Grundlagen Digitale Audiotechnik

Jörn Nettingsmeier

IGVW 4 EDUCATION

vdt

Um 10:00 Uhr hier oder (mit besserem Sound) auf https://cloudy.stackingdwarves.net/IGVW4EDU.ts oder einfach QR-Code scannen.

Grundlagen Digitale Audiotechnik

Jörn Nettingsmeier

Grundlagen Digitale Audiotechnik

Verband Deutscher Tonmeister e.V.

Themenübersicht

- Was heißt *analog*?
  - Eigenschaften analoger Signale
- Was heißt *digital*?
  - Eigenschaften digitaler Signale
- Abtastung (sampling)
- Unterabtastung (aliasing)
- Quantisierung
- Rekonstruktion (Digital-Analog-Wandlung)

Was heißt *analog*?

ανάλογος („análogos“)

ist griechisch und heißt

„dem Verstand entsprechend“

aber auch

„im Verhältnis“

Was heißt *analog*?

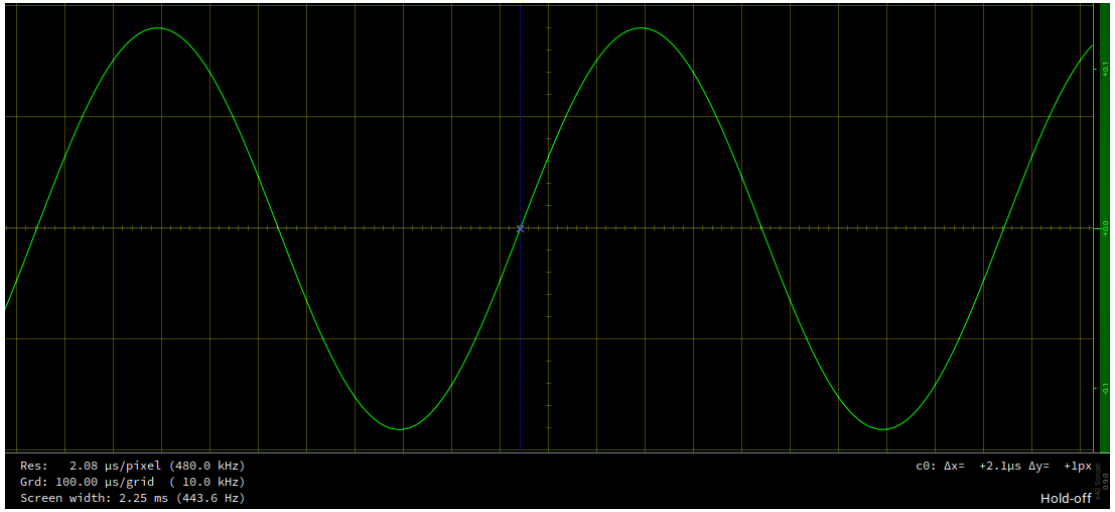
Beispiele für analoge *Medien*, also *Signalübertragungswege:*

- Du sprichst, ich höre.
  Medium: Luft
- Du sprichst in eine Schnurtelefon, ich höre.
  Medien: die Schnur (und die Luft)
- Ich spreche in ein Mikrofon an einem Analogverstärker, du hörst am Kopfhörer.
  Medium: eine elektrische Spannung
- Du schickst mir ein Mixtape, ich höre am Kopfhörer.
  Medien: eine wechselnde Magnetisierung, die eine Spannung erzeugt
- Ich sage: “Der Fisch war soooo lang.”
  Medium: der Abstand zwischen meinen Händen

Was heißt *analog*?

ανάλογος („análogos“)

Das Medium folgt *analog* der Quelle, also „im Verhältnis“.



Was heißt *analog*?

In der Fachsprache der Signaltechnik bedeutet *analog:*

- Das Signal ist *zeitkontinuierlich:* zu jeder Zeit gibt es einen Signal*wert* auf dem Medium.
- Das Signal ist *wertekontinuierlich:* das Medium kann jeden Eingangswert (theoretisch) beliebig genau darstellen.

Ist analog besser?

Analoge Medien bilden Signale im Prinzip sehr gut ab, sind aber in der Praxis nicht perfekt:

- Sie haben eine begrenzte *Bandbreite* (= darstellbarer Frequenzbereich)
- Sie haben eine begrenzte Dynamik (= darstellbarer Lautstärkebereich)

  Zu den Rändern der Bandbreite fällt das Nutzsignal langsam ab. Dazwischen hat das Medium idealerweise einen *linearen Frequenzgang,* d. h. es gibt keine *Verfärbungen*.

  Am unteren Rand der Dynamik taucht das Nutzsignal langsam im *Rauschen* unter.

  Am oberen Rand der Dynamik treten langsam *Verzerrungen* auf.
- Bei jeder Kopie addieren sich die Fehler: das Rauschen nimmt zu, und die Bandbreite nimmt ab.

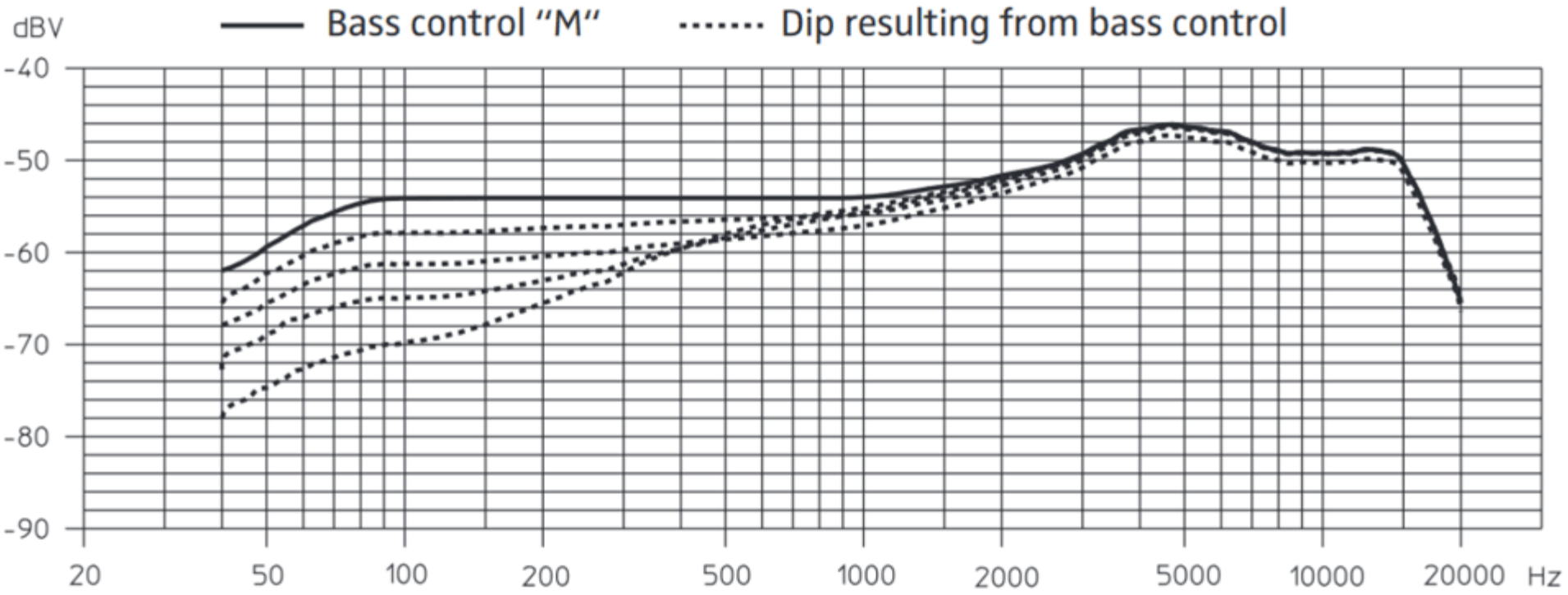
Bandbreiten analoger Systeme

Frequenzgang eines dynamischen Mikrofons mit schaltbarer Bass-Absenkung.

Bandbreite ca. 40-16000 Hz

Beinahe linearer Frequenzgang, aber auf Sprachverständlichkeit optimiert

Bandbreite entspricht dem menschlichen Gehör.



