

2. Digitale Codierung und Übertragung

2.1 Informationstheoretische Grundlagen

2.2 Verlustfreie universelle Kompression

2.3 Digitalisierung, Digitale Medien



Analoge Signale

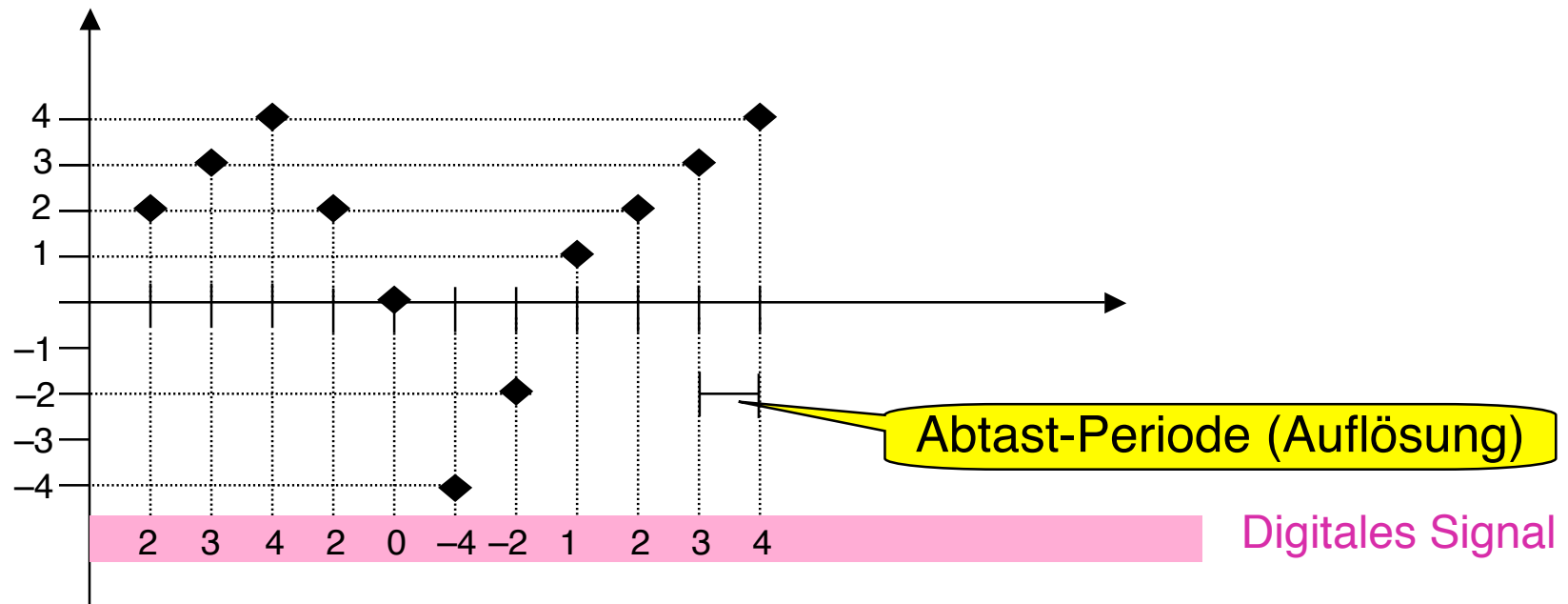
- Ein *Signal* ist die deterministische Änderung einer physikalischen Größe (über Raum und/oder Zeit).
- Ein Signal trägt Information durch Raum und Zeit.
- Im allgemeinen sind physikalische Größen *kontinuierlich* (d.h. durch *stetige* Funktionen darstellbar).
 - Extreme Bereiche der Physik (z.B. Quantenphysik) zeigen Ausnahmen von dieser Regel.
- Ein Signal mit kontinuierlichem Verlauf (d.h. das als stetige Funktion modellierbar ist), heißt *analog*.
 - In analogen Signalen sind prinzipiell beliebig genaue Beobachtungen möglich.
 - Analoge Signale sind sehr anfällig gegen Störungen und damit Informationsverluste (z.B. beim Kopieren).

Beispiele analoger Signale

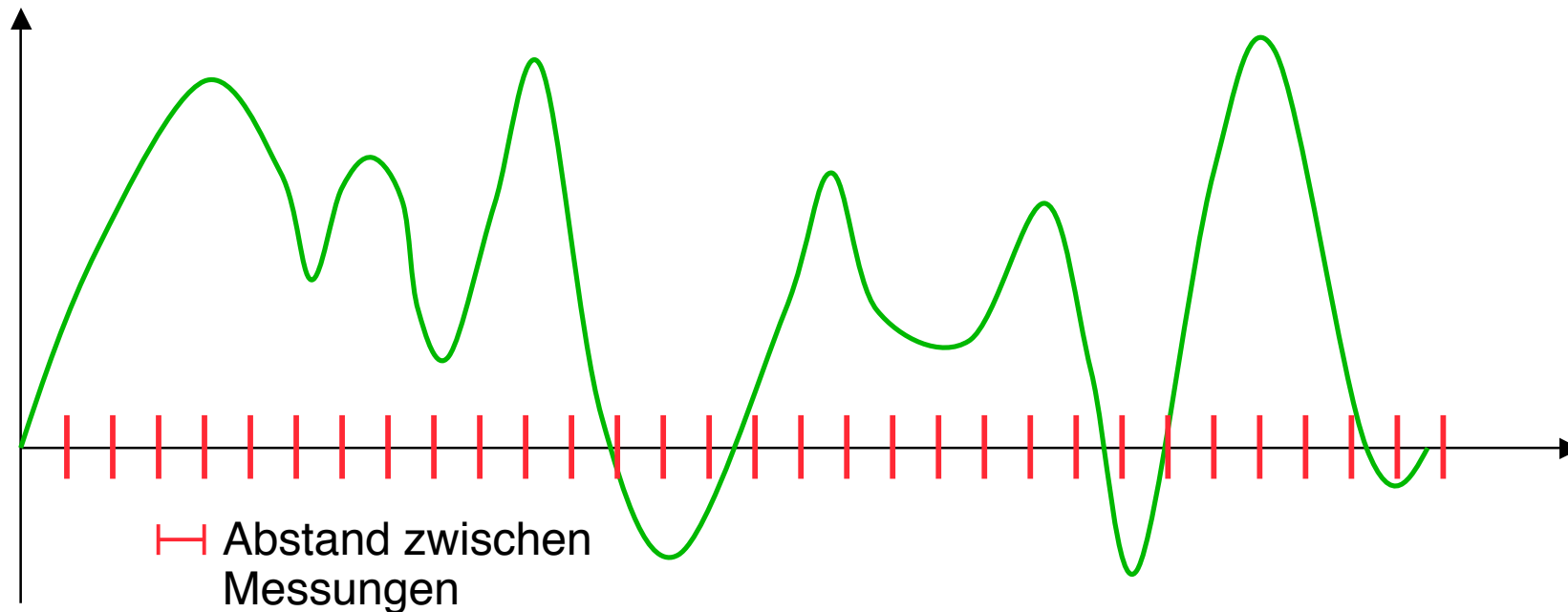
- Helligkeit einer Lichtquelle (Lichtstärke in cd)
 - Farbton einer Lichtquelle
 - Anteil von Licht einer bestimmten Wellenlänge
 - Helligkeit/Farbton von reflektiertem Licht
 - Luftdruck: Schwankungen im Bereich 20 Hz – 20 kHz hörbar
 - Frequenz und Pegel
 - Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung eines Objekts im Raum
 - Drehzahl eines rotierenden Objekts
 - Mechanische Kraft
 - Elektrische Spannung, elektrischer Strom
 - Elektrischer Widerstand, elektrische Kapazität
-
- Die digitale Verarbeitung basiert in der Regel auf analogen Signalen elektrischen Stroms, andere Signalarten werden umgewandelt
 - Beispiel Mikrophon und Lautsprecher

