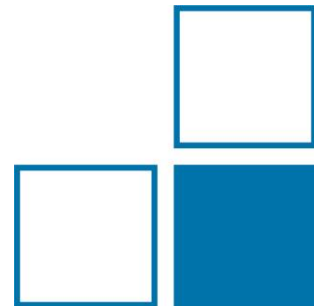


Oszilloskop als metrologisches Messinstrument

Bashar Salloom, Nora Meyne, Kai Baaske und Thomas Kleine Ostmann

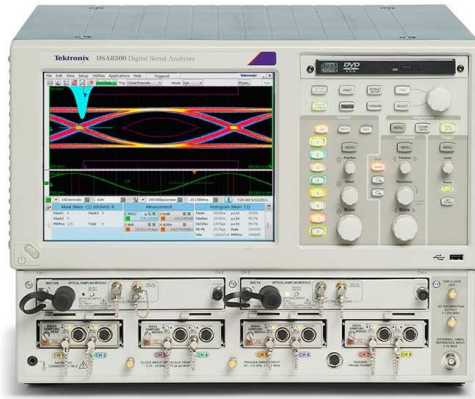
AG 2.25 – Messgrößen digitaler Kommunikationssysteme



- Einleitung
- Sampling-Oszilloskop
- Fehlerquellen bei Sampling-Oszilloskop
- Echtzeit-Oszilloskop
- Fehlerquellen bei Echtzeit-Oszilloskop
- Zusammenfassung

Oszilloskop Übersicht

- Aufgabe: Anzeigegerät der Spannung als Funktion der Zeit
- Zwei Oszilloskoparten: Sampling- und Echtzeit-Oszilloskope
- Einsatz in der Metrologie möglich nach Korrektur der systematischen Fehlerquellen

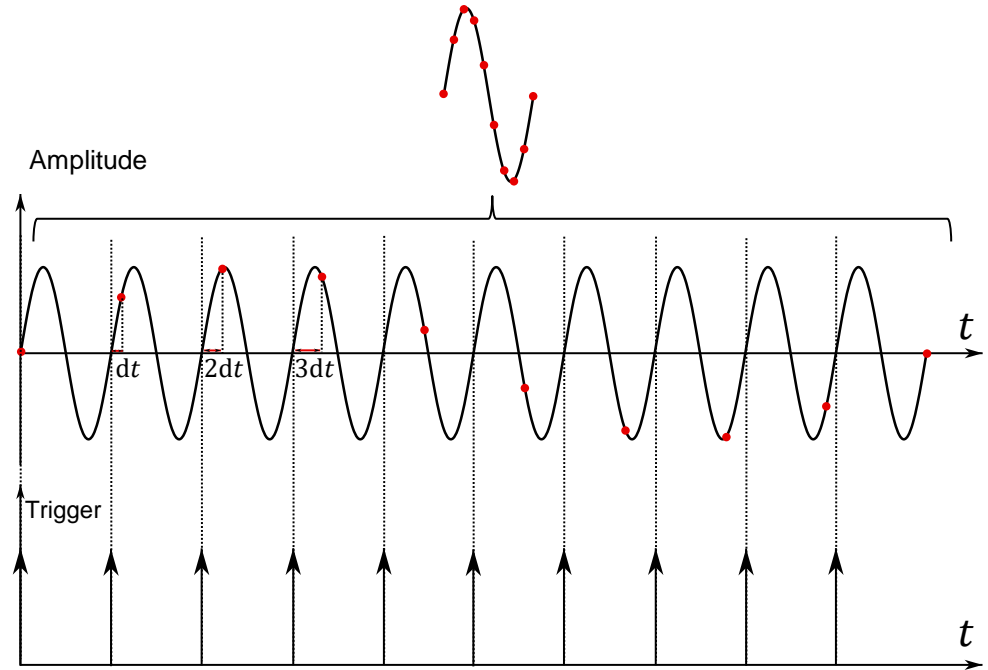


Tektronix DSA8300
Sampling-Oszilloskop

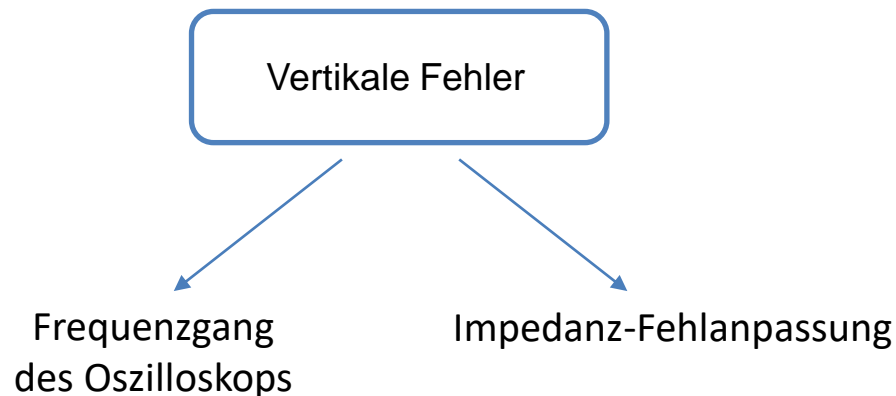
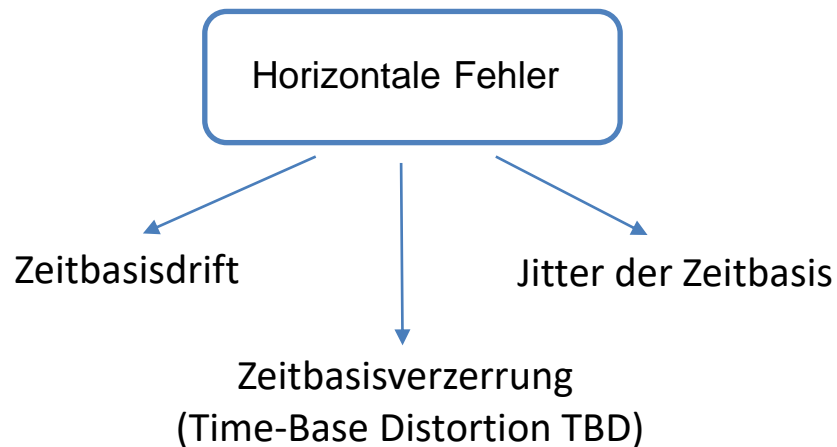