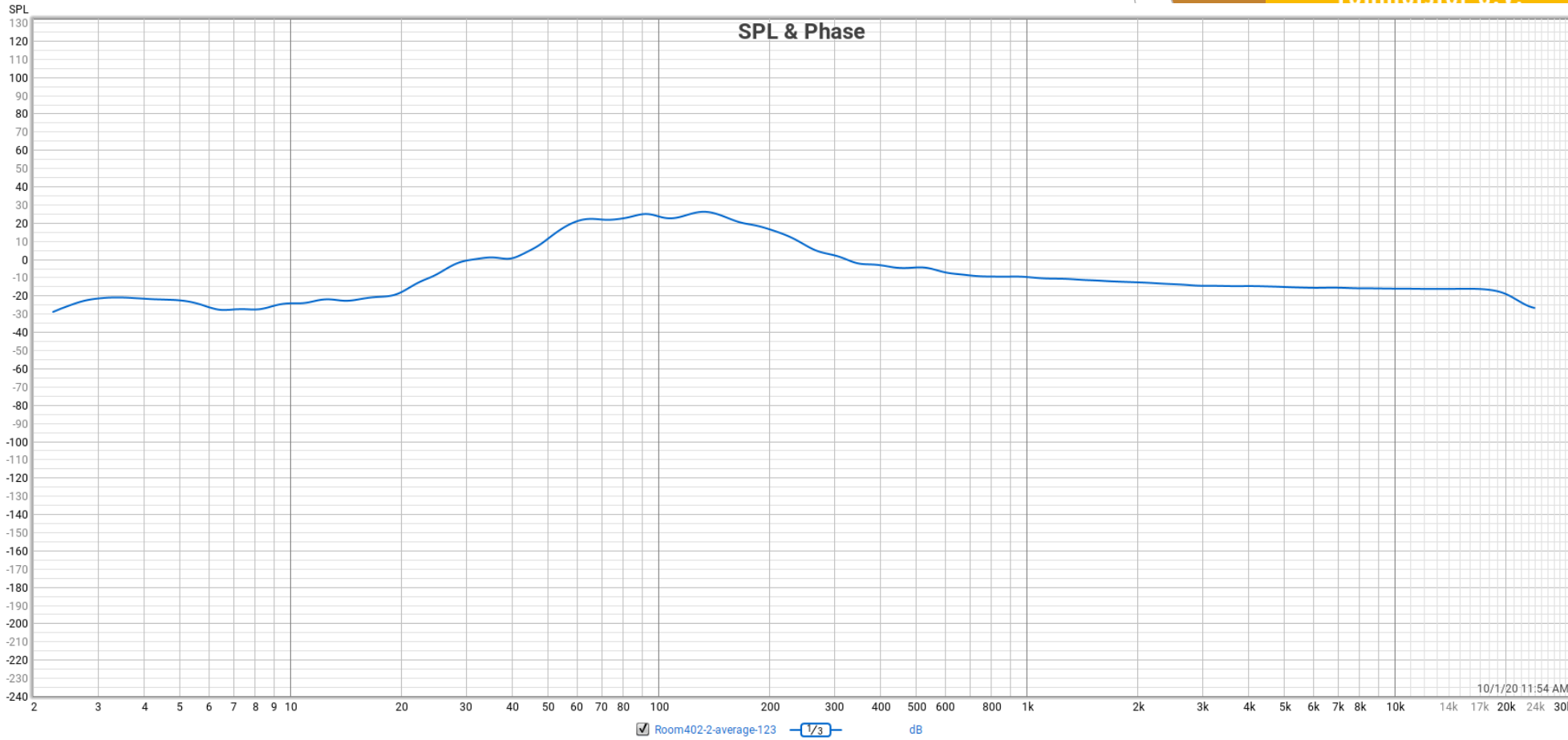
Bandbreiten analoger Systeme

Analoge Medien sind nicht immer gewollt:

Frequenzgang des Störschalls in einem Gebäude vom 3. in den 4. Stock.

Medium: Stahlbeton/Luft.

Läßt nur Tiefbass durch, geringe Bandbreite.



Der Störschall-Frequenzgang eines Gebäudes von einem Stockwerk ins darüberliegende.

Was heißt *digital*?

digitus

ist lateinisch und heißt

„Finger“.

digitalis

bedeutet

“gehört zu den Fingern”

oder

“mit den Fingern”.

Was heißt *digital*?

Beispiele für digitale *Medien*, also *Signalübertragungswege:*

- Eine Ampel ist entweder rot, rot-gelb, grün, oder gelb. Nichts dazwischen.
  Medium: 3 Lampen
  => das sind zwei Bits Information (vier Zustände) in einem 3-Bit-System

- Ich sage: “Der Fisch war so viele Zentimeter lang.” und zeige meine Finger.
  Medium: meine Finger
  => das sind zehn Bits, und
  dieser Fisch war 42 cm lang!

Ein Glück, dass er nicht 132 cm lang war!

Was heißt *digital*?

In der Fachsprache der Signaltechnik bedeutet *digital* außerdem:

- Das Signal ist *zeitdiskret:* Signal*werte* gibt es auf dem Medium nur zu bestimmten Zeiten, nämlich wenn wir messen.
- Das Signal ist *wertediskret:* das Medium kann Eingangswerte nur mit einer bestimmten Genauigkeit (= Anzahl Finger oder *bits*) darstellen, und es gibt keine Bruchteile von Fingern.
-

Was heißt *digital*?

.

Das Messen zur Erzeugung eines digitalen Signales nennt man auch *abtasten*.
Die Finger lassen uns nicht los!

Die Anzahl der Messungen pro Zeiteinheit heißt *Abtastrate* oder *sampling rate*.

Das Abbilden auf diskrete Werte heißt *Quantisierung*.

Die Rundungsfehler, die man dabei macht, erzeugen das *Quantisierungsrauschen*.

Signale ~~befingern~~ abtasten

Abtasten heißt: Messen in regelmäßigen Abständen.

- Die Regelmäßigkeit wird sichergestellt durch einen Takt, die *sample clock*.
- Diese Takt-Uhr tickt mit der *sampling rate*.
- Jeder einzelne Messwert heißt *sample*.

  Wenn wir mehrere Kanäle abtasten, z.B. in einem Stereo-System, nennen wir alle samples, die zum selben Messzeitpunkt gehören, einen *frame*.

Sample clock ←

Analoges Originalsignal ←

“pulse train”: Folge von Einzelwerten ←

DEMO: Signale abtasten.

Zwischen den Messwerten wissen wir nicht, was das Eingangssignal gemacht hat.

Wir haben jetzt nur noch eine Kette von Impulsen (*„pulse train“*) und verlieren *Information*.

Das ist nur dann ein Problem, wenn diese Information für uns wichtig ist.

Man kann zeigen, dass die Abtastrate nur die obere Grenzfrequenz beeinflußt (sie ist genau die Hälfte der Abtastrate, die sogenannte *Nyquist-Frequenz*).

Unterhalb der Nyquist-Frequenz ist das Signal **fehlerfrei**.

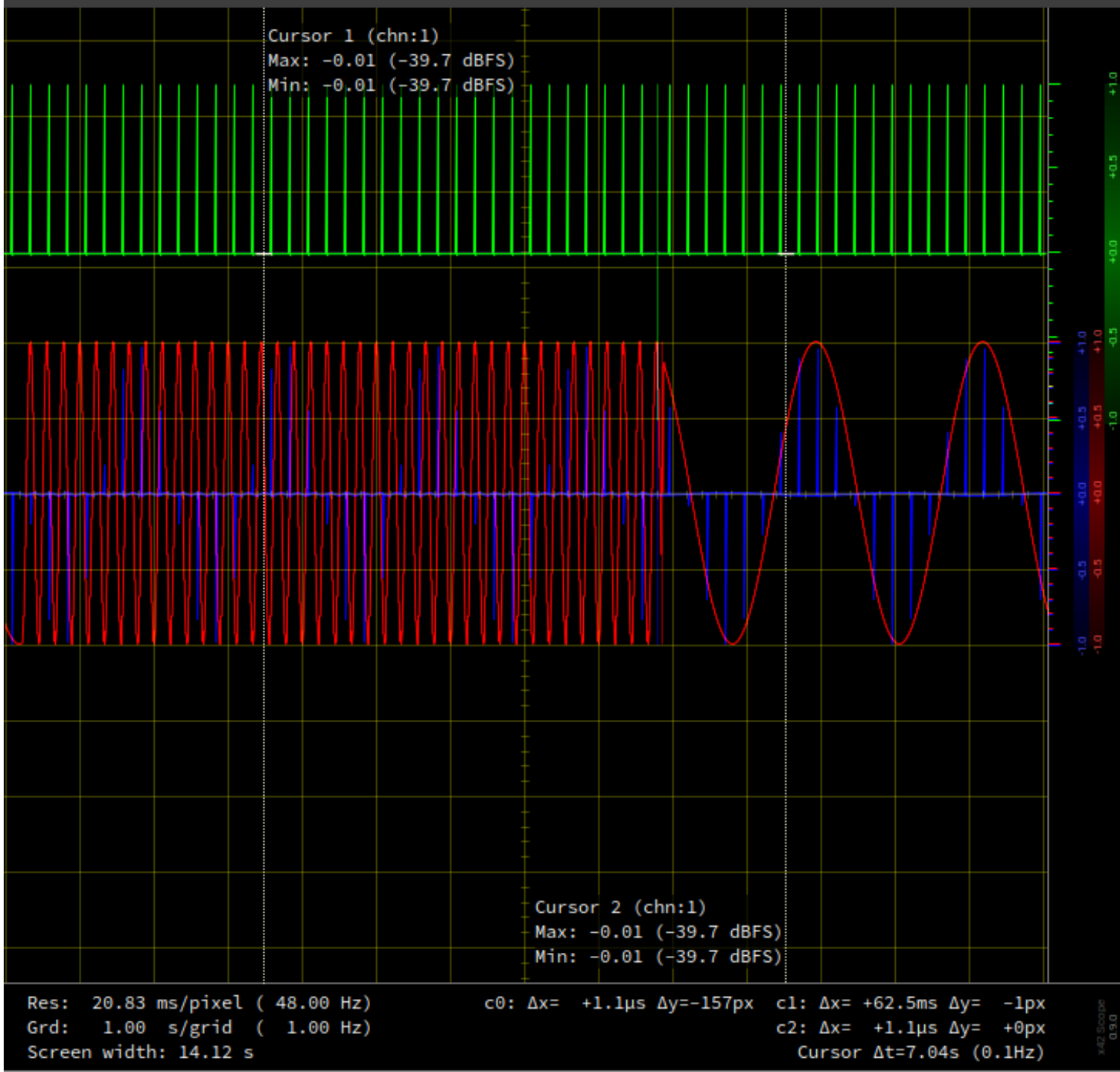
Das gilt allerdings nur, wenn man...

