

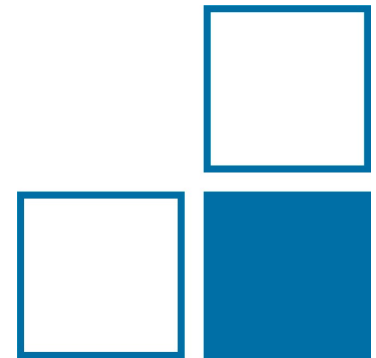


Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Wellenformmetrologie für die Messung der Eigenschaften digitaler Signale

Nora Meyne

AG 2.25 – Hochfrequenz-Messgrößen digitaler Kommunikationssysteme



- Einleitung
- Grundlagen digitaler Modulation
- Eigenschaften digitaler Signale
- Wellenformmetrologie
- Messgeräte und Kalibrierung
- Zusammenfassung und Ausblick

Was sind Wellenformen?

Wo digitale Kommunikation stattfindet, werden modulierte elektromagnetische Signale verwendet, z.B.

- Glasfaser Datenübertragung und Internet
- Smartphones und drahtlose Kommunikation
- Computer, Netzwerke und Server

Auch in anderen Bereichen kommen dynamische Signale vor

- Mechanische Messungen (z.B. Vibration, Druck)
- Medizin (z.B. EKG)


Messtechnische Erfassung schwingungsförmiger Zeitsignale

→ **Wellenform**



Grundlagen digitaler Modulation

Wie kommen die Bits in die Wellenform?

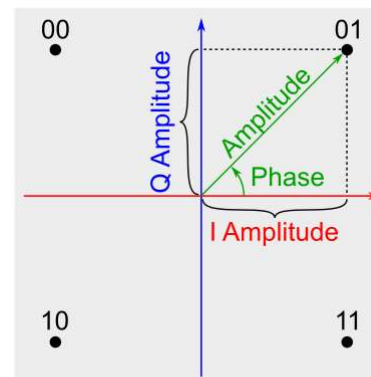
101100011 → 

Modulation

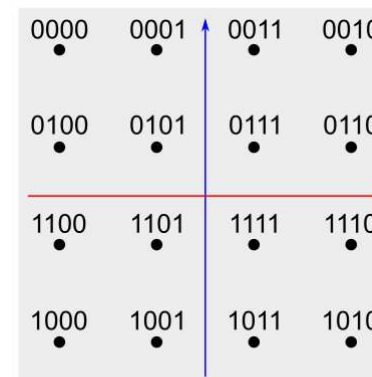
- Mehrere Bits werden in Symbolen zusammengefasst
- Das **Nutzsignal** verändert einen hochfrequenten **Träger** (Amplitude, Phase, Frequenz)
- Digital: Diskrete Werte

Beispiel

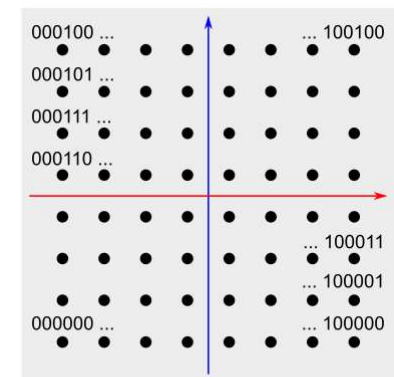
- Quadratur-Amplituden Modulation (QAM)
- Jedes Symbol besteht aus zwei orthogonalen Amplituden **I** und **Q**



QPSK
2 Bits/Symbol



16 QAM
4 Bits/Symbol



64 QAM
6 Bits/Symbol

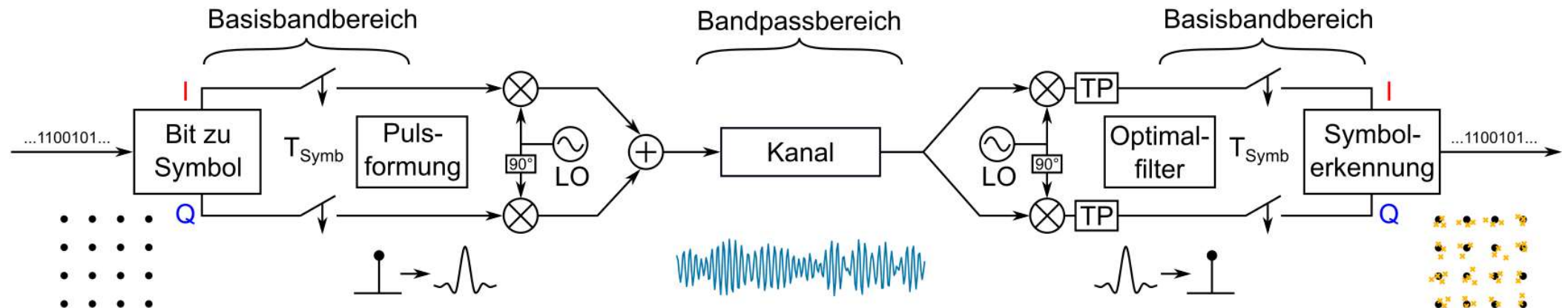
Grundlagen digitaler Modulation (2)

