cambridge University Press, 2008.

Ideales und realistisches Spektrum einer Quelle bei Trägerfrequenz  $\nu_0$  mit Phasenrauschen  $\varphi(t)$



- $S_\varphi(f)$  ist die spektrale Leistungsdichte von  $\varphi(t)$  [2]
- Einheit:  $\text{rad}^2/\text{Hz}$
- Gängige Einheit in Messgeräten:  $\mathcal{L}(f) = \frac{1}{2} S_\varphi(f) \xrightarrow{\text{unit}} \text{dBc}/\text{Hz}$

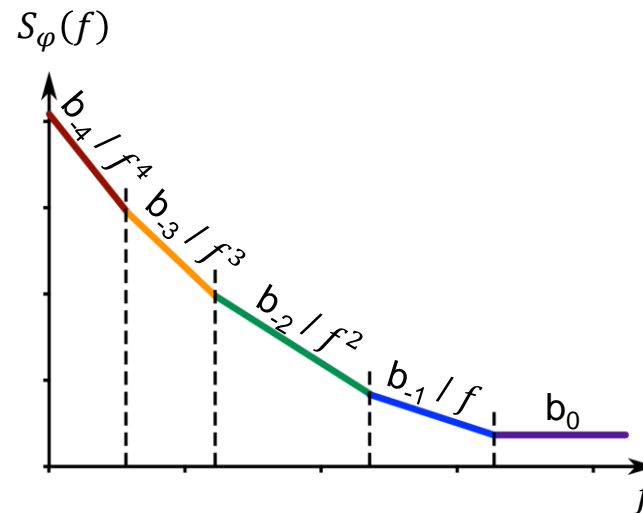
[2] Rubiola, Enrico, and Vincent Giordano. "Phase noise metrology." in *Noise, Oscillators and Algebraic Randomness*, Springer, 2000. 189-215.

# Phasenrauschen - Power Law

Das ‚Power Law‘ ist eine polynomiale Beschreibung von Phasenrausch-Phänomenen [2]

$$S_{\varphi}(f) = \sum_{n=-4}^0 b_n f^n$$

White phase noise	$b_0$
Flicker phase noise	$b_{-1} / f$
White frequency noise	$b_{-2} / f^2$
Flicker frequency noise	$b_{-3} / f^3$
Frequency random walk	$b_{-4} / f^4$



Bei guter Kenntnis über das DUT ist die Messgröße Phasenrauschen parametrisch darstellbar.

[2] Rubiola, Enrico. Rubiola, Enrico, and Francois Vernotte. "The companion of Enrico's chart for phase noise and two-sample variances." IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 71.7 (2023): 2996-3025.

# Phasenrauschen – Absolut und Differenziell

- Absolutes Phasenrauschen

- 1-Tor: Signalquelle, Oszillator, Laser, etc.

DUT

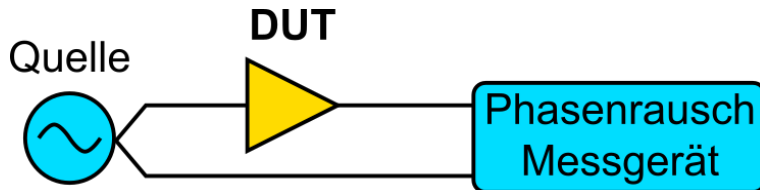


Phasenrausch  
Messgerät

Phasenrauschen, welches von einer Quelle selbst erzeugt wird

- Differenzielles Phasenrauschen

- 2-Tor: Verstärker, Frequenzkonverter, etc.

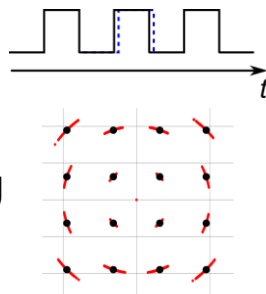


Phasenrauschen, welches von Komponenten einem bestehenden Signal hinzugefügt wird

- Grenzwert für Signalqualität
- Differenzielle Messung

## Schnelle digitale Signale

- Schnelle Taktsignale
- Frequenzumsetzung
- Modulationsverzerrung



## Zeit / Frequenz Metrologie

- Atomuhren
- Langzeitstabilität



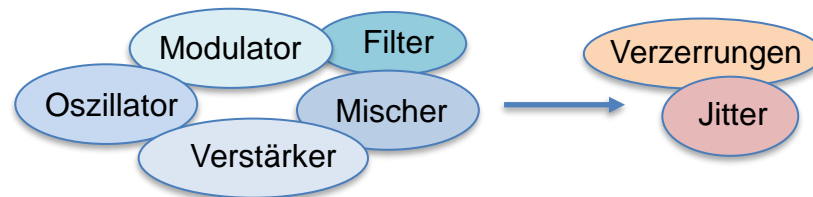
## Radar Objekterkennung und Radioastronomie