Unterabtastung

...vorher alle höherfrequenten Anteile wegfiltert.

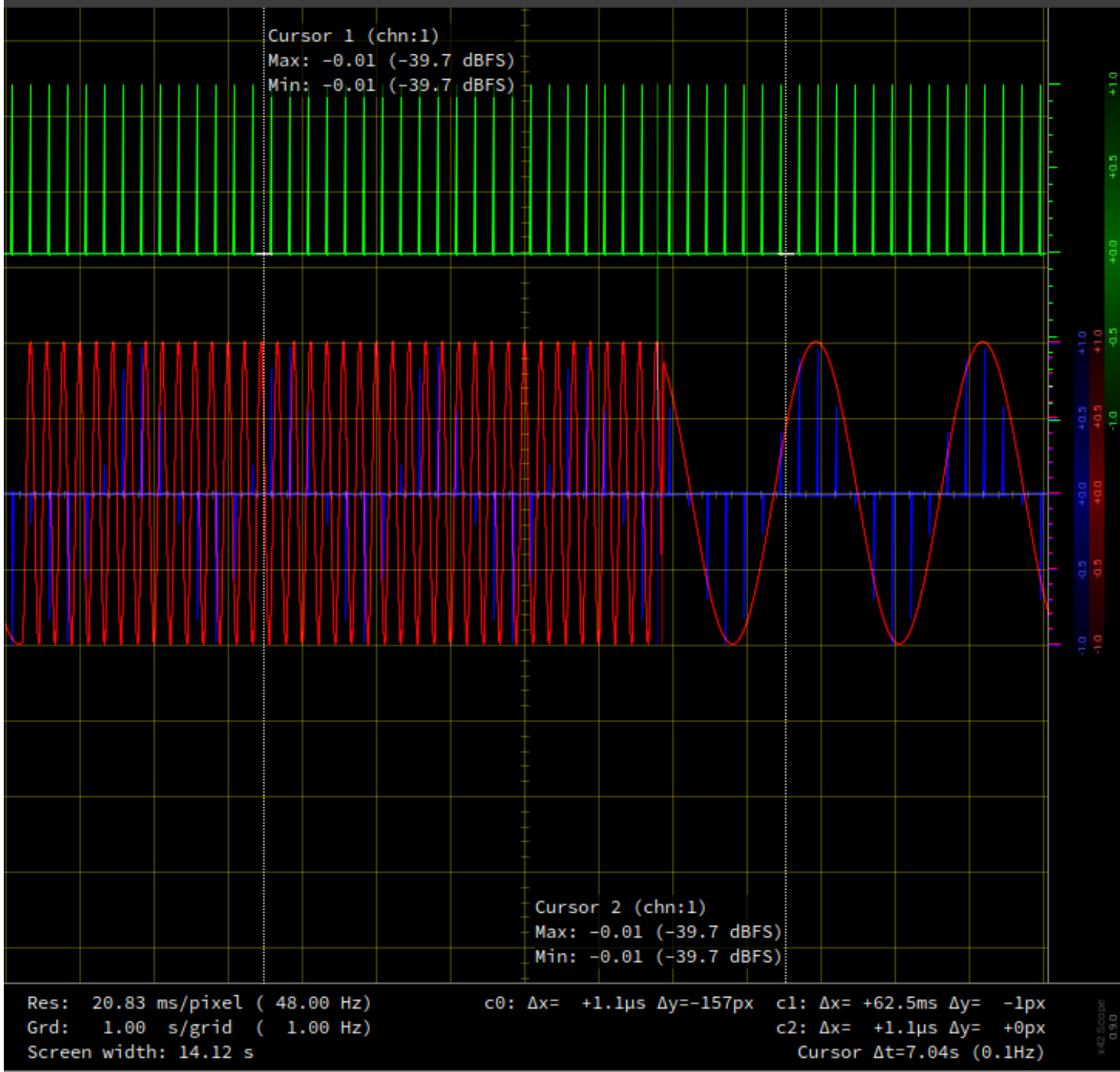
Ansonsten entstehen böse Störungen, die sogenannten *Alias-Frequenzen*.

Das Analogsignal hoher Frequenz links ist zu niedrig abgetastet: es erzeugt das gleiche Digitalsignal wie das Signal niedrieger Frequenz auf der rechten Seite.



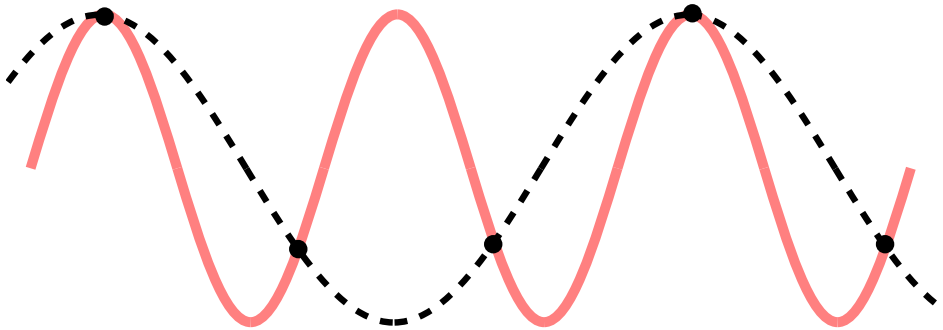
Unterabtastung

DEMO: unterabgetastete Signale.

