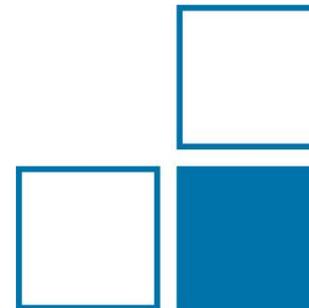


Fortschritte in der Wellenformmetrologie

Dr. Nora Meyne, Bashar Salloom

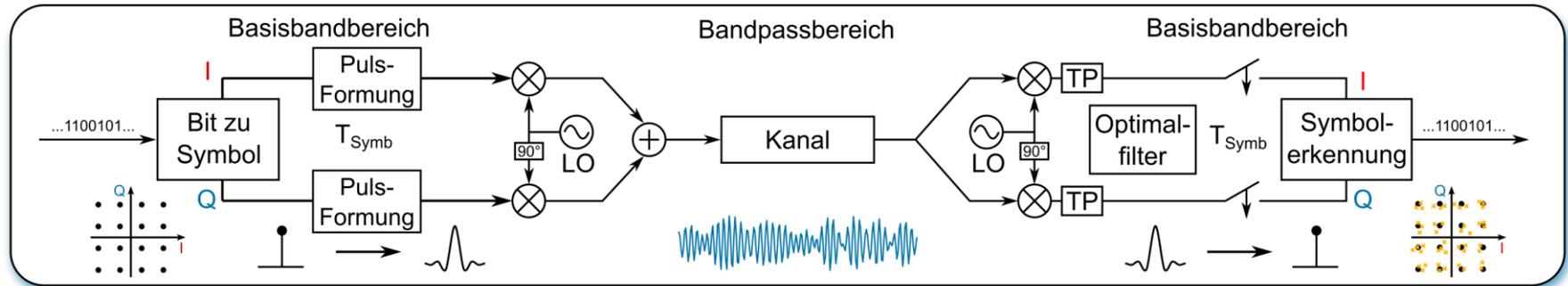
AG 2.25 – Hochfrequenz-Messgrößen digitaler Kommunikationssysteme



- Wellenformen in der Hochfrequenztechnik
- Wellenformmetrologie
- Kalibrierung der Messgeräte
 - Sampling-Oszilloskop
 - Echtzeit-Oszilloskop
 - Arbiträrgenerator
- Ausblick

Zeitabhängige Signale, z.B. Signale für Datenübertragung

- Digitale Modulation, Bits \rightarrow Symbole \rightarrow Wellenformen
- Symbolrate definiert Bandbreite des Signals
- Filter werden genutzt, um Spektrum zu formen und Rauschen zu minimieren



Höhere Frequenzen und größere Bandbreiten

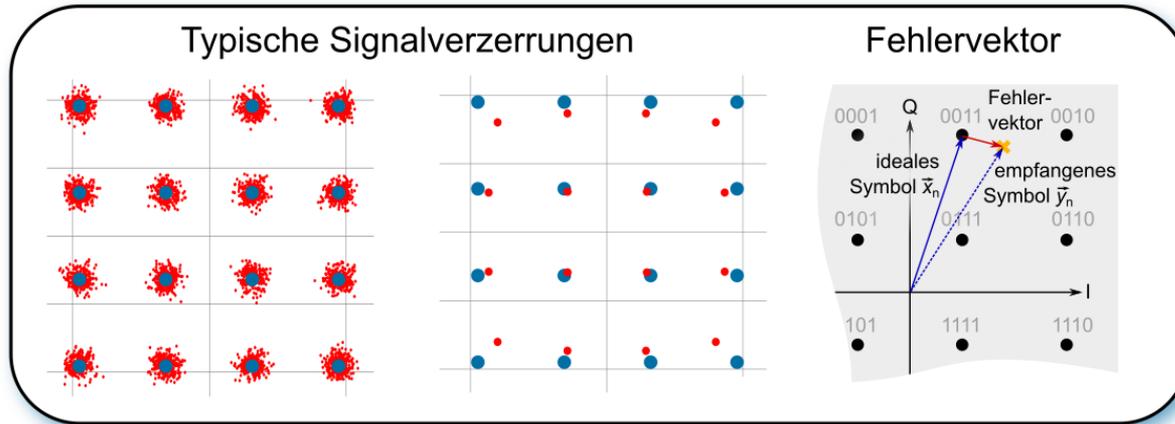
- Stärkerer Einfluss der Hardware bei Sender und Empfänger
- Erfassung der Amplitude nicht ausreichend \rightarrow Rückführung der Phase notwendig
- Gerätekalibrierung herstellerabhängig