Modulation

- Bitstrom wird auf Symbole abgebildet, Pulsformung für vorteilhafte spektrale Eigenschaften
- Aufwärtskonversion von **I** und **Q** mit Lokaloszillator bei Trägerfrequenz (→ Mischer)
- Kombination der Signale zu reellem Bandpasssignal

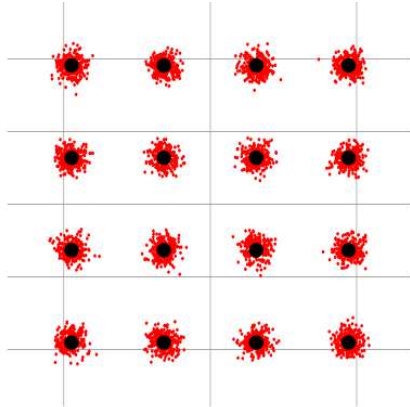
Demodulation

- Abwärtskonversion mit Lokaloszillator, Filter, Symbolerkennung

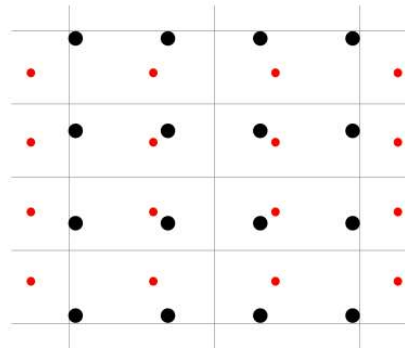


Verzerrungen bei der Modulation

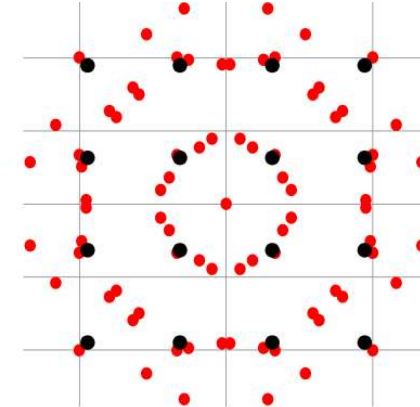
Weißes Rauschen



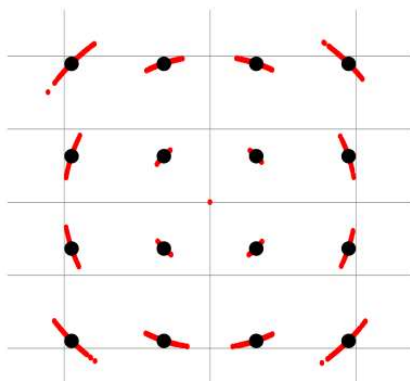
IQ Gain Imbalance



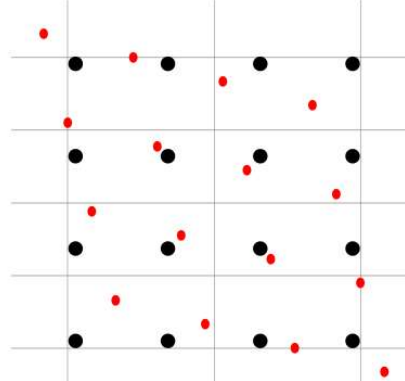
Intermodulationsverzerrung



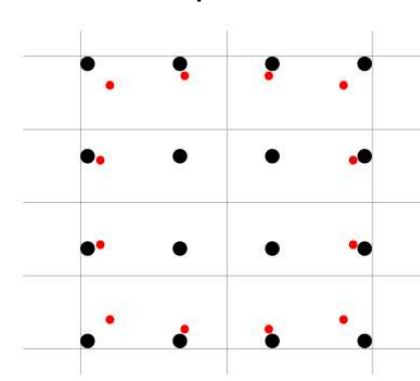
Phasenrauschen



IQ Phase Imbalance



Kompression

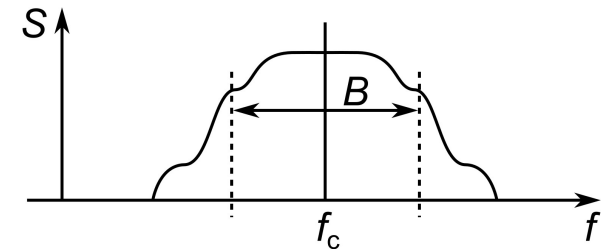


DFG-Proposal FOR 2863 Meteracom, Metrology for THz Communication, Proposal Review 21.02.2019