- Auflösung
- Signal-zu-Rauschverhältnis

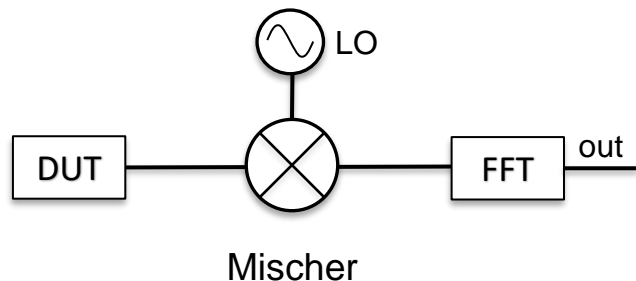


## Signalgeneratoren und Messgeräte

- Frequenzumsetzung
- Verkettung verschiedener Komponenten





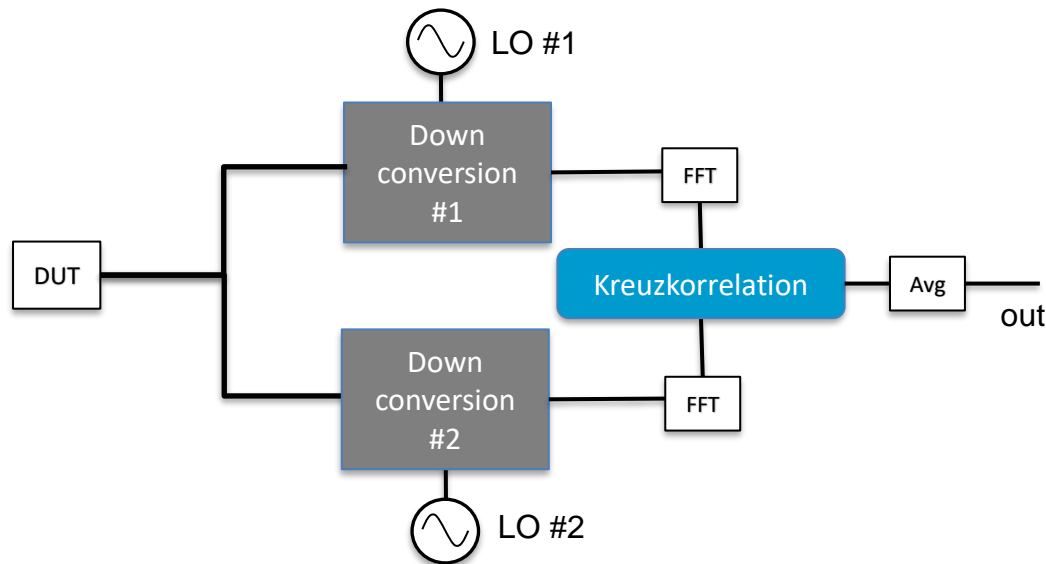


## Analoge Phasenrauschmessung

- Mischer und Phasendetektion

## Digitale Phasenrauschmessung

- Digitale Demodulation und Analyse des digitalisierten Signals



Unterschiedliche Gerätearchitekturen  
→ Unterschiede bei Kalibrierung?!

- Phasenrauschen
  - Hintergrund und Anwendungen
- Metrologie für Phasenrauschen
  - Ansätze und Anforderungen
  - Ausstattung und erste Messungen
- Vergleiche und Dienstleistungen
  - Zeitplan und Ausblick

## Bestehende Kalibrierdienstleistungen

- Weltweit nur wenige Dienstleistungen an NMIs (NIST<sup>[3]</sup> und LNE<sup>[4]</sup>)
  - Oft angegliedert an Zeit- und Frequenzmetrologie, teilweise hohe Unsicherheiten
  - Bei vielen Anwendungen ist keine vollständige Unsicherheit notwendig
  - Rückführbarkeit auf SI über HF-Leistung einer Phasenrauschreferenz

**NIST**

### RF PM/AM Noise Measurement Systems: On-Site Tests

Table 1: Specifications of NIST PM and AM noise standards

Model	Carrier frequency	Maximum offset frequency (MHz)	mo
510100M	5 MHz	1	
	10 MHz	3	
	100 MHz	10	
10M100M1G	10 MHz	3	
	100 MHz	30*	
	1 GHz	100*	
102040G	10 GHz	100*	
	20 GHz	100*	
	40 GHz	100*	

**NIST**

### Oscillators and Other Components

Typical PM measurement noise floor at different carrier frequencies

Carrier Frequency	5 MHz	100 MHz	10 GHz
$S_{\phi}(1 \text{ Hz})$ , (dBrad <sup>2</sup> /Hz)	-150	-145	-140
$S_{\phi}(\text{Thermal})$ , (dBrad <sup>2</sup> /Hz)	-187	-187	-187

The 2-sigma uncertainty for the PM noise calibration is typically  $\pm 1$  dB, but specific values depend on the

**femto-st**  
SCIENCES & TECHNOLOGIES

Radio frequency measurements, RF noise: phase noise : **-172 dBc/Hz to 0 dBc/Hz**

Oscillators, 2 port device

Absolute expanded uncertainty : **2 dB**

[Uncertainty table](#)

Phase detector

Carrier frequency : (5 MHz to 500 MHz, 0.5 GHz to 18 GHz)