Tektronix DPO70000SX
Echtzeit-Oszilloskop

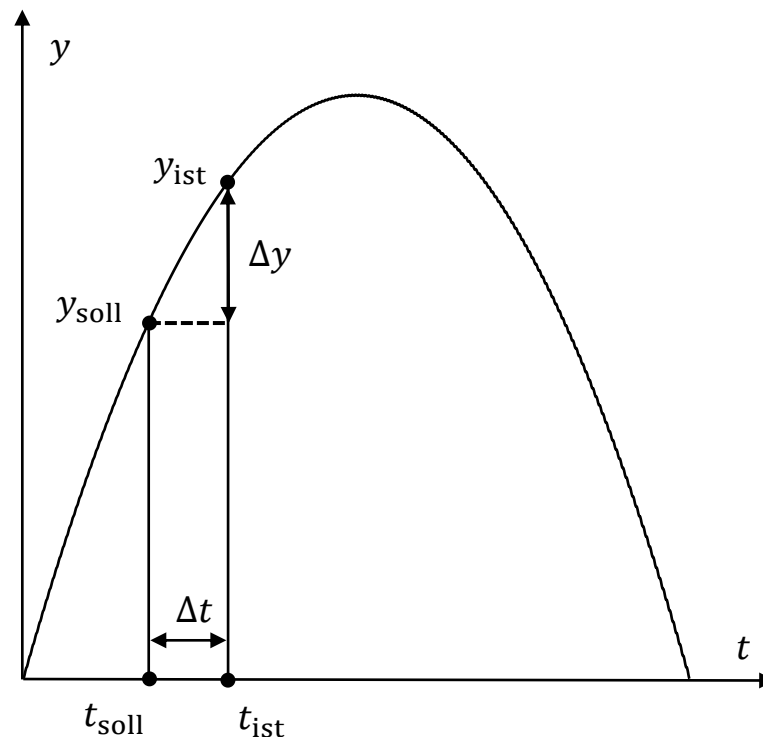
- Nur für periodische Signale geeignet
- Nach Triggerereignis Aufnahme von einem Sample
- Trigger muss mit Signal synchronisiert sein
- Vordefinierte linear steigende Verzögerung nach Trigger
- Messsignal aus verschiedener Signalperioden rekonstruieren
- Hohe Bandbreite da dt klein gewählt werden kann
- Hohe ADC-Auflösung erzielbar



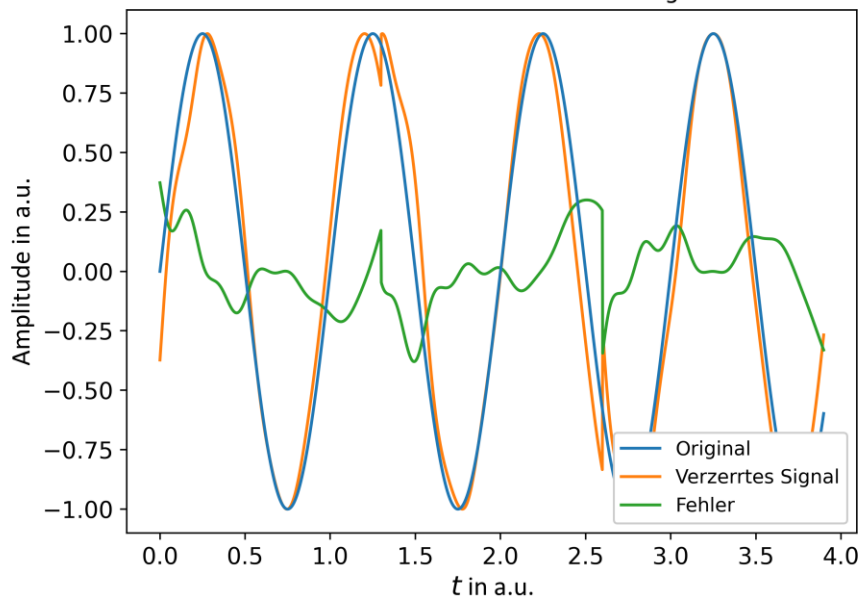
- Fehler entstehen aufgrund nicht-idealer Bauteile
- Unterscheidung zwischen horizontale und vertikale Fehler
- Fehlerquellen:



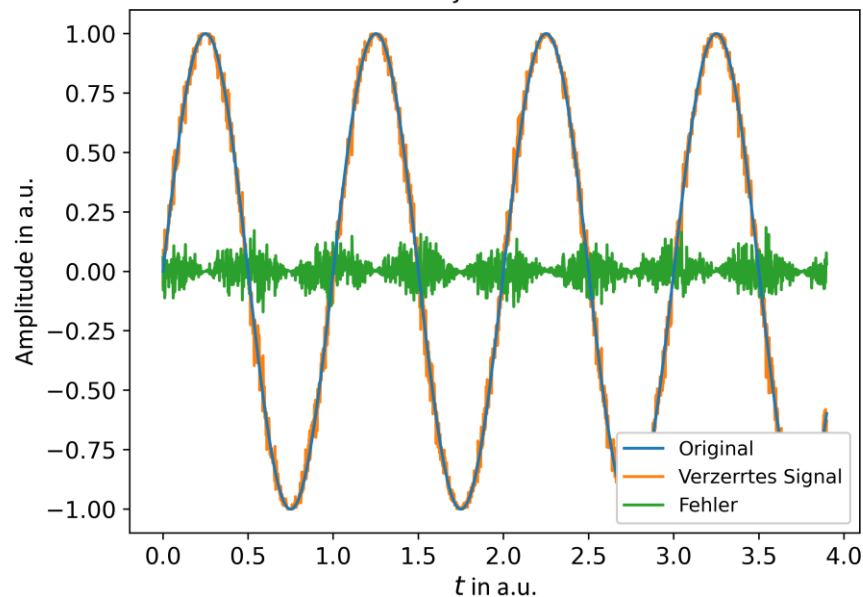
- Abweichung zwischen idealem und tatsächlichem Abtastpunkt Δt
- Fehler Δy abhängig von der Signalform
- Vertikalfehler $\Delta y \sim \Delta t \frac{dy}{dt}$
- **Drift:** Langsam variierender Teil von Δt
- **Zeitbasisverzerrung:** Systematischer Teil von Δt
- **Jitter:** Statistischer Teil von Δt
- Fehler nicht korrigierbar durch Mittelung