Charakterisierung von HF-Generatoren und HF-Empfängern

- Verzerrung der Wellenform beim Senden und Empfangen
- Einfluss passiver Komponenten auf Signalverzerrungen → Mischer, Antennen

Brücke zur Kommunikationstechnik

- Qualitätsparameter digitaler Signale
- **EVM**: Error Vector Magnitude → Gemittelter, gewichteter Betrag des Fehlervektors

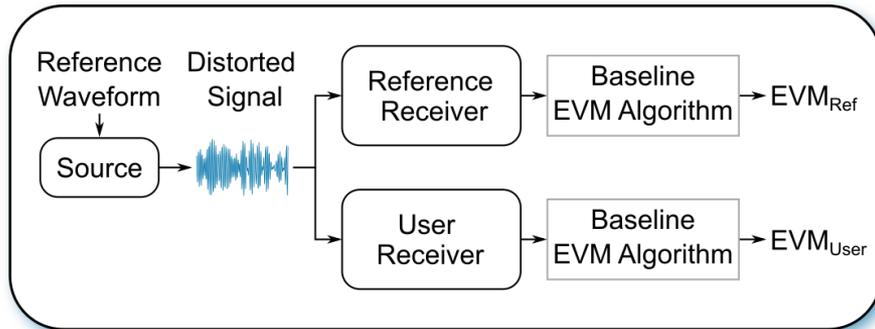


Messgröße Error Vector Magnitude

Ansätze zur Rückführung der EVM

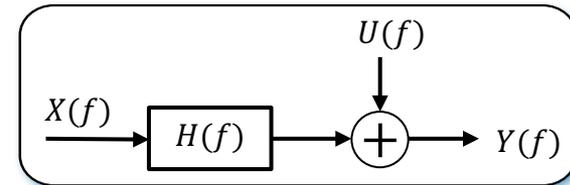
IEEE 1765^[1]

- ‚Minimaler‘ EVM Algorithmus
- Referenzwellenformen mit definierten Verzerrungen
- Vergleich zwischen Referenzempfänger und Nutzerempfänger
- Bestimmung der Hardwareeinflüsse



Modulation Analysis^[2]

- Gesendete und empfangene Wellenformen: → linear korrelierte Zufallsvariablen
- ‚Störer‘: → unkorrelierte Zufallsvariablen



$$Y(f) = H(f)X(f) + U(f)$$

- Definition der Kanalkapazitätsdichte c_D angelehnt an Shannons Kanaltheorie
- Definition eines optimalen Filters
- Herleitung der EVM in Abhängigkeit von c_D

[1] IEEE Recommended Practice for Estimating the Uncertainty in Error Vector Magnitude of Measured Digitally Modulated Signals for Wireless Communications, 2022

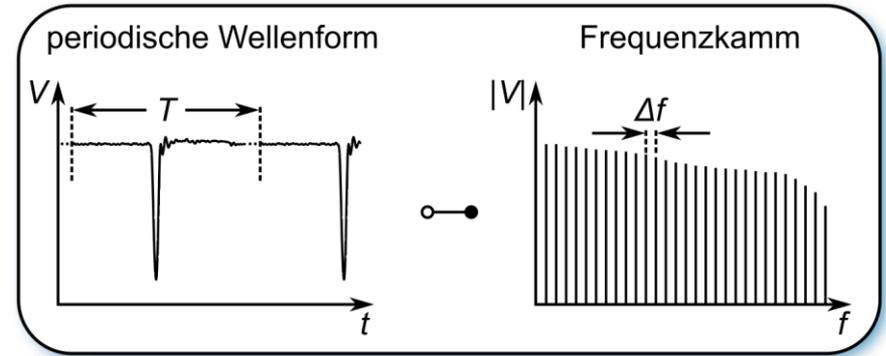
[2] Verspecht, Jan. "Quantifying Modulation Quality at the Physical Layer using Equalized Channel Capacity." *51st European Microwave Conference (EuMC)*. IEEE, 2022.

