

# HAM RADIO 2014

HAM RADIO



FRIEDRICHSHAFEN

## Experimente mit einer Soundkarte: Von rauschenden Widerständen, Schieberegistern und Übertragungsfunktionen

PROF. DR. THOMAS BAIER

E-mail: [baier@hs-ulm.de](mailto:baier@hs-ulm.de)

DG8SAQ

Hochschule Ulm  
Prittwitzstrasse 10  
89075 Ulm

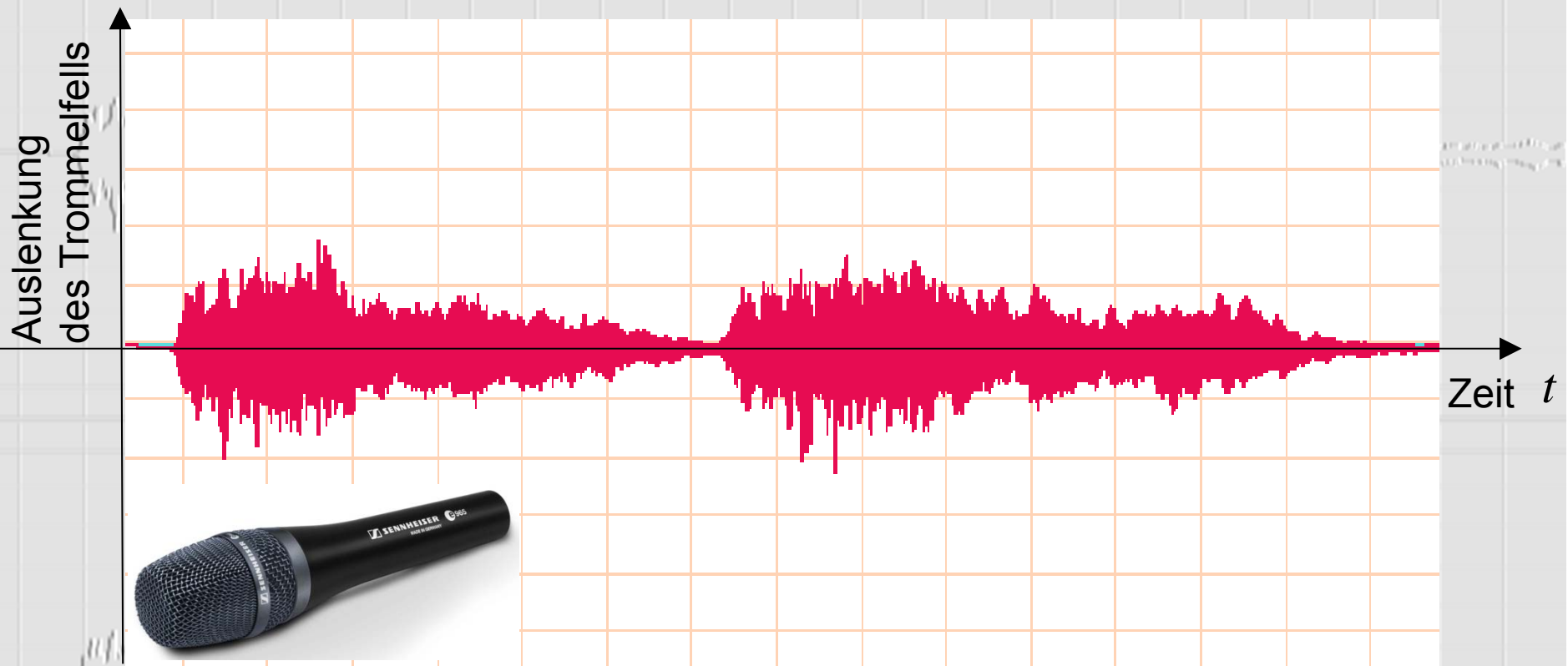
Technik  
Informatik & Medien

Hochschule Ulm



University of  
Applied Sciences

# Sound = Schall ...

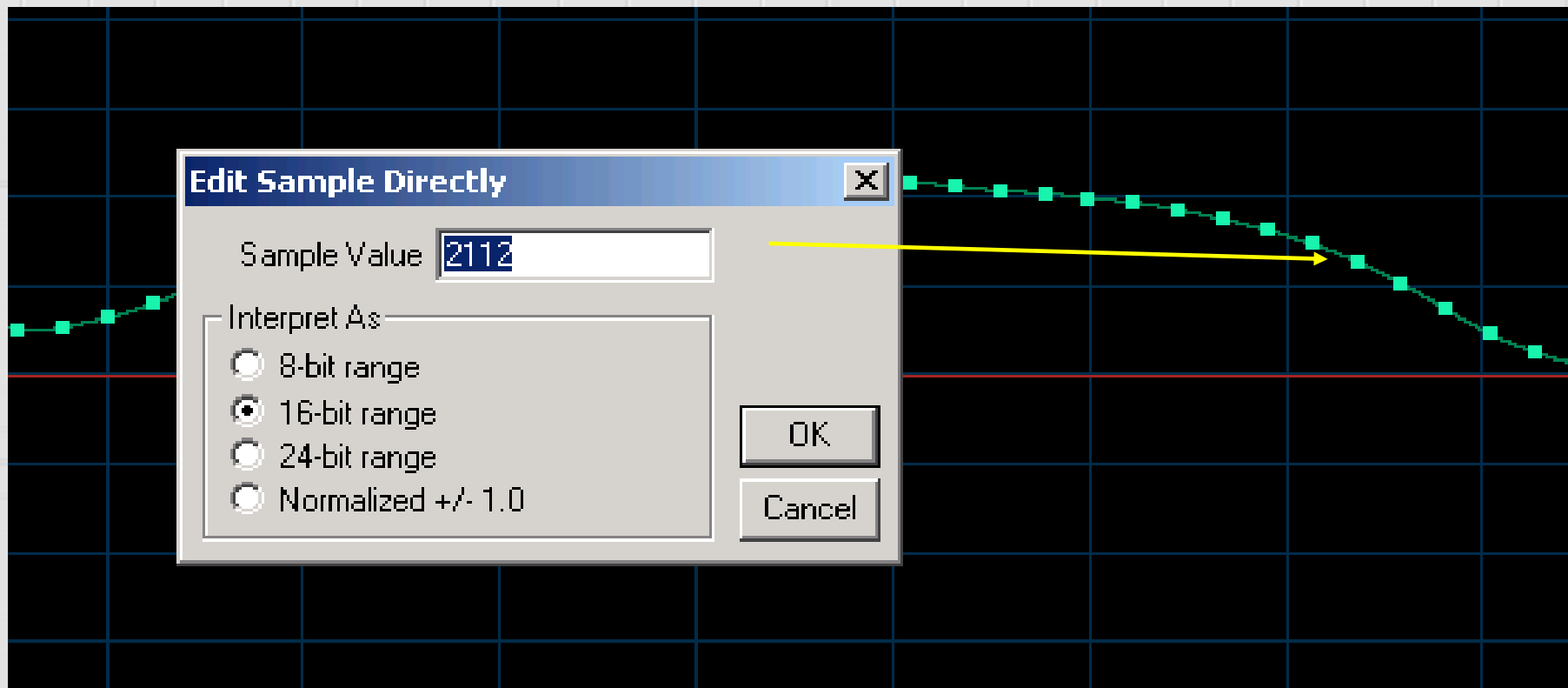


... wird mit Mikrophon in eine Wechselspannung umgewandelt.

Hochschule Ulm



# Die Soundkarte misst Wechselspannung periodisch und digital



Abtastrate: Messwerte pro Zeit  
16 Bit Auflösung:  $2^{16}$  mögliche Messergebnisse

Hochschule Ulm



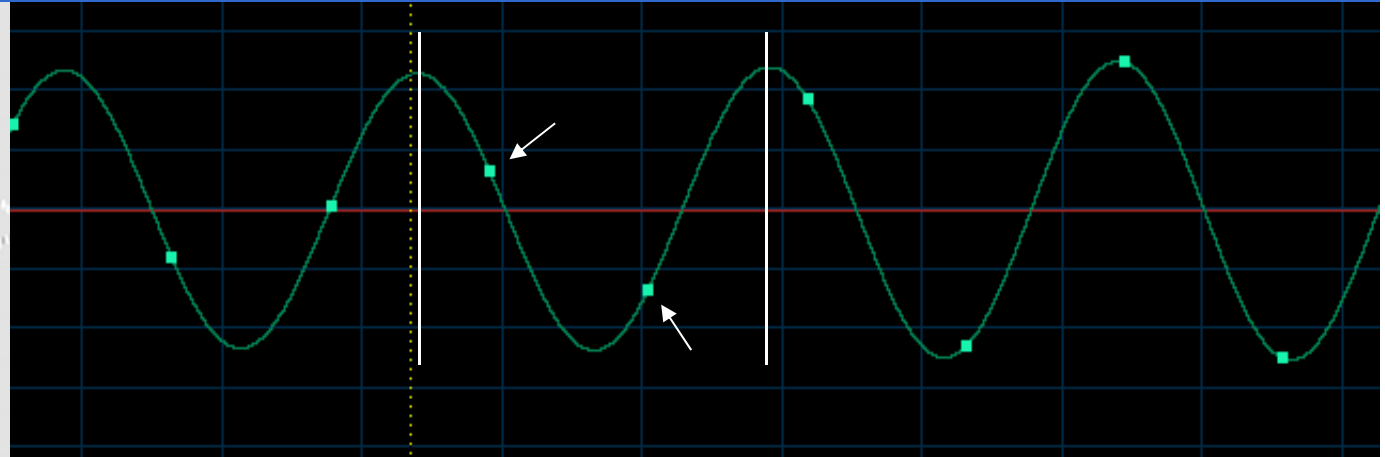
# Nyquist-Shannon Abtasttheorem von 1948



Claude Elwood  
Shannon

(\* 1916; † 2001)

Amerikanischer Mathematiker,  
Begründer der Informationstheorie.



Mehr als zwei Abtastpunkte pro Schwingung  
für die höchste vorkommende Frequenz

→ ursprüngliches Signal exakt aus  
Abtastpunkten reproduzierbar.

Hochschule Ulm



# Hochwertige Soundkarte in Theorie ...

## 192 ksps Abtastrate:

192 000 Messpunkte pro Sekunde

→ Signale von bis zu 90 kHz abtastbar.



## 24 Bit Auflösung:

→ Theoretische Messdynamik

$$2^{24} : 1 = 16 \cdot 10^6 \equiv 144 \text{ dB}$$

Bsp: Bei 1 V Vollaussteuerung 60 nV Auflösung

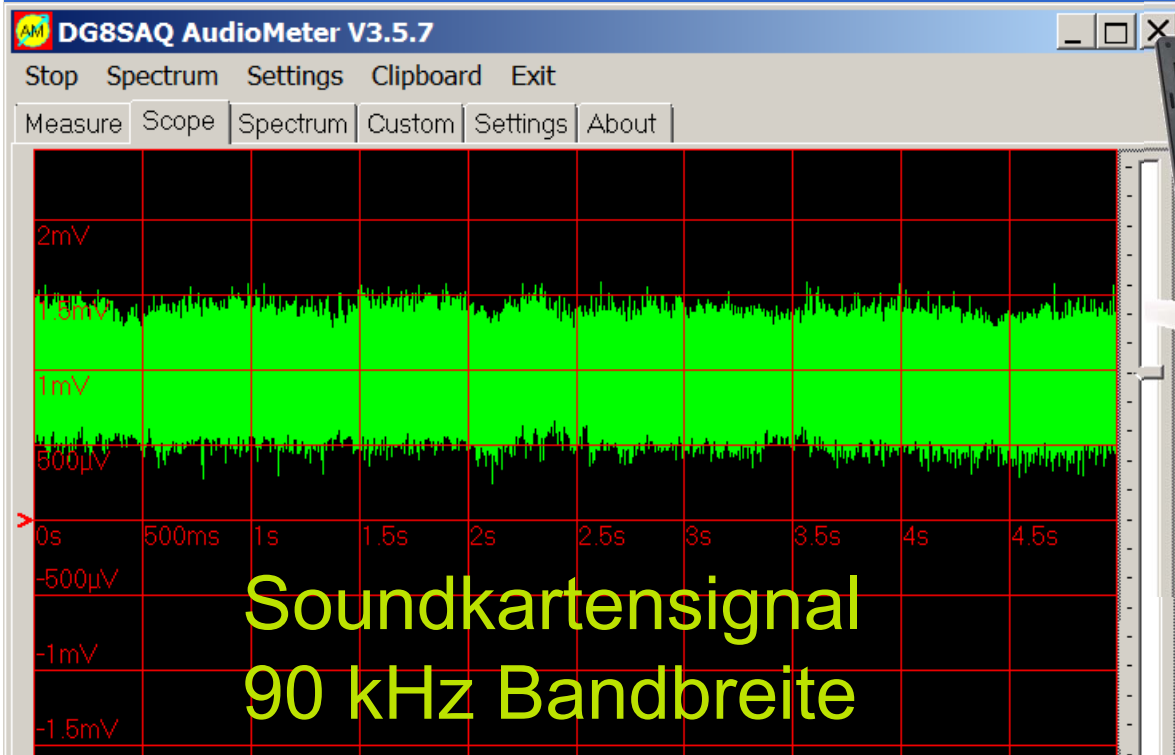


**Anwendungen:** - Längstwellenempfang  
- Effektivspannungsmessung

Hochschule Ulm



# ... und Praxis: DCF77 Direktempfang mit Soundkarte



Passive 77,5 kHz  
Ferritantenne direkt an  
Soundkarteneingang  
des Laptop  
angeschlossen

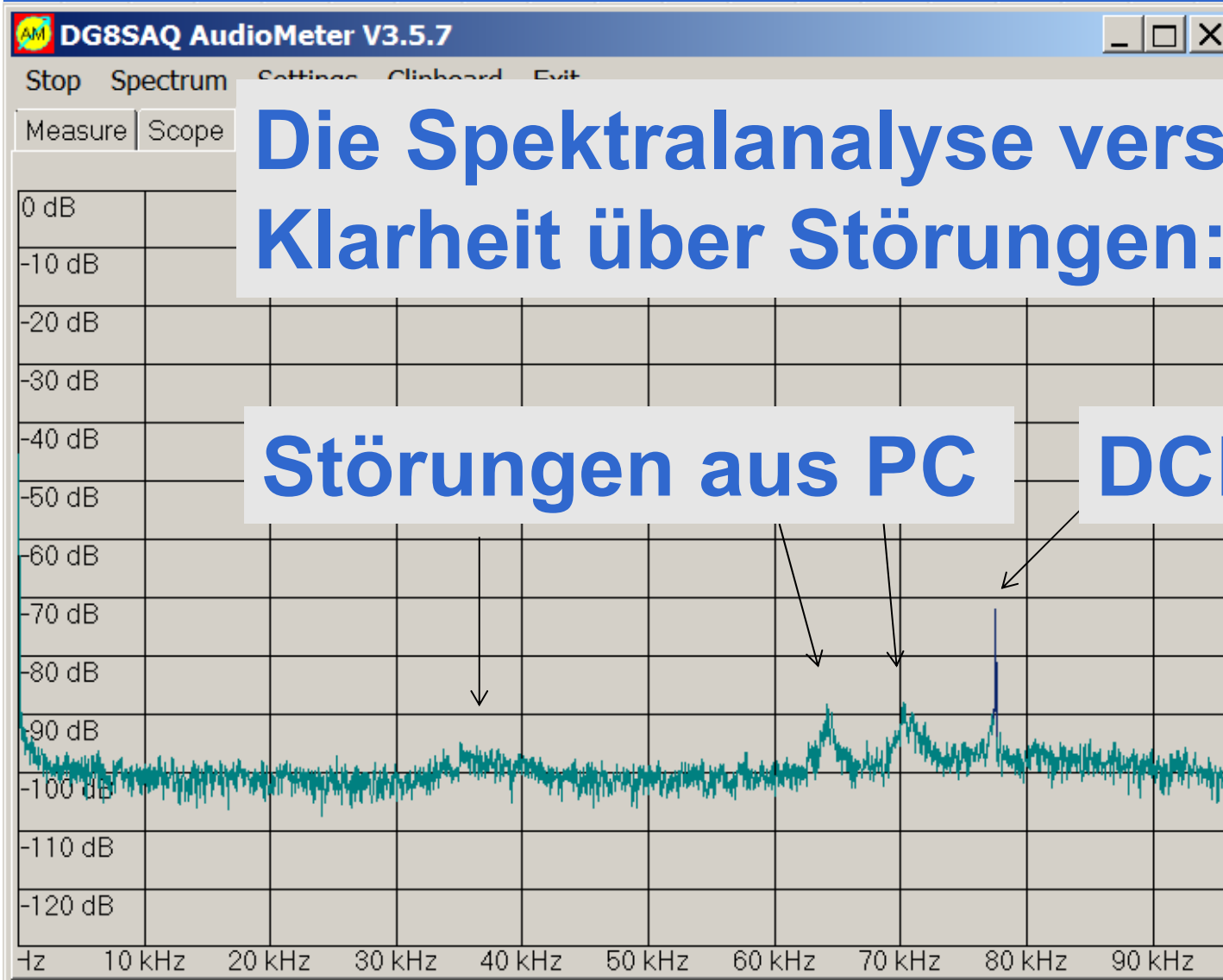
Das Empfangssignal  
verbirgt sich im Rauschen!