Offset frequency : 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz

DUT power : > 0 dBm

Service provided by the LNE-LTFB

Approved on 06 August 2013

Institute service identifier : LNE/111

CMC ID : EURAMET-EM-FR-00000EAE-1 

[3] <https://www.nist.gov/programs-projects/phase-and-amplitude-noise-calibration-services>, [4] <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/quick-search> ,phase noise'

## Bestehende Kalibrierdienstleistungen

- Erste Dienstleistungen aus Industrie

- DAkkS akkreditierte Stellen<sup>[5]</sup> für Phasenrauschen (R&S, Testo)
- Interne Kalibrierungen von Geräteherstellern (z.B. Holzworth)

### Rohde & Schwarz Meßgerätebau GmbH (Ausschnitt)

Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMC)				
Messgröße / Kalibriergegenstand	Messbereich / Messspanne	Messbedingungen / Verfahren	Erweiterte Messunsicherheit	Bemerkungen
Phasenrauschen Oszillatoren Messgeräte	> -77 dBc/Hz <sup>a)</sup>	1 Hz <sup>b)</sup>	1,5 dB	Trägerfrequenz:
	-85 dBc/Hz bis -77 dBc/Hz	1 Hz	2,5 dB	100 MHz bis 500 MHz
	> -92 dBc/Hz	3 Hz bis 10 Hz	1,5 dB	
	-100 dBc/Hz bis -92 dBc/Hz	3 Hz bis 10 Hz	2,5 dB	<sup>a)</sup> Phasenrauschen Messgeräte

### Testo Industrial Services GmbH

Phasenrauschen Signalgeneratoren	Phasenrauschen bezogen auf Trägeramplitude in dBc/Hz	Offsetfrequenz bezogen auf Trägerfrequenz		Trägerfrequenz:
	> -87 dBc/Hz	100 Hz	2,5 dB	100 MHz – 1 GHz
	> -99 dBc/Hz	1 kHz	2,5 dB	
	> -104 dBc/Hz	10 kHz	2,5 dB	
	> -111 dBc/Hz	100 kHz	2,5 dB	
	> -131 dBc/Hz	1 MHz	2,5 dB	

Bedarf nach Kalibrierdienstleistungen / Vergleichsmöglichkeiten  
mit kleiner Unsicherheit, niedrigere Rauschwerte,  
niedrigere und höhere Trägerfrequenzen, etc.

> -186 dBc/Hz	1 MHz bis 10 MHz	1,5 dB
-192 dBc/Hz bis -186 dBc/Hz	1 MHz bis 10 MHz	2,5 dB

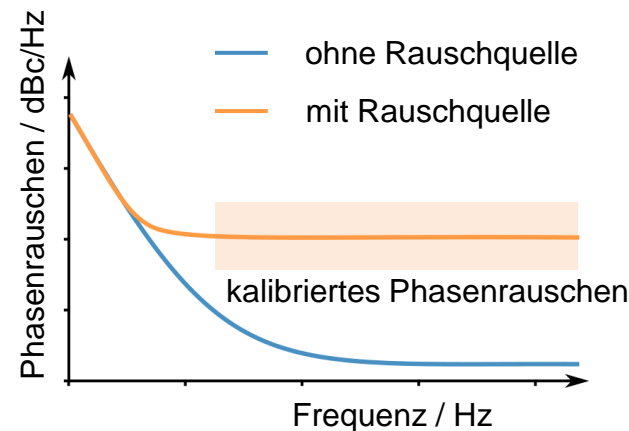
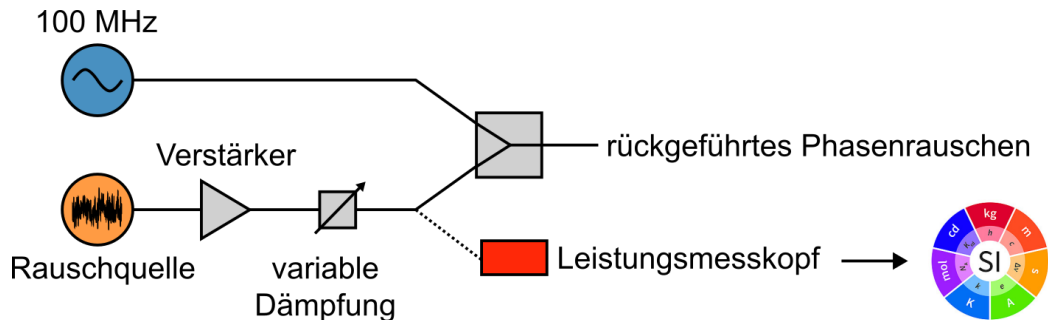
> -120 dBc/Hz	1 MHz	2,5 dB
> -135 dBc/Hz	10 MHz	2,5 dB

[5] <https://www.dakks.de/de/akkreditierte-stellen-suche.html> 'Phasenrauschen'

## Rückführung über Phasenrauschreferenz [6-8]

- Gute Quelle kombiniert mit weißem Rauschen
- Abschnittsweise flacher Frequenzverlauf
- Rückführung über HF-Leistung