Phasenreferenzen

- Charakterisierung breitbandiger elektrischer Referenzsignale (Frequenzkamm)^[3]
- Kalibrierte Phase für frequenzumsetzende Messungen (z. B. Mischer)
- Phasenkalibrierung von Vektor Signalanlysatoren

Ansatz

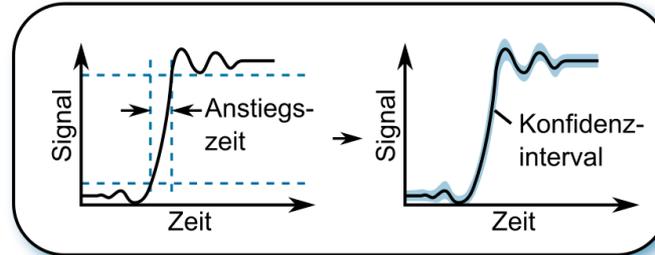
- Messung eines Pulses im Zeitbereich (Sampling-Oszilloskop)
- Wegen Periodizität kann nach Fourier Transformation der Phasenverlauf im Frequenzbereich charakterisiert werden



[3] Cho, Chihyun, et al. "Phase calibration and uncertainty evaluation for a RF comb generator." Measurement and Control 53.3-4 (2020): 698-703

Unsicherheitsanalyse → Messunsicherheit für die komplette Wellenform notwendig^[4]

- Ziel: Sample-by-Sample-Unsicherheiten statt parametrischer Unsicherheit^[5]
- Wellenform mit Unsicherheiten je nach Anwendung weiterverwenden (EVM, Frequenzkamm)



Messgeräte zur Erfassung von Wellenformen

- Sampling-Oszilloskop
- Vektor-Signalanalysator
- Echtzeit-Oszilloskop
- Nichtlinearer Netzwerkanalysator

Korrektur und Verarbeitung von Wellenformen

- Transformation Zeitbereich ↔ Frequenzbereich
- Korrektur von Fehlanpassung / Deembedding
- Gerätespezifische Korrekturen

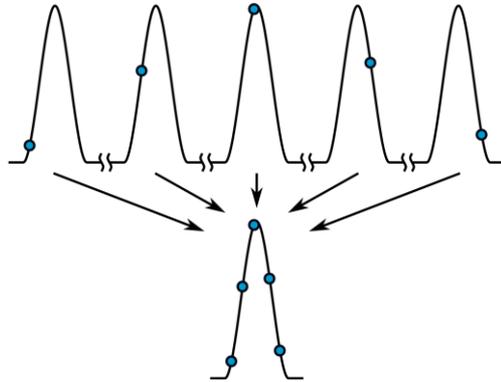
Unsicherheitsanalyse

- Kovarianzmatrix
- Monte-Carlo-Simulation

[4] Hale, Paul D., Dylan F. Williams, and Andrew Dienstfrey. "Waveform Metrology: Signal Measurements in a Modulated World." *Metrologia* 55.5 (2018): S135.