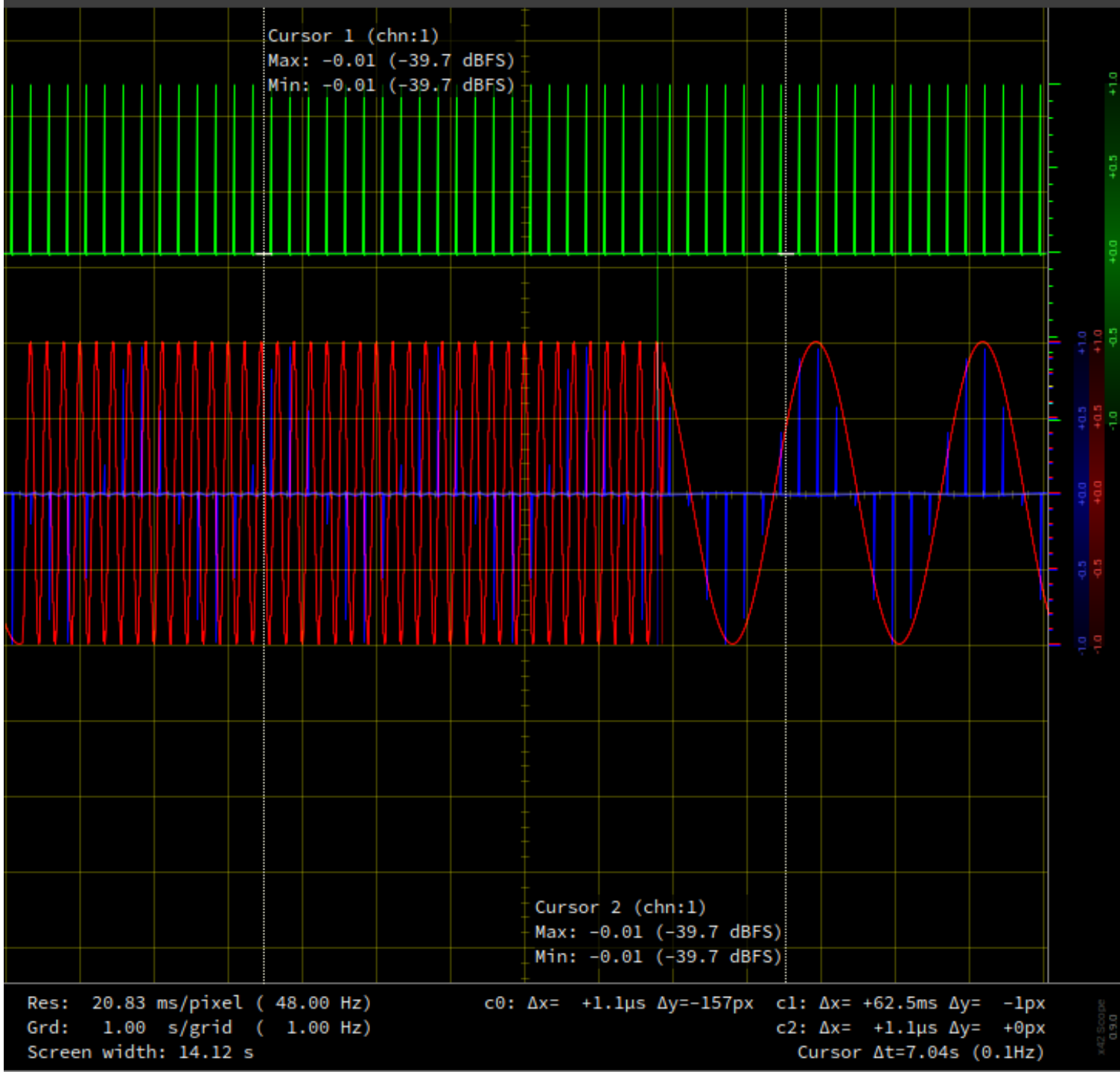


Unterabtastung

Hier noch mal eine detaillierte Aliasing-Darstellung aus der Wikipedia:



Die rote Wellenform ist das Eingangssignal, die Abtastzeiten sind die schwarzen Punkte. Sie entsprechen dem gestrichelten Signal, einem Ton tieferer Frequenz.



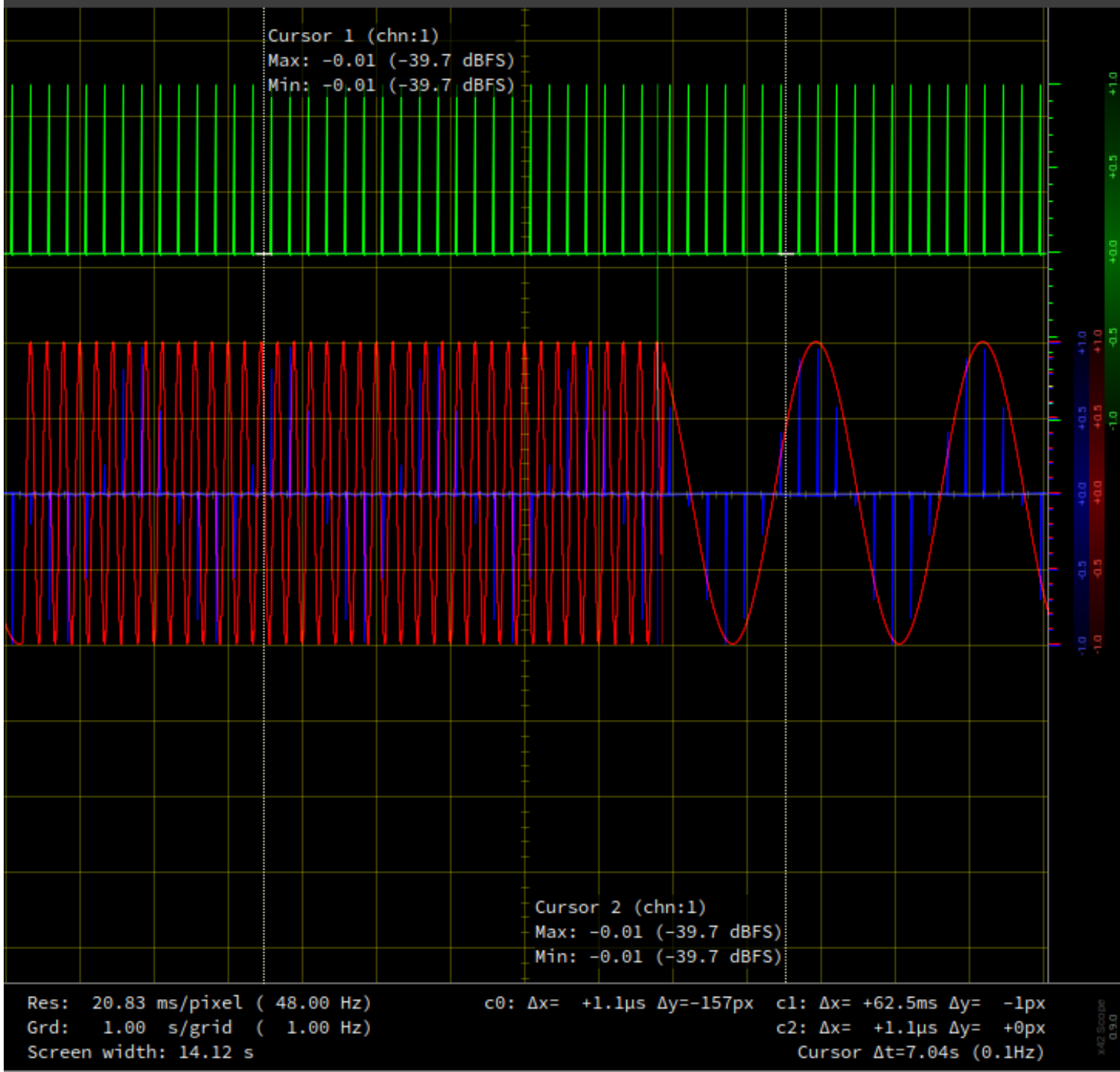
Merke: vor der Digitalisierung ***müssen*** alle Frequenzen oberhalb der Nyquist-Frequenz (also der halben Abtastrate) mit einem Tiefpass-Filter möglichst vollständig weggefiltert werden *(Anti-Aliasing-Filter)*.

Weil man Filter nicht beliebig steilflankig machen kann, tasten wir etwas höher ab als wir hören können:

44,1 kHz auf der CD

48 kHz eigentlich überall sonst

D.h. unser Tiefpass-Filter hat 2050 Hz bzw. 4000 Hz “Platz” um hohe Frequenzen so weit zu dämpfen, dass deren Aliasing-Töne nicht mehr störend hörbar sind.



Wenn man die *sampling rate* verringern möchte, muss man ebenso vorher die Frequenzen wegfiltern, die mit der neuen Abtastrate nicht mehr darstellbar sind.

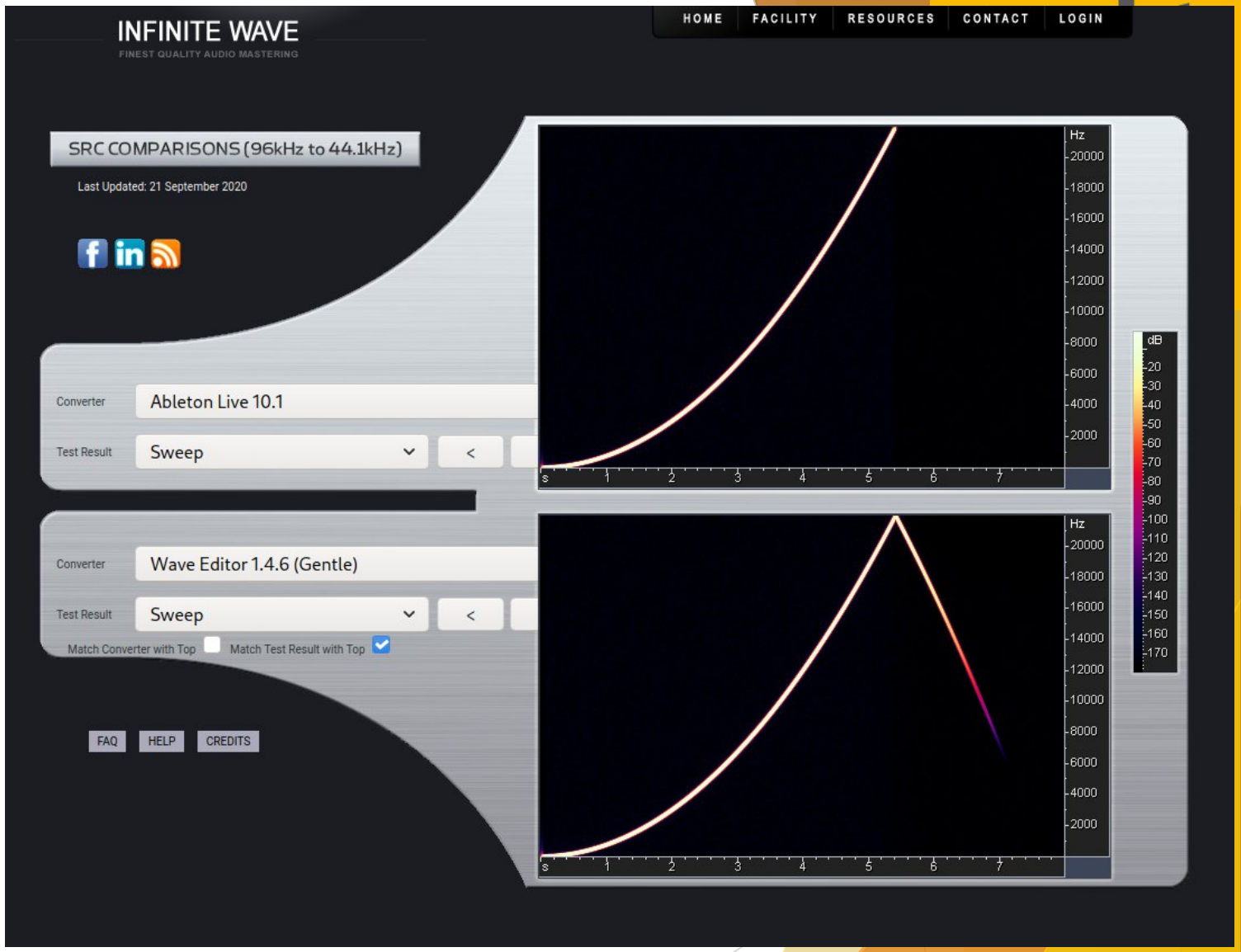
Hier sieht man Messungen zweier Resampling-Algorithmen beim Wandeln von 96 nach 44,1 kHz.