Vereinfachtes Schaltbild, Beispiel für 100 MHz



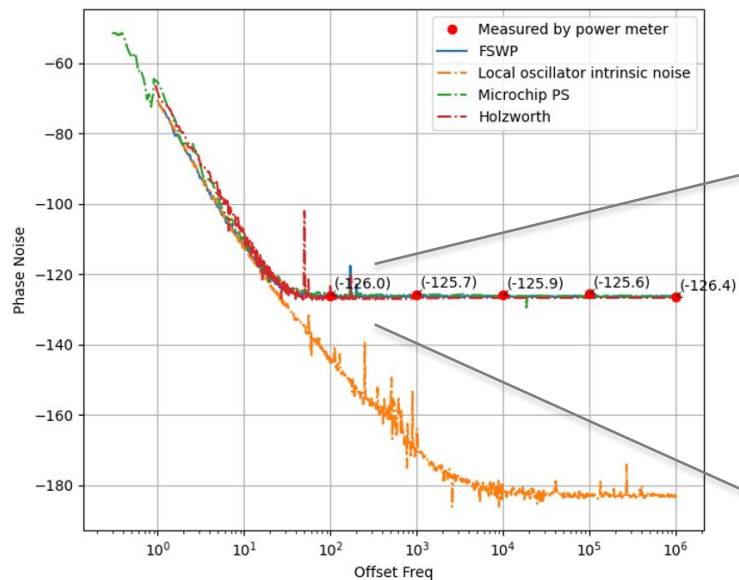
[6] Hati, A., Nelson, C., Ashby, N., & Howe, D, "Calibration uncertainty for the NIST PM/AM noise standards". *NIST Special Publication*, 250, 2012.

[7] Watabe, Ken-ichi, et al. "- 100 dBc/Hz flat phase noise signal at 10 MHz for phase noise standards." Conference on Precision electromagnetic Measurements. IEEE, 2012.

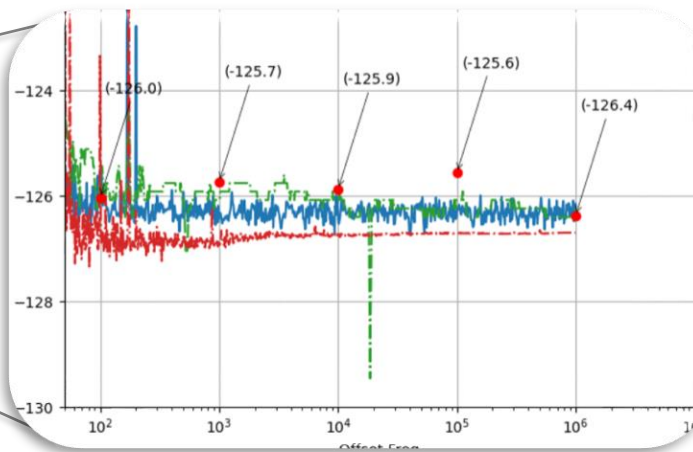
[8] Bernier, Laurent-Guy, et al. "Traceable calibration of a phase noise standard.", 48th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. 2017.

# Phasenrauschreferenz - Messungen

- Einfache Phasenreferenz mit 100 MHz Oszillator aufgebaut
- Messungen mit allen uns verfügbaren Messgeräten, sowie mit NRQ6 Power Meter



- Relativ gute Übereinstimmung
- Genauere Untersuchungen nötig



## Messgerät

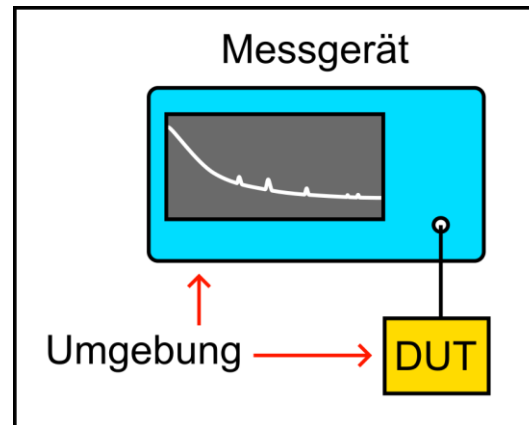
- Genauigkeit des Messergebnisses
- Systematische Abweichung
- Linearität
- Drift
- Artefakte / Störungen
- **Grundrauschen / Referenzen**
- ...