[5] Vorbereitung einer Ergänzung zum IEC Standard IEC/TC 85/WG 22 "Computation of Waveform Parameter Uncertainties" zum Thema "Electrical Waveform Uncertainties"

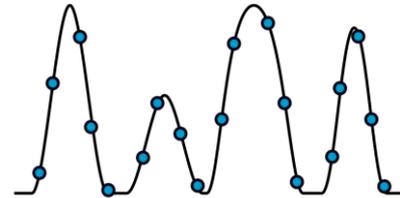
Sampling-Oszilloskop



Eigenschaften

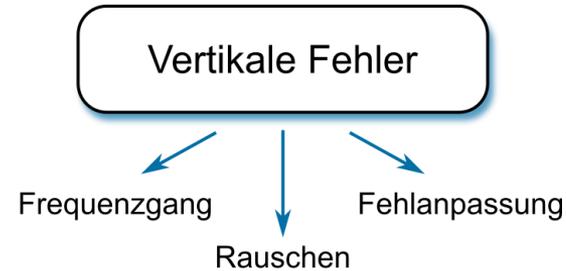
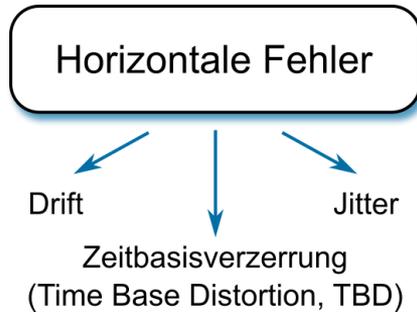
- Messung periodischer Signale
- Hohe zeitliche Auflösung und Dynamik
- Langsame Messung
- Kalibrierung wohldefiniert

Echtzeit-Oszilloskop



Eigenschaften

- Single-Shot Messung langer Signale
- Feste zeitliche Auflösung und niedrige Dynamik
- Architekturen (Hardware) vielfältig
- Kalibrierung komplex



Korrektur der Zeitbasis

- Drift: langsame Verschiebung der Zeitbasis
- TBD: Systematischer Fehler
- Jitter: Statistischer Fehler
- Unsicherheitsanalyse je nach Ansatz [6]

Korrekturen im Frequenzbereich

- Fehlanpassung und Deembedding
- Entfaltung von der Impulsantwort, rückgeführt über Elektrooptisches Samplingsystem (EOS)^[7]
- Unsicherheitsanalysen VNA und EOS zusammenführen

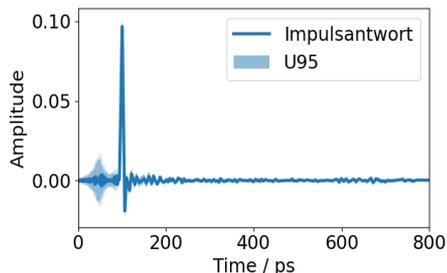
[6] Hale, Paul D., et al. "Compensation of random and systematic timing errors in sampling oscilloscopes." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 55.6 (2006): 2146-2154.

[7] Fuser, H., et al. "Optoelectronic time-domain characterization of a 100 GHz sampling oscilloscope." Measurement Science and Technology 23.2 (2011): 025201.

Zeitbereich

Impulsantwort $h(t)$ (EOS)

- Sehr hohe zeitliche Auflösung
- Zeitlich begrenzte Messung
- Unsicherheiten als Kovarianzmatrix



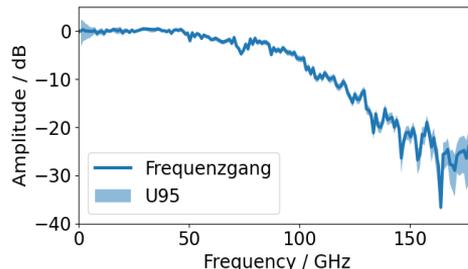
Gemessene Wellenform $v(t)$

- Zeitbasiskorrekturen durchführen
- Hohe zeitliche Auflösung
- Länge einstellbar

Frequenzbereich

Frequenzantworten $H(f)$, $V(f)$

- Relativ niedrige Auflösung
- Unsicherheiten in Betrag und Phase



Kalibrierung durch Entfaltung

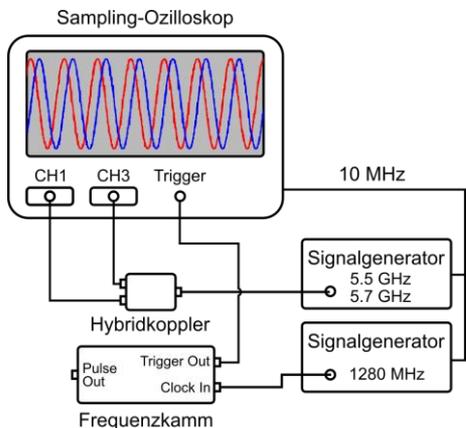
- $V_{\text{cal}}(f) = V(f)/H(f) \rightarrow$ Monte Carlo
- Regularisierung bei hohen Frequenzen notwendig