<http://www.sdr-kits.net/DG8SAQ/AudioMeter3.zip>

Hochschule Ulm



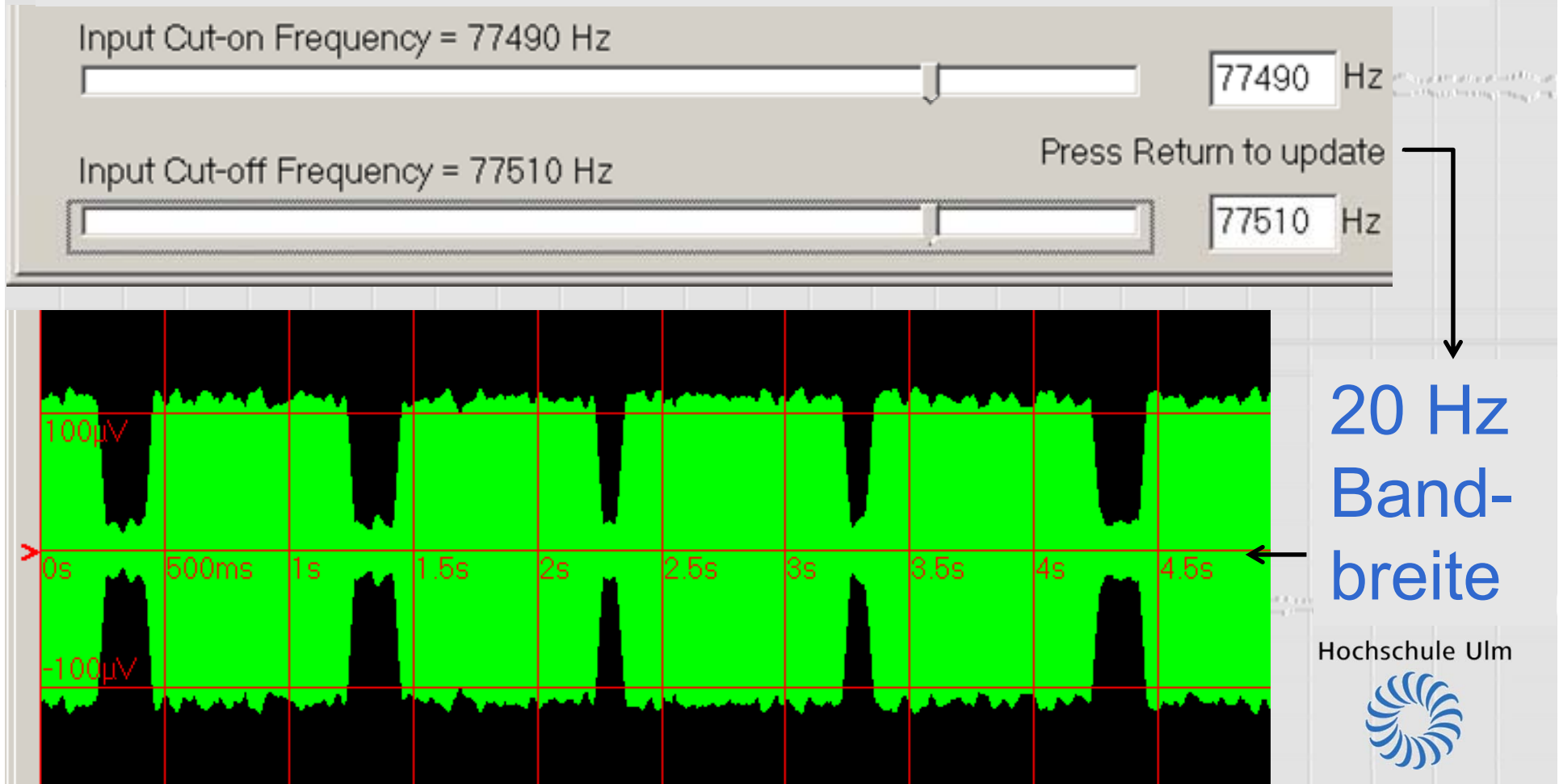
# DCF77 Direktempfang mit Soundkarte (2)





# DCF77 Direktempfang mit Soundkarte (3)

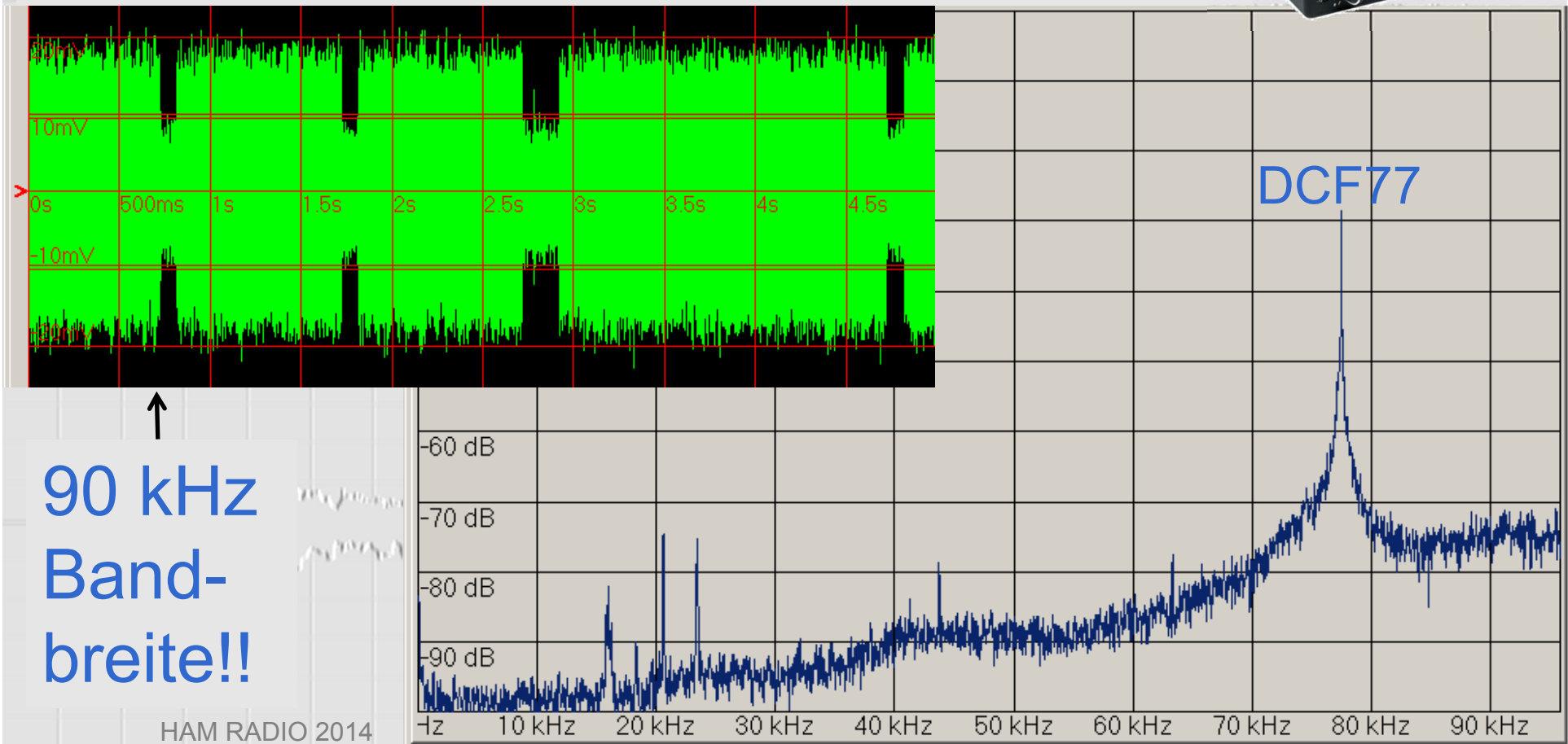
Störungen aus PC kann man digital wegfiltern:





# DCF77 Direktempfang mit Soundkarte (4)

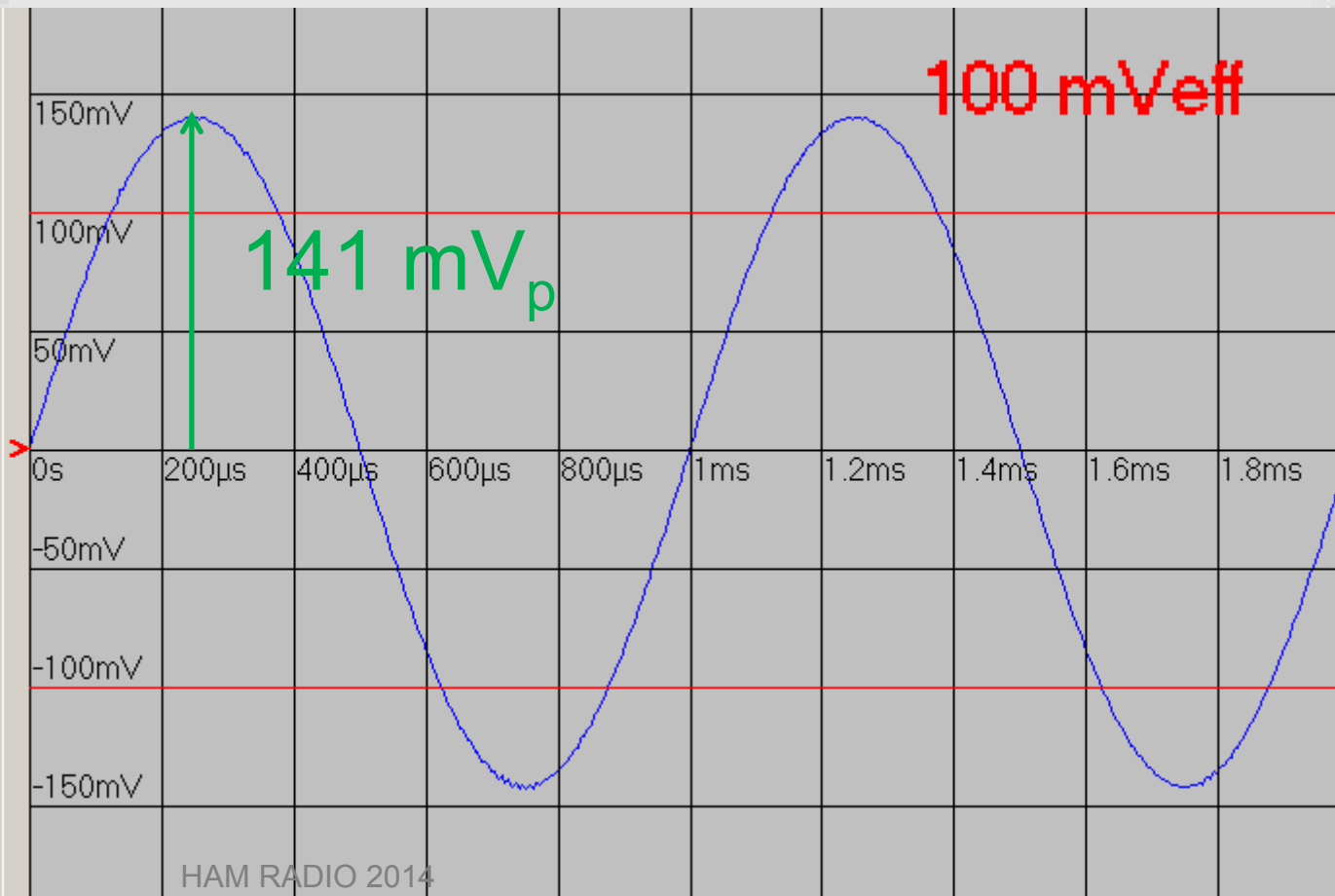
Wesentlich bessere Soundkarte aus dem Profimusik-Bereich: **E-MU 0204:**