## DUT

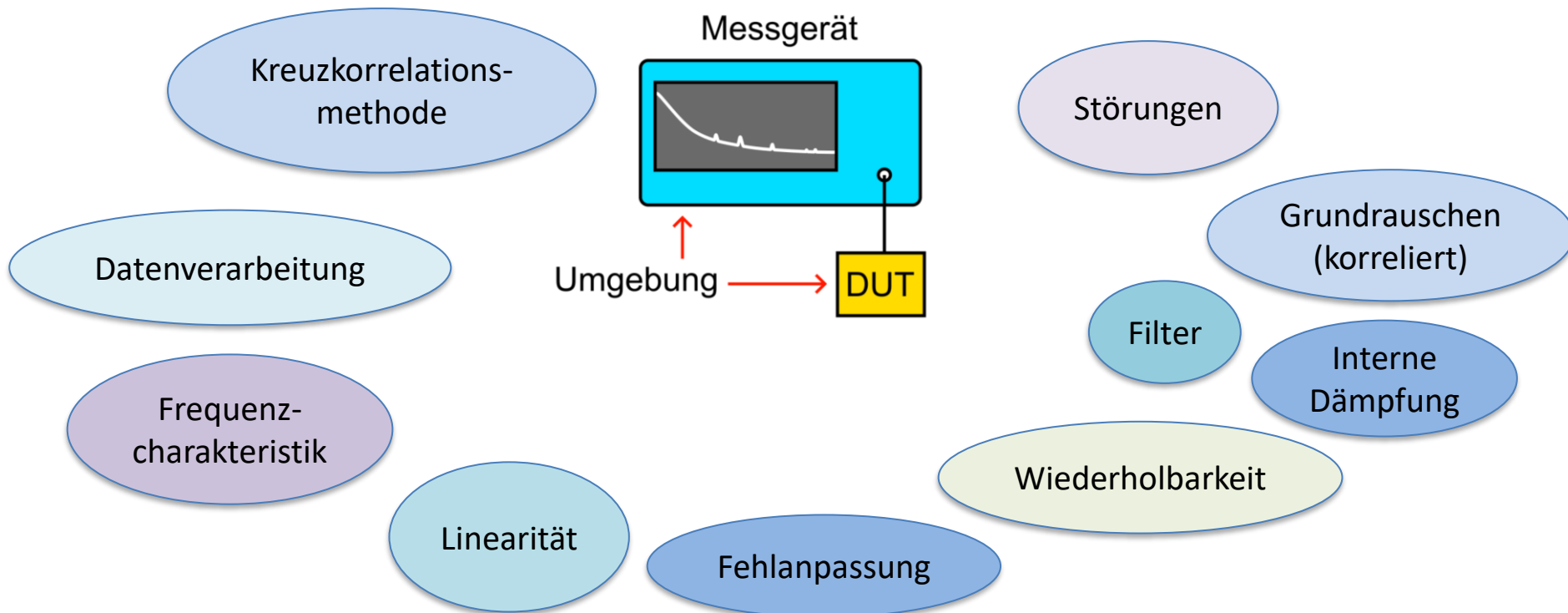
- Reproduzierbarkeit
- Fehlanpassung
- **Spannungsversorgung**
- ...

## Umgebung

- Temperaturvariation
- Elektromagnetische Störungen
- **Vibrationen**
- ...



**Ziel:** Entwicklung von Prozeduren für identifizierte Parameter → Unsicherheitsbeiträge



[9] G. Feldhaus, G. Rösel, A. Roth, J. Wolle, "Measurement Uncertainty Analysis and Traceability for Phase Noise Application Note", 2016.



## Messgeräte

- Unterschiedliche Messverfahren



Analoges Messgerät  
bis 6 GHz



Digitales Messgerät  
bis 200 MHz



Hybride Messung  
bis 26 GHz

## Optischer Tisch

- Gebäudevibrationen entkoppeln, starrer Untergrund

## Optischer Frequenzkamm

- Hochstabile Referenzsignale (GHz-Bereich), optische Referenz

## Zubehör

- Kabel / Adapter / Bandpassfilter / Isolatoren / Spannungsquellen / etc.  
(Einrichtung neues Labor)

**Ziel:** Geräterauschen reduzieren <sup>[10]</sup>

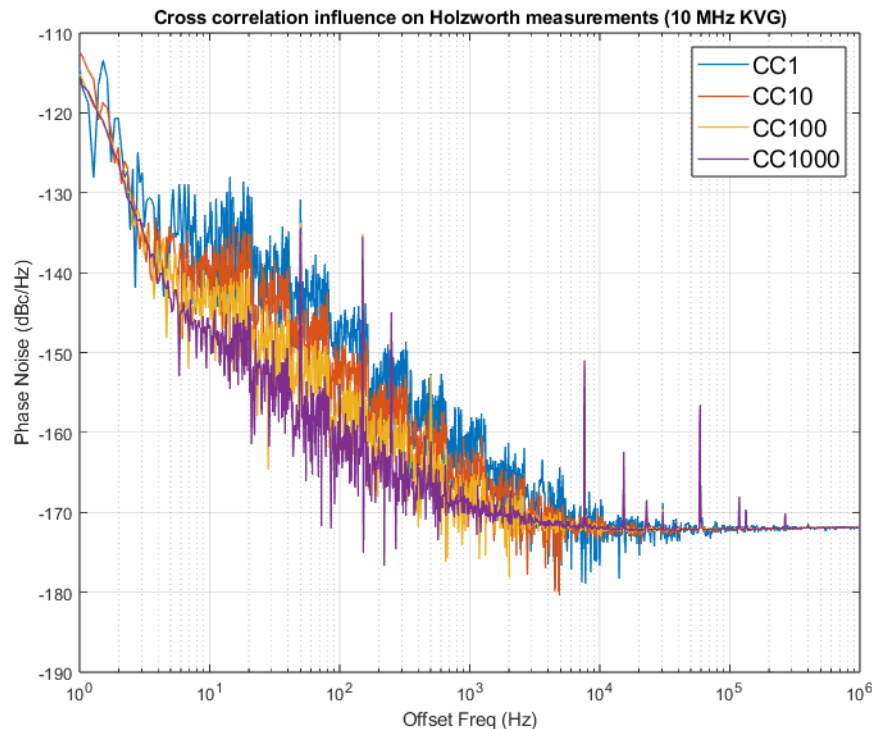
$$S_{\text{meas}} = S_{\text{DUT}} + S_{\text{instr(unc)}} + \delta S_{\text{instr(corr)}}$$