Testsignal ist ein ansteigender Sinuston von 0 Hz bis zur Nyquist-Frequenz (also 48000 Hz vor dem Resampling).

Oben ist alles gut, alles oberhalb von 24 kHz wird gefressen und stört nicht.

Unten sieht man, dass höhere Frequenzen tiefere Alias-Frequenzen erzeugen – sie werden an der Nyquist-Grenze gespiegelt.

Ein Blick auf die Anti-Alias-Filter zeigt warum:



(Quelle: https://src.infinitewave.ca)

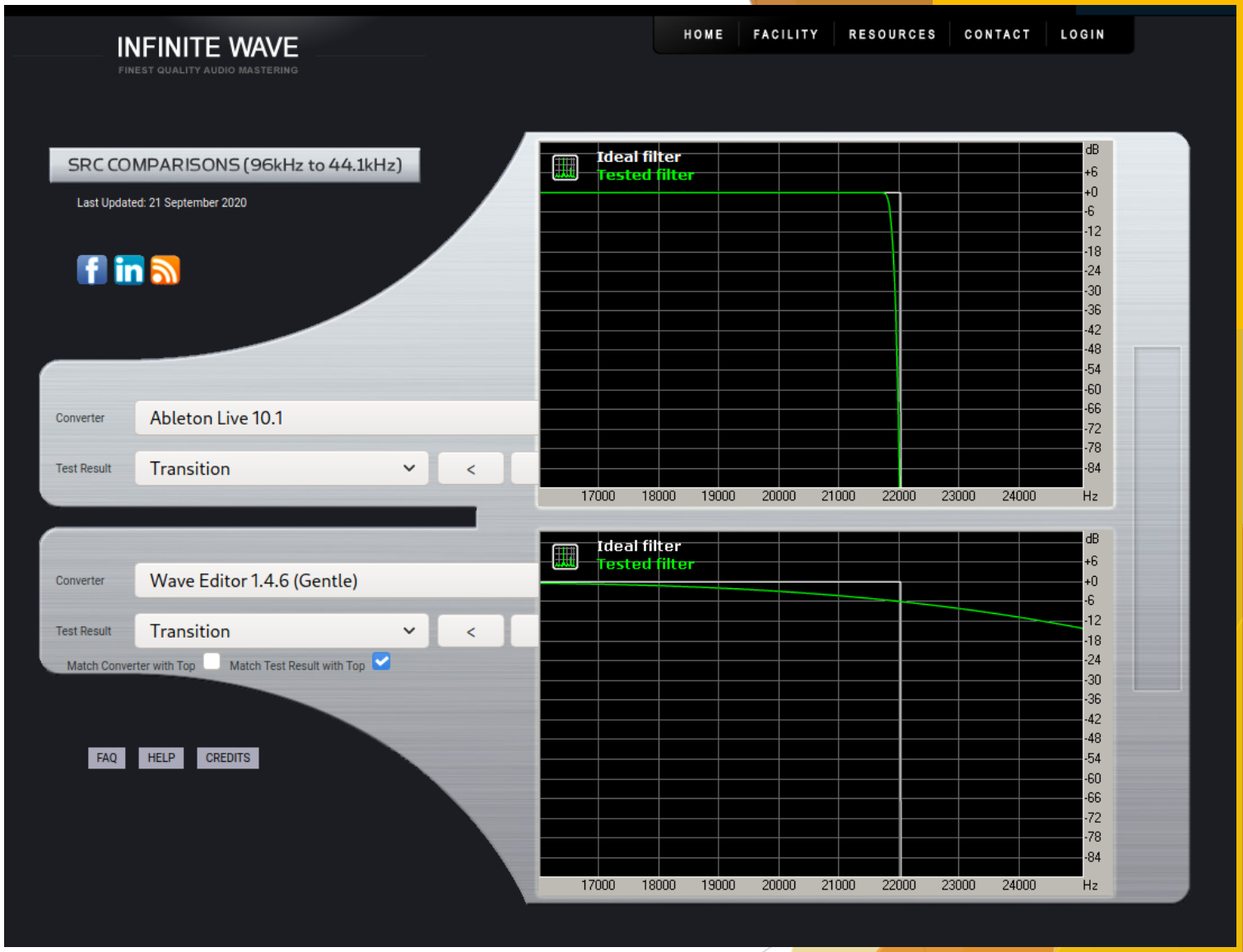
Der obere Anti-Alias-Filter ist sehr steil. Frequenzen oberhalb der Nyquist-Frequenz (= außerhalb des weißen Rahmens) werden um mehr als 90 dB gedämpft.

Der untere Anti-Alias-Filter ist sehr sanft und dämpft nur -6 dB bei Nyquist.

Ein Filter für ältere Menschen, die oberhalb von 16 kHz nichts oder nur noch wenig hören.

Jüngere Menschen nehmen Verzerrungen war, die aber auch Bestandteil einer aggressiven Klangästhetik sein können.

Das ist die “digitale Kälte/Härte”. Kann man so machen, wird dann aber scheiße.



(Quelle: https://src.infinitewave.ca)

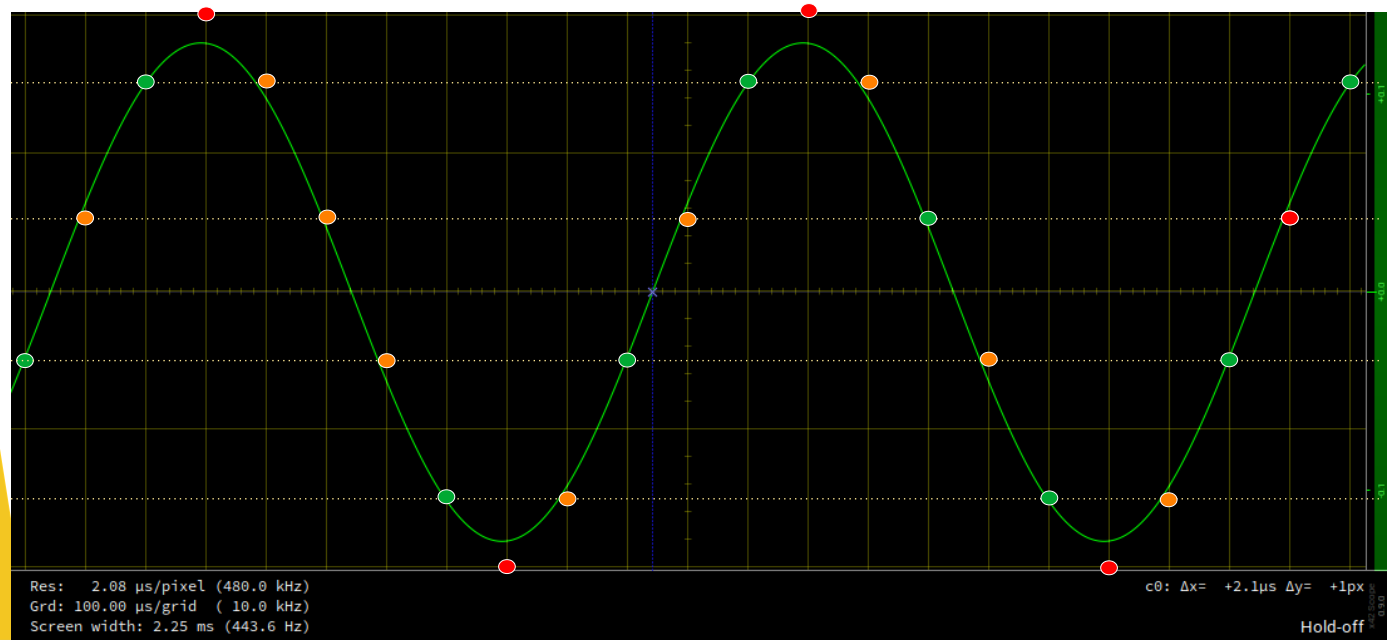
Quantisierung

Unser Messgerät (der *Komparator* im Analog/Digital-Wandler) hat nur eine begrenzte Genauigkeit oder *Auflösung*.