Digitale Signale

- Ein *digitales* Signal gibt für ein Raster des Raums bzw. der Zeit jeweils *diskrete* Werte aus einem endlichen oder abzählbar unendlichen Wertebereich wieder.
 - Bei digitalen Signalen existiert immer eine festgelegte maximale *Auflösung*, die die Genauigkeit der Wertangabe begrenzt.
- Beispiel:

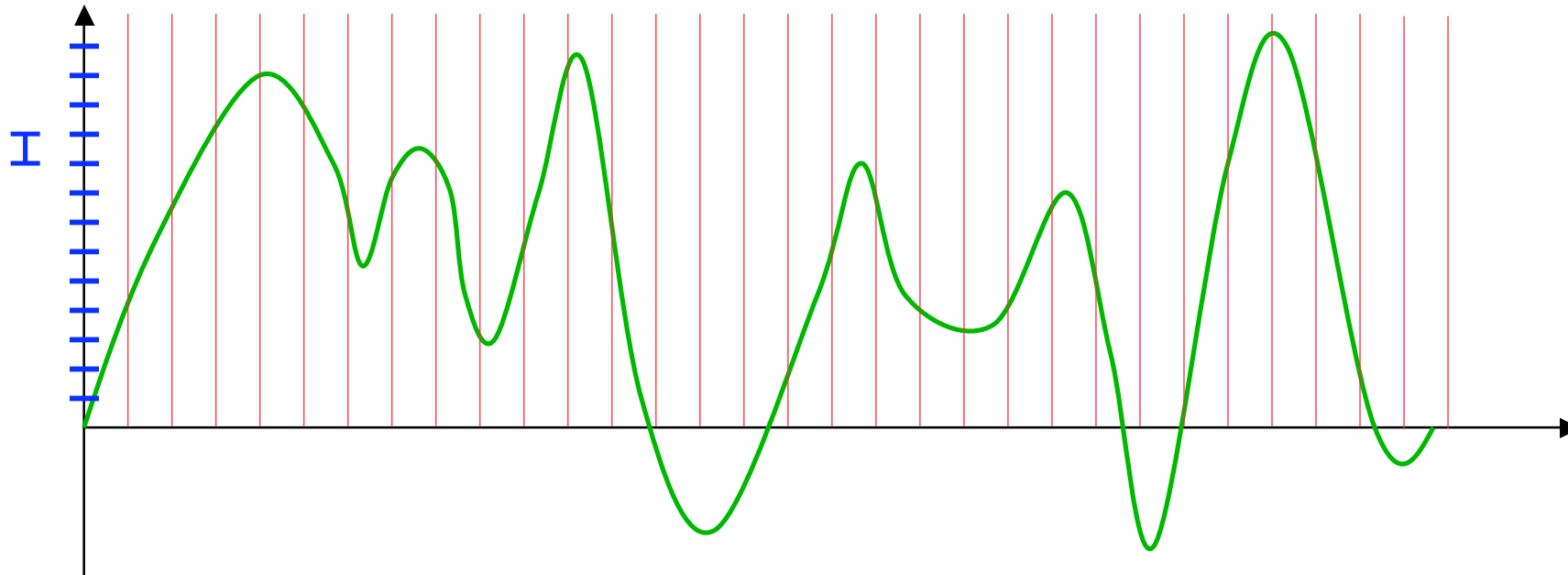


Diskretisierung



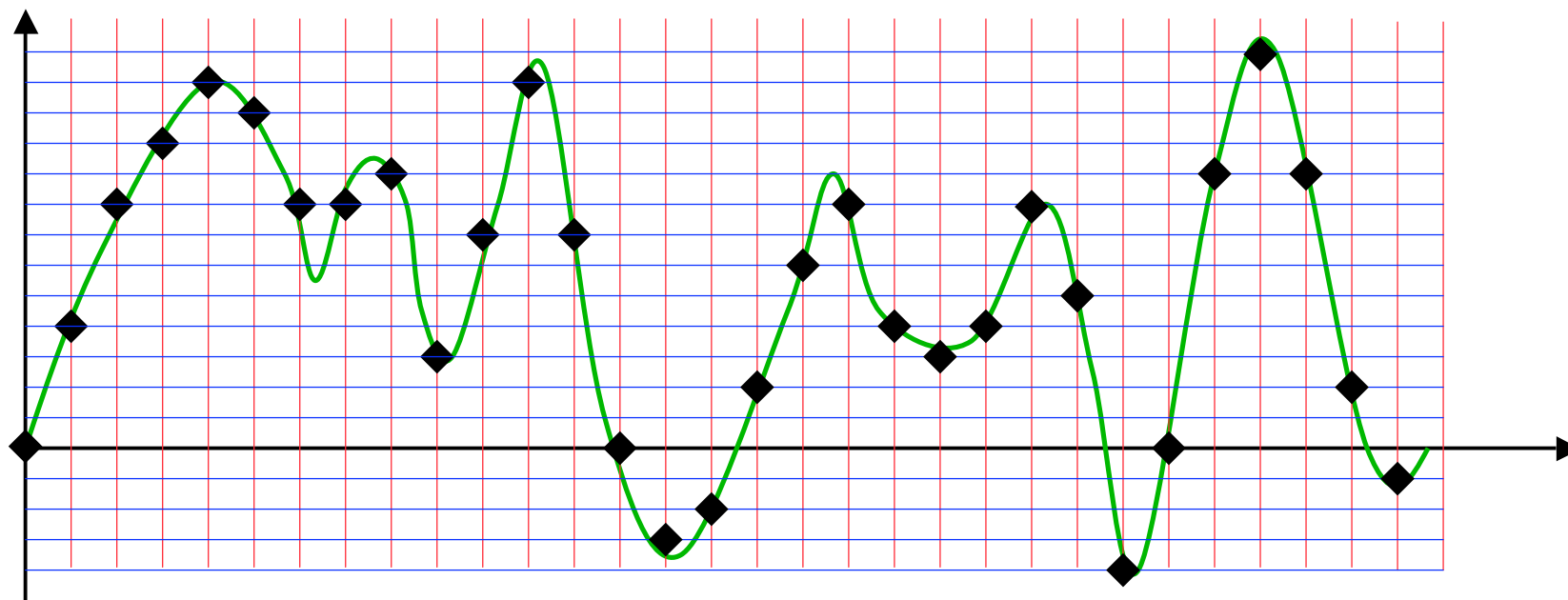
- Bei der *Diskretisierung* wird ein festes Raster von Messpunkten gleichen Abstands auf der Achse festgelegt, über die sich das Signal verändert (z.B. Zeitachse, räumliche Dimension)
- Zu jedem Messpunkt wird der aktuelle Wert des Signals (*Sample*) bestimmt (*Sampling*).

Quantisierung



- Die *Quantisierung* besteht in der Darstellung der Messwerte in einem festen ganzzahligen Wertegeraster (letztlich dargestellt durch Binärzahlen).
- Jeder Messwert (jedes Sample) wird als Wert im Raster abgebildet, entweder direkt durch Messgeräte oder durch Berechnung (z.B. Runden) aus analogen Messungen.

Digitalisierung = Diskretisierung+Quantisierung



- Durch zu grobe Raster bei Diskretisierung und Quantisierung entstehen *Digitalisierungsfehler*.