$S_{\text{instr(unc)}}$ : 5 dB Verbesserung pro Größenordnung CC

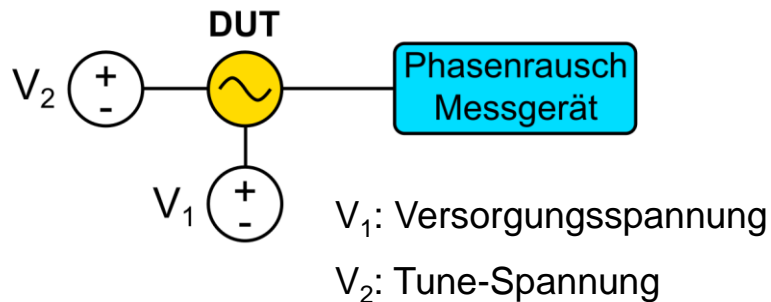
**Beispiel:**

Holzworth 7062C und 10 MHz Quarzoszillator

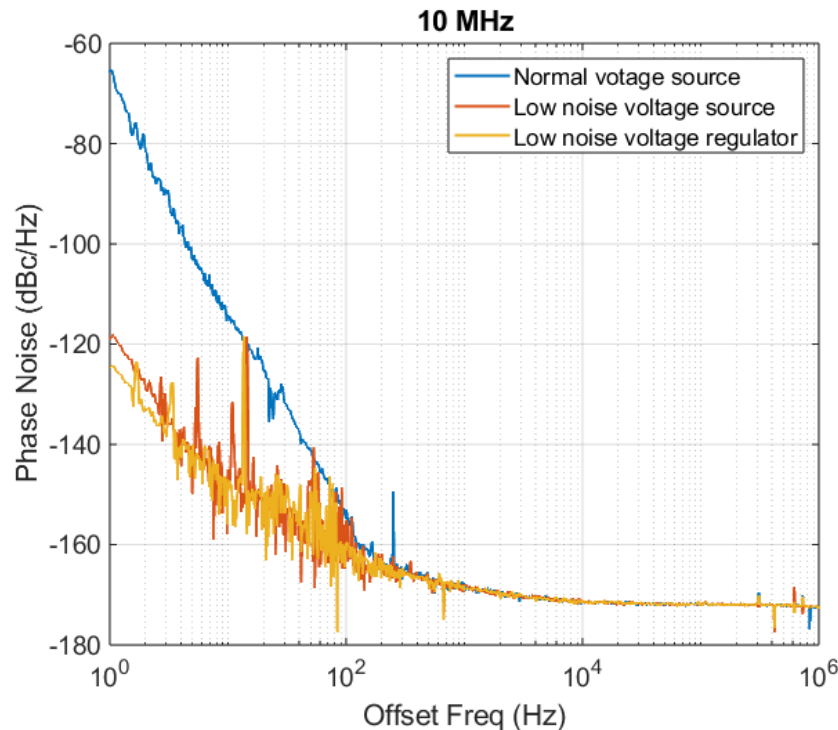
- CC1: ‚Rohmessung‘ → großer Einfluss von Referenzen und Geräterauschen
- CC1000: Rauschen im Bereich 10 Hz bis 10 kHz deutlich reduziert



[10] Rubiola, Enrico, and François Vernotte. "The cross-spectrum experimental method." *arXiv preprint arXiv:1003.0113* (2010).