Zeitbereich

Kalibrierte Wellenform $v_{\text{cal}}(t)$
z. B. für EVM,
Frequenzkamm

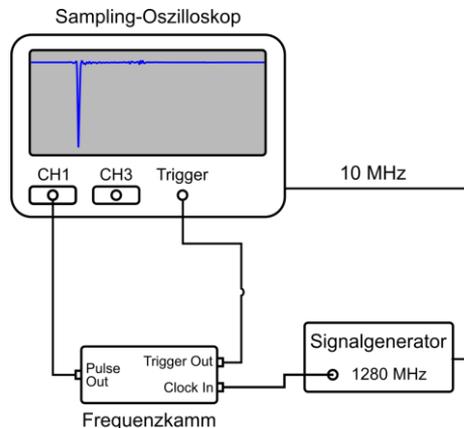
Messaufbau

Zeitbasiskorrektur



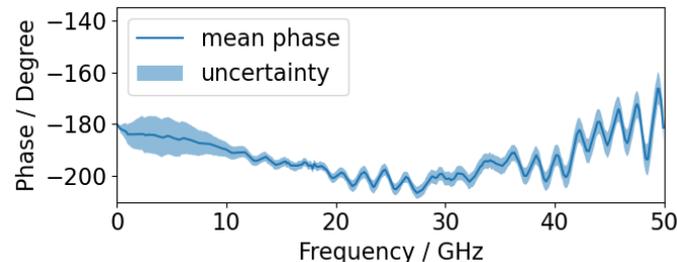
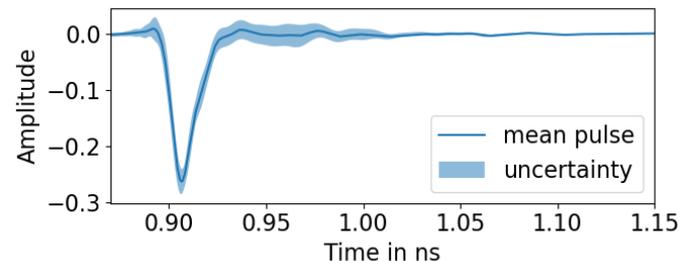
- Bestimmung systematischer Teil der Zeitbasis durch verschiedene Sinusspannungen mit Hybridkoppler
- Messung des Pulses bei gleichen Einstellungen

Messung Frequenzkamm



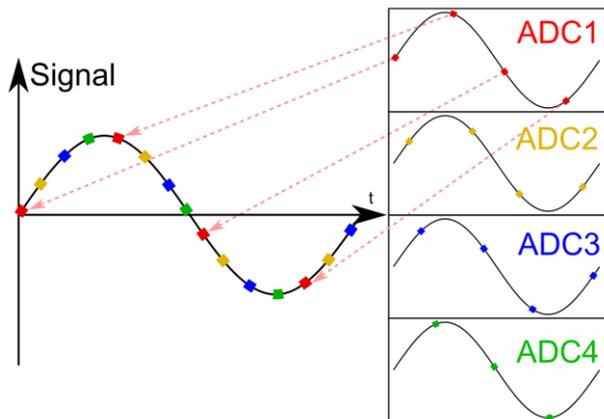
Messergebnis

- Phase des Frequenzkamms (detrended)
- Referenzebene derzeit am Oszilloskop (Deembedding bei AG 2.24)