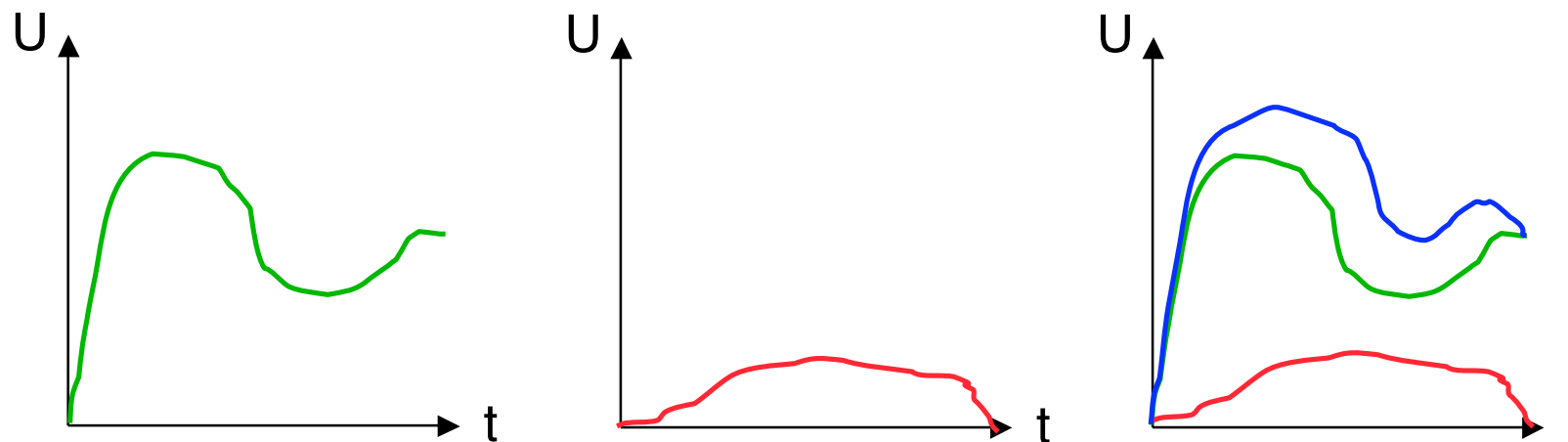
Digitalisierung und Medienarten

- Verschiedene (Repräsentations-)Medien haben verschiedene Arten von x-Achsen für die Signale.
- Auch die Terminologie weicht leicht ab!
- **Audio:**
 - x-Achse = Zeit
 - Genauigkeit der Diskretisierung = "Abtastrate" (*sampling rate*)
 - Genauigkeit der Quantisierung = "Auflösung" (*resolution*)
- **Bild:**
 - Zwei räumliche Achsen (x und y)
 - Genauigkeit der Diskretisierung = "(räumliche) Auflösung" (Dichte der Bildelemente) (Bsp. 300 dots per inch)
 - Genauigkeit der Quantisierung = "Farb- bzw. Grauwertauflösung" (*color resolution*) oder "Farb- bzw. Grauwerttiefe" (z.B. 16 Bit)

Darstellungsdimensionen

- Ein (Einzel-)Medium kann bis zu drei räumliche Dimensionen und eine zeitliche Dimension enthalten:
 - Text: Eine räumliche (oder zeitliche) Dimension
 - Bild: Zwei räumliche Dimensionen
 - Video: Zwei räumliche Dimensionen, eine zeitliche Dimension
 - Raumklang: Drei räumliche Dimensionen, eine zeitliche Dimension
- Begriffe: Raumabhängige und zeitabhängige Medien
- Prinzipiell kann man (unter Erhalt der Information) eine räumliche Dimension in eine zeitliche Dimension umcodieren und umgekehrt (Transformation in Darstellungsräumen).
 - Beispiel: Scrollen (Raumdimension in Zeitdimension umgewandelt)
 - Beispiel: Notenschrift (Zeitdimension in Raumdimension umgewandelt)

Was ist so gut an „digitaler Qualität“? (1)



Analoge Übertragung oder Speicherung:

- Signalfremde Bestandteile (Rauschen) nicht vom Nutzsignal unterscheidbar

— Nutzsignal (z.B. Musik)

— Rauschen

— Gesamtsignal (verfälscht durch Rauschen)

Was ist so gut an „digitaler Qualität“? (2)



Digitale Übertragung oder Speicherung:

- Signalfremde Bestandteile (Rauschen) durch geeignete Codierung vom Nutzsignal trennbar
- Originalsignal ohne Verlust rekonstruierbar

— Nutzsignal (z.B. Musik)

— Rauschen

— Gesamtsignal (verändert, aber nicht verfälscht durch Rauschen)

Vor- und Nachteile digitaler Signale

- Vorteile:
 - Unempfindlichkeit gegen Störungen des unterliegenden Übertragungsmediums (z.B. Einstrahlung von Störfeldern) bzw. Speichermediums (z.B. magnetische Instabilitäten)
 - » Fehler erst ab einem Schwellwert bemerkbar
 - » Zusätzlich Fehlererkennung und -korrektur möglich
 - Verlustfrei kopierbar
 - Viele Signale entstehen bereits in digitaler Form (z.B. Computergrafik)
- Nachteile:
 - Informationsverlust gegenüber einem analogen Original
 - Hoher Speicheraufwand bzw. große benötigte Kanalkapazität
 - Früher: Spezielle Computersysteme notwendig (z.B. schnelle Festplatten)

Digitale Medien

- Ein digitales Medium ist ...
 - eine gezielte Kombination von technischen Medien (aller Typen)
unter Digitalisierung aller (oder vieler) Repräsentationen und
Zwischenrepräsentationen
 - kombiniert mit einer geeigneten rechentechnischen und netztechnischen
Infrastruktur
 - mit dem Ziel der Unterstützung von menschlichen Kommunikationsprozessen,
d.h. der Schaffung und Ergänzung von gesellschaftlichen Medien

Beispiele digitaler Medien

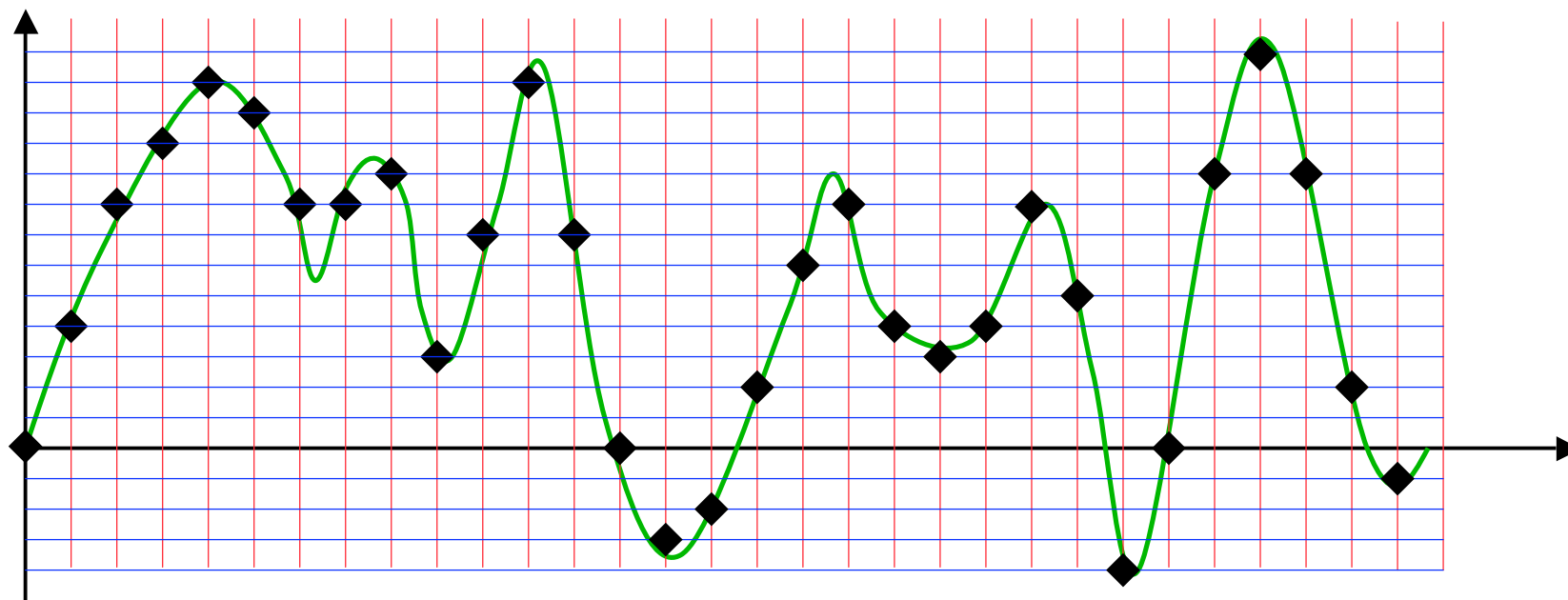
- CD-ROM
- DVD(-Video)
- World Wide Web
 - ... und viele spezielle Dienste darin, z.B. Musik-Verkauf, Bildarchiv
- MMS (Multimedia Messaging auf dem Handy)
- eBook, ePaper

Keine digitalen Medien sind z.B.:

- Klassische Zeitungen und Zeitschriften
 - Aber: Produktion wird immer stärker digitalisiert
- Klassisches (analoges) Festnetz-Telefon (POTS = Plain Old Telephone System)
- Klassischer Rundfunk (im Gegensatz z.B. zu DAB, ADR)

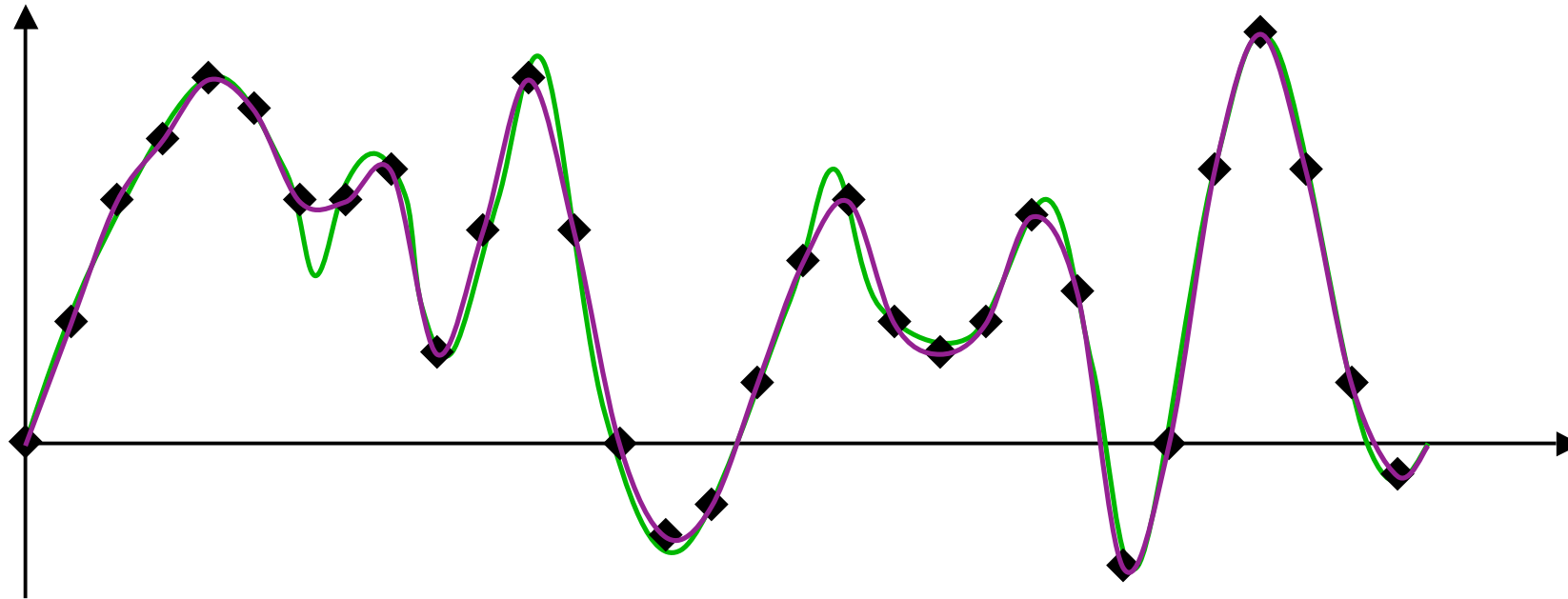
- Der Trend zur Digitalisierung aller Medien ist unverkennbar.

Digitalisierungsfehler (Bsp. von vorher)



- Durch zu grobe Raster bei Diskretisierung und Quantisierung entstehen *Digitalisierungsfehler*.

Digitalisierungsfehler

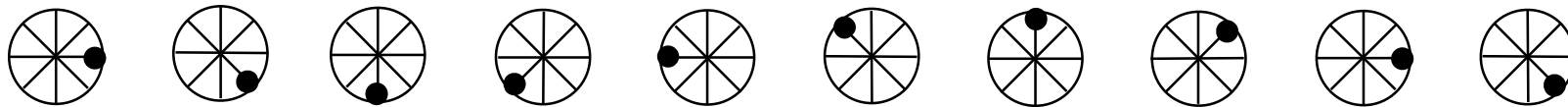


- Fehlerursachen:
 - Zu grobe Quantisierung: Linearer Zusammenhang Fehler/Ursache
 - Zu grobe Diskretisierung, d.h. Fehler in der Abtastrate:
Zusammenhang schwerer zu verstehen; führt zu gravierenden Fehlern!

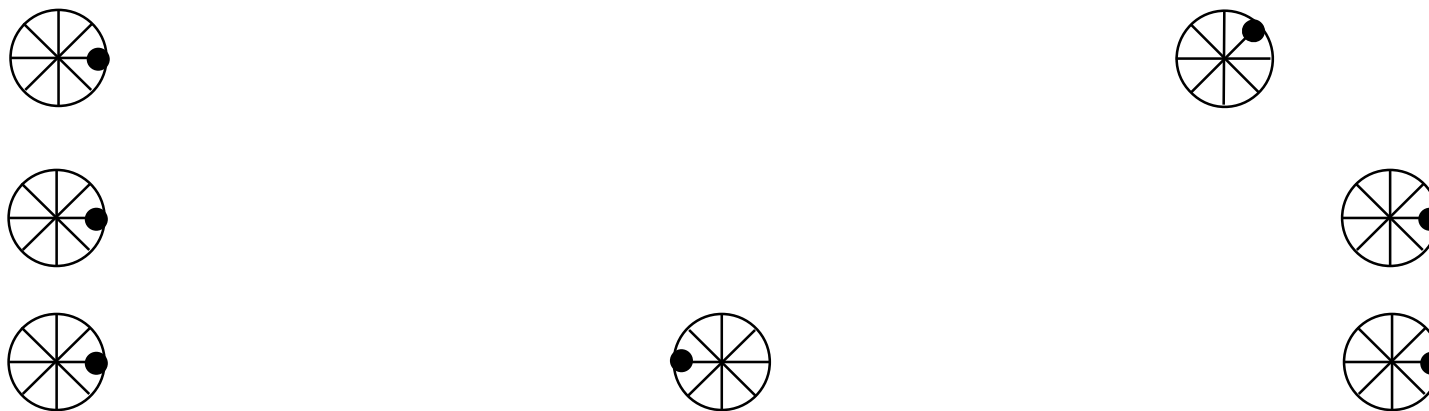
Abtastrate: Einführendes Beispiel

- Warum drehen sich in Kinofilmen die Räder von Zügen oft scheinbar rückwärts?

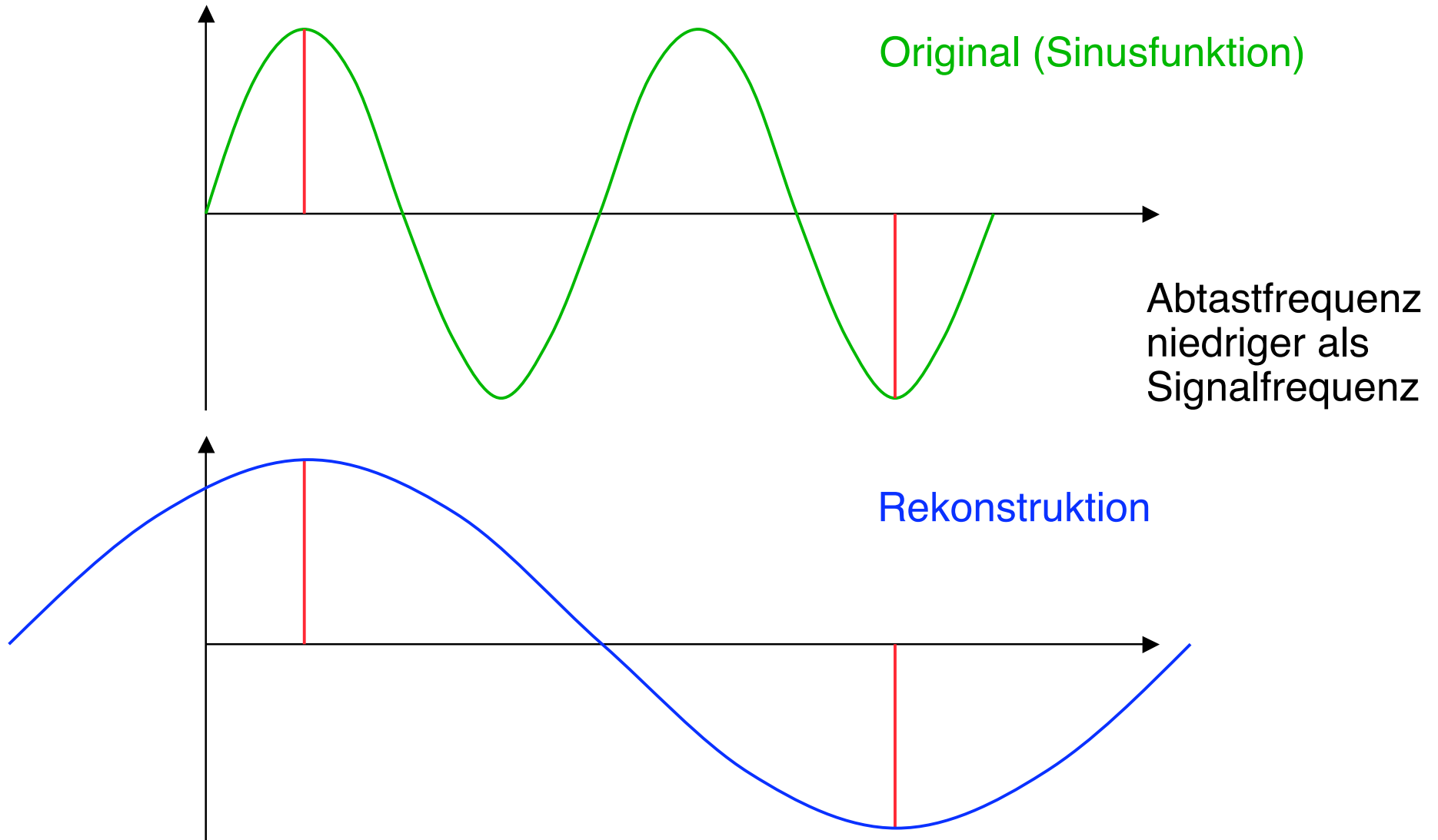
Zugrad (über die Zeit):



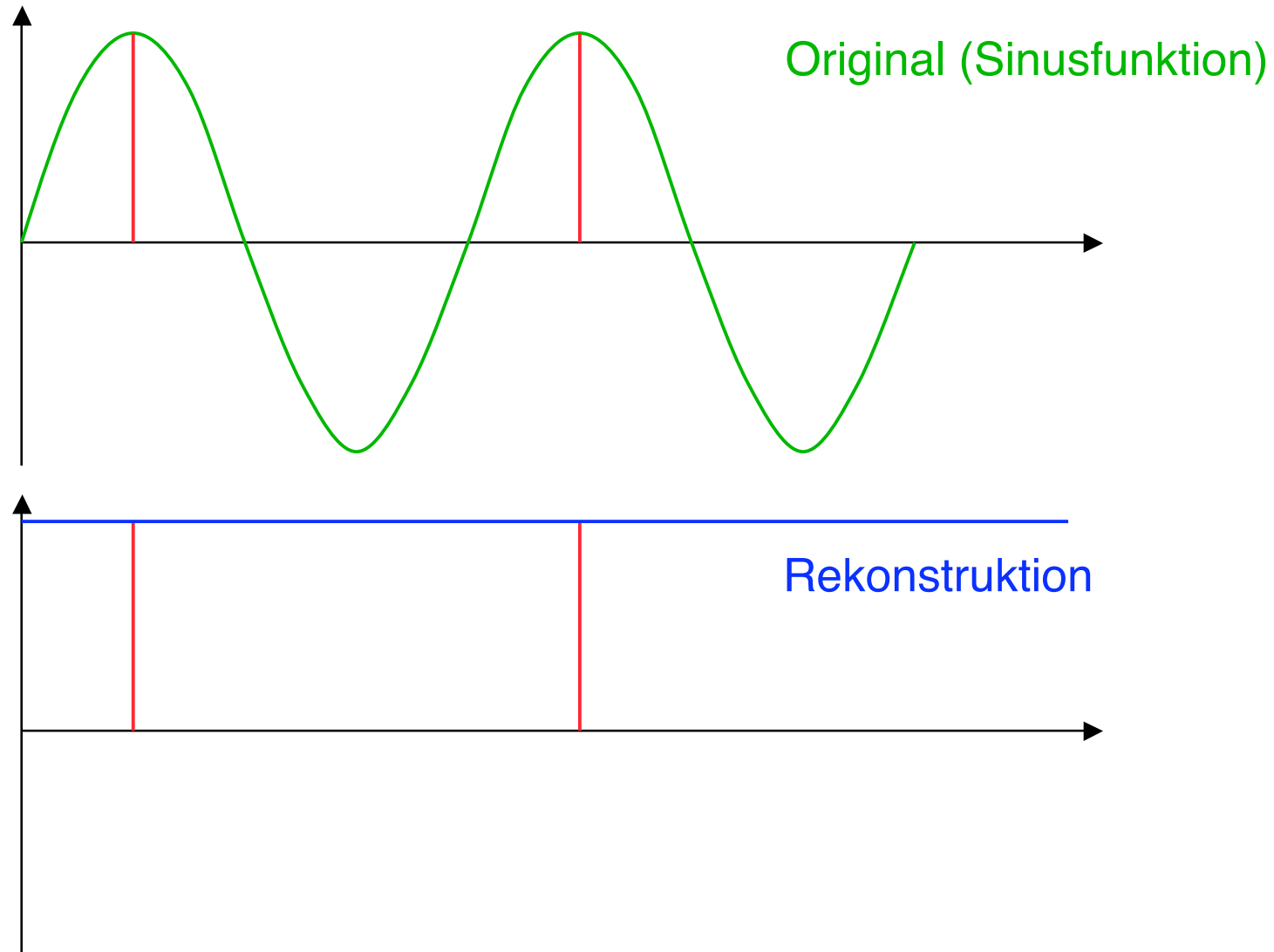
Aufnahmen (über die Zeit):



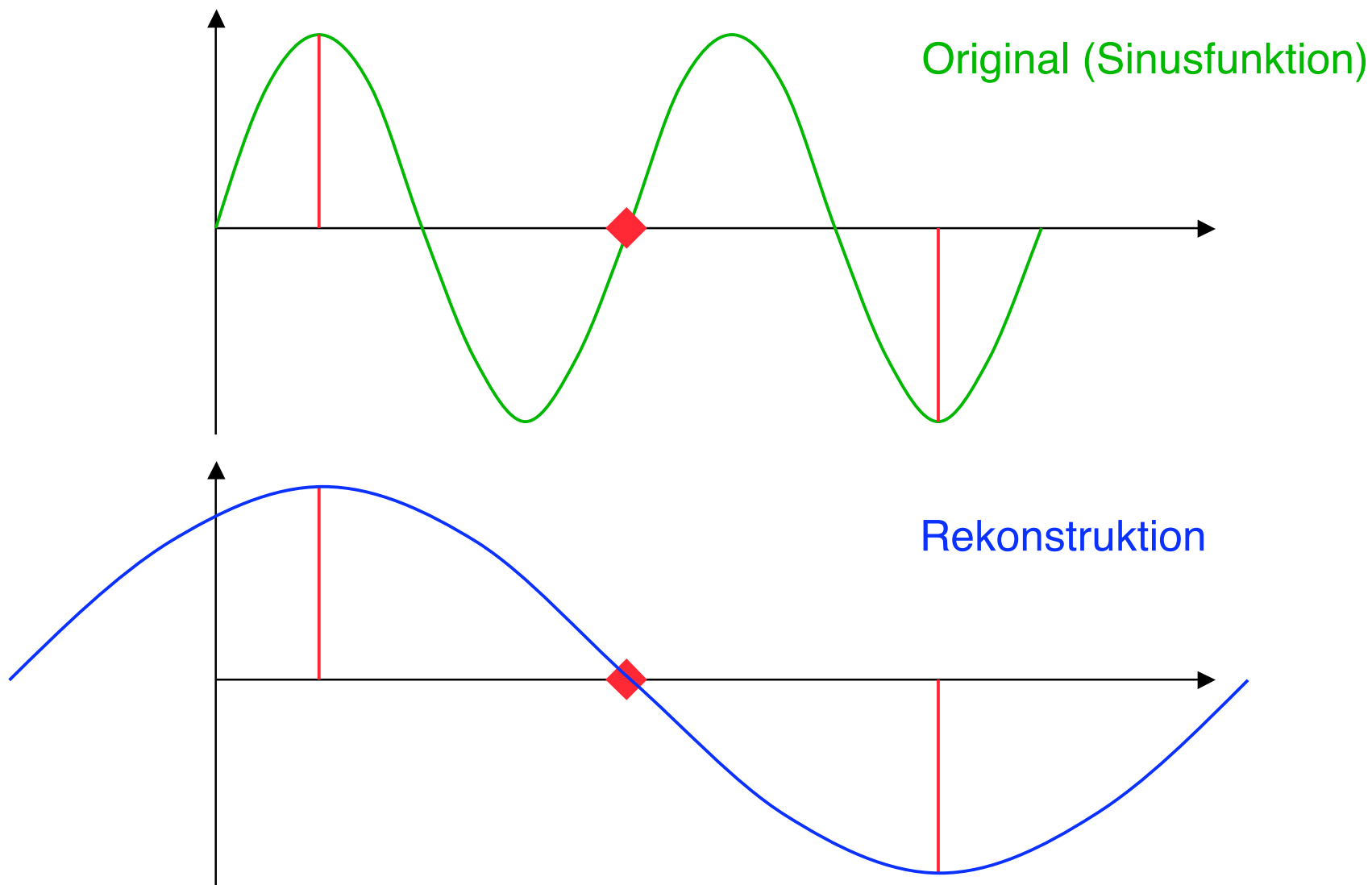
Sehr niedrige Abtastrate



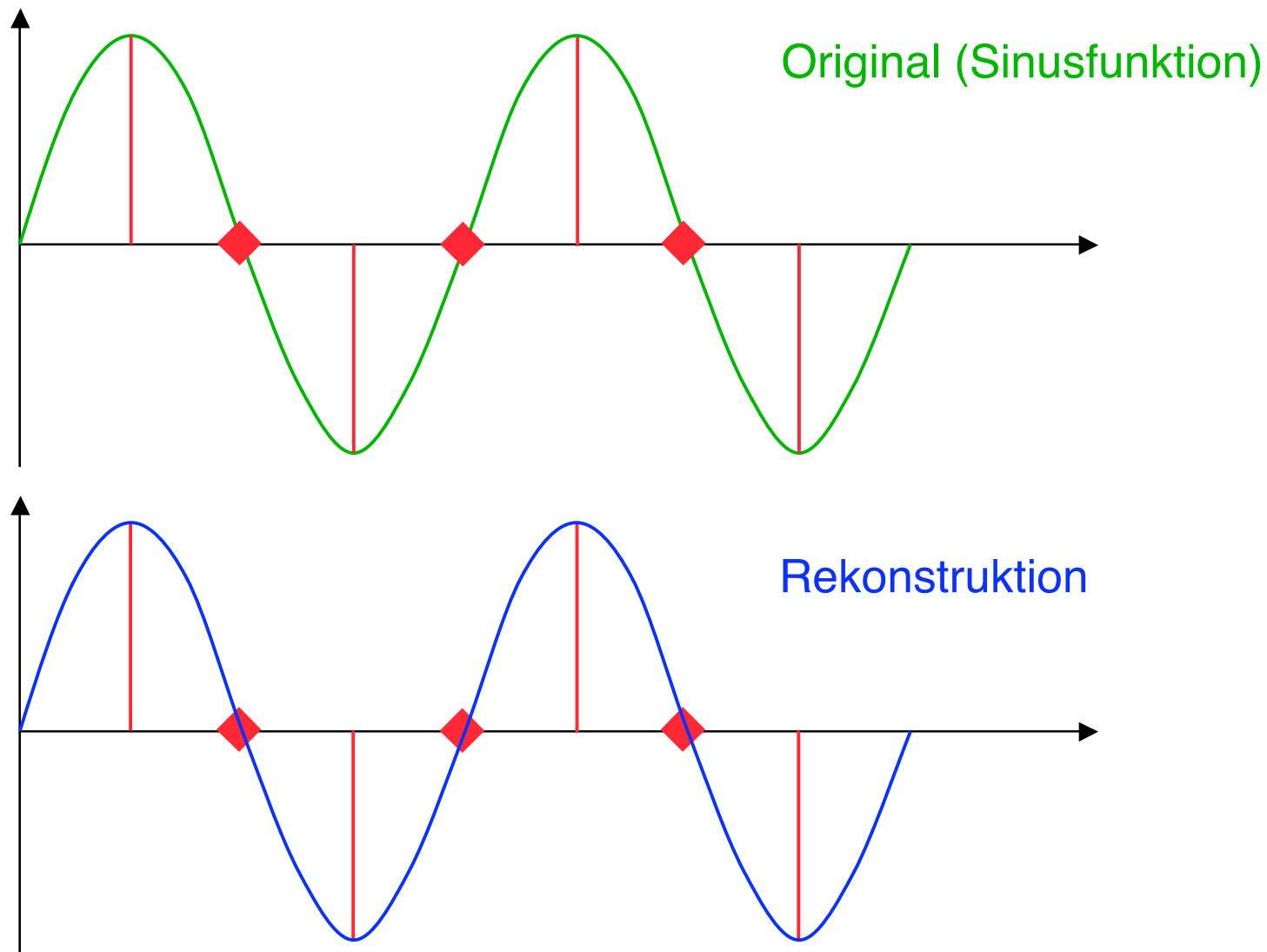
Abtastrate gleich Signalfrequenz



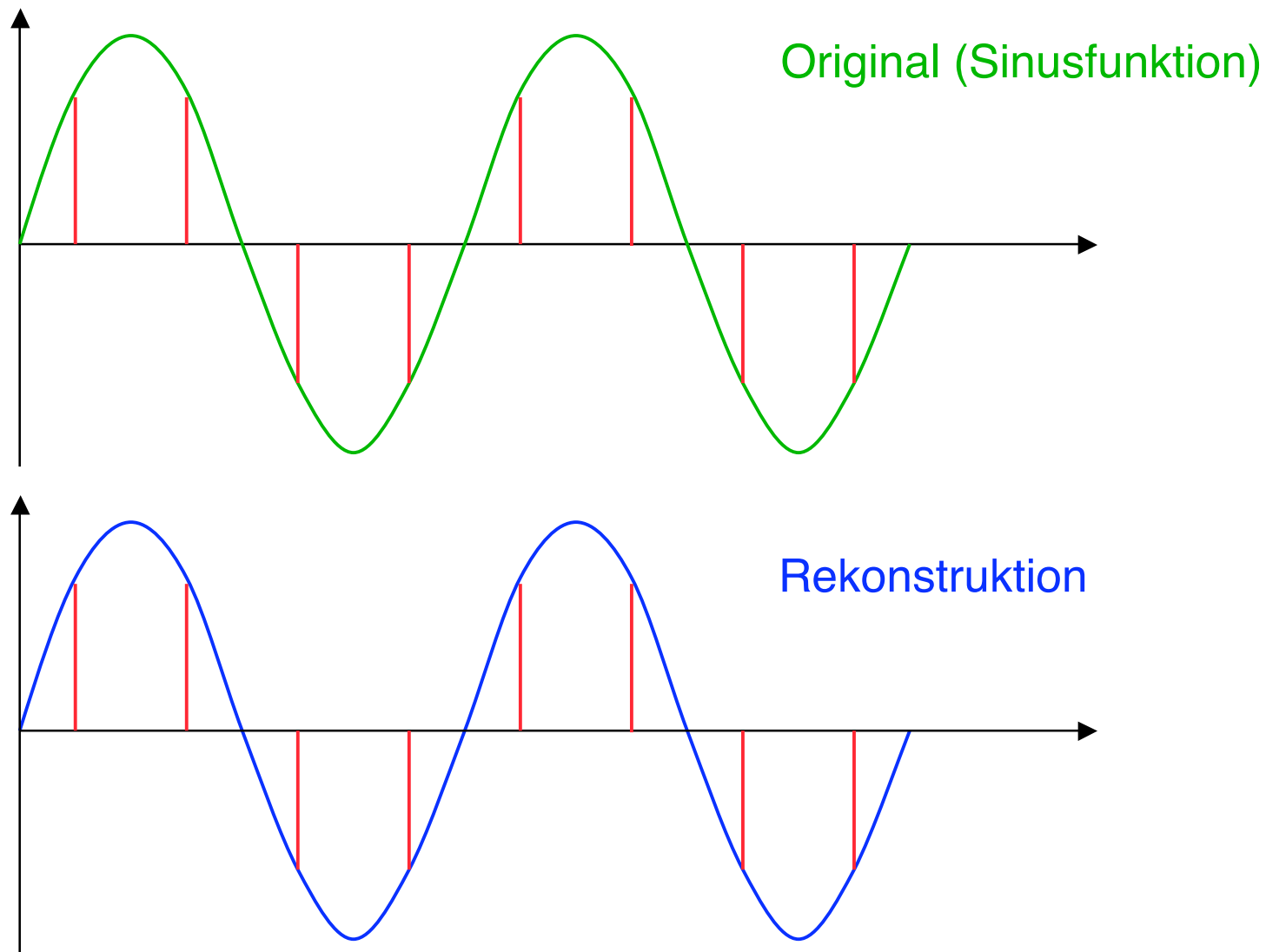
Abtastrate größer als Signalfrequenz



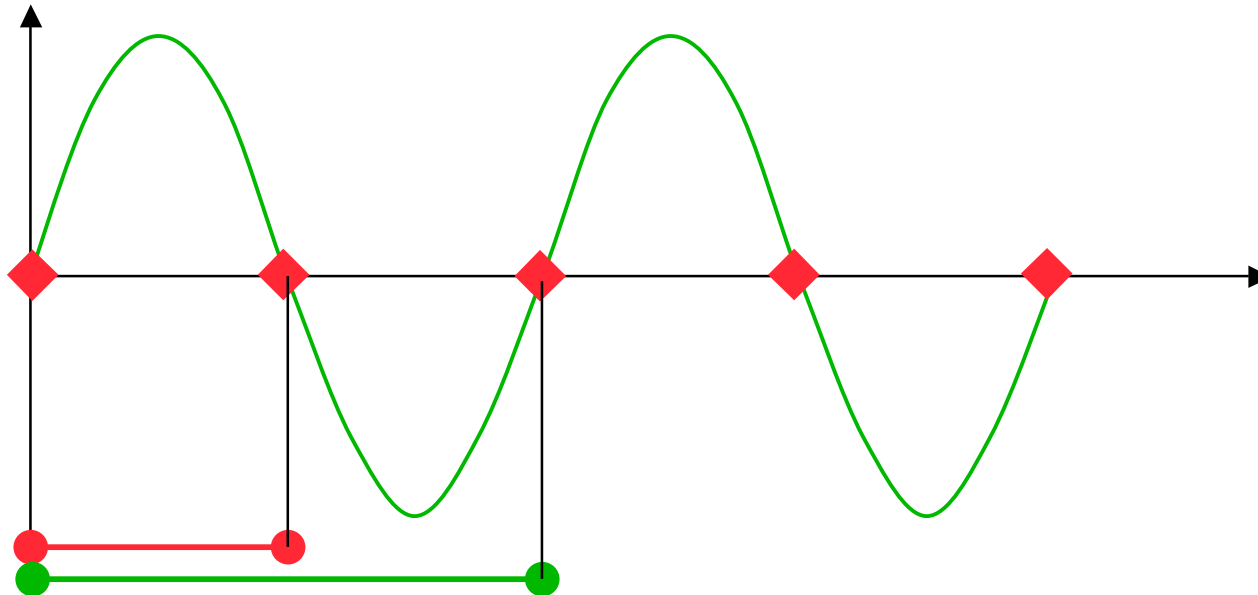
Hohe Abtastrate (1)



Hohe Abtastrate (2)



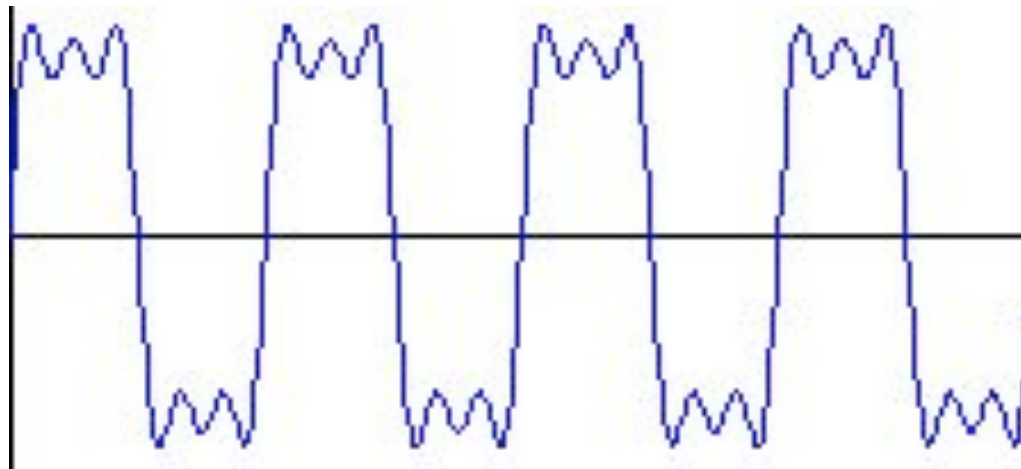
Wie groß muss die Abtastrate sein?



- Bei der doppelten Abtastrate gegenüber einer Sinus-Signalfrequenz ist die Abtastung „noch“ nicht korrekt.
- Mindestabtastung: Mehr als doppelte Frequenz im Vergleich zur Frequenz eines reinen Sinus-Signals

Realistische Beispiele: Bandbegrenzung

- Reale Signale bestehen immer aus einer Überlagerung von Signalanteilen verschiedener Frequenzen
- „Bandbreite“ = Bereich der niedrigsten und höchsten vorkommenden Frequenzen
 - Untere Grenzfrequenz
 - Obere Grenzfrequenz
- Grundfrequenz = Frequenz der Wiederholung des Gesamtsignals



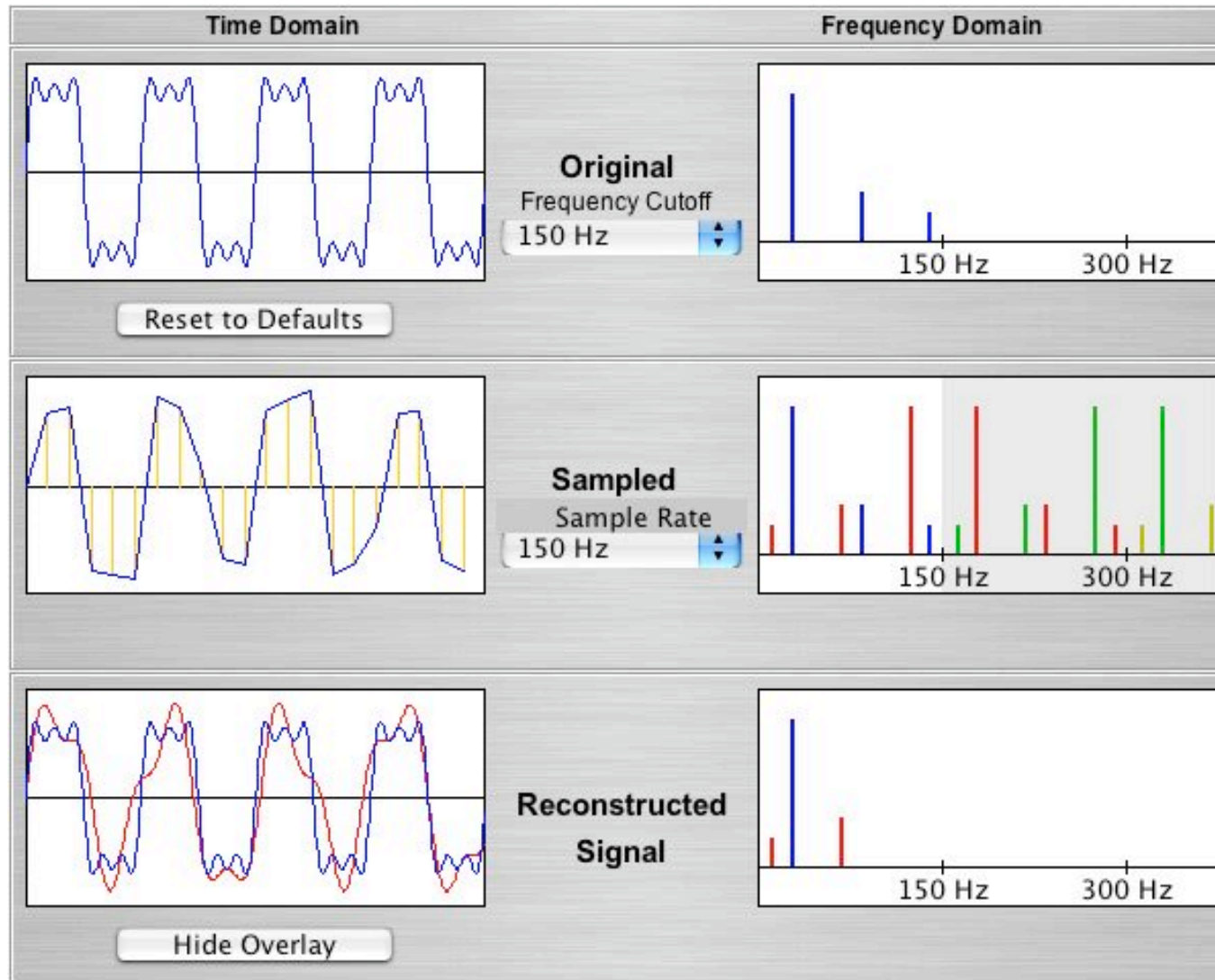
Beispiel:

Überlagerung von Signalen mit 50 Hz (Grundfrequenz), 100 Hz und 150 Hz

Abtasttheorem

- Nach Harry Nyquist (1928) oft auch Nyquist-Theorem genannt. (Beweis von Claude Shannon)
- Wenn eine Funktion
 - mit höchster vorkommender Frequenz f_g (Bandbegrenzung)
 - mit einer Abtastrate f_s abgetastet wird, so dass
$$f_s > 2 \cdot f_g ,$$
 - dann kann die Funktion eindeutig aus den Abtastwerten rekonstruiert werden.
- Praktisches Beispiel:
 - CD-Abtastrate 44,1 kHz

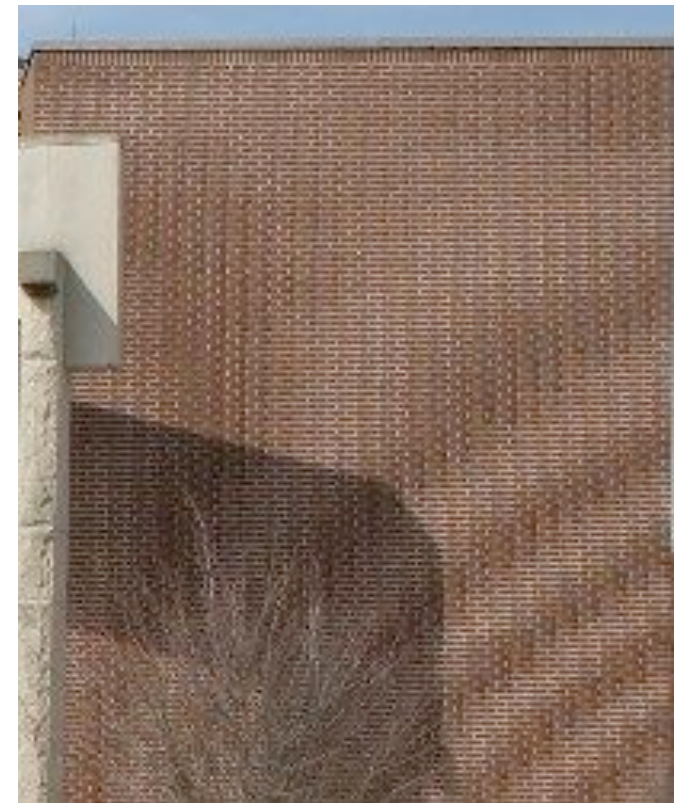
Beispiel zum Abtasttheorem



<http://www2.egr.uh.edu/~glover/applets/Sampling/Sampling.html>

Aliasing

- Zu niedrige Abtastfrequenz
- Hochfrequenter Signalanteil wird unzureichend abgetastet
- Statt des hochfrequenten Signalanteils wird eine niedrigere Frequenz wiedergegeben
- [Audio-Beispiel](#)
- Bild-Beispiel (Moiré-Muster)



Quelle:
Wikipedia

Vermeidung von Aliasing: Filterung

- Vor digitaler Abtastung: Nyquist-Bedingung sicherstellen!
- Wenn höherfrequente Anteile ($\geq 1/2 f_S$) vorhanden,
 - Entfernen!
- Filterung
 - Bei Bildern und Ton anwendbar
- Anwendungsbeispiele:
 - Hochauflösendes Bild soll neu abgetastet werden
 - Signal aus einem Tongenerator soll abgetastet werden (z.B. Sägezahnsignal)

Wie perfekt ist die Rekonstruktion?

- Das Nyquist-Theorem ist ein mathematisches Theorem.
 - **Keinerlei Verlust** bei Rekonstruktion innerhalb der angegebenen Rahmenbedingungen
- Mathematische Rekonstruktion mit „idealem Tiefpass“
 - Siehe später!
- Praktische Rekonstruktion
 - Zum Teil sehr aufwändige Systeme für optimale Anpassung an Wahrnehmungsphysiologie
- Praktisches Beispiel:
 - Vergleich der Klangqualität von CD-Spielern (an der gleichen Stereoanlage)