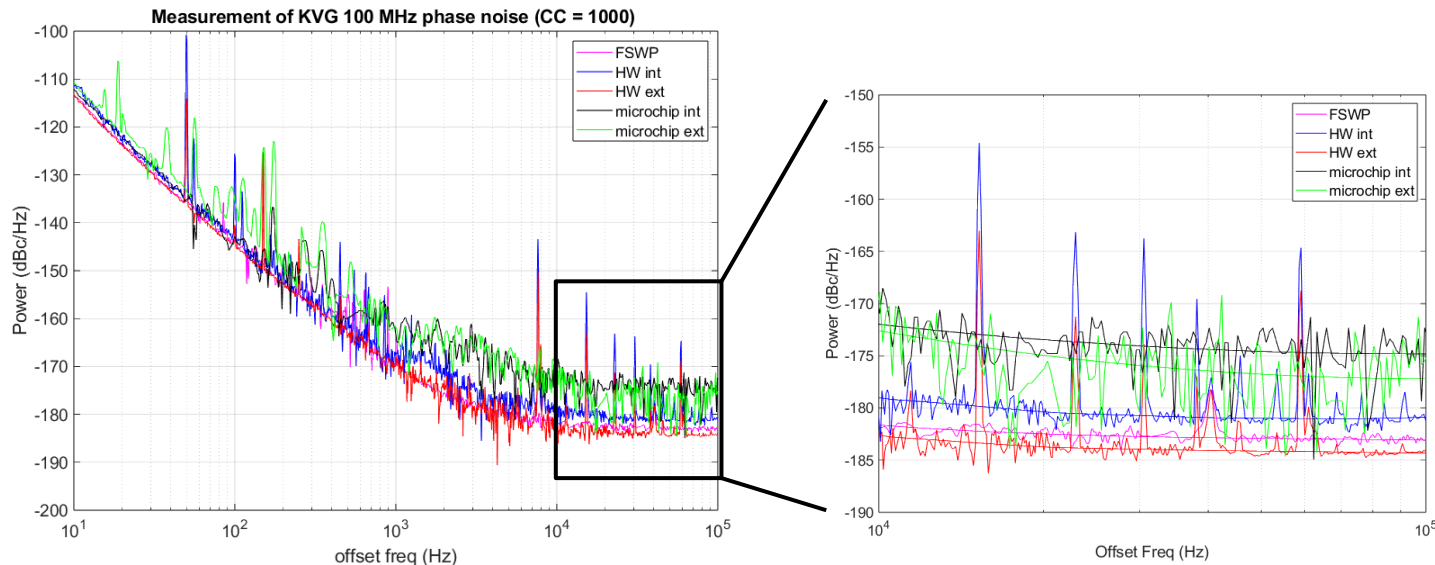


- Versorgungsspannung:  
Spannungsquelle → kaum Einfluss
- Tune-Spannung:  
Regelung für die Oszillatorfrequenz  
→ großer Einfluss auf Phasenrauschen



# Messungen - Grundrauschen

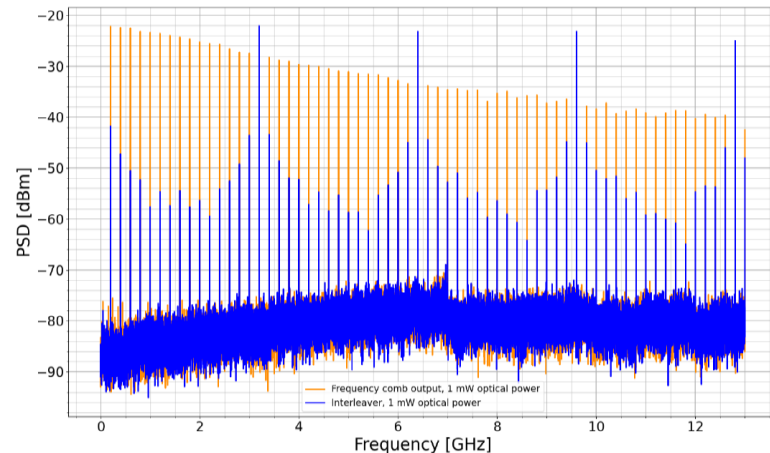
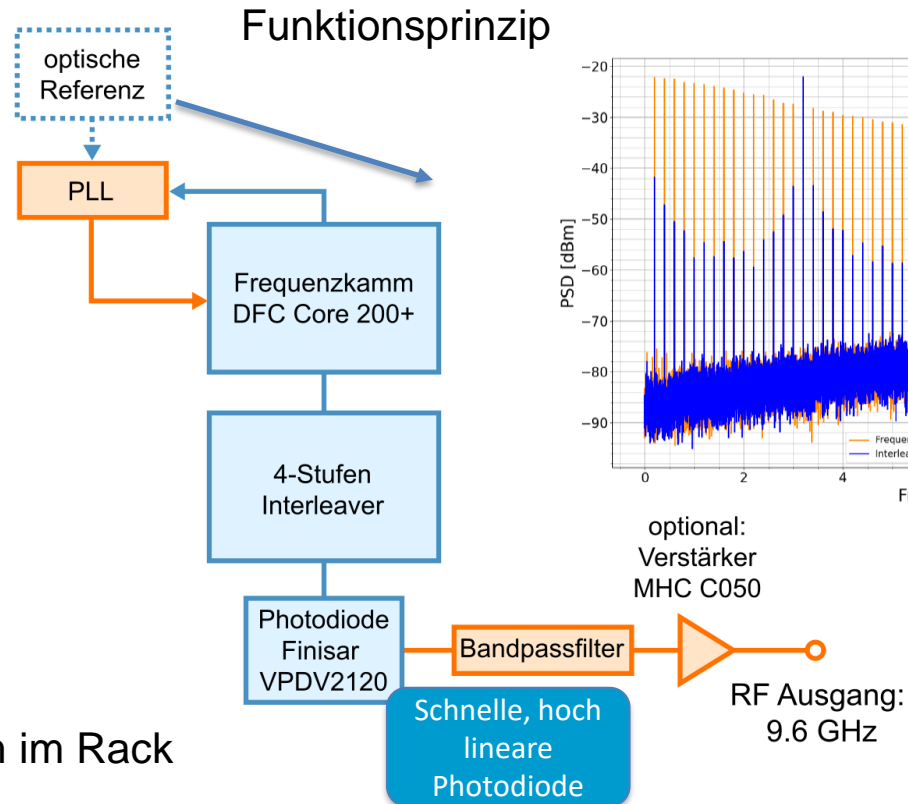
- Geräteabhängige Unterschiede im Grundrauschen (weißes Rauschen bei großem Frequenzoffset)
- Abhängig von LO-Rauschen (gute Referenzoszillatoren → geringeres Rauschen)
- Digitaler Analyzer hat höchstes Grundrauschen