# Soundkarte als Messgerät für Effektivspannungen

Effektiv-Spannung aus mittlerer Leistung:

$$\bar{P} = \frac{U_{eff}^2}{R}$$



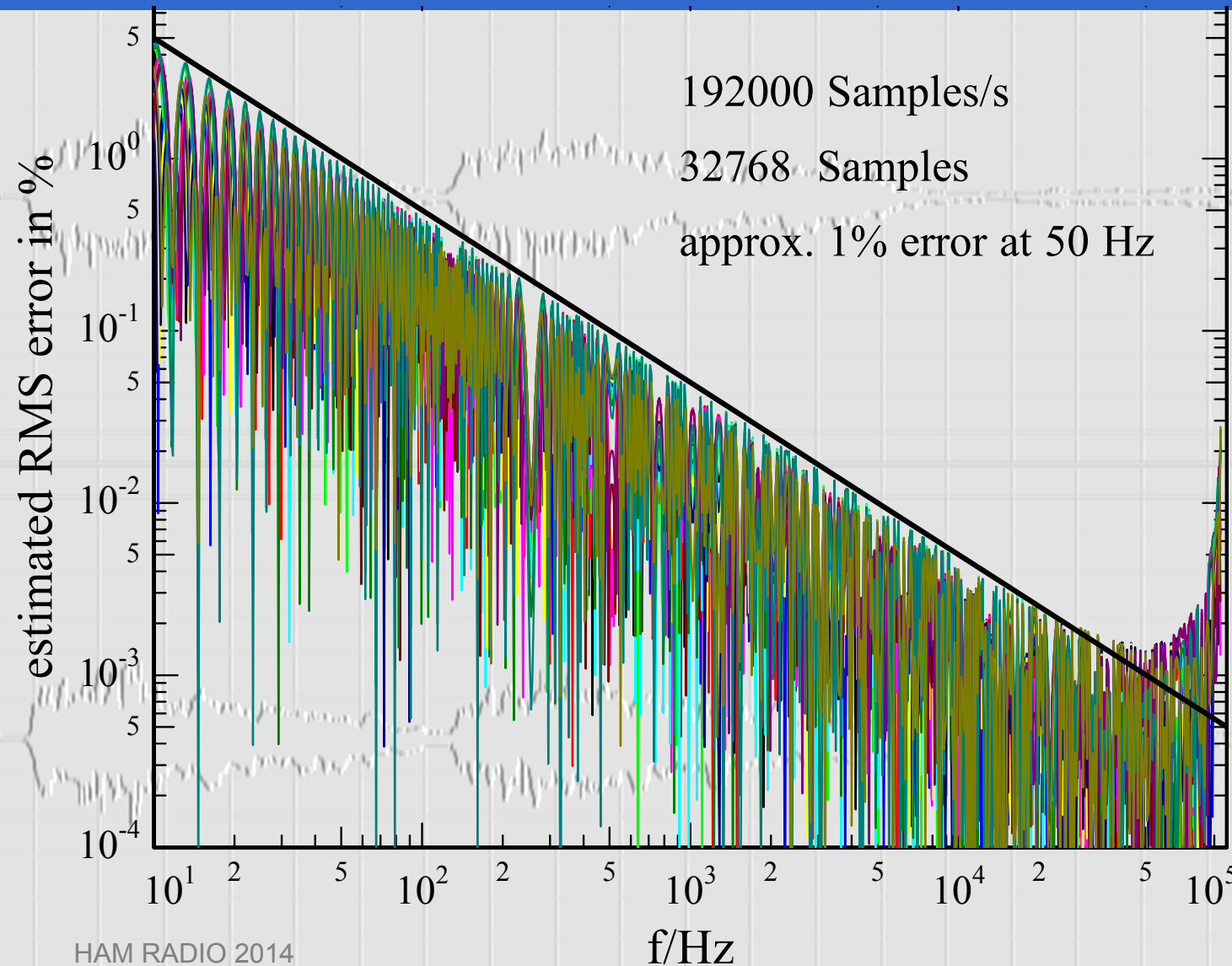
Sinus:

$$U_{eff} = \frac{U_p}{\sqrt{2}}$$

Hochschule Ulm



# Effektivspannungsmessung: Meßfehler durch Randeffekte

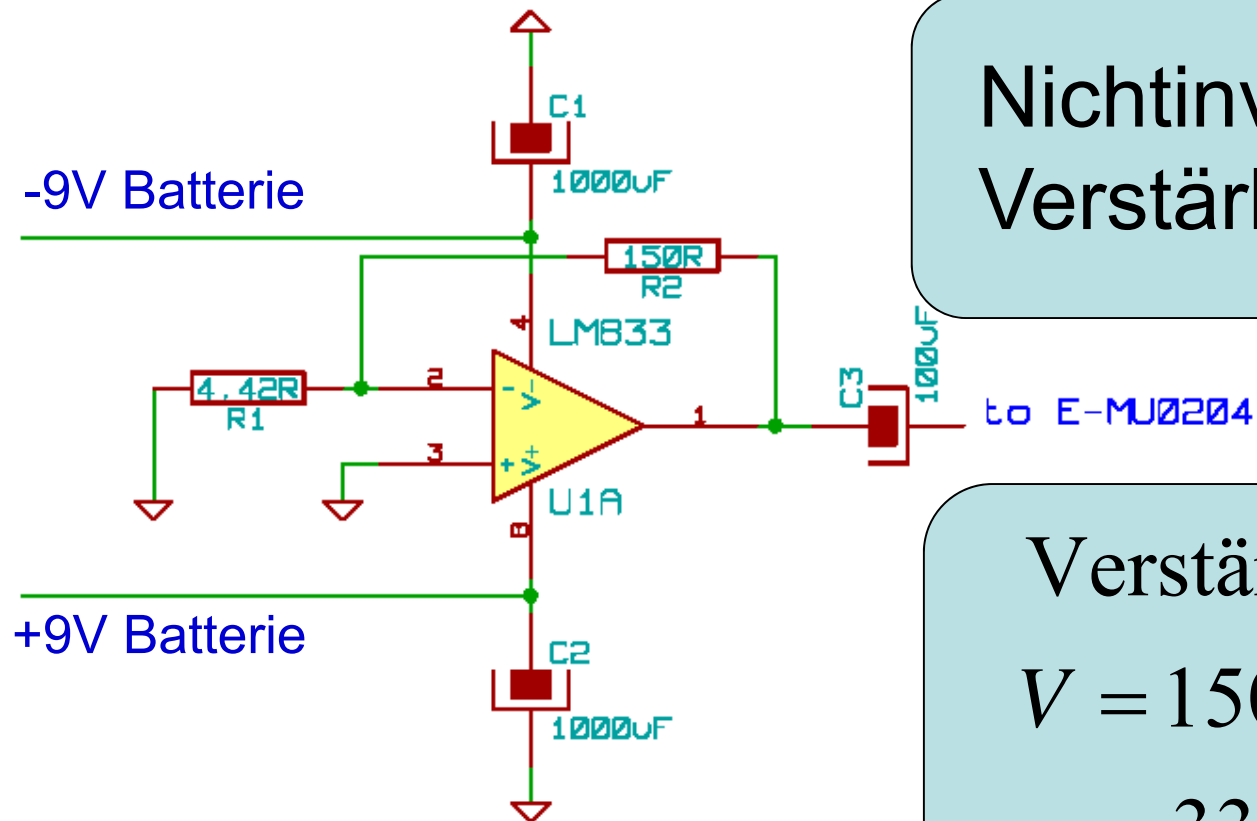


0,17s Messdauer  
Mittelung hilft!

Hochschule Ulm



# Messung der effektiven Rauschspannung des OPV LM833



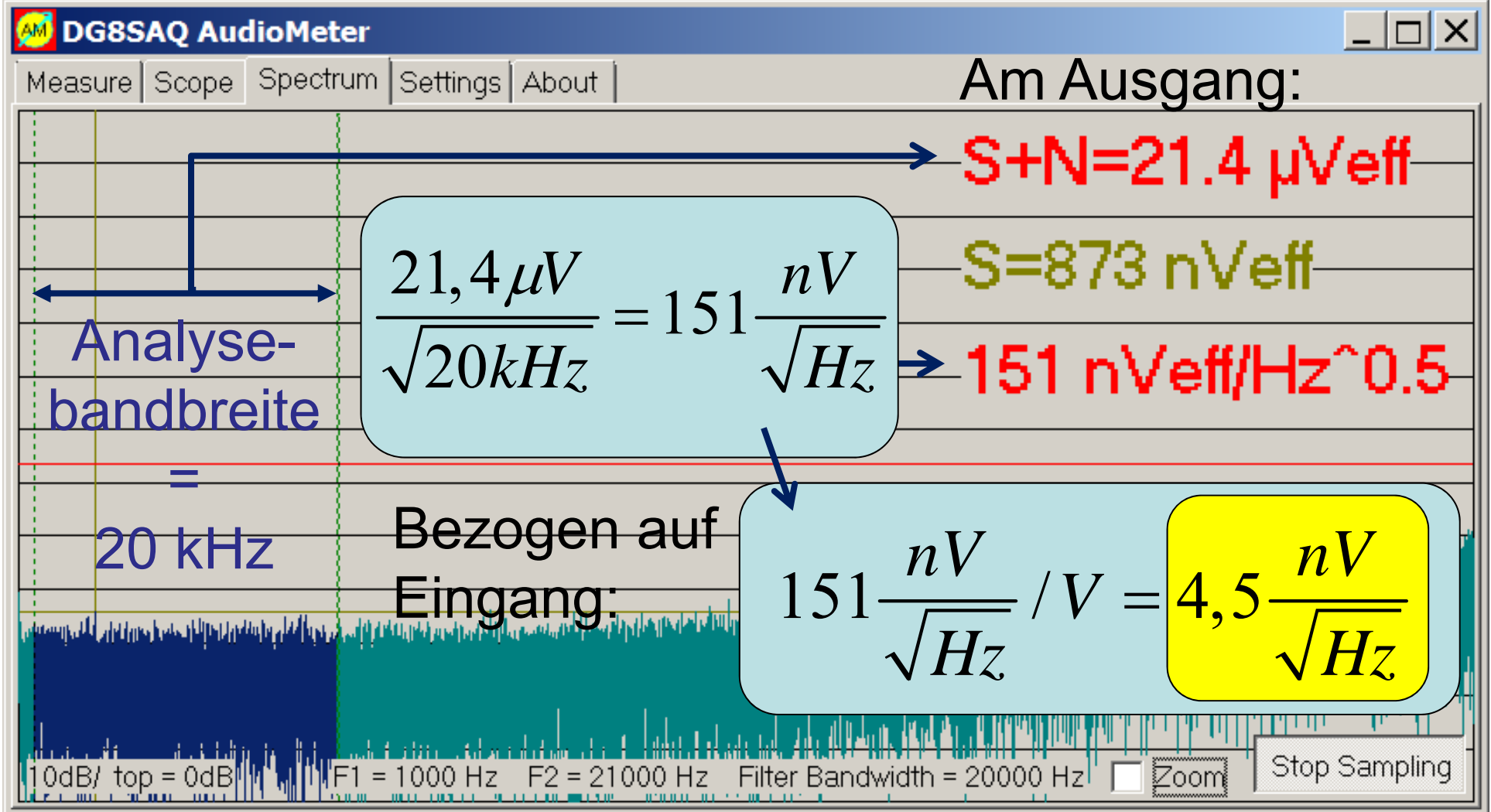
Nichtinvertierender  
Verstärker

Verstärkung:

$$V = 150\Omega / 4,42\Omega$$
$$= 33,9$$

Datenblatt LM833:  
„Low Input Noise Voltage: 4.5nV/√Hz”

# Messung der effektiven Rauschspannung des OPV LM833 (2)



# Was bedeutet dieses Messergebnis?

$4,5 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$  z.B. an  $50 \Omega$ :

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow \frac{\left(4,5 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)^2}{50 \Omega} = 4 \cdot 10^{-19} \frac{W}{Hz}$$

- Das ist eine spektrale Leistungsdichte!
- Hinter einem Filter mit z.B. 10 kHz Bandbreite kommen  $4 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4 W = 4 \cdot 10^{-15} W$  Rauschleistung heraus.

Hochschule Ulm

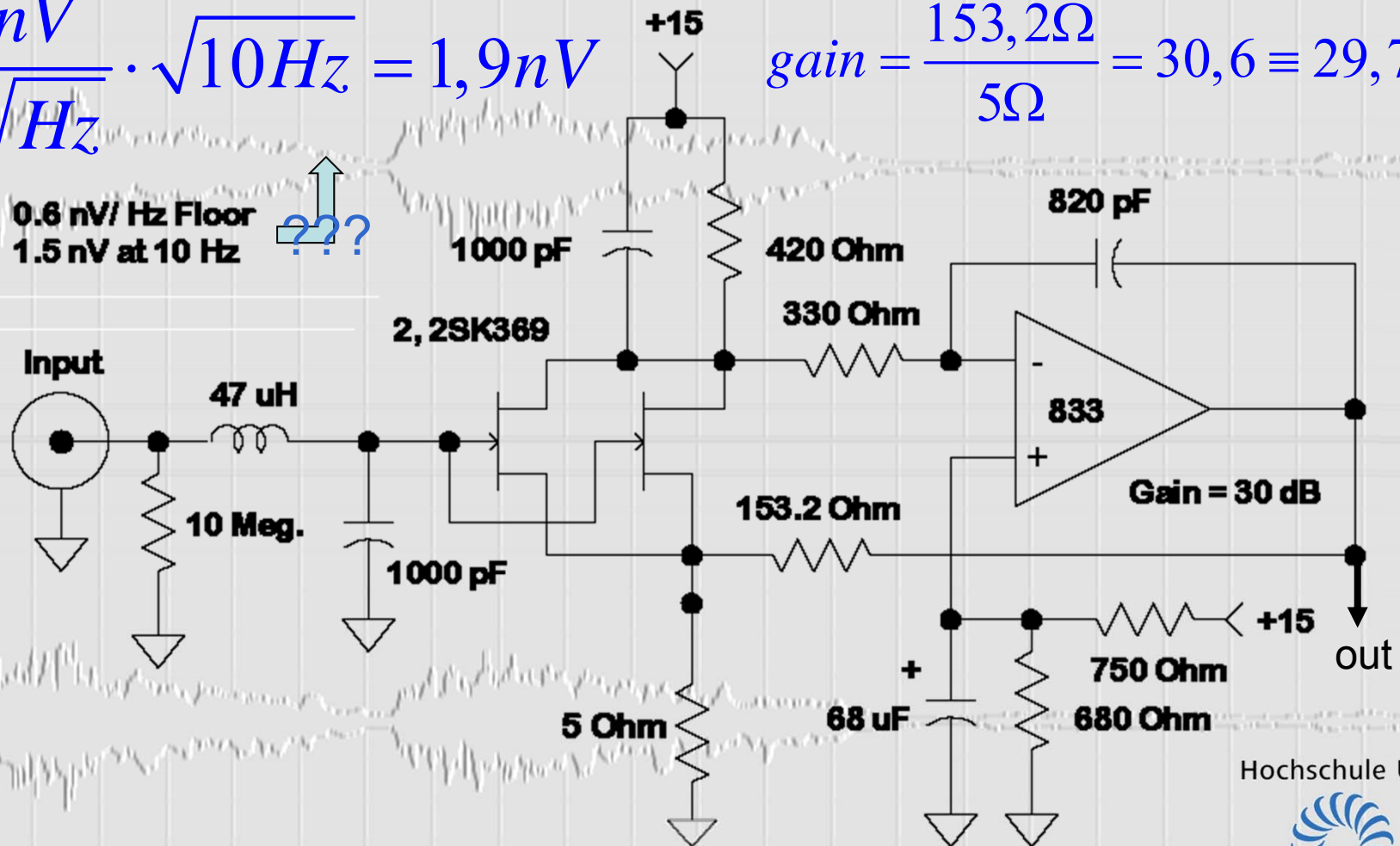


# Verstärker, der weniger rauscht (nach Charles Wenzel)

$$0,6 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} \cdot \sqrt{10Hz} = 1,9nV$$