Diese ist unabhängig vom Wertebereich:

Meinen Fisch kann ich mit 10 Fingern = 10 Bits = 2^{10} = 1024 Stufen Genauigkeit beschreiben. Als Angler wähle ich 1 Stufe = 1 cm, als Walfänger wähle ich 1 Stufe = 5 cm.

Die Stufe ist die Genauigkeit. Mein Rundungsfehler ist maximal ½ Stufe.



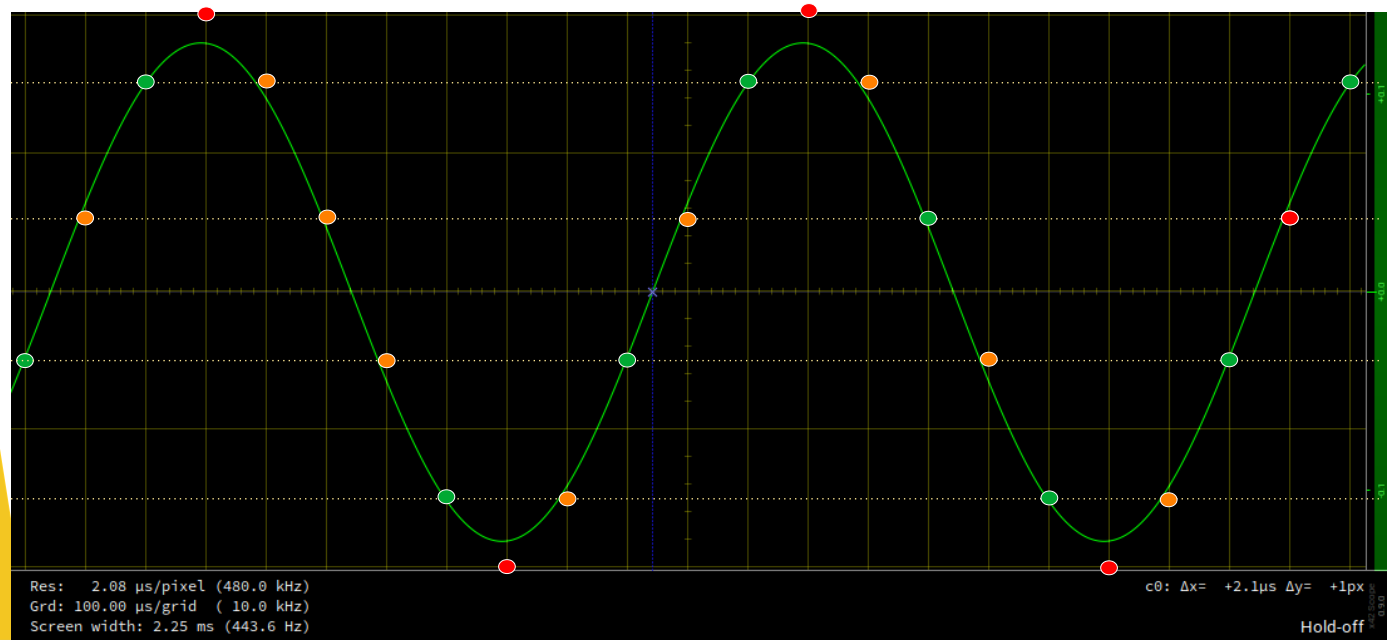
Hier wurde ein Signal auf 9 Stufen quantisiert.

Die Farbe der Samplepunkte stellt die Abweichung dar: gering, mittel, hoch.

Die Abweichungen machen sich als Rauschen bemerkbar.
Sie sind signalabhängig und daher besonders unschön.

Quantisierung

Demo: Quantisierungsrauschen



Zwischen den Messwerten wissen wir nicht, was das Eingangssignal gemacht hat.

Wir haben jetzt nur noch eine Kette von Impulsen (*„pulse train“*) und verlieren *Information*.

Das ist nur dann ein Problem, wenn diese Information für uns wichtig ist.

Man kann zeigen, dass die Abtastrate nur die obere Grenzfrequenz beeinflußt (sie ist genau die Hälfte der Abtastrate, die sogenannte *Nyquist-Frequenz*).

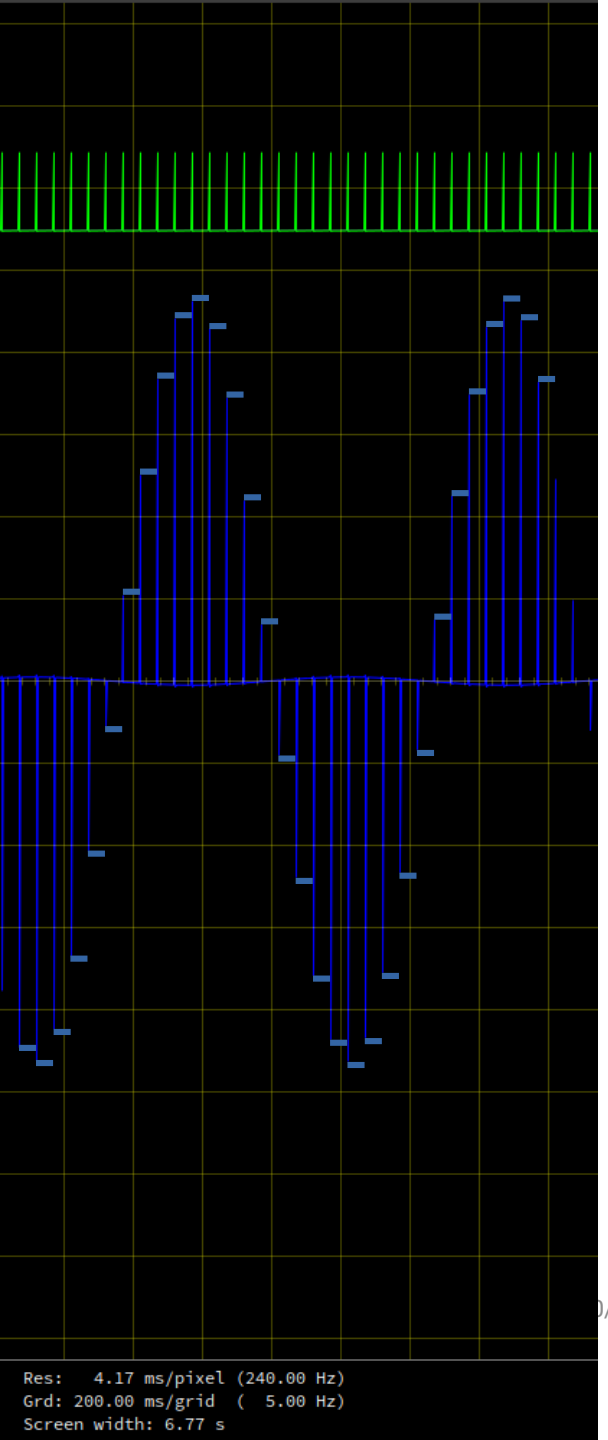
Unterhalb der Nyquist-Frequenz ist das Signal **fehlerfrei**.

Das gilt allerdings nur, wenn man...

...digitale Signale **korrekt reproduziert**.

Dazu muss man zwischen den digitalen Messwerten analoge Werte erzeugen, die dem Verlauf des ursprünglichen Eingangssignals entsprechen.

Allgemein nennt man das *Interpolation*, bei der Digital-Analog-Wandlung auch *Rekonstruktion*.