# Optischer Frequenzkamm



Optischer Frequenzkamm im Rack



Weitere Bandpassfilter für  
variable Ausgangsfrequenz  
(3.2 GHz, 6.4 GHz)

## Aktuell:

- Inbetriebnahme mit optischer Referenz

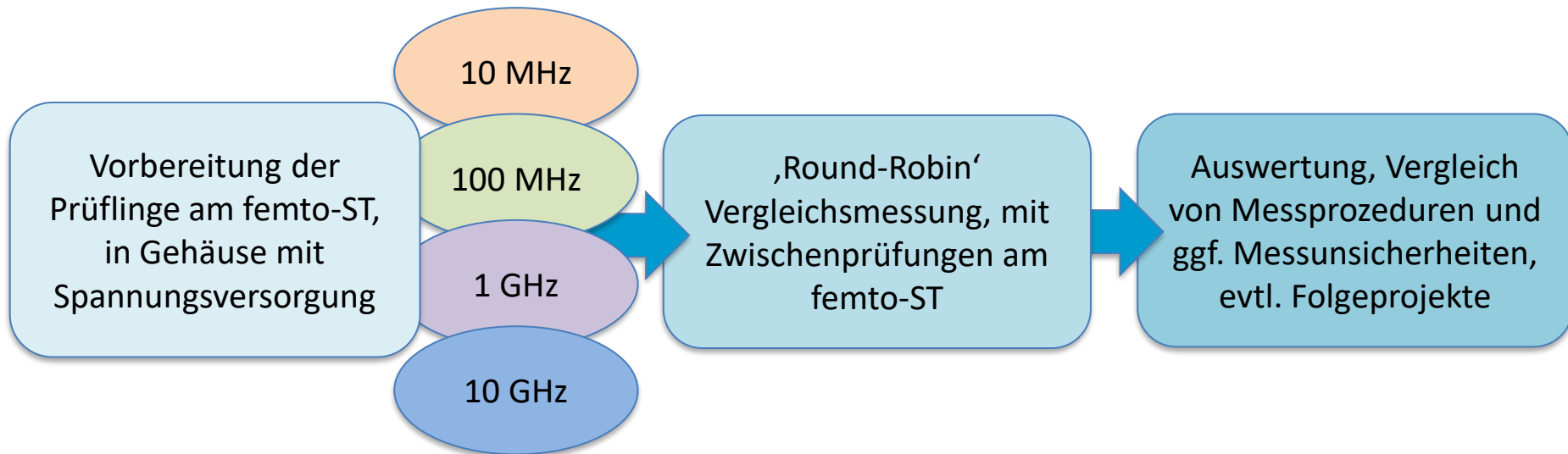
## Perspektivisch:

- Sehr gute Quelle (Frequenzstabil und niedriges Phasenrauschen)
- Als Quelle für hochfrequente Phasenrauschreferenz (Anwendbar schon bei niedrigem Frequenzoffset)
- Als Lokaloszillator mit niedrigem Phasenrauschen
- Optoelektronische Forschungsfragen

- Phasenrauschen
  - Hintergrund und Anwendungen
- Metrologie für Phasenrauschen
  - Ansätze und Anforderungen
  - Ausstattung und erste Messungen
- Vergleiche und Dienstleistungen
  - Zeitplan und Ausblick

Geplante Vergleichsmessung („Pilot Study“) mit verschiedenen Oszillatoren als Prüfling

- Vorgeschlagen und geplant von Enrico Rubiola (femto-ST, LNE)
- Start voraussichtlich ab Juni 2025





## Zeitplan PTB Dienstleistung Phasenrauschen

- Phasenrauschmessplätze und Prozeduren im Aufbau
- Kalibrieranfragen aus Industrie vorhanden

### ➤ Aktuell Fokus auf Quarzoszillatoren < 1 GHz

- Perspektivisch:
  - Kalibrierung von Messgeräten
  - Höhere Frequenzbereiche
  - Differenzielle Messungen (2-Tore)



Deutsches  
Elektronen-Synchrotron



best practice  
traceability  
improved services





**Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Nora Meyne

Telefon: 0531 592-2240

E-Mail: [nora.meyne@ptb.de](mailto:nora.meyne@ptb.de)

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



Stand: 05/25