$$gain = \frac{153,2\Omega}{5\Omega} = 30,6 \approx 29,7dB$$

0.6 nV/ Hz Floor  
1.5 nV at 10 Hz



Hochschule Ulm



<http://www.wenzel.com/pdf/files1/pdfs/lowamp.pdf>



# Wenzel-Verstärker zweistufig 30dB/60dB Verstärkung schaltbar



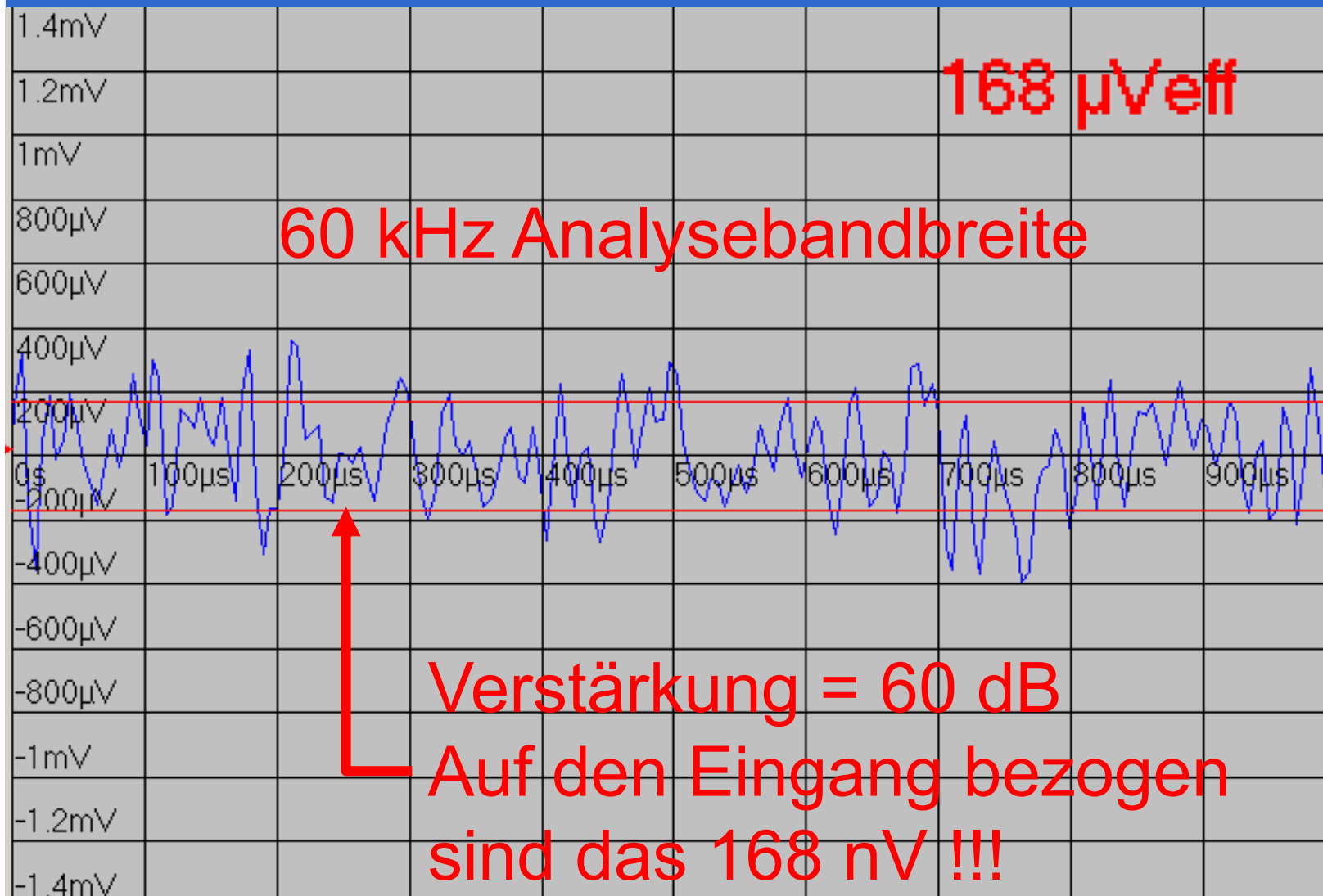
Cal. Out  
Sinus mit  
140mVpp

Out

Hochschule Ulm



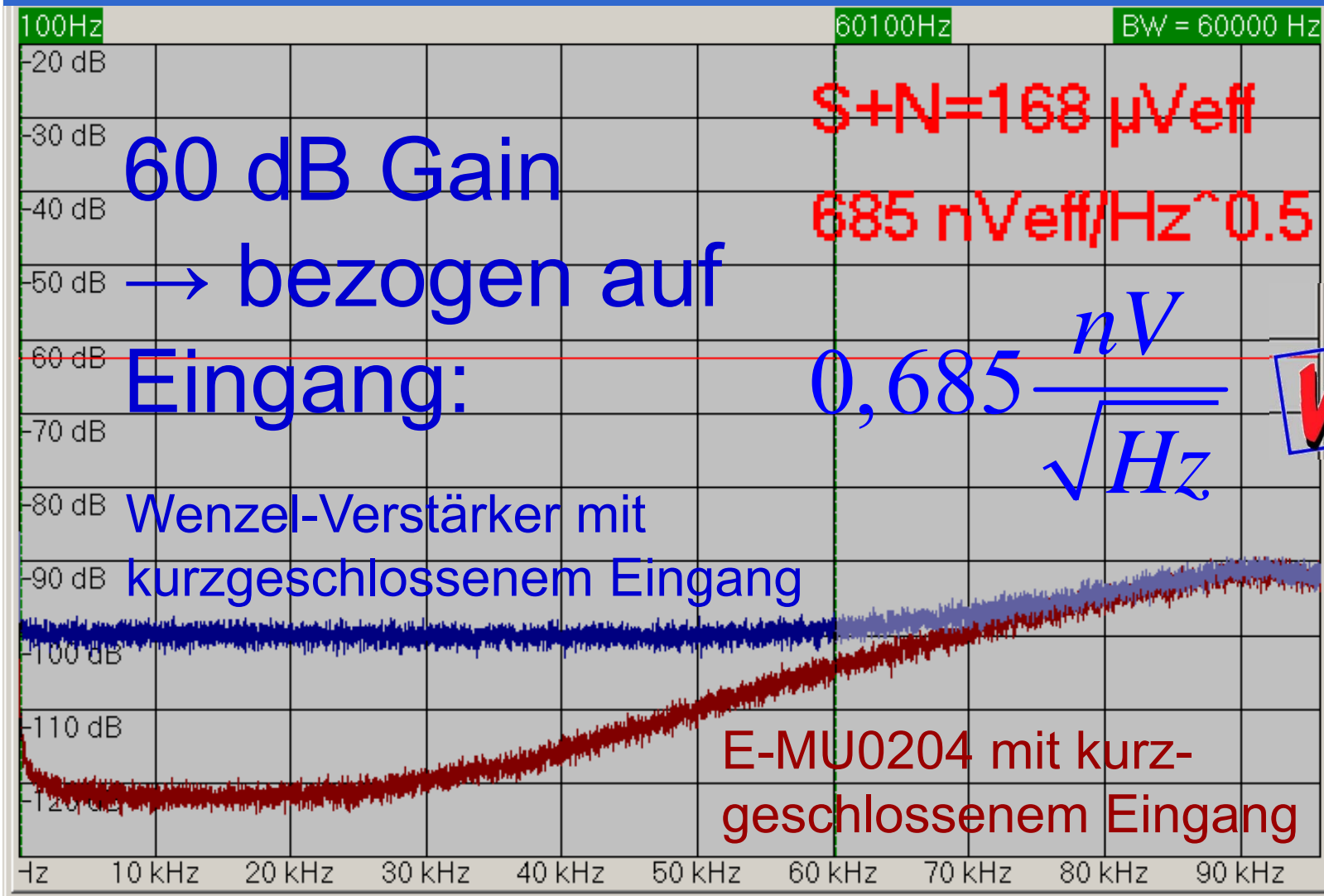
# Ausgangsspannung Wenzel-Verstärker bei kurzgeschlossenem Eingang



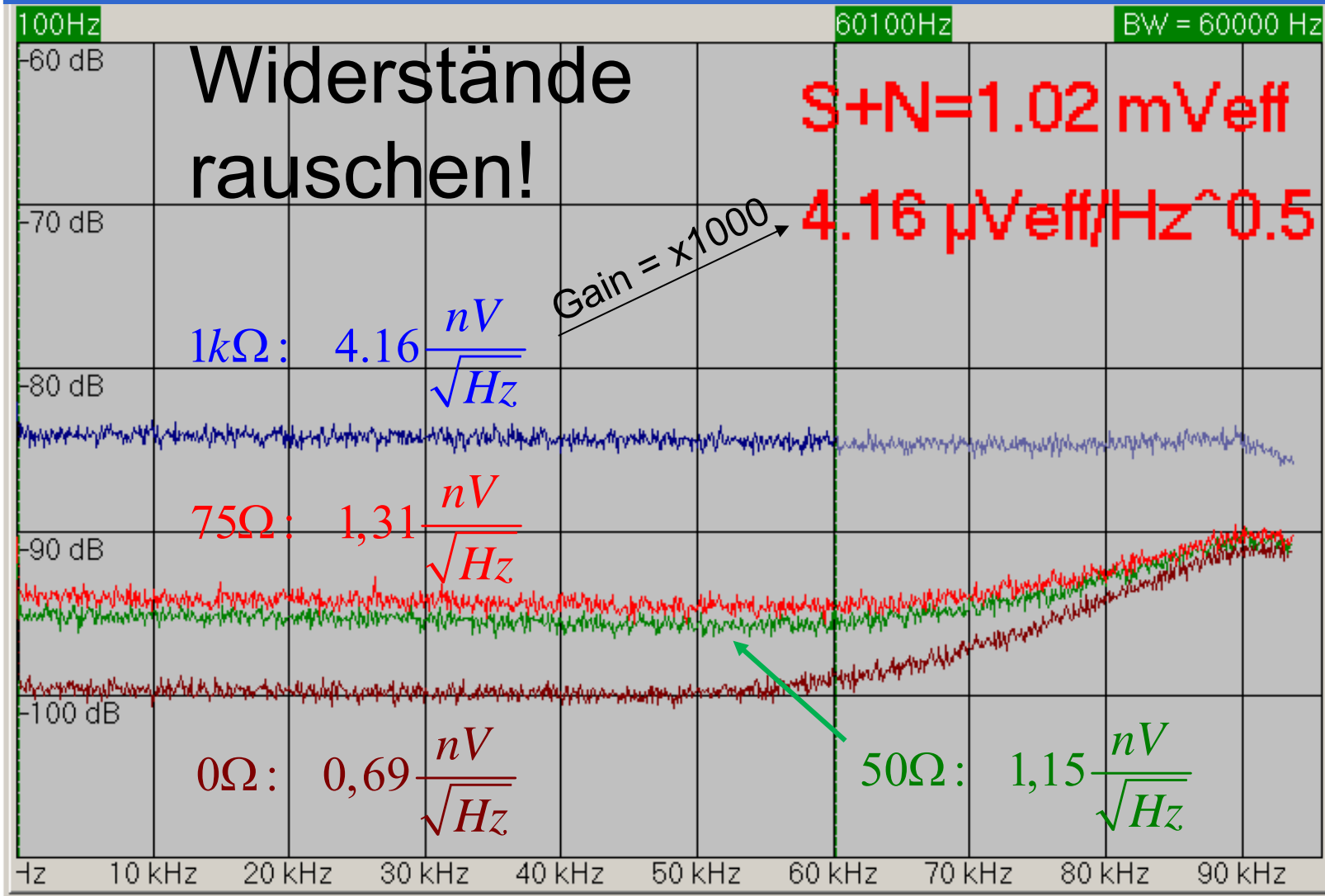
Hochschule Ulm



# Ausgangsspannung Wenzel-Verstärker bei kurzgeschlossenem Eingang (2)

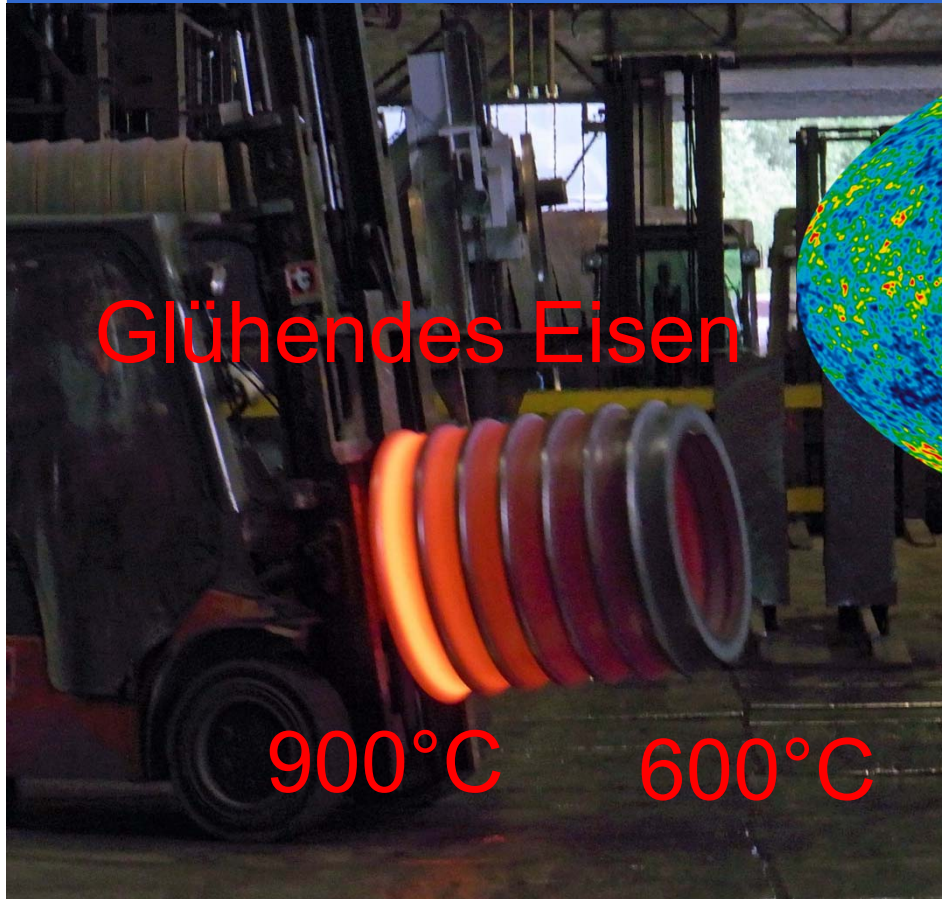


# Mit Wenzel-Verstärker gemessene Rauschspannung von Widerständen





# Was warm ist, gibt Wärmestrahlung ab!

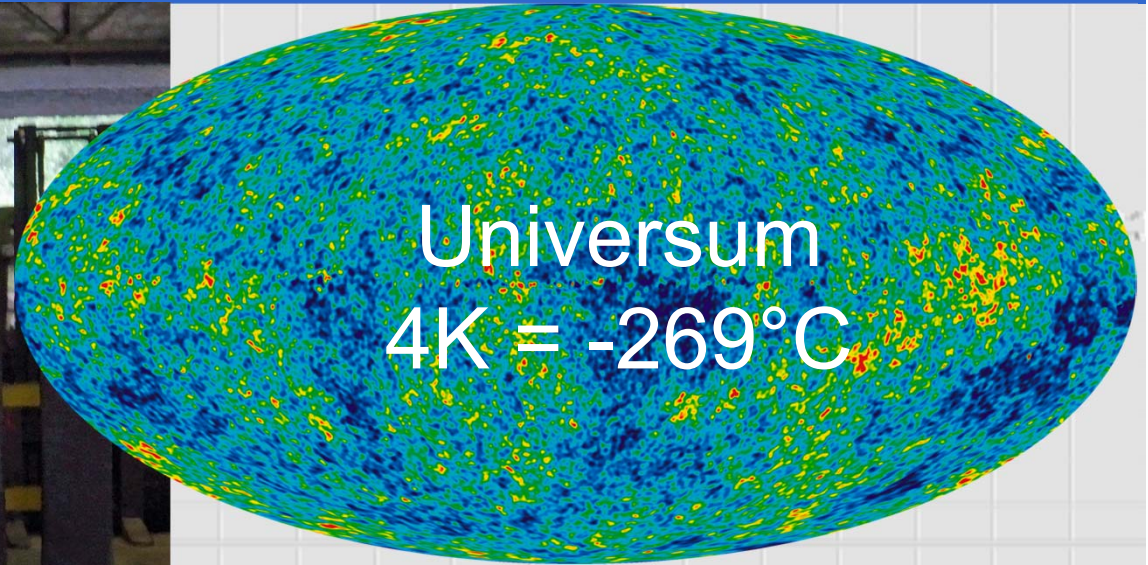


Glühendes Eisen

900°C

600°C

[http://de.wikipedia.org/wiki/Glut\\_\(Lichtausstrahlung\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Glut_(Lichtausstrahlung))