Funktionsprinzip

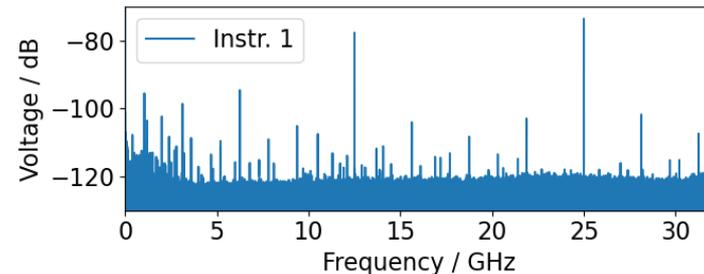
- Aufnahme in Echtzeit
- Schnelle AD-Umwandlung für große Bandbreite nötig
→ Einsatz von n verschachtelten ADCs
- Zusammenfügen der Daten → hohe Samplerate
- ADCs unterscheiden sich leicht voneinander



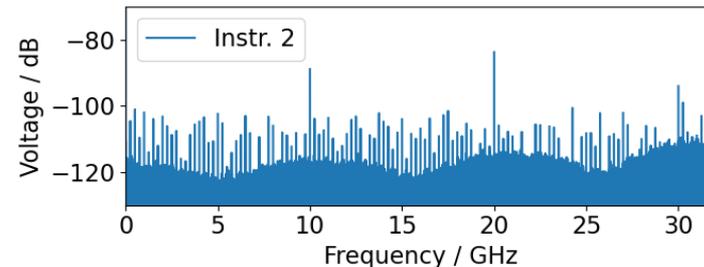
Einfluss Architektur

- Spektrum von Rauschen zeigt periodische Spitzen
- $$n_{\text{ADC}} = \frac{f_{\text{sample}}}{\Delta f}$$

Gerät 1:



Gerät 2:

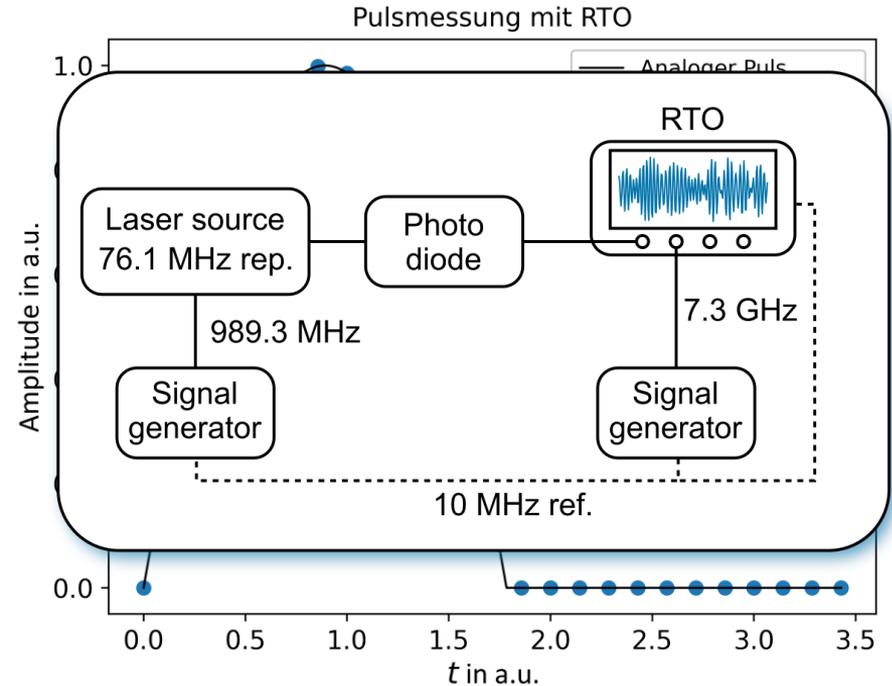


Korrekturen

- Charakterisierung der Impulsantworten der ADCs [8]
- Rückführbar über kalibrierte Photodiode [9] (AG 2.54) mit fs-Laser
- Synchronisierung mit Laserquelle für Übersampling der einzelnen ADCs

$$f_{\text{neu}} = \frac{f_{\text{pulse}} f_{\text{adc}}}{\text{gcd}(f_{\text{pulse}}, f_{\text{adc}})}$$