Eigenschaften digitaler Signale

Kenngößen Bandpasssignale

- Trägerfrequenz, Bandbreite
- Leistungsdichtespektrum

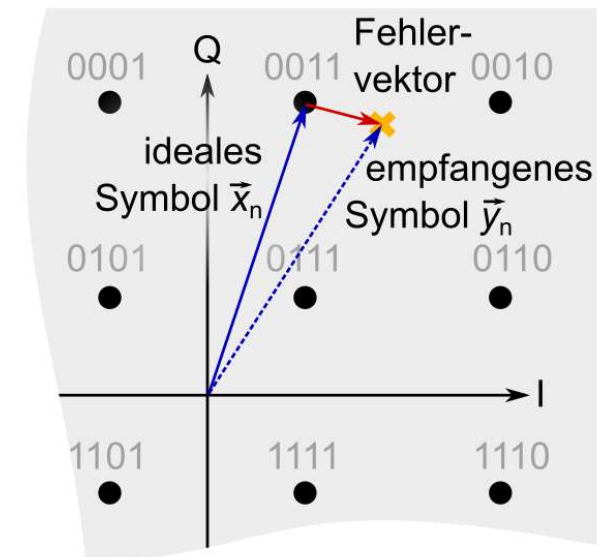


Typische Kenngößen Basisbandsignale

- Bit Error Rate (BER) → fehlerhaft übertragene Bits
- Error Vector Magnitude (EVM)

$$\text{EVM} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N |y_n - x_n|^2}{\sum_{n=1}^N |x_n|^2}}$$

- Gemittelter, gewichteter Fehlerbetrag nach Korrekturen
- Kleiner Symbolabstand → rauschempfindlich



Messgeräte zur Bestimmung der EVM



Frequenzbereichsmessung

- Vektor Spektrumanalysator
 - Herkömmliche Methode zur Messung der EVM
 - Rückführbarkeit schwierig wegen internem Mischer und Algorithmus
 - Begrenzte Bandbreite
- Nichtlinearer Netzwerkanalysator ^[1]
 - Breitbandige Messung mit Korrektur der Fehlanpassung
 - Lange Messdauer

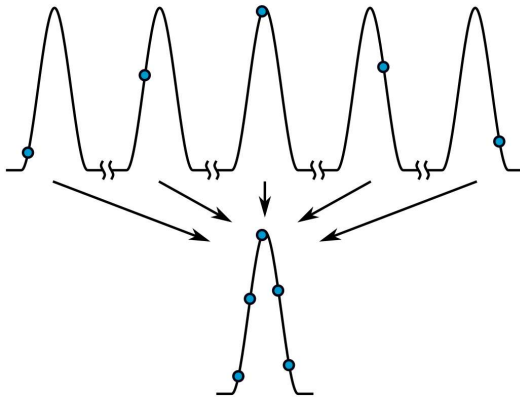
Zeitbereichsmessung

- Sampling Oszilloskop
 - Gängiger Referenzempfänger wegen guter Kalibrierbarkeit
 - Kurzes Messsignal
- Real-Time Oszilloskop
 - Vielseitig wegen hoher Bandbreite
 - Beliebiges Messsignal
 - Niedrige Dynamik (Amplitudenauflösung)

[1] Ribeiro, Diogo C., et al. "Impact of Phase Calibration on EVM Measurement Quality." *91st ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG)*. IEEE, 2018.

Oszilloskope im Vergleich

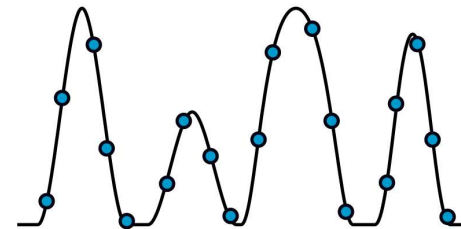
Sampling Oszilloskop



Eigenschaften

- Zusammengesetzte Messung periodisch wiederholter Impulse
- Hohe zeitliche Auflösung und Dynamik
- Kalibrierung wohldefiniert
- Langsame Messung