Universum  
4K = -269°C

<http://map.gsfc.nasa.gov/>

Widerstand mit Wärmestrahlung  
der Umgebung im thermischen  
Gleichgewicht



27°C = 300 K

Hochschule Ulm



# Widerstände erzeugen eine thermische Rauschleistungsdichte

$$\frac{\Delta P}{\Delta f} = \frac{1}{\Delta f} \frac{U_{eff}^2}{R} = 4 \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1}$$

Quantennatur  
Bose-Einstein-Statistik

für  $f \ll \frac{kT}{h} \approx 6 \text{ THz}$  bei 300K  $\Rightarrow$

Nyquistformel:

$$\frac{U_{eff}}{\sqrt{\Delta f}} = \sqrt{4kTR}$$

$\Rightarrow$  weißes Rauschen bis weit in den GHz-Bereich

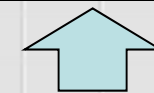


# Thermisches Widerstandsrauschen: Theorie und Praxis

R / Ohm	Nyquist	gemessen	korrigiert
0	0,00	0,69	0,00
50	0,91	1,15	0,92
75	1,11	1,31	1,11
1000	4,07	4,16	4,10



alle Pegel in  $nV / \sqrt{Hz}$



Bei den Messwerten muss die Rauschleistung des Verstärkers subtrahiert werden:

$$U_{korr} = \sqrt{U_{mess}^2 - \left(0,69 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)^2}$$

Hochschule Ulm





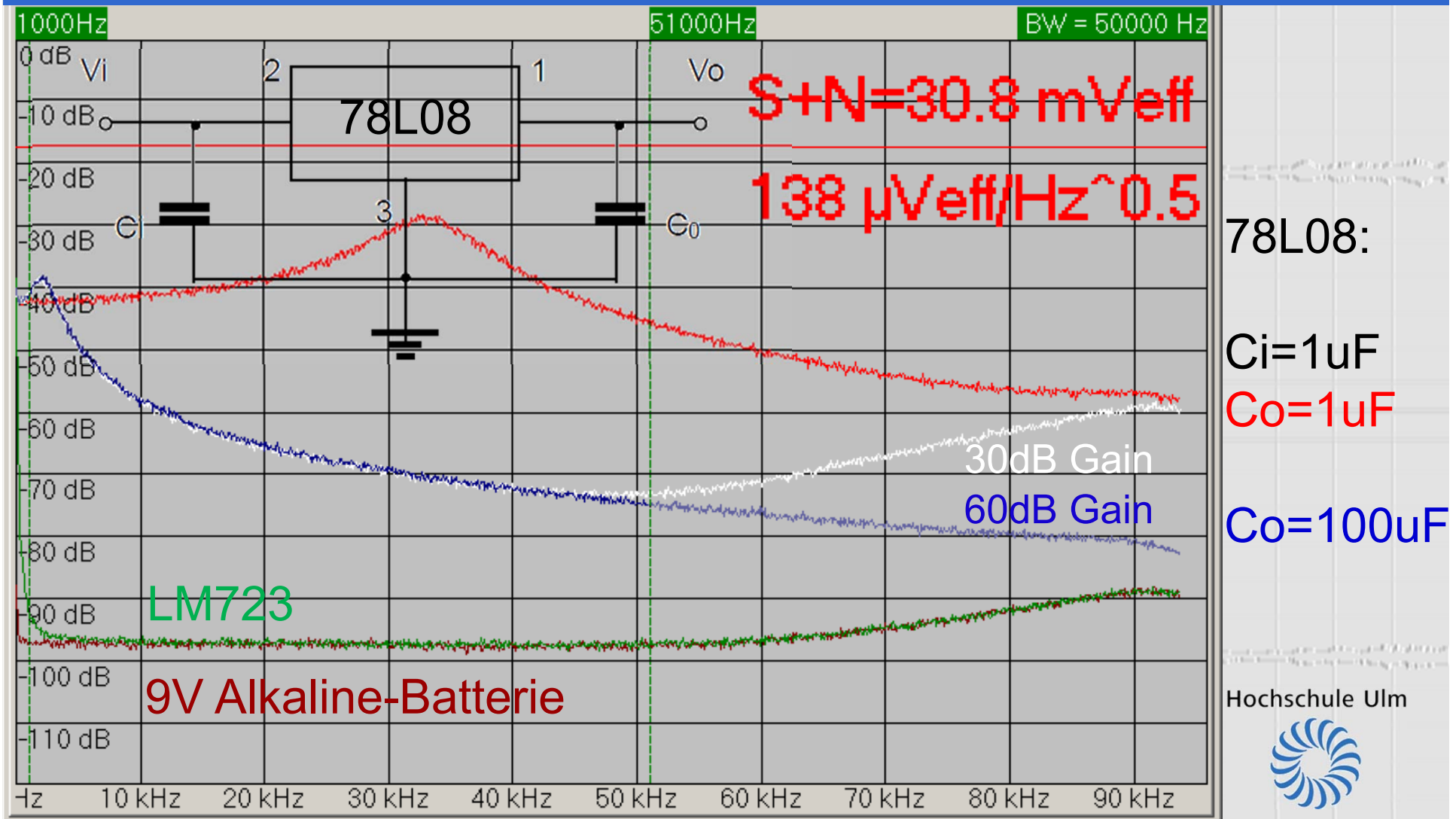
# Auch Spannungsquellen rauschen! Geschirmte Messkammer:



DUT: 78L08

Spannungsregler gespeist  
aus zwei Alkaline Batterien

# Rauschen verschiedener Spannungsquellen



# Rauschen verschiedener Spannungsquellen (2)

	gemessen	korrigiert *
Alkaline Batterie	0,72	0,19
NiMH Akku	0,71	0,15
LM723	0,74	0,26
78L08 Co=1uF	880	880
78L08 Co=100uF	140	140