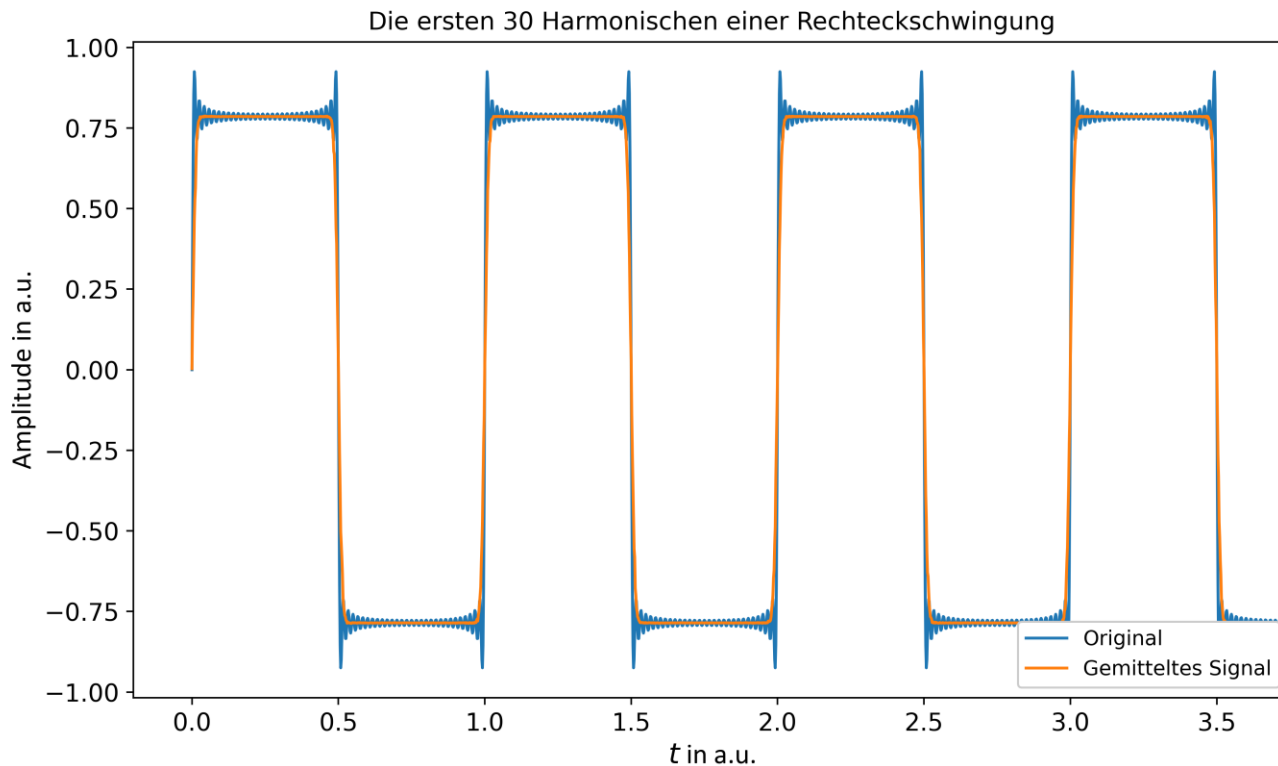
Einfluss der Zeitbasisverzerrung

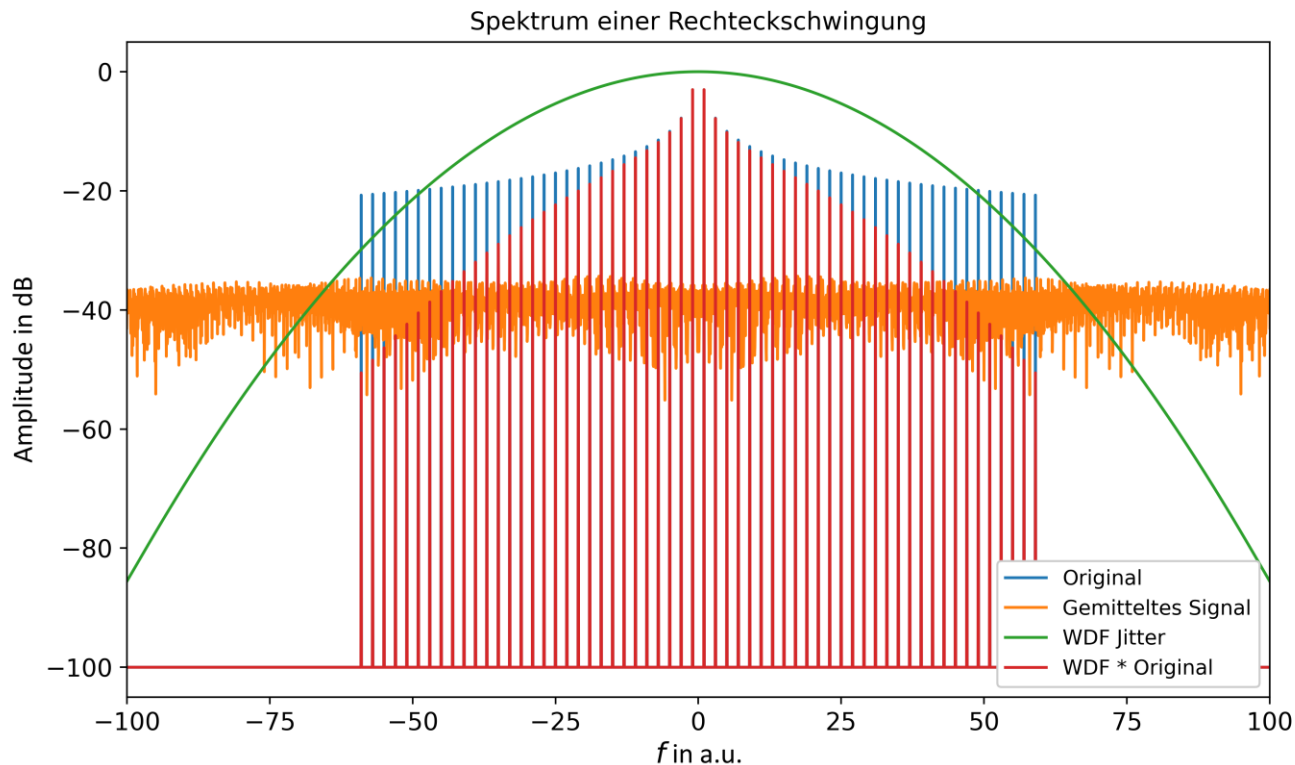


Einfluss des Jitters der Zeitbasis



Mittelung unter Jitter-Einfluss

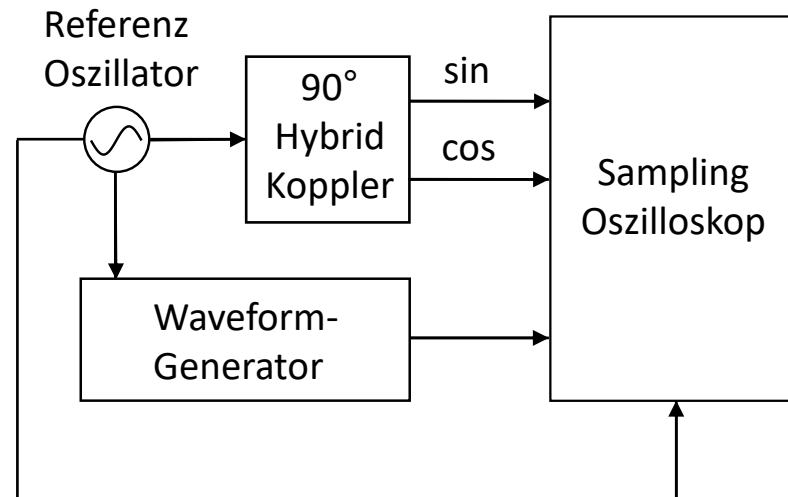




- Messung eines analytisch leicht beschreibbaren Signals (Sinus)
- Modell für das gemessene Signal:

$$y_i = \alpha + \sum_{k=1}^n \beta_k \sin(k\omega(t_i + \Delta t_i) + \varphi_k)$$

- Sinus-Signal überlagert mit n harmonischen und einem DC-Offset
- Einsatz eines parametrischen Fits zur Bestimmung der unbekannten Parameter
- Annahme: Zeitbasisfehler gleich für alle Kanäle



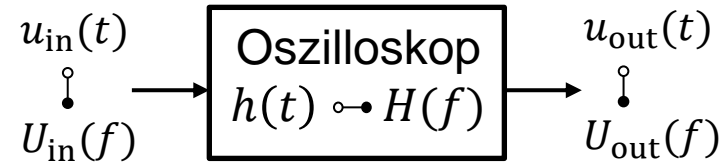
Vereinfachter Messaufbau zur Bestimmung von TBD aus [1]

[1] P. D. Hale, C. M. Wang, D. F. Williams, K. A. Remley und J. D. Wepman, „Compensation of random and systematic timing errors in sampling oscilloscopes,“ IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Bd. 55, p. 2146–2154, 2006.

Frequenzselektives Verhalten