Real-Time Oszilloskop

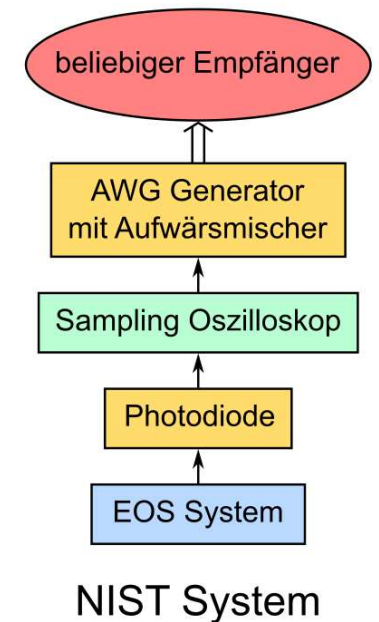
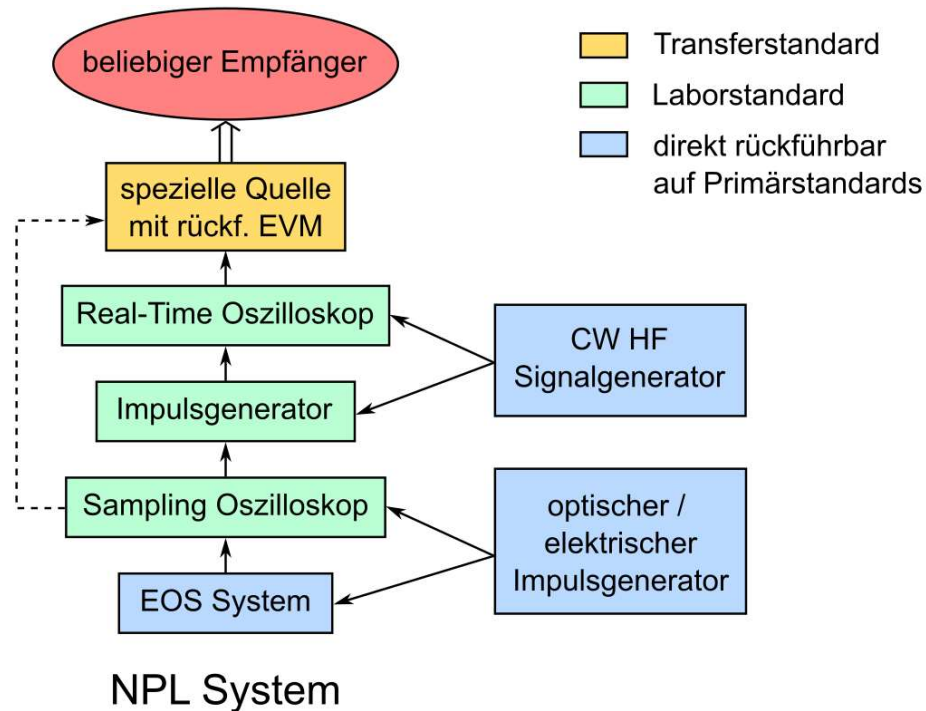


Eigenschaften

- Single-Shot Messung einzelner Impulse
- Feste zeitliche Auflösung und niedrige Dynamik
- Kalibrierung komplex
- Schnelle Messung

Rückführbarkeit EVM

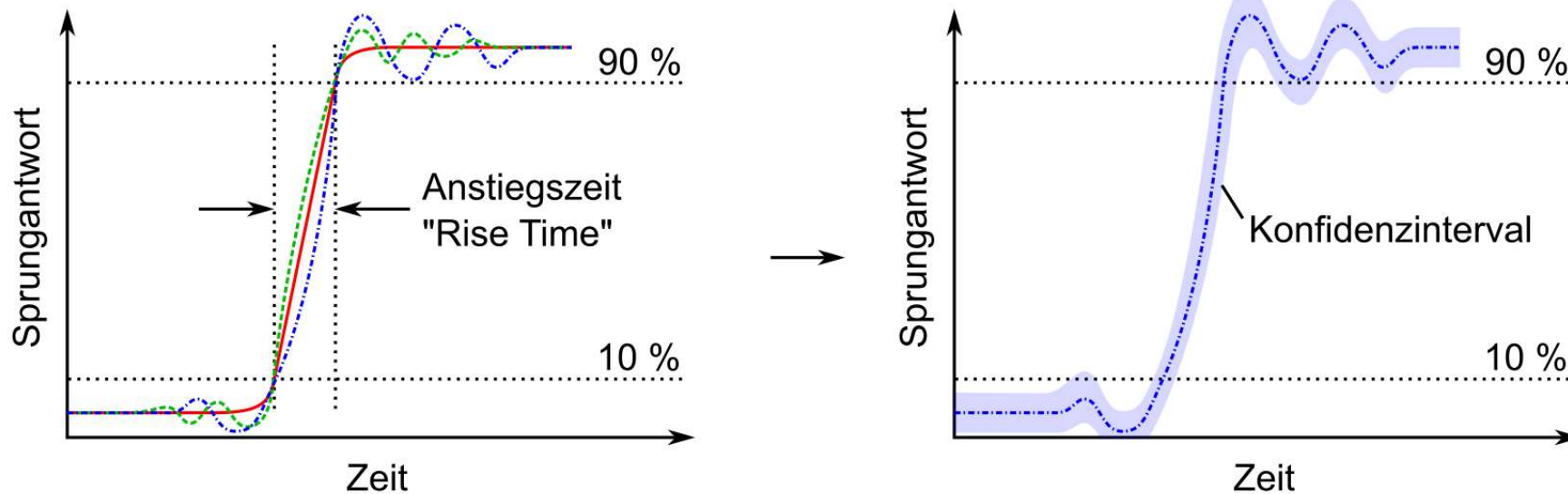
- EVM abhängig von
 - Sender
 - Empfänger
 - Übertragungskanal
 - Messunsicherheiten der Wellenform in Basisband propagieren
 - Ansätze anderer NMIs vorhanden [2,3]
- **Dynamische Wellenform-metrologie**



[2] Humphreys, David A., and Robert T. Dickerson. "Traceable Measurement of Error Vector Magnitude (EVM) in WCDMA Signals." *IEEE International Waveform Diversity and Design Conference*, 2007.