- Kalibrierungsanwendung an Messsignalen erfordert:
 - Reihenfolge ADCs bestimmen
 - Separation nach ADC oder zeitvariantes Filter
 - Regularisierung
 - Unsicherheitsanalyse



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

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

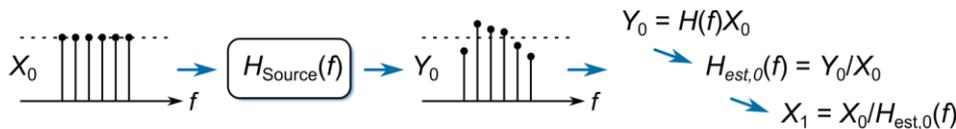
Kalibrierung Arbiträrgenerator (AWG)

Architektur

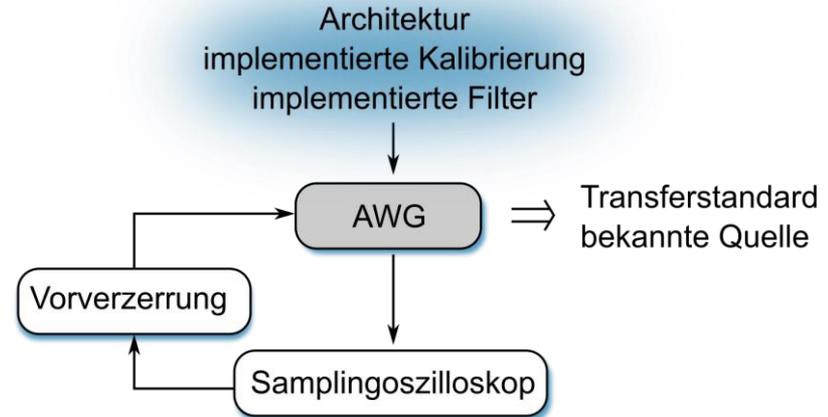
- Verschachtelung von DACs
- Digitale Signalverarbeitung

Korrekturen [10]

- Asymmetrien der HF-Pfade korrigieren
- Iterative Vorverzerrung:



- Rückführung über kalibriertes Sampling-Oszilloskop (hohe Dynamik)
- Transferstandard für digitale Signale



[10] Remley, Kate A., et al. "Calibrated oscilloscope measurements for system-level characterization of weakly nonlinear sources." *2014 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMiC)*. IEEE, 2014.

Rückgeführte Messung EVM

Messaufbau

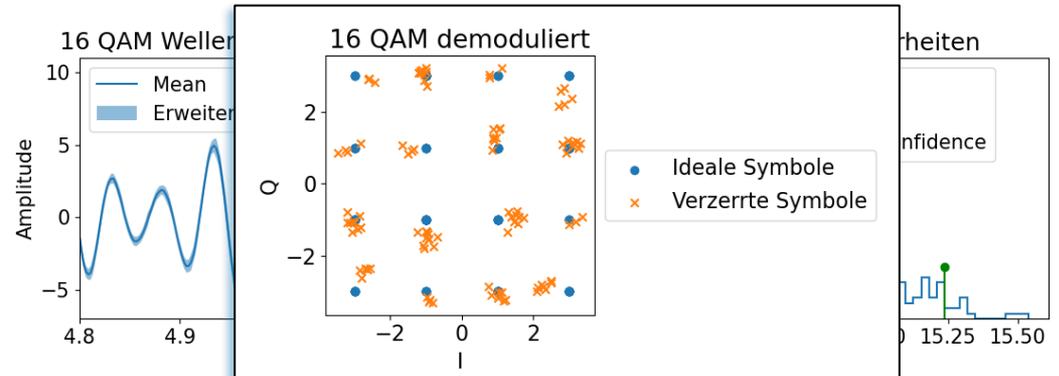
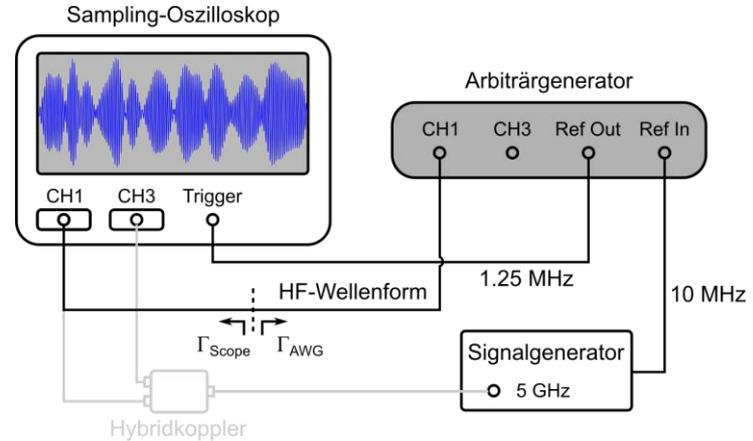
- Kalibrierter Empfänger, z.B. Sampling-Oszilloskop
- Kalibrierter Sender, z.B. AWG mit Vorverzerrung
- Charakterisierte Fehlanpassung