- Oszilloskop weist frequenzselektives Verhalten auf
- Besondere Ausprägung für hohe Frequenzen
- Impulsantwort $h(t) \leftrightarrow H(f)$ beschreibt Verhalten bei allen Frequenzen
- $h(t)$ bestimmbar durch die Messung eines bekannten Referenzpulses aus Photodiode [2]
- Photodiode wird durch ein elektrooptisches Sampling System charakterisiert [3]

$$H(f) = \frac{U_{out}(f)}{U_{in}(f)}$$



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

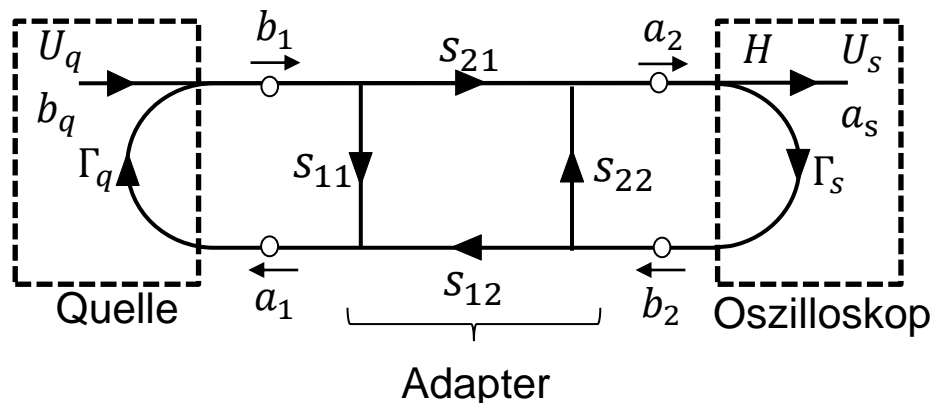
$$U_{out}(f) = H(f) \cdot U_{in}(f)$$

[2] T. S. Clement, P. D. Hale, D. F. Williams, C. M. Wang, A. Dienstfrey und D. A. Keenan, „Calibration of sampling oscilloscopes with high-speed photodiodes,“ IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Bd. 54, p. 3173–3181, 2006

[3] H. Füser, S. Eichstädt, K. Baaske, C. Elster, K. Kuhlmann, R. Judaschke, K. Pierz and M. Bieler, "Optoelectronic time-domain characterization of a 100 GHz sampling oscilloscope," Measurement Science and Technology, vol. 23, p. 025201, 2011.