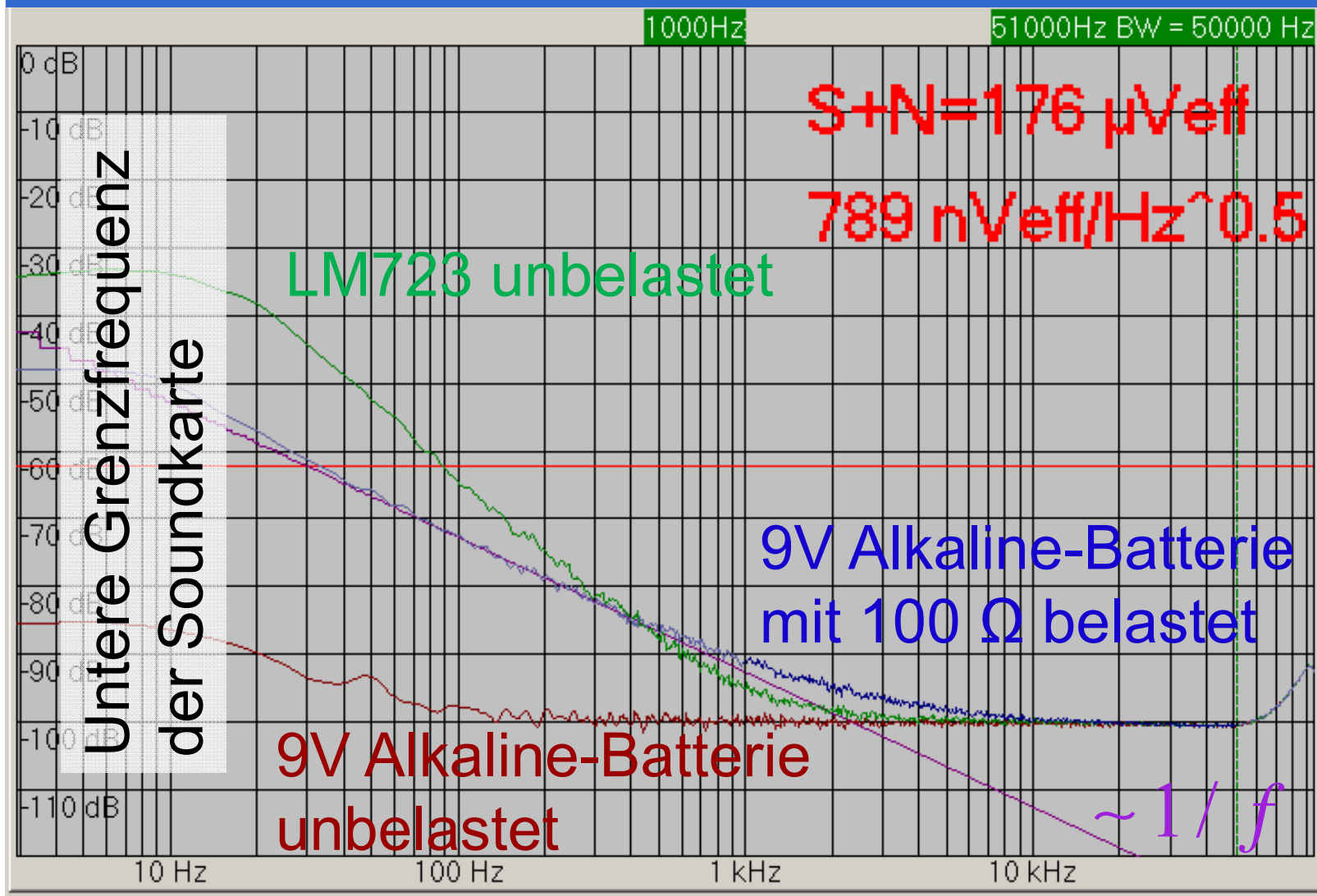
alle Pegel in  $nV / \sqrt{Hz}$

\* Verstärkerrauschen von  $0,69 nV/\sqrt{Hz}$   
leistungsmäßig subtrahiert

Hochschule Ulm



# Rauschen verschiedener Spannungsquellen (3)

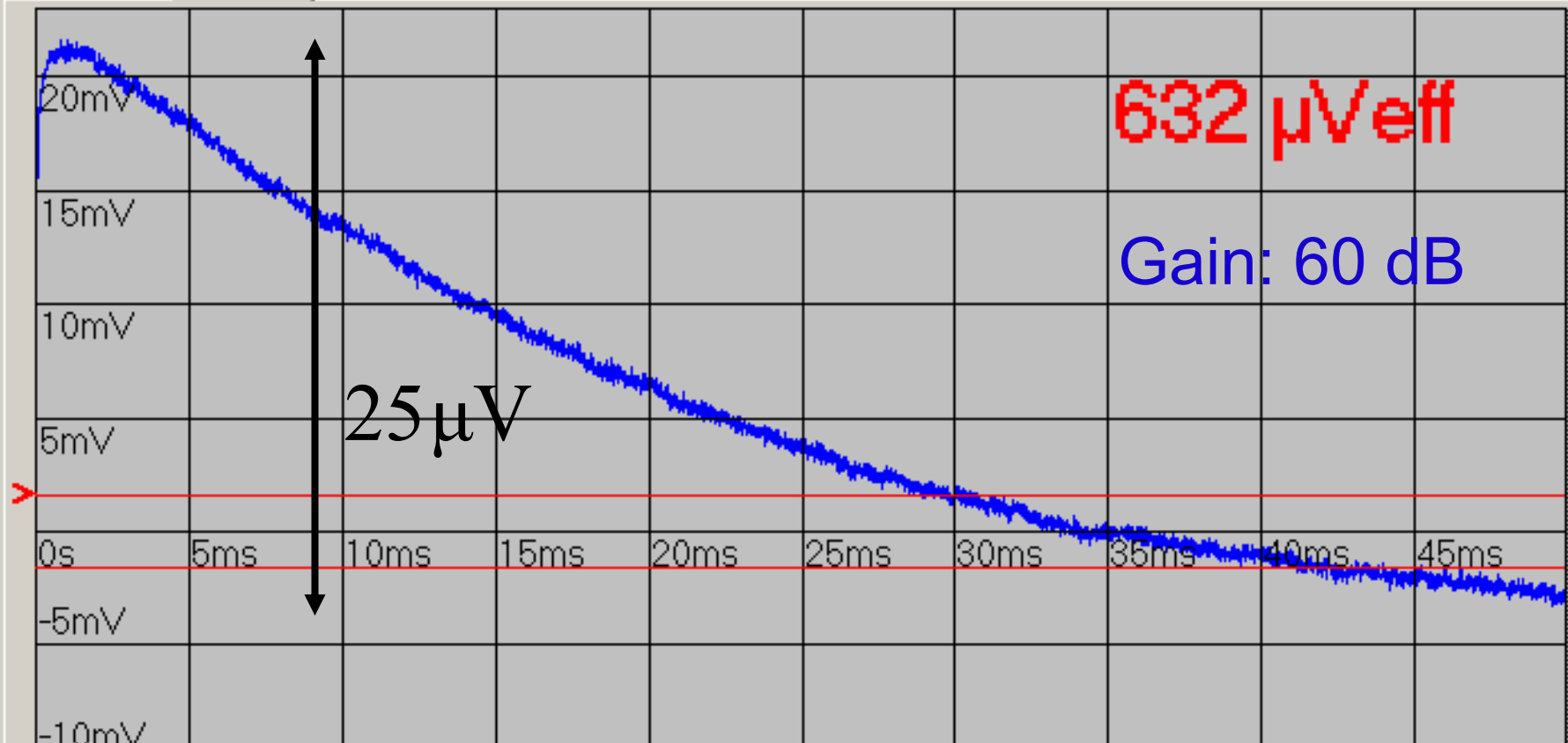


Hochschule Ulm





# Belastete Batterien machen sporadische Spannungssprünge

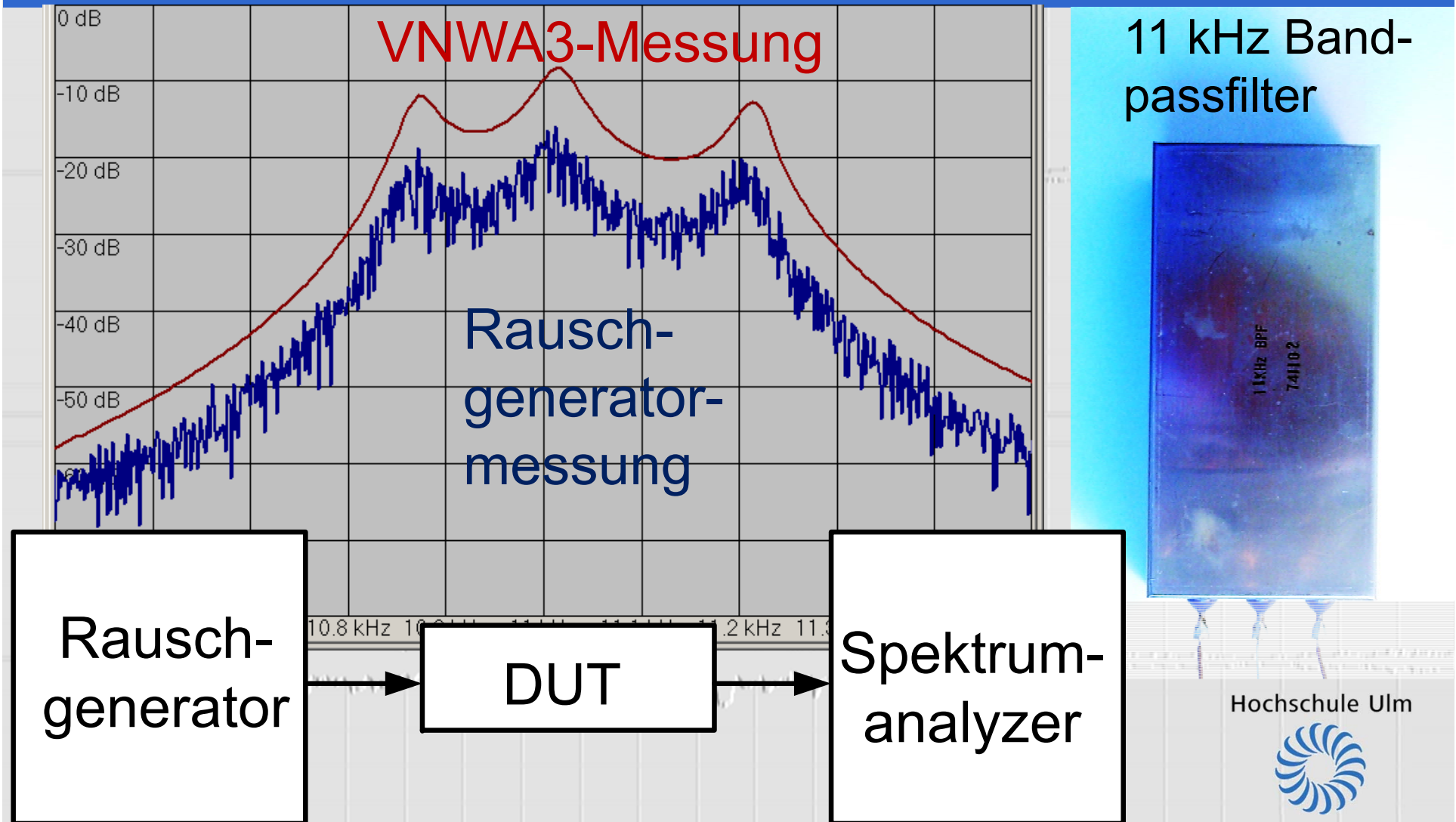


9V Alkaline-Batterie mit 100 Ω belastet

Hochschule Ulm



# Nützliches Rauschen zur Messung von Übertragungsfunktionen



# Messung von Übertragungsfunktionen: Rauschen vs. Frequenzsweep

## *Pro Rauschanregung:*

- Alle Frequenzen werden gleichzeitig gemessen
- DUT muss nur einmal auf alle Frequenzen gleichzeitig einschwingen

## *Contra Rauschanregung:*

- Pro Frequenz weniger Leistung
- Signalverarbeitung muss hochgradig linear sein





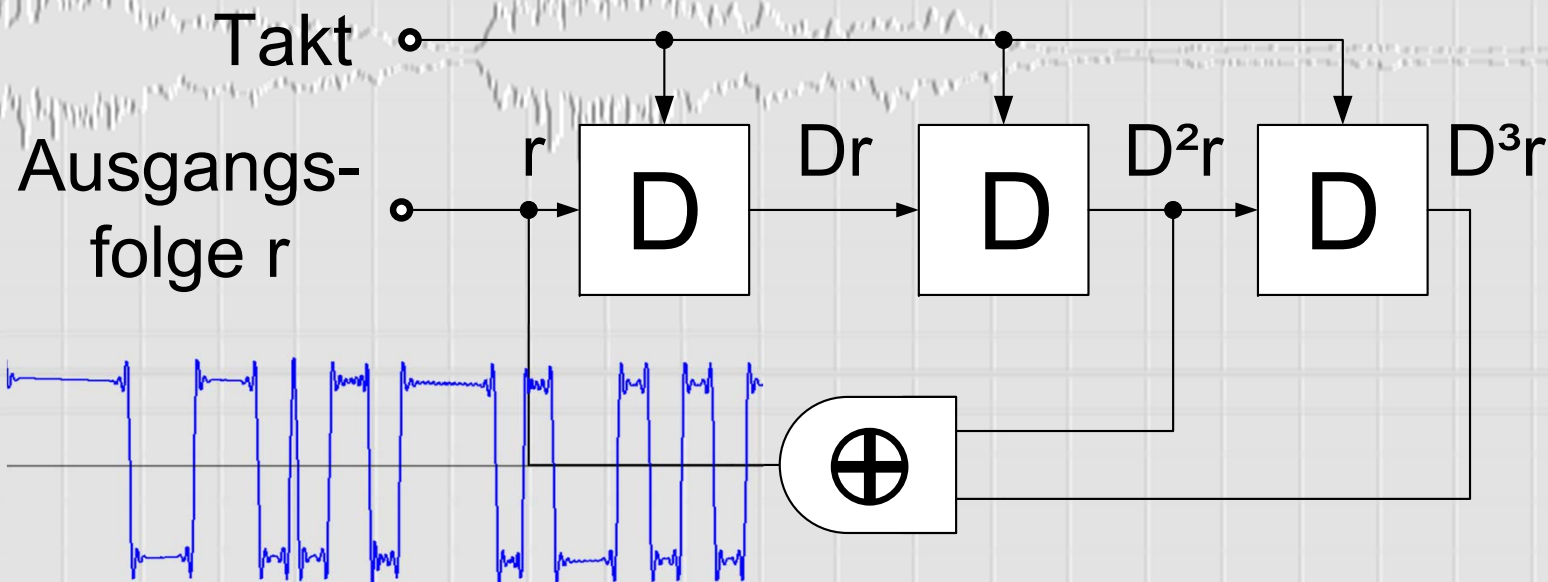
# Ideale Rauschanregung

- Bei gegebener Maximalamplitude möglichst viel Leistung pro Frequenz
- Möglichst konstantes Frequenzspektrum
- Periodisch für optimales Einschwingverhalten



# Ideale „Rausch“anregung: Schieberegisterfolgen

Rückgekoppeltes Schieberegister, z.B.



$$r = D^2r \oplus D^3r \Leftrightarrow (D^3 \oplus D^2 \oplus 1)r = 0$$

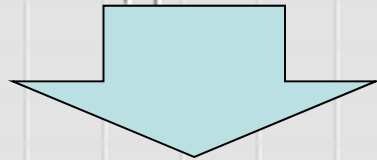
Generatorpolynom

Hochschule Ulm



# Schieberegisterfolgen maximaler Länge = zyklische Pseudozufallsfolgen ZPF

- n-stufiges Schieberegister
- Generatorpolynom irreduzibel



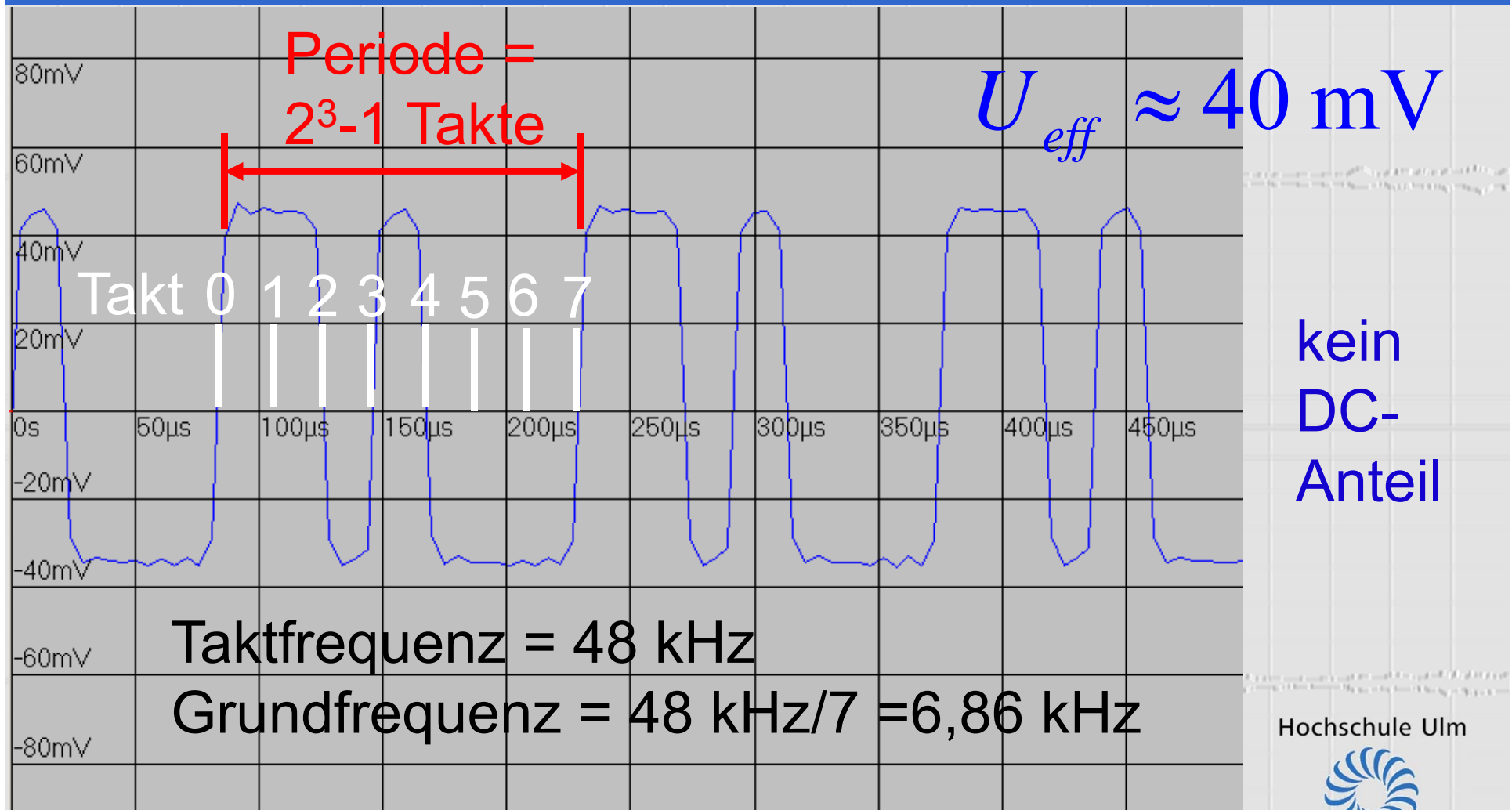
- Periodizität =  $2^n - 1$  Takte, d.h. maximal
- Mit  $2^n - 1$  Frequenzen darstellbar \*
- Folge  $\delta$ -korreliert