Unsicherheitsanalyse

- Wellenform mit Unsicherheiten aus Monte-Carlo-Analyse
- Unsicherheit der Realisierungen durch EVM-Formel weiter propagieren (z.B. IEEE 1765)
- Statistik für die EVM

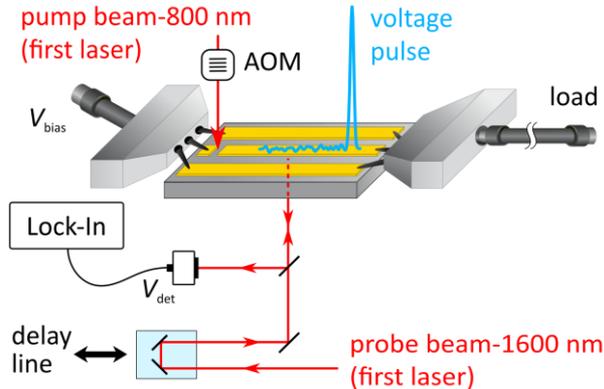
Beispiel

- Simulation 16 QAM mit nichtlinearer Verzerrung und leichtem Rauschen



Elektrooptisches Sampling (AG 2.54)

- Laser-basiertes Sampling elektrischer Pulse
- EOS liefert relative Amplitudengänge
- Rückführung über Streckenänderung



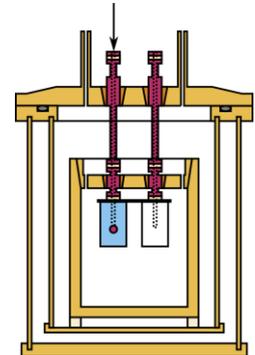
Streuparameter (AG 2.22)

- Charakterisierung von Konnektoren und Adaptern
- Rückführung über dimensionelle Messungen von Luftleitungen



HF-Leistung (AG 2.22)

- Zusätzliche Kalibrierung für Amplitudengang
- Kalibrierter Leistungsmesskopf
- Rückführung über Mikrokalorimeter



- Messung der Eigenschaften digitaler Signale ist angesiedelt in neu gegründeter AG 2.25: **„Hochfrequenz-Messgrößen digitaler Kommunikationssysteme“**
- Beteiligte Wissenschaftler:
 - Dr. Nora Meyne
 - Bashar Salloom
 - Katja Tüting
- Partner:
 - Dr. Kai Baaske (AG 2.21, Sampling Oszilloskop und Impulsgeneratoren)
 - Dr. Heiko Fuser (AG 2.54, EOS System)

- Dienstleistung: Charakterisierung von Sendern / Empfängern (EVM)
- Dienstleistung: Kalibrierung von Phasenreferenzen
- Auswertung spektraler Eigenschaften digitaler Signale
- Weiterführende Anwendungen:
 - Höhere Frequenzen (6G)
 - Over-the-Air-Testing modulierter Signale





**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Nora Meyne

Telefon: 0531 592-2287

E-Mail: nora.meyne@ptb.de

www.ptb.de