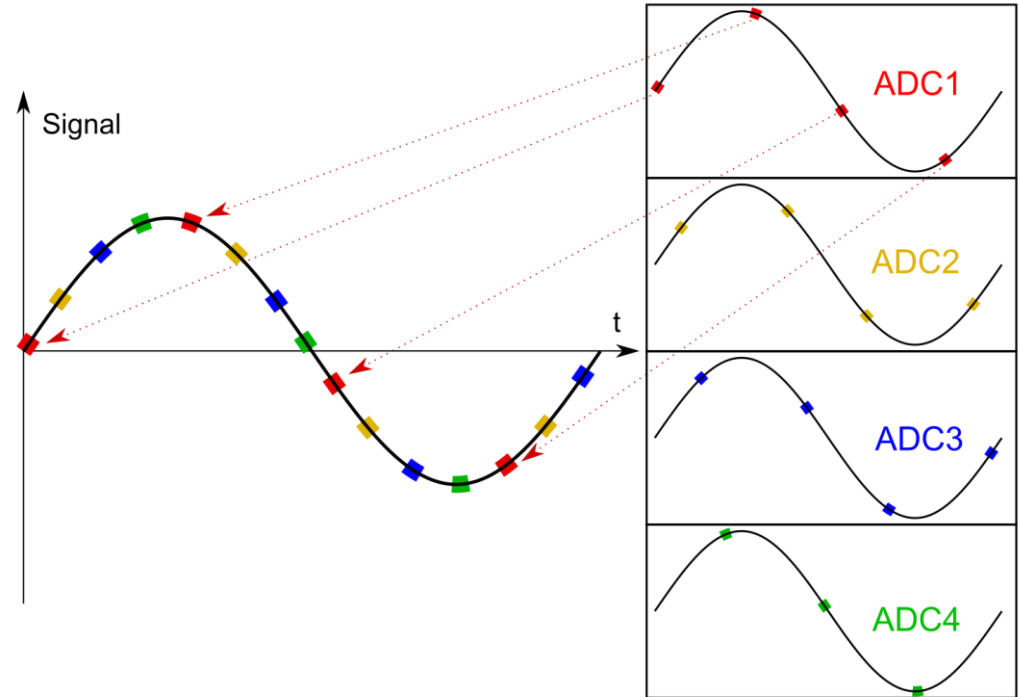
- Fehlanpassung am Oszilloskop und Quelle führt zu Reflektionen
- Koaxialadapter verzerren das Messsignal
- Korrektur bei bekannten S-Parametern möglich [4]
- VNA Bandbreite begrenzt Frequenzbereich der Kalibrierung
- Verhalten beschreibbar durch:

$$U_s = H \frac{U_q s_{21}}{1 - s_{11} \Gamma_q - s_{22} \Gamma_s - \Gamma_s \Gamma_q (s_{12} s_{21} - s_{11} s_{22})}$$



[4] D. F. Williams, T. S. Clement, P. D. Hale and A. Dienstfrey, "Terminology for high-speed sampling-oscilloscope calibration," in 2006 68th ARFTG Conference: Microwave Measurement, 2006.

- Aufnahme in Echtzeit
- Schnelle AD-Umwandlung für große Bandbreite nötig
- → Einsatz Interleaving ADC
- Signal von n ADCs gleichzeitig aufnehmen
- Zusammenfügen der Daten → hohe Samplerate
- n Impulsantworten müssen bestimmt werden
- ADC-Auflösung beschränkt



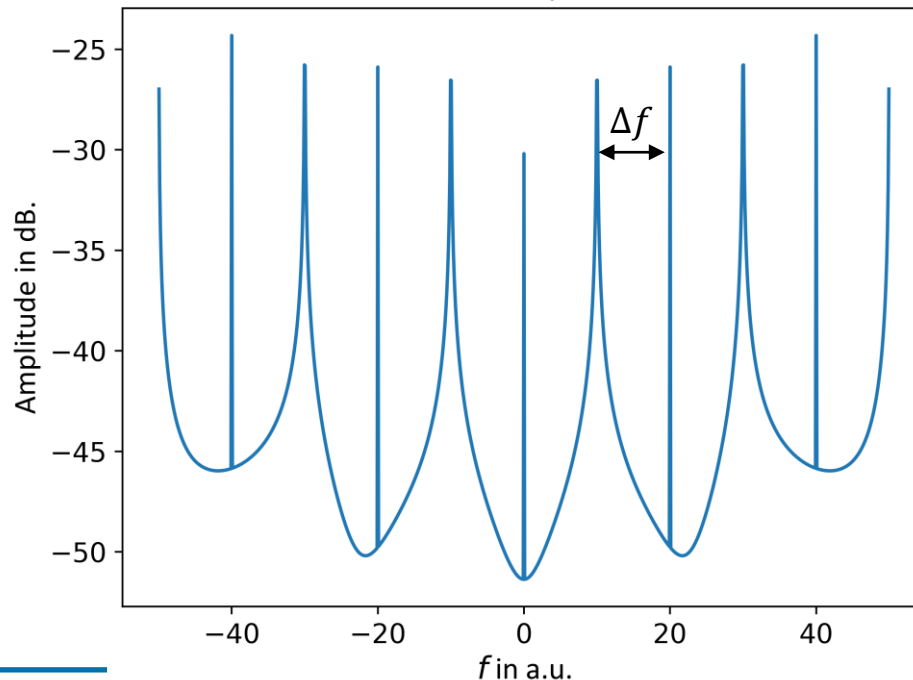
- Aufgrund Interleaving ADC Struktur, gibt es eine Impulsantwort für jeden einzelnen ADC
- Anzahl der ADCs in kommerziellen Oszilloskopen nicht bekannt und unterschiedlich
→ Tests zur Bestimmung der Anzahl der ADCs nötig
- Reihenfolge der ADCs im RTO ist unbekannt
- Trennung der Messdaten um einzelne Impulsantworten zu bestimmen verursacht Aliasing
- Bei gegebenen Impulsantworten Kalibrierungsanwendung auf Messsignal nicht trivial