[3] Remley, Kate A., et al. "Millimeter-Wave Modulated-Signal and Error-Vector-Magnitude Measurement With Uncertainty." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 2015.

- Bisher oft Ein-Parameter-Beschreibung, z.B. Sprungantwort eines Oszilloskops

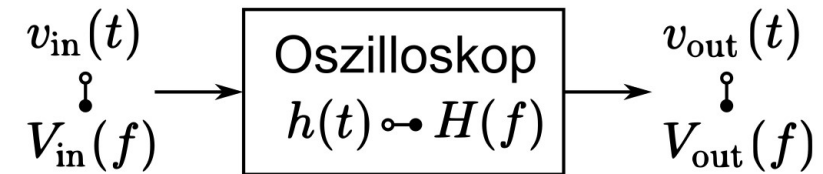


- Einzelne Parameter beschreiben Sprungantwort nicht eindeutig
- Für komplexe hochfrequente Systeme unzureichend
- Vollständige messtechnische Erfassung von Wellenformen → [Wellenformmetrologie](#)

→ Dynamische Systemantwort wird ausgewertet

Beispiel Oszilloskop

- Beschreibung als zeit- bzw. frequenzdiskretes System
- Umwandlung mittels Fourier Transformation
- Systemantwort aus Entfaltung bzw. Division



$$v_{out}(t) = h(t) * v_{in}(t)$$

$$V_{out}(f) = H(f) \cdot V_{in}(f)$$

Analyse

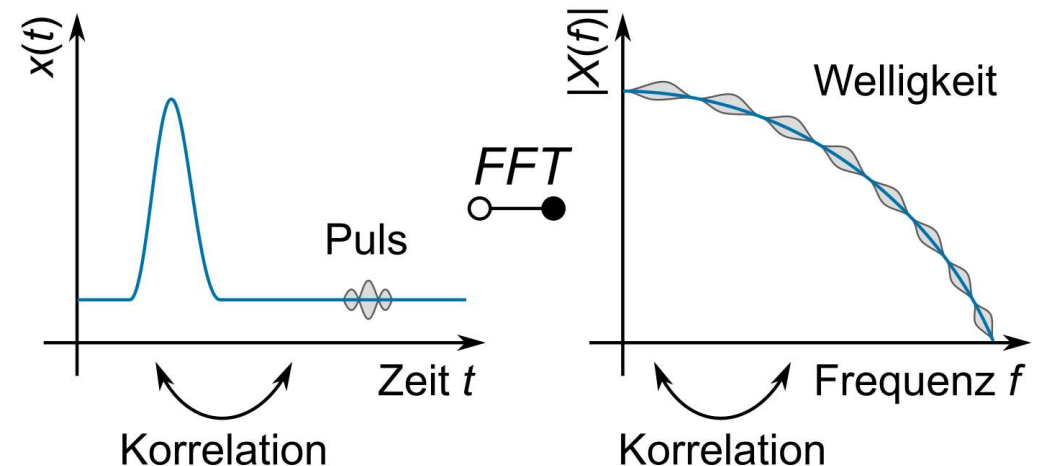
- Rauschen führt zu mathematisch schlecht konditionierten Problemen
- Filter bzw. Regularisierung notwendig [4]
- Auswirkung auf Messunsicherheit möglich
- Korrelation zwischen Zeit- und Frequenzbereich erhalten [5]

[4] Eichstädt, S., et al. "On challenges in the uncertainty evaluation for time-dependent measurements." *Metrologia*, 2016.

[5] Hale, Paul D., Dylan F. Williams, and Andrew Dienstfrey. "Waveform metrology: signal measurements in a modulated world." *Metrologia*, 2018.