\* Innerhalb Nyquist-Grenze

Hochschule Ulm



# Beispiel 3-stufiges Schieberegister

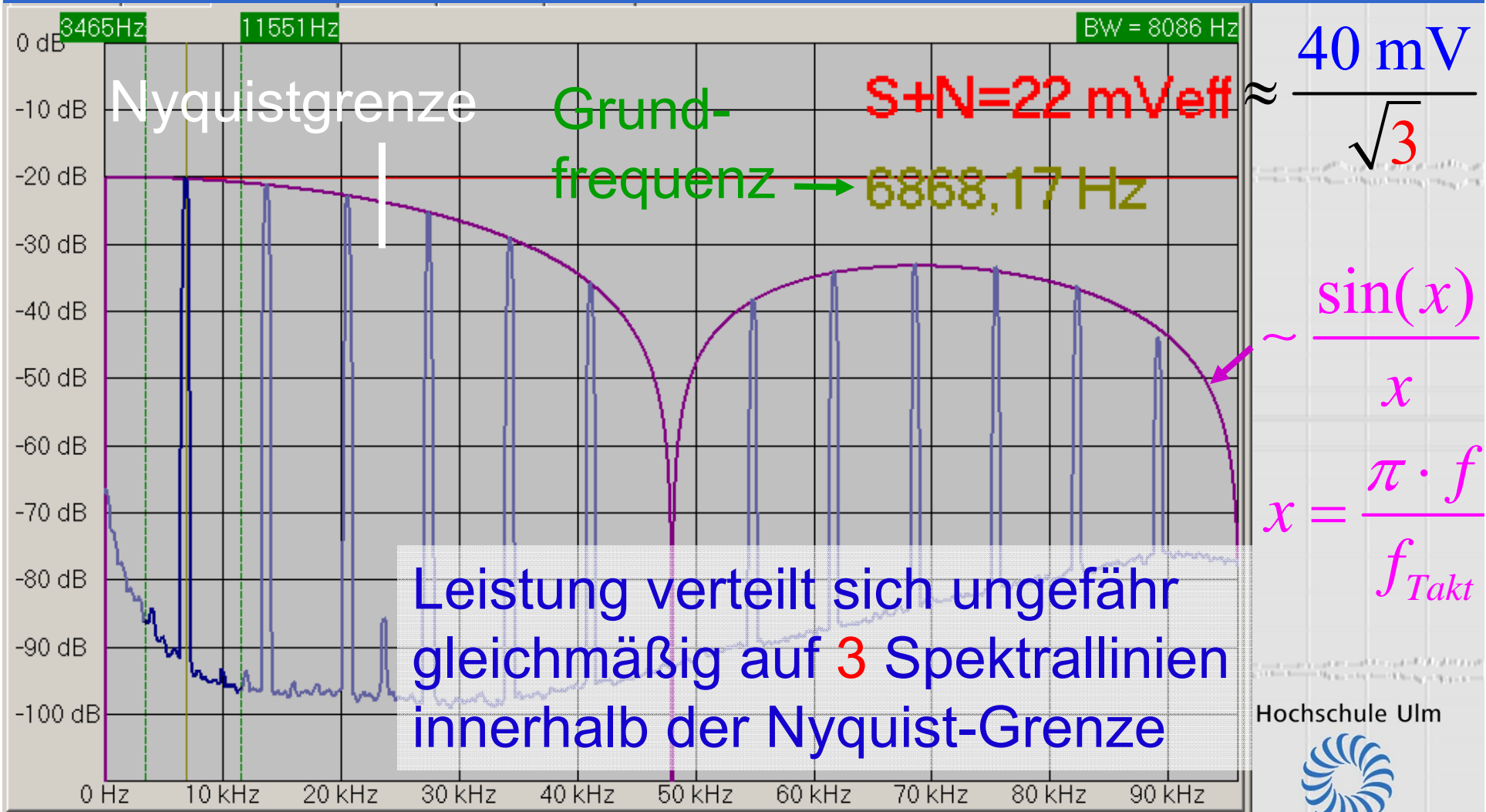


Hochschule Ulm

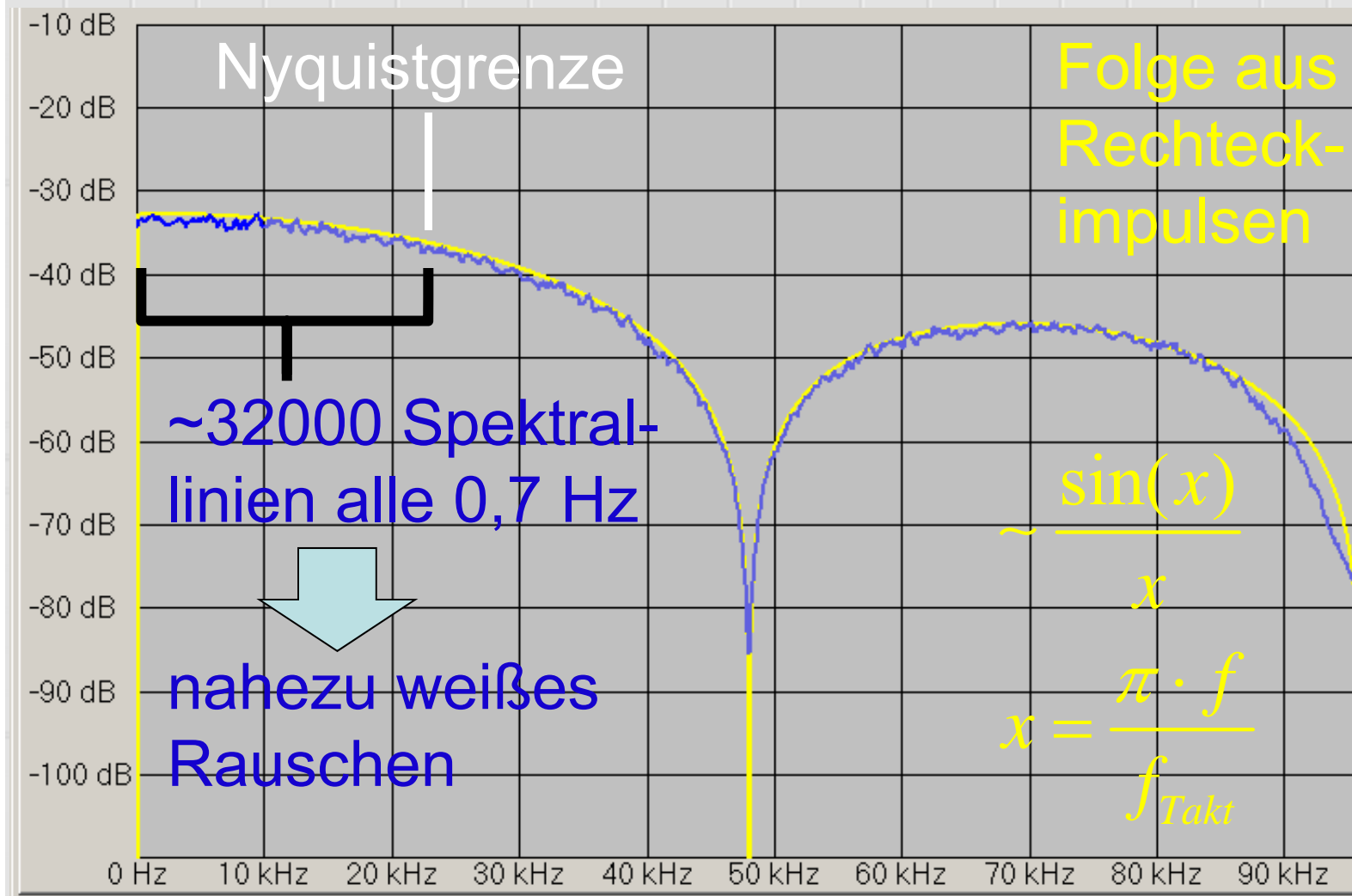


# Beispiel 3-stufiges Schieberegister (2)

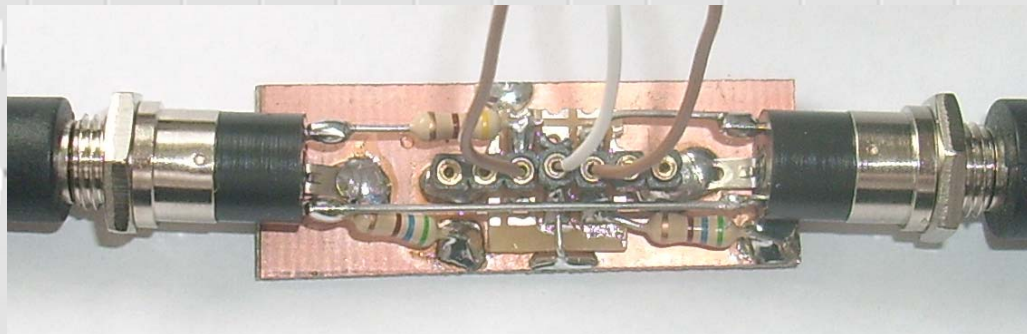
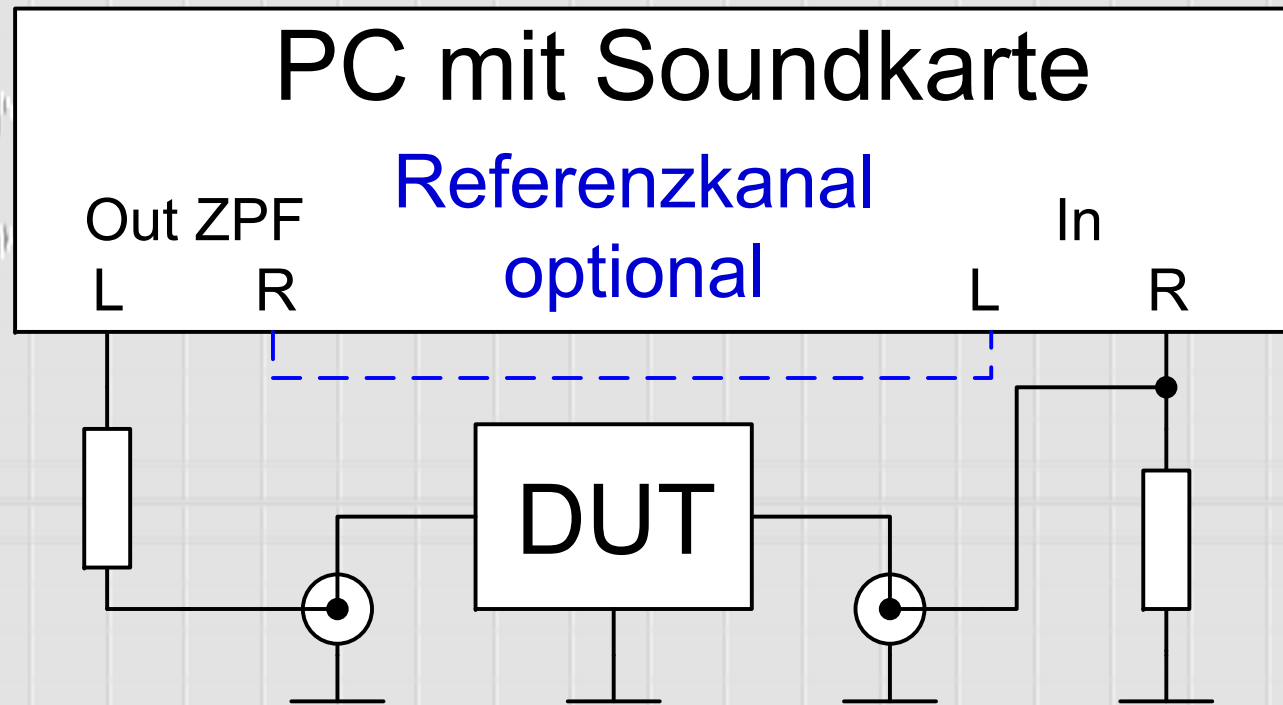
## SA sieht nur **positive** Frequenzen!



# Beispiel 16-stufiges Schieberegister 48 kHz Takt



# Rausch-VNA misst Transmission

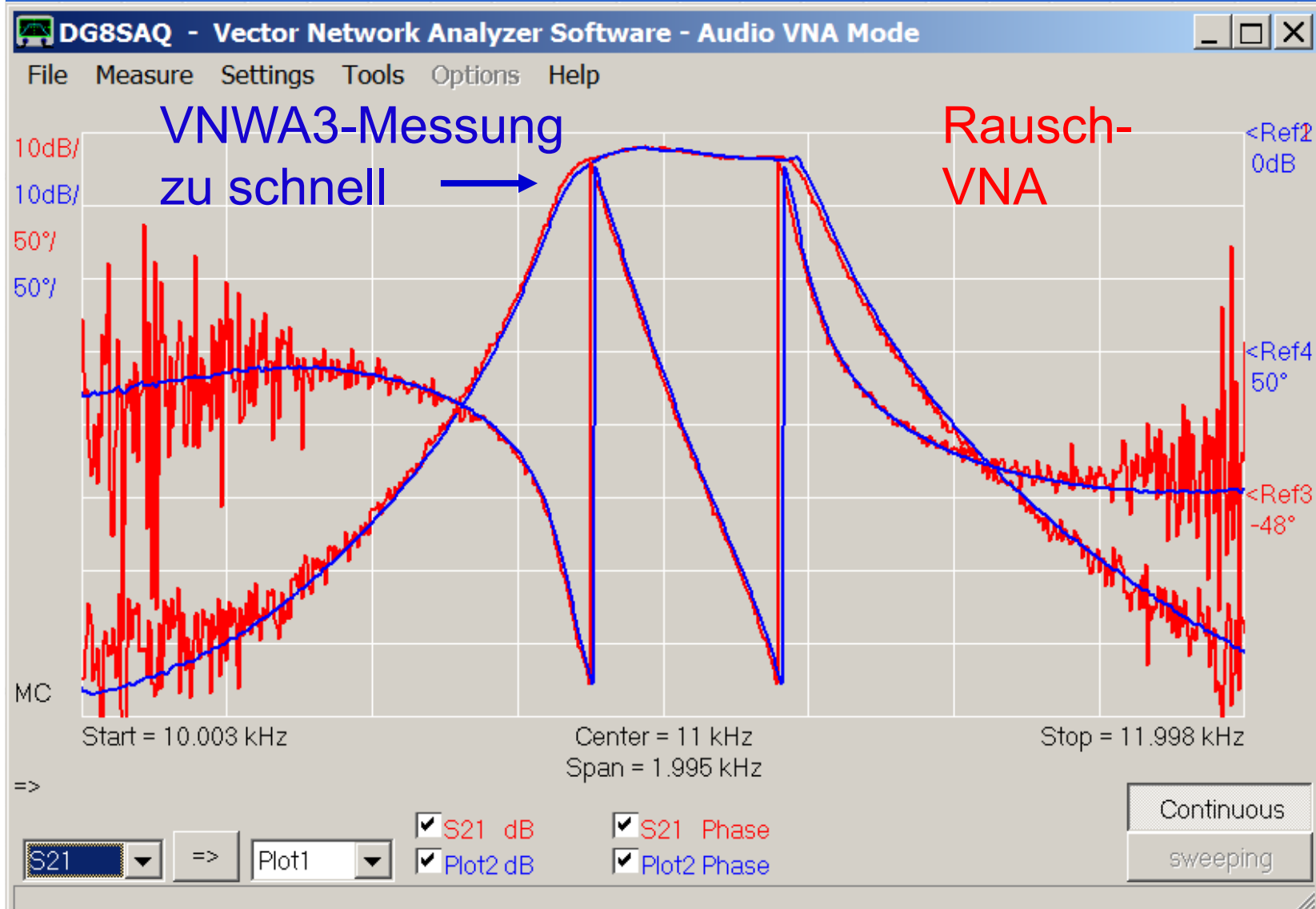


Hochschule Ulm





# 11 kHz – Bandpassfilter: Betrag und Phase!

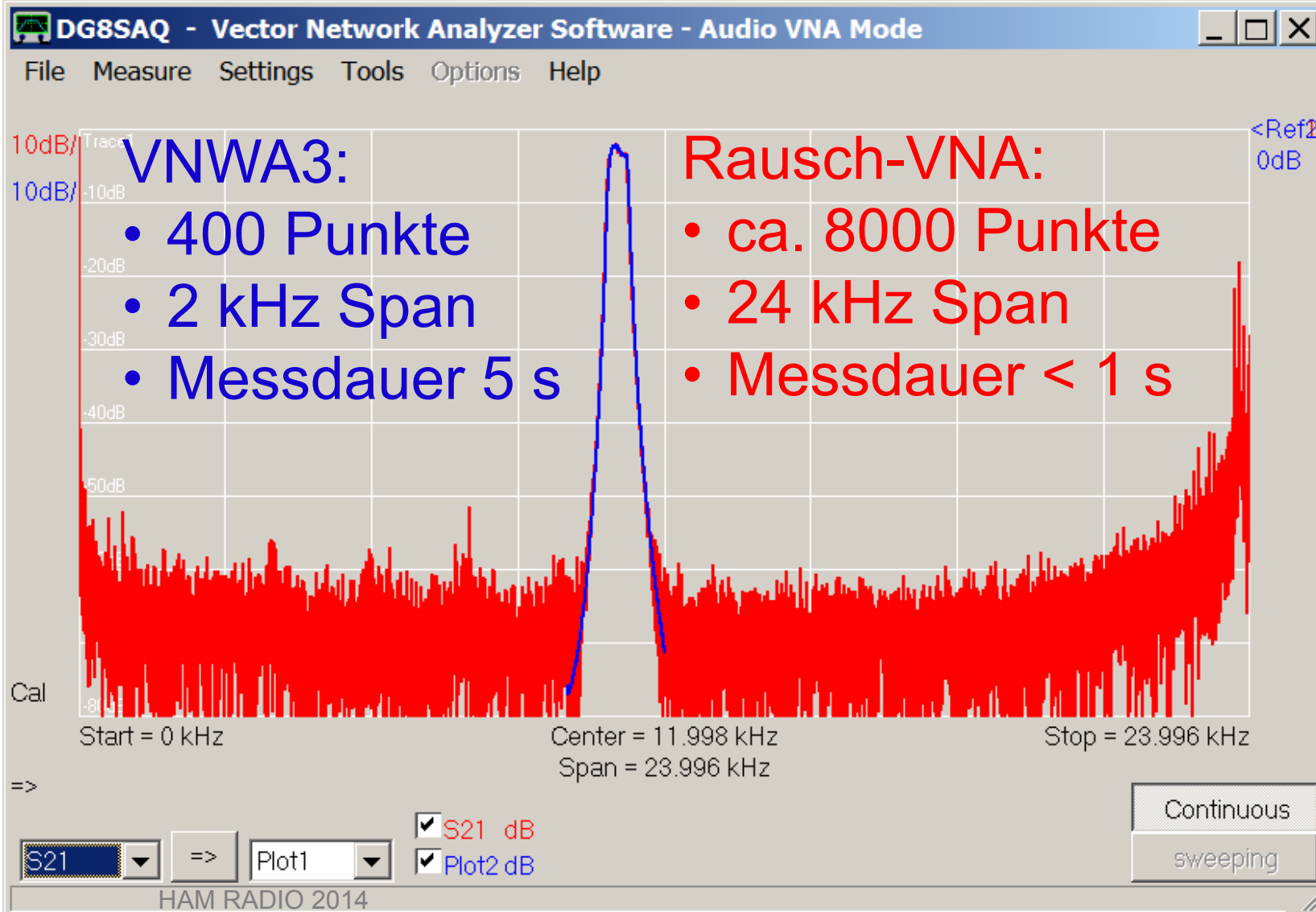


500  $\Omega$  Umgebung

hochschule Ulm



# 11 kHz – Bandpassfilter (2)



500  $\Omega$  Umgebung

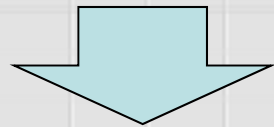
hochschule Ulm



# 4 kHz Quarz



3dB-Bandbreite = 0,2 Hz !!!

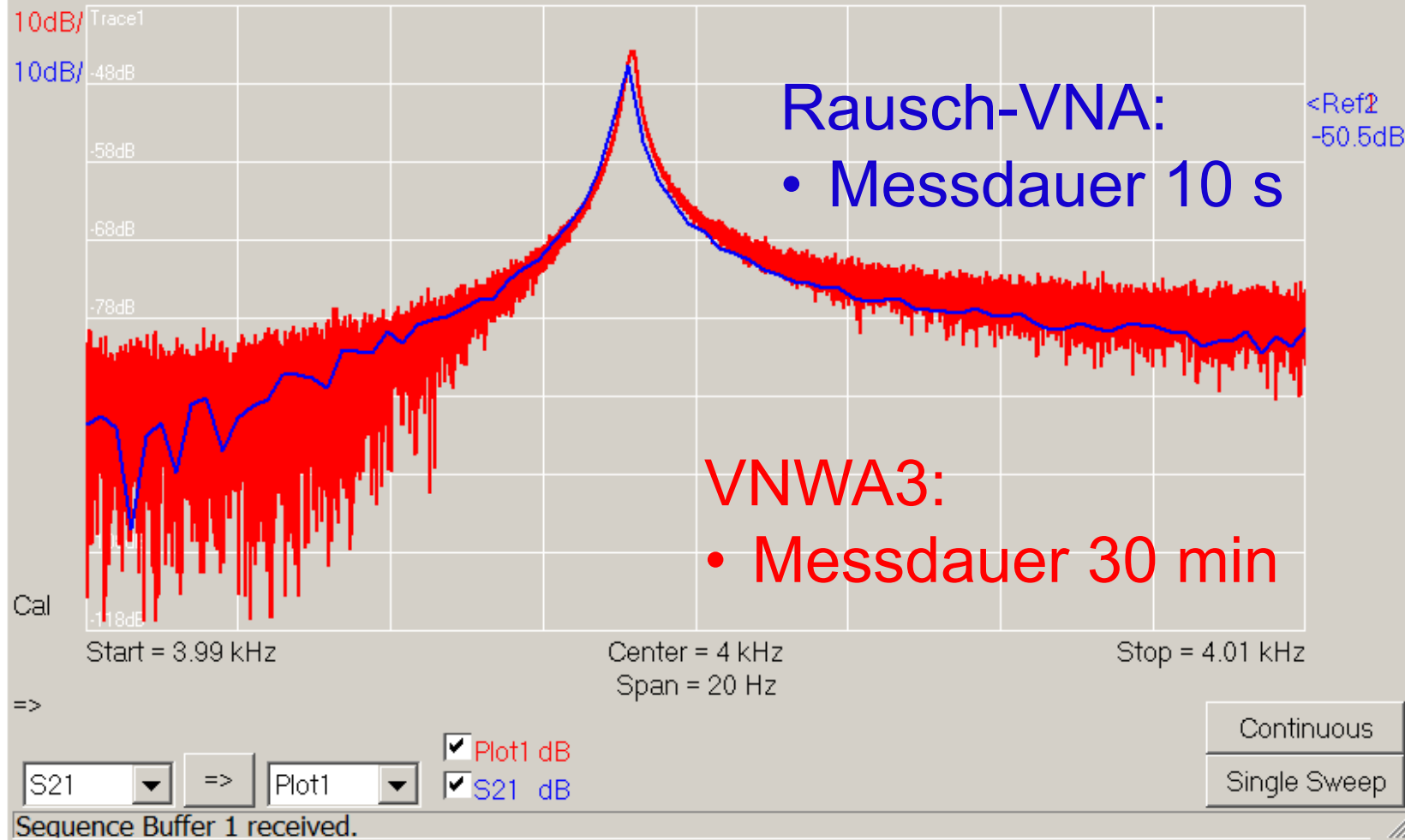


Benötigt  $> 5$  s, um bei größerem  
Frequenzwechsel auf neue Frequenz  
einzuschwingen

Hochschule Ulm



# 4 kHz Quarz (2)



# Messdauer vs. Signal-Rausch-Abstand

Verdoppelung Messdauer:

- 2-fache Rauschleistung  $N$
- 2-fache Signalspannung
  - 4-fache Signalleistung  $S$
- 2-faches  $S/N$

Verdoppelung der Messdauer bringt 3 dB  
Signal-Rauschabstand.

Hochschule Ulm



# Messdauer Rausch-VNA vs. VNWA

## Bsp: Sequenzlänge = 511

*Gleiche Signal-Spitzenspannung  $U_0$   
Messdauer pro Frequenz  $T_0$ , Einschwingdauer  $T_E$*

### VNWA

- Sinusanregung
- $P = U_0^2 / 2R$
- 255 Frequenzpunkte  
 $\approx 2^8$  Punkte
- Messdauer  $\approx 2^8 \cdot T_0 + 2^8 \cdot T_E$

### Rausch-VNA

- Rechteckanregung
- $P = U_0^2 / R \rightarrow 3 \text{ dB Gewinn}$
- Verteilt sich auf 255 Spektrallinien
- Messdauer  $\approx 2^7 \cdot T_0 + 1 \cdot T_E$

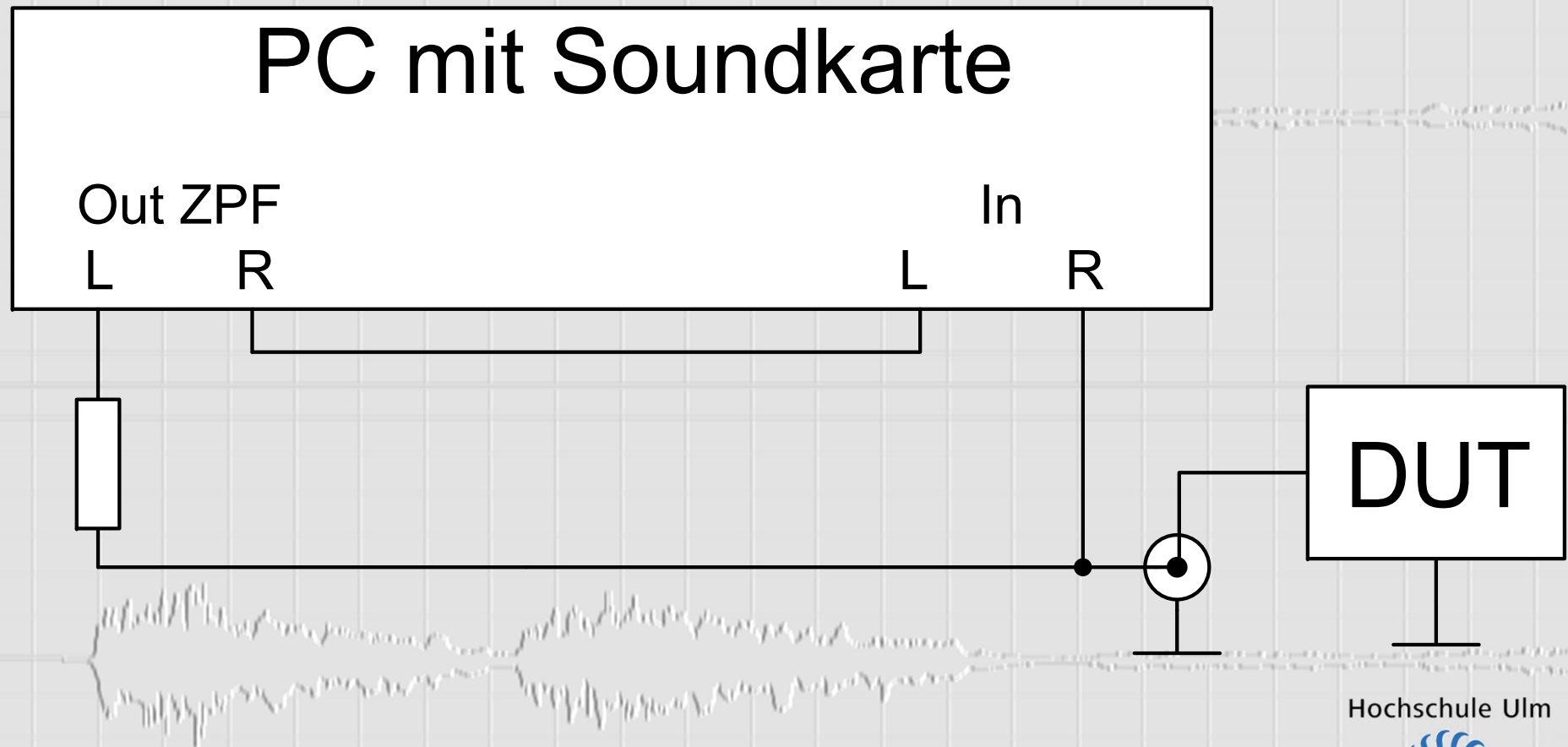
- 3dB Gewinn durch Rechteckanregung
- Drastischer Gewinn durch kürzere Einschwingzeit

Hochschule Ulm





# Rausch-VNA misst auch Reflexion



Hochschule Ulm



# Realisierung Rausch-VNA für Reflexion

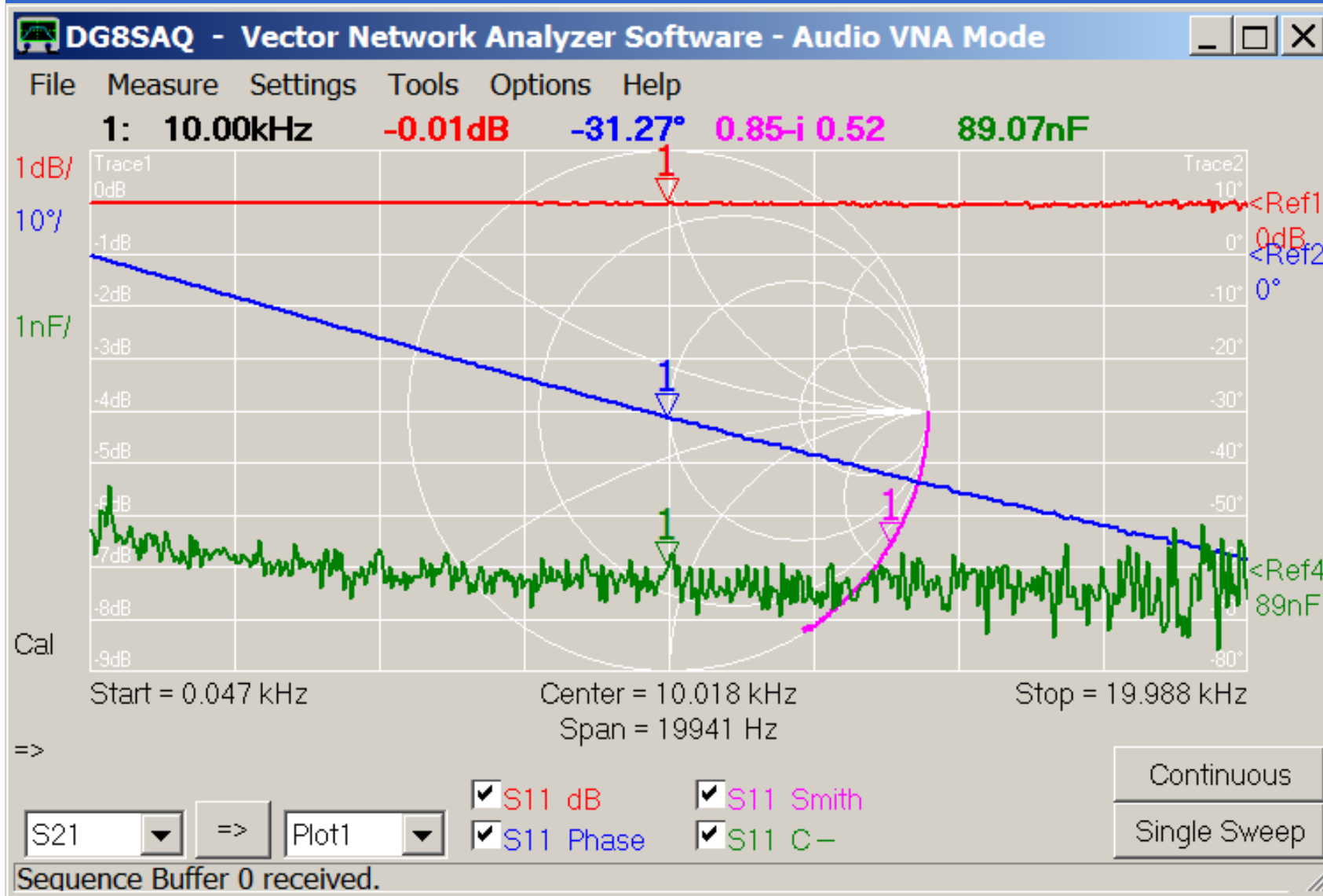
PCM2900 USB Audio-Board (Elektor)

Out

In

DUT:  
100nF

# Reflexionsmessung eines 100 nF-Kondensators mit Rausch-VNA



schule Ulm



# ENDE



**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit**

Hochschule Ulm