- Bestimmung Anzahl ADCs durch ein DC-Testsignal
- Unterschiedliche DC-Offsets bzw. Gain-Werte der einzelnen ADCs verursachen Spurs im Spektrum
- Anzahl der ADCs aus Abtastfrequenz und Abstand zwischen Spektrallinien bestimmbar [5]:

$$n_{\text{ADC}} = \frac{f_{\text{sample}}}{\Delta f}$$

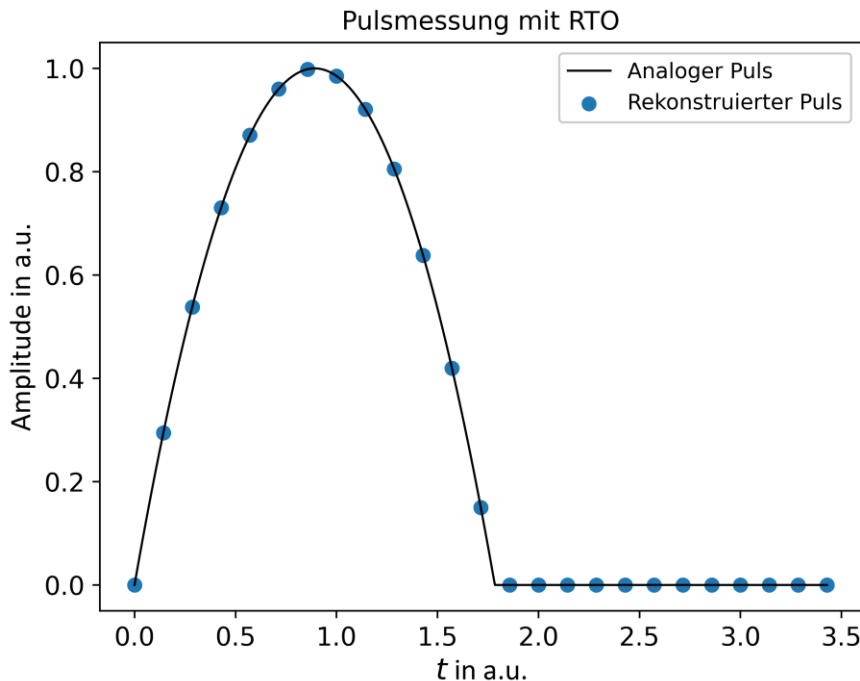
[5] C. Cho, J. G. Lee, P. D. Hale, J. A. Jargon, P. Jeavons, J. B. Schlager und A. Dienstfrey, „Calibration of time-interleaved errors in digital real-time oscilloscopes,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Bd. 64, p. 4071–4079, 2016.

Einfluss DC-Offset im Frequenzbereich 10 ADCs



- Zeitreihe von n ACS aufgenommen
- Trennung der Messdaten um n Impulsantworten zu bestimmen verursacht Aliasing
- Lösung → Überlagerung der Messpunkte aus mehreren Pulsperioden
- Voraussetzung: sehr stabile Pulswiederholrate
- Neue Abtastrate aus [6]

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

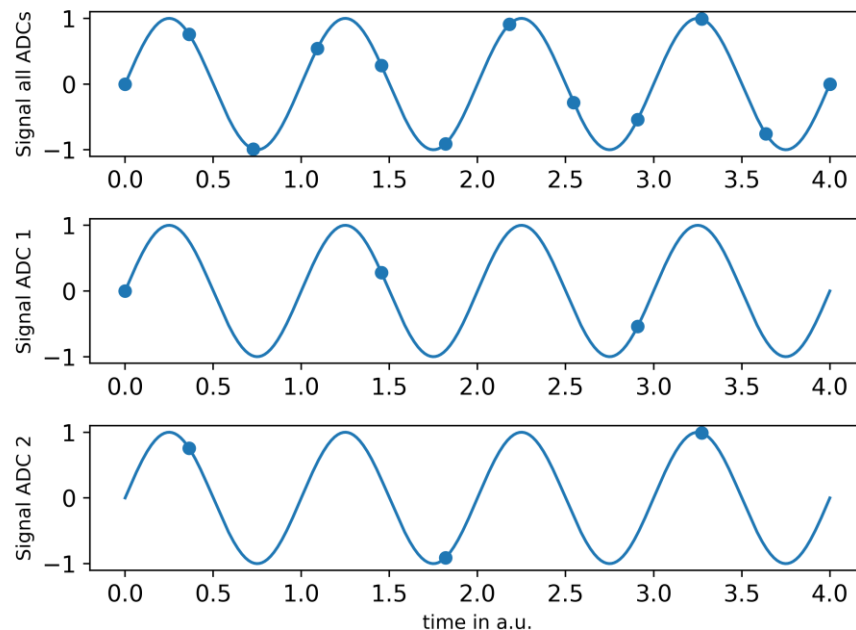


[6] D. Kim, J.-G. Lee, D.-J. Lee und C. Cho, „Traceable calibration for a digital real-time oscilloscope with time interleaving architecture,“ Measurement Science and Technology, Bd. 29, p. 015003, 2017