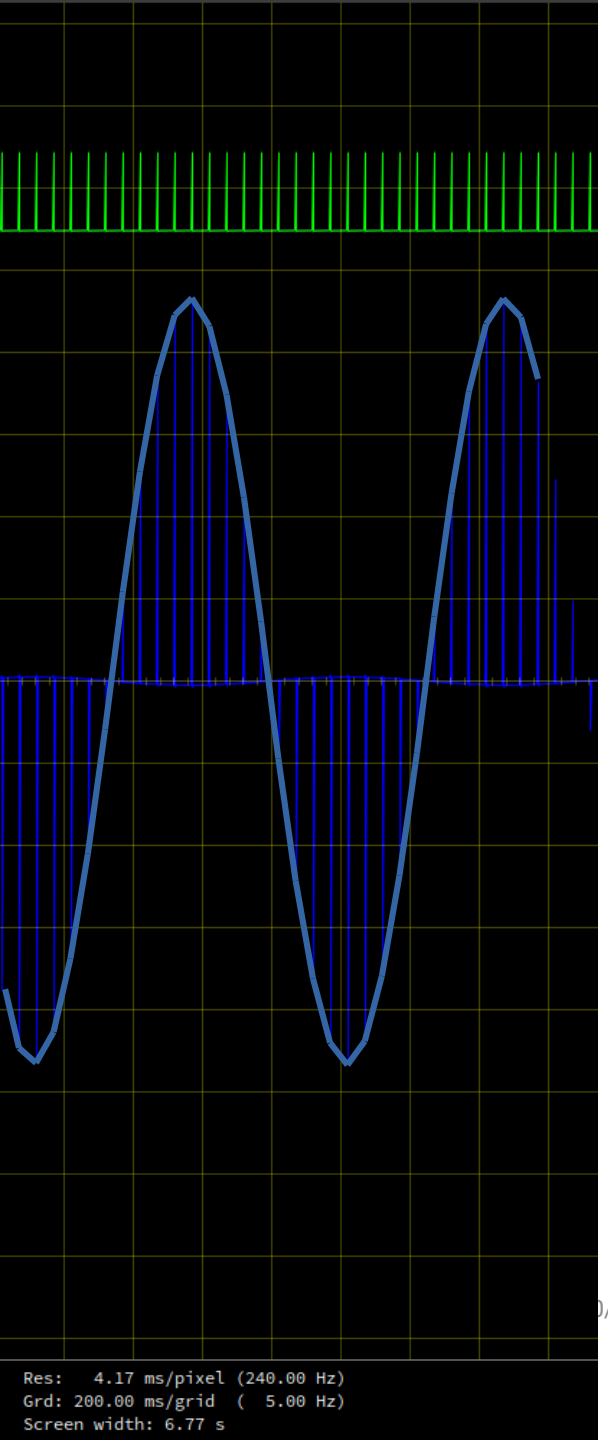
Rekonstruktion

Rekonstruktionsstrategie Nr. 1

Wir behalten den letzten Wert, bis ein neuer kommt (links durch die horizontalen blauen Balken gezeigt).

Das nennt man *sample and hold* oder *zero'th order hold (ZOH)*.

Klingt ungefähr so: [Demo]



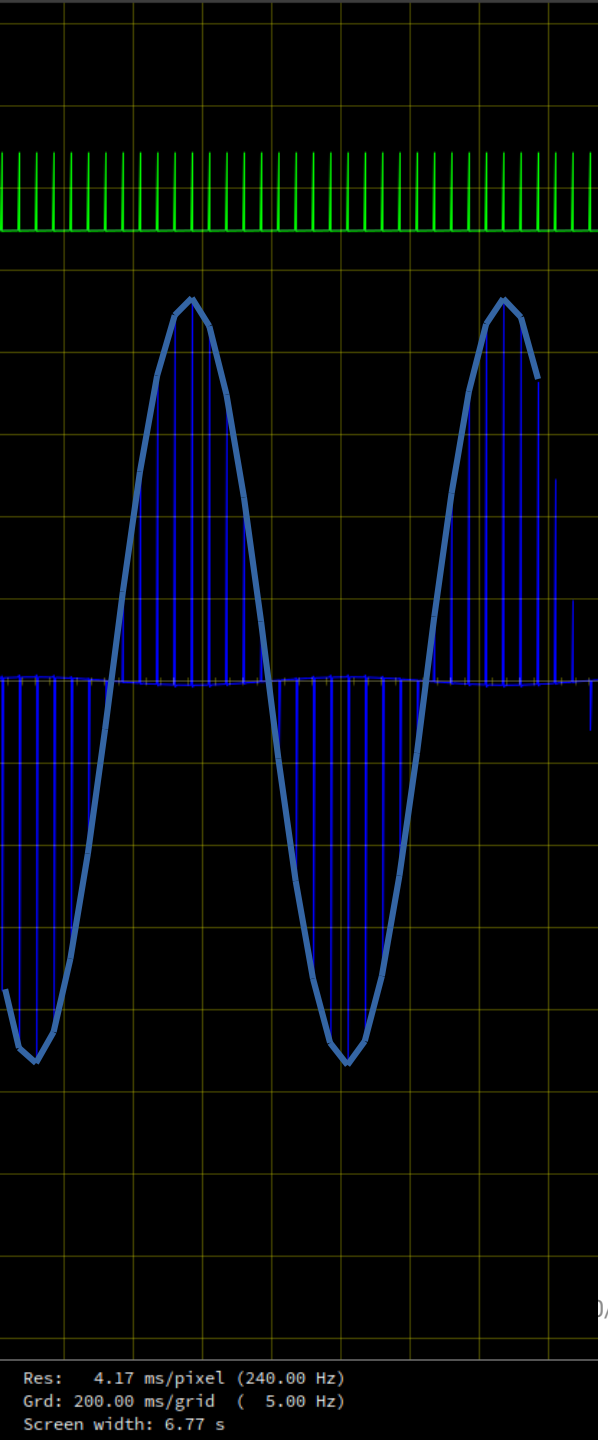
Rekonstruktion

Rekonstruktionsstrategie Nr. 2

Wir verbinden den letzten und den aktuellen Wert mit einer geraden Linie (blaue Balken).

Das nennt man *lineare Interpolation*.

Klingt ungefähr so: [Demo]



Rekonstruktion

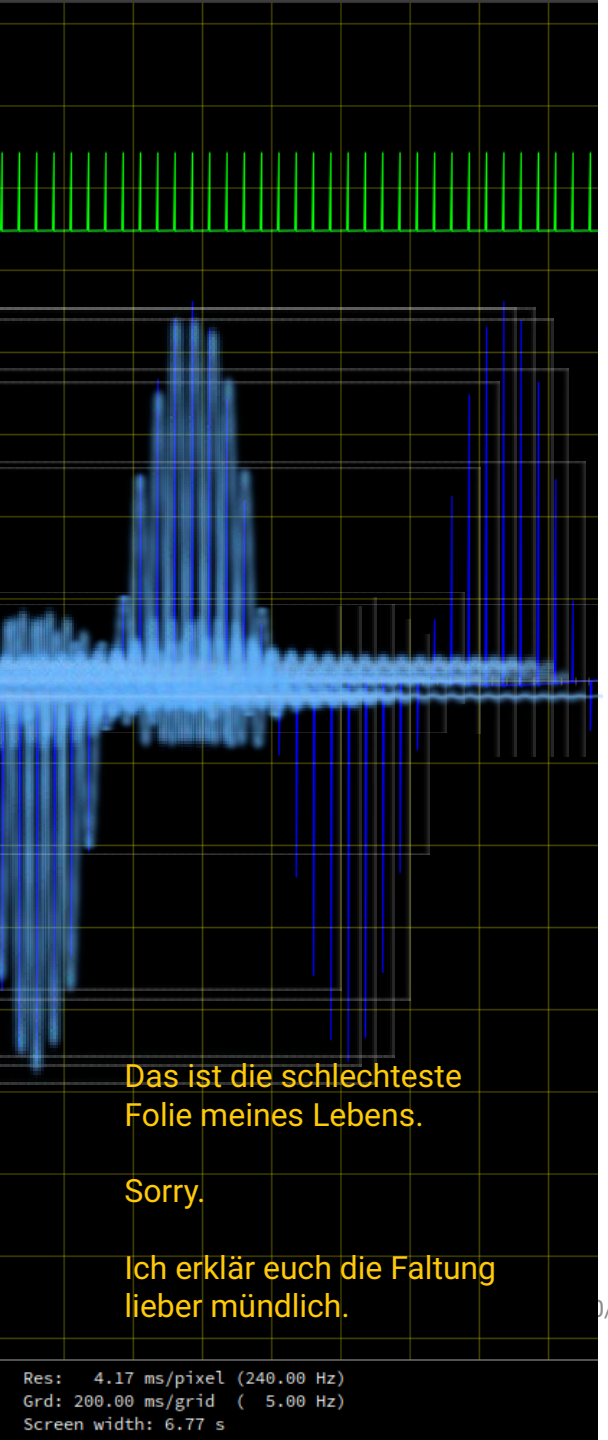
Wie man sieht, entstehen hier „Ecken“ in der Wellenform.

Daraus entstand der Mythos, dass digitale Systeme schlechter klingen als analoge.

Findige Händler kamen auf die Idee, dass man ja Geräte mit immer höherer Abtastrate verkaufen kann, damit diese Ecken immer weniger werden. Deswegen kann man mittlerweile für viel Geld 768 kHz-Wandler kaufen.

Nur: die lineare Interpolation ist eine dumme Idee, und niemand benutzt sie, wenn es auf Qualität ankommt.

vdt
Verband Deutscher Tonmeister e.V.