Unsicherheitsanalyse

- Rückführung auf SI Einheiten teilweise im Frequenzbereich (z.B. Impedanz) und teilweise im Zeitbereich (z.B. EOS System)
- Unsicherheitsanalyse inklusive Korrelationen notwendig
- Fourier Transformation der Messgrößen und Unsicherheiten
- Regularisierung für FFT und Entfaltungen
- **Keine Standardlösung**
- Monte Carlo Analyse und/oder Kovarianz-Matrix → GUM S1 und S2 [6]
- Sensitivitätsmatrix für lineare Empfindlichkeit auf unterschiedliche Unsicherheiten



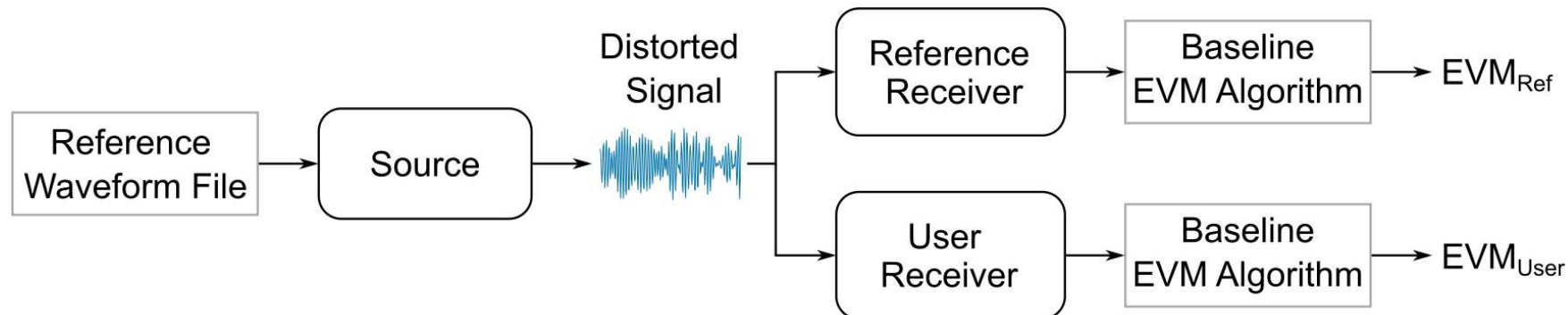
[6] Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities.

Mitwirkung an IEEE Standard P1765

Estimating the Uncertainty in Error Vector Magnitude of Measured Digitally Modulated Signals for Wireless Communications

Ansatz:

- Wellenform mit bekannter Störung (z. B. Rauschen, lineare und nichtlineare Verzerrung)
- Rückgeführte Quelle (AWG) → rückgeführter Referenzempfänger, kalibrierter Testempfänger
- Identischer Algorithmus für beide Empfänger
- Vergleich von Testempfänger mit Referenzempfänger



Messgeräte der AG

Hochfrequenter Arbiträrgenerator

AWG Keysight M8195A



Eigenschaften

- Abtastrate bis zu 65 GSa/s
 - 25 GHz analoge Bandbreite
- vielseitige Signalerzeugung

Hochfrequente Echtzeitoszilloskope

Tektronix DPO77002SX ATO



Eigenschaften

- 200 GS/s Abtastrate
 - Bis zu 70 GHz Signalerfassung
- Aufnahme beliebiger Signale in Echtzeit

Kalibrierung des Arbiträrgenerators (AWG)

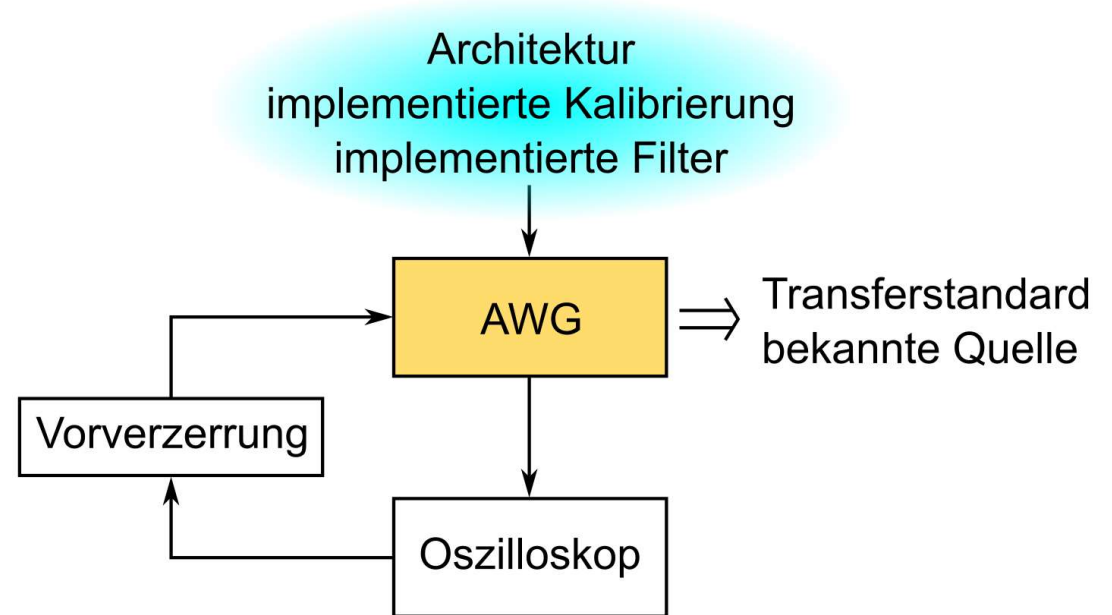


Architektur

- Digitale Signalverarbeitung
- Verschachteltes DAC Array
- Ausgangsfilter

Korrekturen [7]

- Asymmetrien der HF-Pfade korrigieren
- Vorverzerrung zur Unterdrückung von unerwünschten Harmonischen
- Rückführbarkeit über kalibriertes Oszilloskop



[7] Park, Youngcheol, and Kate A. Remley. "Two-stage correction for wideband wireless signal generators with time-interleaved digital-to-analog-converters." *83rd ARFTG Microwave Measurement Conference*. IEEE, 2014.

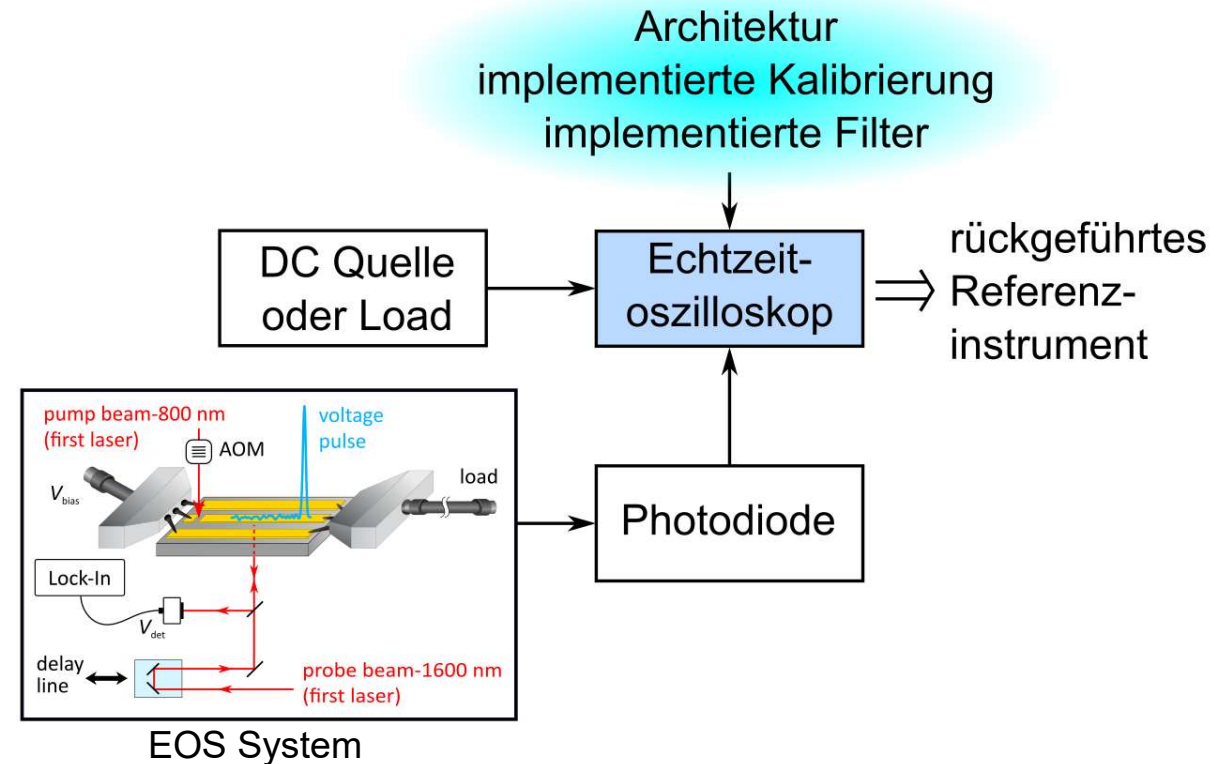
Kalibrierung der Echtzeitoszilloskope

Architektur

- Verschachteltes ADC Array
- Digitale Abwärtskonversion
- Digitale Signalverarbeitung

Korrekturen [8,9]

- Identifikation der Anzahl der ADCs
- Kalibrierung der Impulsantworten
- Rückführbar über kalibrierte Photodiode [10] (AG 2.52)



[8] Humphreys, David A., Martin Hudlička, and Irshaad Fatadin. "Calibration of wideband digital real-time oscilloscopes." *IEEE Trans. on Instr. and Measurement* 2015.

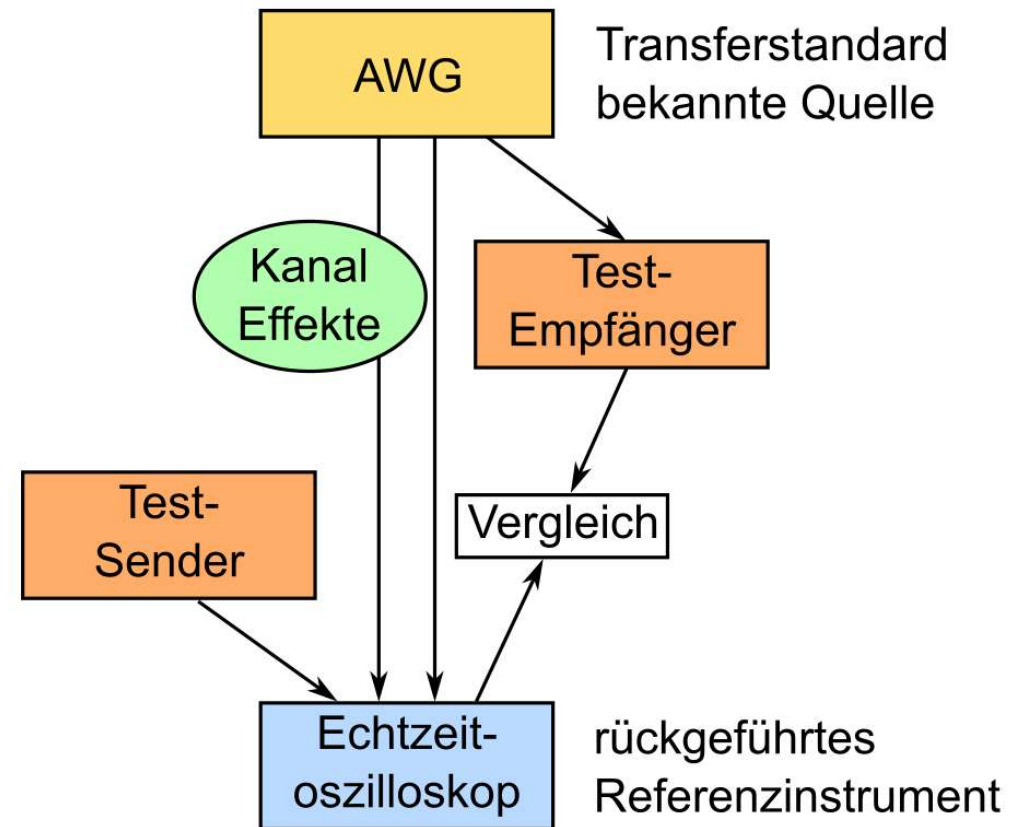
[9] Cho, Chihyun, et al. "Calibration of time-interleaved errors in digital real-time oscilloscopes." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 2016.

[10] Struszewski, Paul, et al. "Time-domain characterization of high-speed photodetectors." *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 2017.

Anwendung der Messgeräte

Kalibrierung beliebiger Sender und Empfänger

- AWG als Transferstandard für beliebige Empfänger
- Echtzeitoszilloskop als Referenzinstrument
- Rückgeführte Messung beliebiger Sender
- Vergleich zwischen Oszilloskop und Testempfänger für rückgeführte Basisbandgrößen (EVM)
- Untersuchung von Kanaleffekten zwischen AWG und Oszilloskop



- Messung der Eigenschaften digitaler Signale ist angesiedelt in neu gegründeter AG 2.25: **„Hochfrequenz-Messgrößen digitaler Kommunikationssysteme“**
- Beteiligte Wissenschaftler:
 - Ulrich Schumann
 - Dr. Nora Meyne
 - Zusätzlich ein Doktorand ab 01.06.2021
- Partner:
 - Dr. Kai Baaske (AG 2.21, Kalibrierung Sampling Oszilloskop und Impulsgeneratoren)
 - Dr. Heiko Füser (AG 2.52, EOS System und Photodiode)

Zusammenfassung und Ausblick



Zeitnahe Ziele

- Kalibrierung der Messgeräte
- Rückführbare Messung von Basisbandgrößen digitaler Signale (EVM)
- Messautomatisierung

Ausblick

- Dienstleistung: Charakterisierung von Sendern / Empfängern
- Auswertung spektraler Eigenschaften digitaler Signale
- Rückführbare Kanalcharakterisierung



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

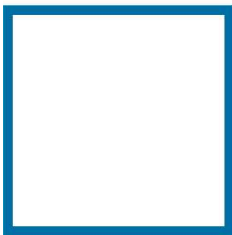
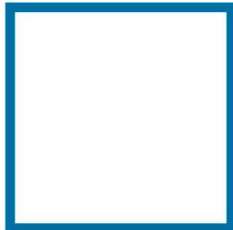
38116 Braunschweig

Nora Meyne

Telefon: 0531 592-2216

E-Mail: nora.meyne@ptb.de

www.ptb.de



Stand: 05/21