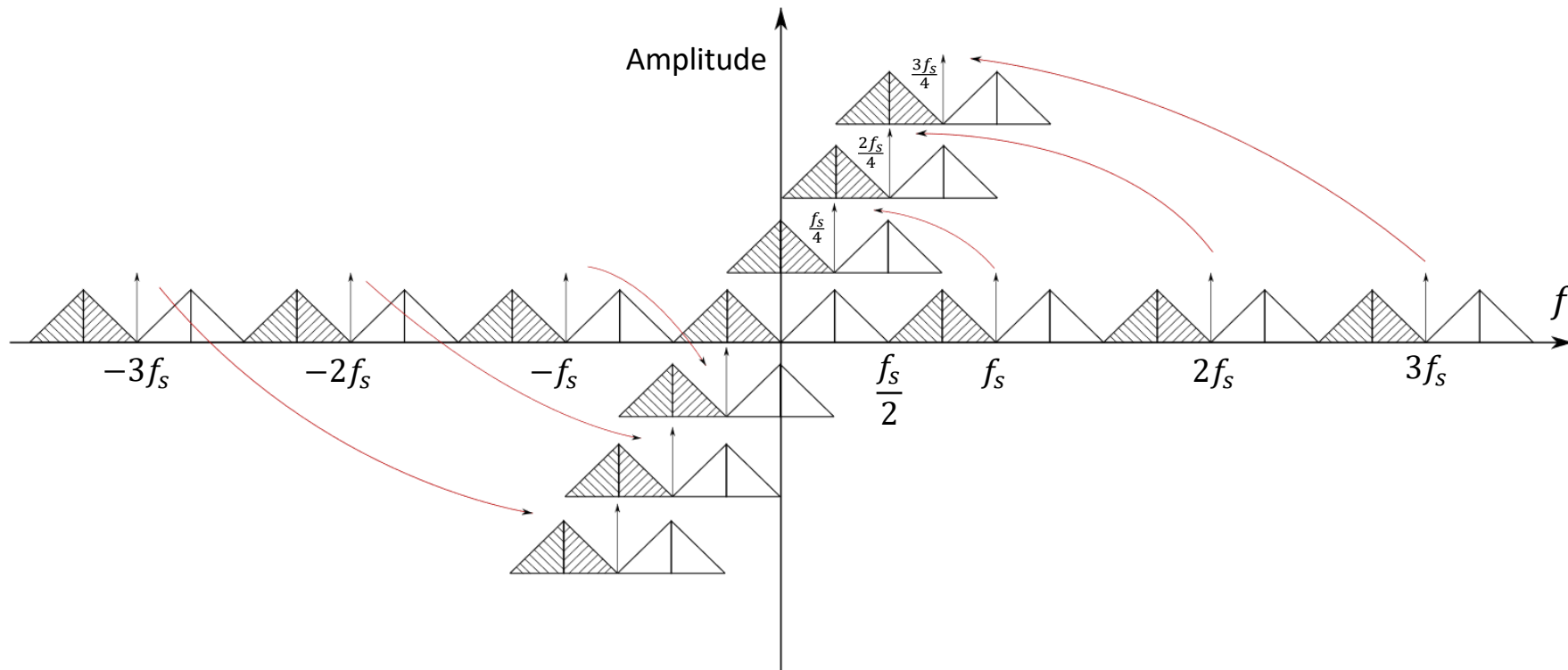
- Gemessenes Spektrum von einem ADC verfälscht durch Aliasing
- Kalibrierungsanwendung auf Messsignal nicht trivial
- Analytische Beschreibung des vom k -ten ADC gemessenen Spektrums:

$$Y_{k,\text{Alias}}(f) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M Y_k \left(f - \frac{mF_s}{M} \right) \cdot e^{-j2\pi \frac{M-m}{M} k}$$

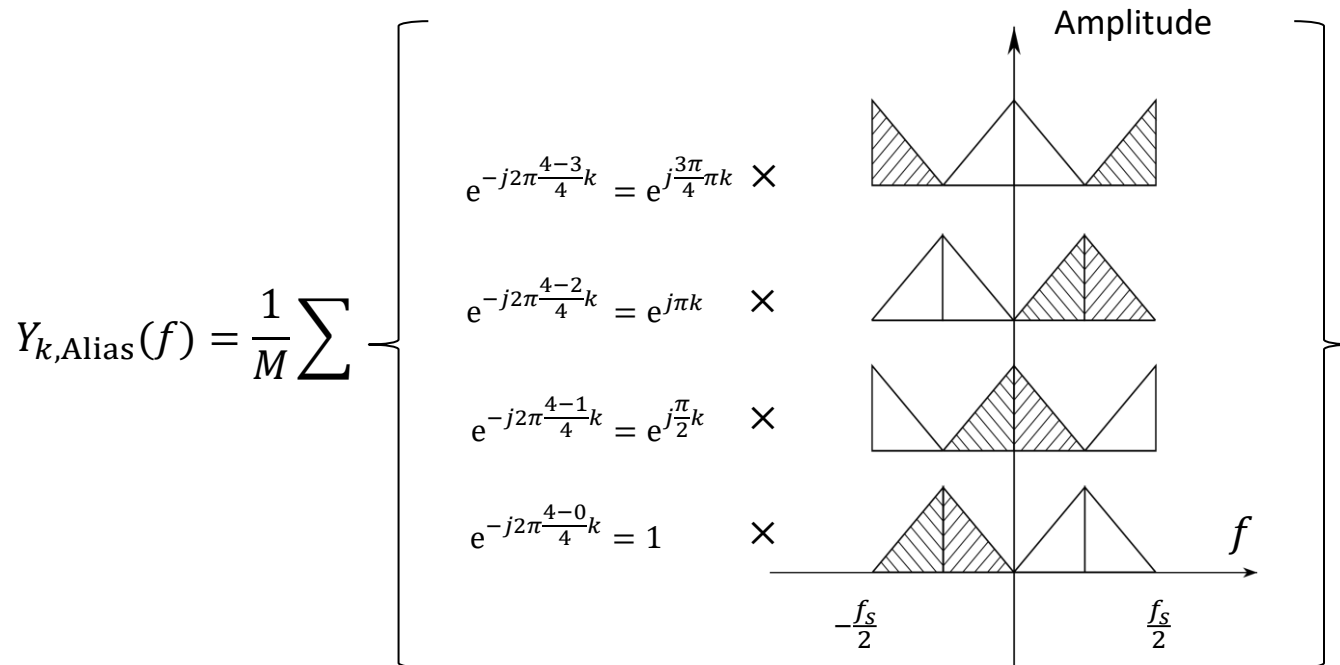
- H_k : Übertragungsfunktion des k -ten ADCs
- $X(f)$: Ideales Signalspektrum
- $Y_k(f) = X(f) \cdot H_k(f)$
- M : Anzahl der ADCs
- F_s : Abtastrate



Effekt Unterabtastung für 4 ADCs



Effekt Unterabtastung für 4 ADCs



- Das System ist beschreibbar durch ein lineares Gleichungssystem aus [7]:

$$\begin{bmatrix} Y_0(f) \\ \vdots \\ Y_{k-1}(f) \end{bmatrix} = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} H_0(f) e^{-j2\pi \frac{M-0}{M} 0} & \dots & H_0\left(f - \frac{mF_s}{M}\right) e^{-j2\pi \frac{M-m}{M} 0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{k-1}(f) e^{-j2\pi \frac{M-0}{M} (k-1)} & \dots & H_{k-1}\left(f - \frac{mF_s}{M}\right) e^{-j2\pi \frac{M-m}{M} (k-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(f) \\ \vdots \\ X\left(f - \frac{mF_s}{M}\right) \end{bmatrix}$$

- Lösung des Gleichungssystems liefert das kalibrierte Signal:

$$\begin{bmatrix} X(f) \\ \vdots \\ X\left(f - \frac{mF_s}{M}\right) \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} H_0(f) e^{-j2\pi \frac{M-0}{M} 0} & \dots & H_0\left(f - \frac{mF_s}{M}\right) e^{-j2\pi \frac{M-m}{M} 0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{k-1}(f) e^{-j2\pi \frac{M-0}{M} (k-1)} & \dots & H_{k-1}\left(f - \frac{mF_s}{M}\right) e^{-j2\pi \frac{M-m}{M} (k-1)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_0(f) \\ \vdots \\ Y_{k-1}(f) \end{bmatrix}$$

[7] D. Kim, J.-G. Lee, D.-J. Lee und C. Cho, „Traceable calibration for a digital real-time oscilloscope with time interleaving architecture,“ Measurement Science and Technology, Bd. 29, p. 015003, 2017

- **Zusammenfassung**

- Oszilloskop plausibel als metrologisches Messinstrument nach Fehlerquellenkorrektur
- Kalibrierung muss horizontal und vertikal stattfinden
- Bei RTO Sonderverfahren bei der Kalibrierung nötig aufgrund der Interleaving-ADC-Struktur

- **Ausblick**

- Implementierung einer vollständigen Kalibrierung für Sampling-Oszilloskop
- Untersuchung der Anwendung der Kalibrierungsdaten bei RTO an Messungen
- Untersuchung der Anwendbarkeit der Zeitbasiskorrektur auf die RTO

**Vielen Dank !
Fragen?**



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

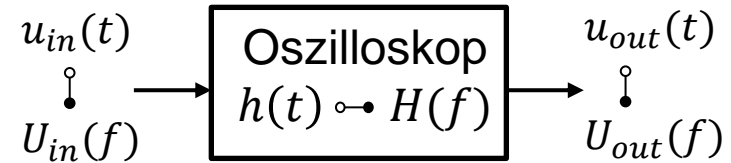
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Bashar Salloom
Telefon: 0531 592-2211
E-Mail: bashar.salloom@ptb.de

www.ptb.de

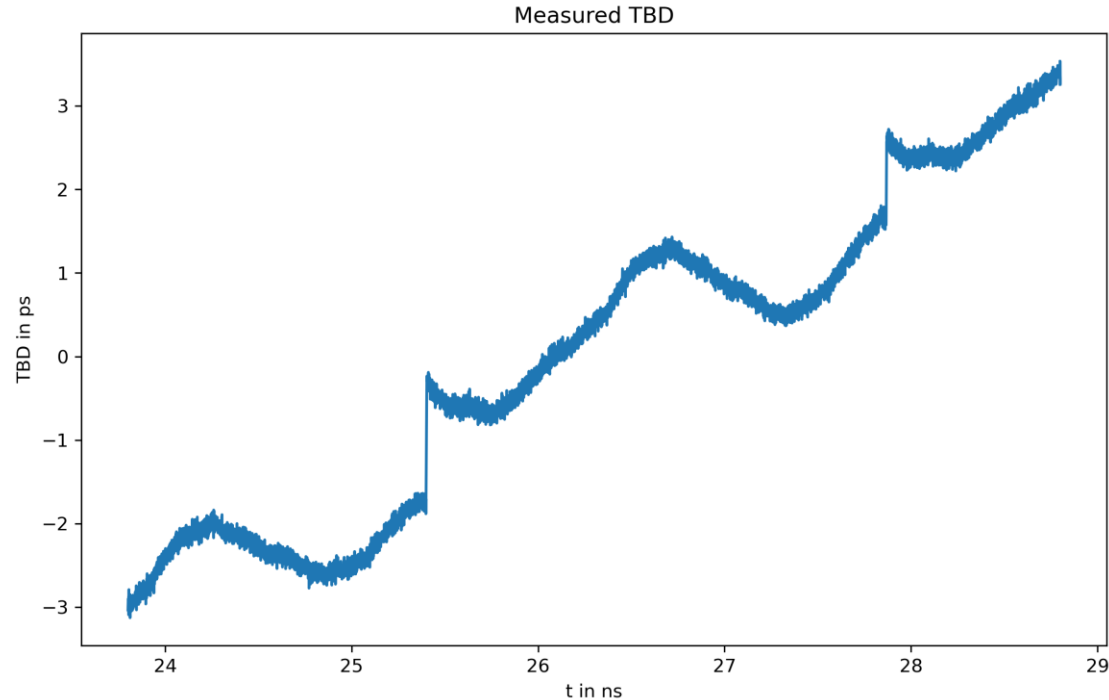
- Oszilloskop diskriminiert zwischen Frequenzen
- Besondere Ausprägung für hohe Frequenzen
- Impulsantwort $h(t) \leftrightarrow H(f)$ beschreibt Verhalten bei allen Frequenzen
- $h(t)$ bestimmbar durch die Messung eines bekannten Referenzpulses
- Anwendung der Kalibrierung schlecht konditioniert
→ Regularisierung nötig

$$U_{in}(f) = U_{out}(f) \cdot \hat{H}(f)^{-1} = U_{out} \cdot \frac{H(f)^*}{|H(f)|^2 + \lambda |L(f)|^2}$$



$$u_{out}(t) = h(t) * u_{in}(t)$$
$$U_{out}(f) = H(f) \cdot U_{in}(f)$$

$$H(f) = \frac{U_{out}(f)}{U_{in}(f)}$$



Funktionsweise Sampling-Oszilloskop

- Nur für periodische Signale geeignet
- Nach Triggerereignis Aufnahme von einem Sample
- Trigger muss mit Signal synchronisiert sein
- Vordefinierte linear steigende Verzögerung nach Trigger
- Messsignal aus verschiedener Signalperioden rekonstruieren
- Hohe Bandbreite & ADC-Auflösung erzielbar