Das ist die schlechteste Folie meines Lebens.

Sorry.

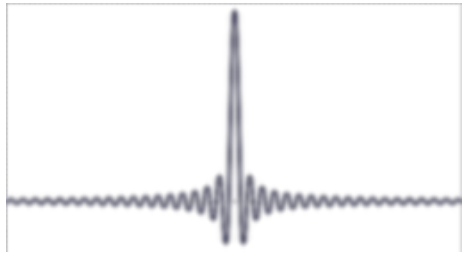
Ich erklär euch die Faltung lieber mündlich.

Rekonstruktion

Rekonstruktionsstrategie Nr. 3

Die ideale Interpolation geht so, dass man den „pulse train“ durch einen perfekten Tiefpassfiler schickt (eigentlich den gleichen, den man auch schon als Anti-Alias-Filter benutzt hat).

Der perfekte Tiefpassfilter sieht so aus:

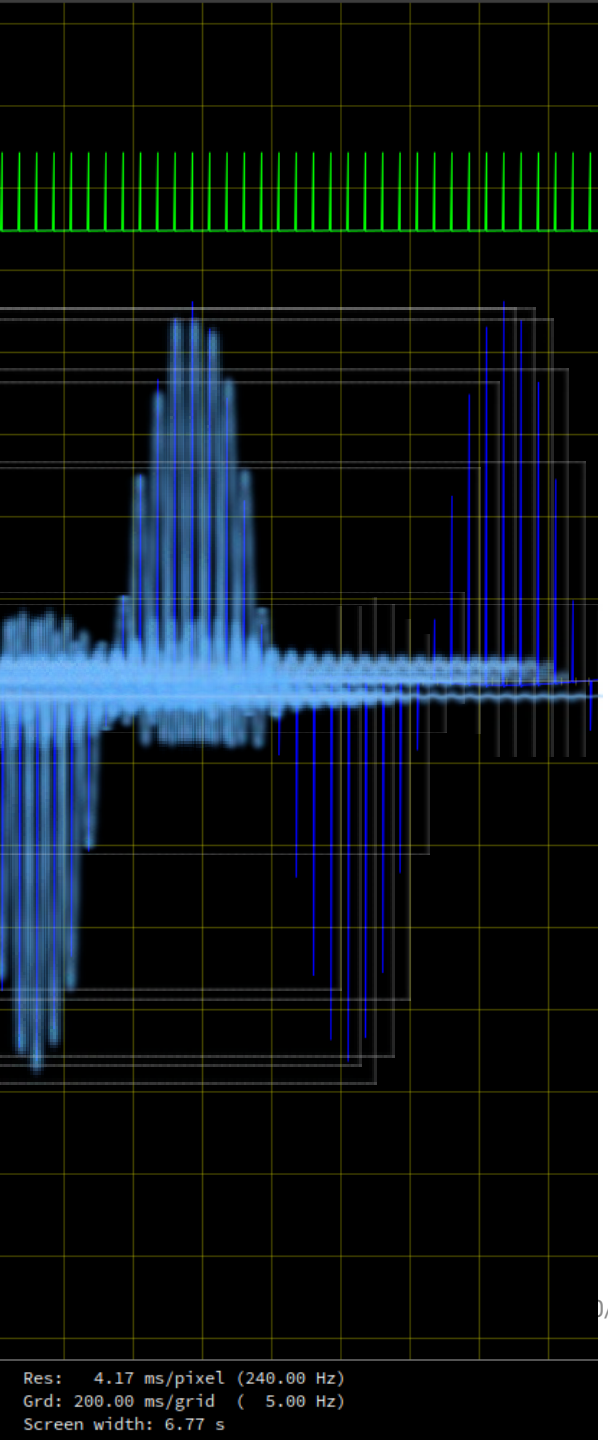


Diese Kurve ist f(x) = sin x / x, man nennt sie auch die *sinc-Funktion*.

Das nennt man *sinc-Interpolation*.

Klingt ungefähr so: [Demo]

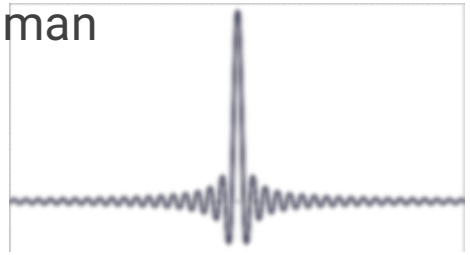
vdt
Verband Deutscher Tonmeister e.V.



Rekonstruktion

Rekonstruktionsstrategie Nr. 3

Die *sinc-Interpolation* ist perfekt.
Man kriegt sie in der Praxis nicht 100%ig hin, weil die Funktion unendlich lang ist, aber man kann den Job beliebig gut machen.



Das heißt: die Abtastrate beeinflusst
einzig und allein
die *Bandbreite* des Signals, nicht die Klangqualität.

Wir hören von 20 bis 20.000 Hertz.
Das sind 10 Oktaven oder 1,43 Klaviere.

48 kHz ist gut genug, 96 kHz macht die Tiefpassfilter einfacher, kostet aber doppelt so viel Platz und Rechenleistung.

Schall für den Menschen noch höher abzutasten ist Unsinn.

vdt
Verband Deutscher Tonmeister e.V.

Ist digital besser?

Verband Deutscher Tonmeister e.V.

Digitale Signalketten sind nur so gut wie ihre Abtaster.

- Die *sample rate* begrenzt die *Bandbreite* (= darstellbarer Frequenzbereich)
- Die *Bit-Tiefe* begrenzt die Dynamik (= darstellbarer Lautstärkebereich)

  Digitale Medien kennen keine untere Grenzfrequenz. An der oberen Grenzfrequenz treten sehr plötzlich extreme Signalverzerrungen auf (aliasing).
  Ansonsten hat das Medium einen *linearen Frequenzgang,* d. h. es gibt keine *Verfärbungen*.

  Am unteren Rand der Dynamik verschwindet das Nutzsignal plötzlich im Rauschen (kann durch *dithering* abgemildert werden).

  Am oberen Rand der Dynamik treten plötzliche extreme *Verzerrungen* auf.
- Jede digitale Kopie ist perfekt. Rauschen durch Rundungsfehler kann durch höhere Bit-Tiefen im Signalprozessor vermieden werden.

Ist digital besser?

Digitale Signalketten sind nur so gut wie ihre Abtaster.

- Die *sample rate* begrenzt die *Bandbreite* (= darstellbarer Frequenzbereich)
- Die *Bit-Tiefe* begrenzt die Dynamik (= darstellbarer Lautstärkebereich)

  Digitale Medien kennen keine untere Grenzfrequenz. An der oberen Grenzfrequenz treten sehr plötzlich extreme Signalverzerrungen auf (aliasing).
  Ansonsten hat das Medium einen *linearen Frequenzgang,* d. h. es gibt keine *Verfärbungen*.

  Am unteren Rand der Dynamik verschwindet das Nutzsignal **plötzlich** im Rauschen (kann durch *dithering* abgemildert werden).

  Am oberen Rand der Dynamik treten **plötzliche** extreme *Verzerrungen* auf.
- Jede digitale Kopie ist perfekt. Rauschen durch Rundungsfehler kann durch höhere Bit-Tiefen im Signalprozessor vermieden werden.

Ist analog besser?

Analoge Medien bilden Signale im Prinzip sehr gut ab, sind aber in der Praxis nicht perfekt:

- Sie haben eine begrenzte *Bandbreite* (= darstellbarer Frequenzbereich)
- Sie haben eine begrenzte Dynamik (= darstellbarer Lautstärkebereich)

  Zu den Rändern der Bandbreite fällt das Nutzsignal **langsam** ab. Dazwischen hat das Medium idealerweise einen *linearen Frequenzgang,* d. h. es gibt keine *Verfärbungen*.

  Am unteren Rand der Dynamik taucht das Nutzsignal **langsam** im *Rauschen* unter.

  Am oberen Rand der Dynamik treten **langsam** *Verzerrungen* auf.
- Bei jeder Kopie addieren sich die Fehler: das Rauschen nimmt zu, und die Bandbreite nimmt ab.

Rückblick

Bandbreite (= Frequenzumfang), Dynamik (= Lautstärkeumfang)

analog (= “im Verhältnis”): zeitkontinuierlich + wertekontinuierlich

digital (= “mit den Fingern”): zeitdiskret + wertediskret

Bits = Finger

Abtastung (= sampling), Unterabtastung (= aliasing)

Quantisierung = Rundung = Fehler = Rauschen

sample clock > (höchste zu übertragende Frequenz) x 2 (“Nyquist-Frequenz”)

Digitalsignal: Impulsfolge (= pulse train)

Anti-Alias-Filter (ein Tiefpass bei der Nyquist-Frequenz)

Interpolation (Zwischenwerte raten): sample-and-hold, linear, sinc

Fragen?

zurück zu MS-Teams: