

# 2. Digitale Codierung und Übertragung

2.1 Informationstheoretische Grundlagen

2.2 Verlustfreie universelle Kompression

2.3 Digitalisierung, Digitale Medien



# Analoge Signale

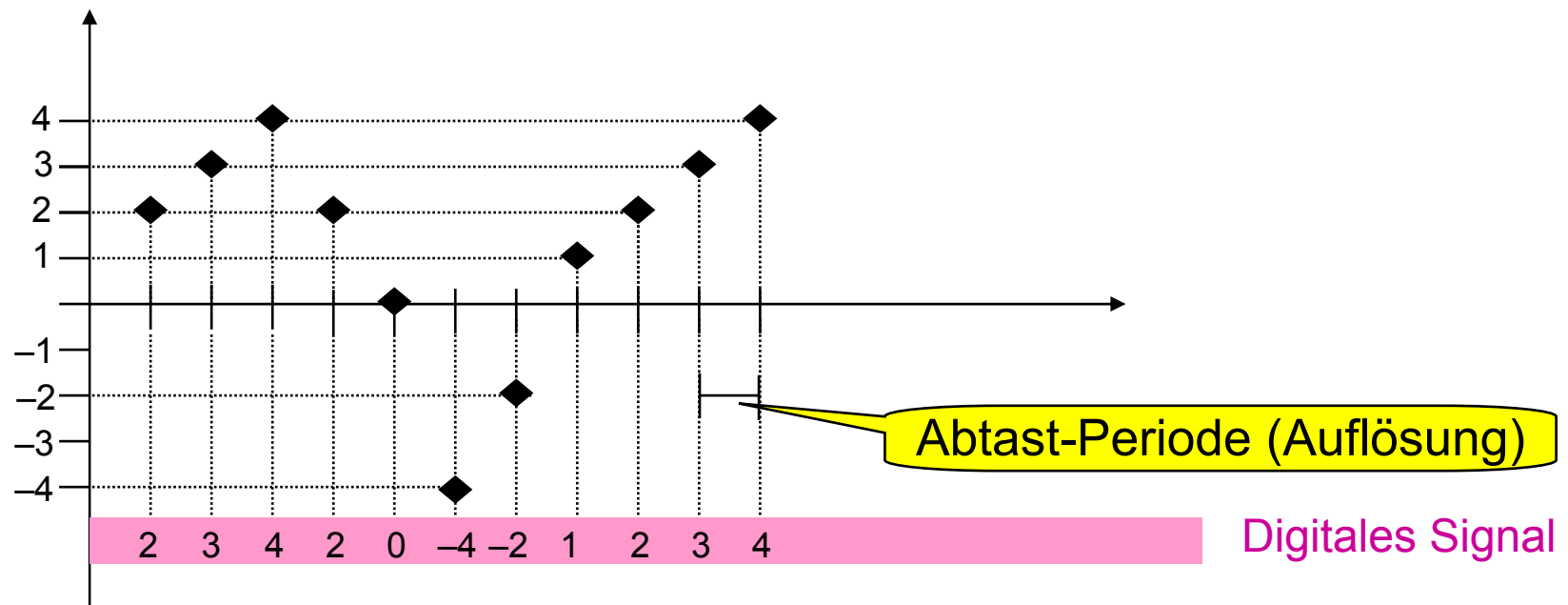
- Ein *Signal* ist die deterministische Änderung einer physikalischen Größe (über Raum und/oder Zeit).
- Ein Signal trägt Information durch Raum und Zeit.
- Im allgemeinen sind physikalische Größen *kontinuierlich* (d.h. durch *stetige* Funktionen darstellbar).
  - Extreme Bereiche der Physik (z.B. Quantenphysik) 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

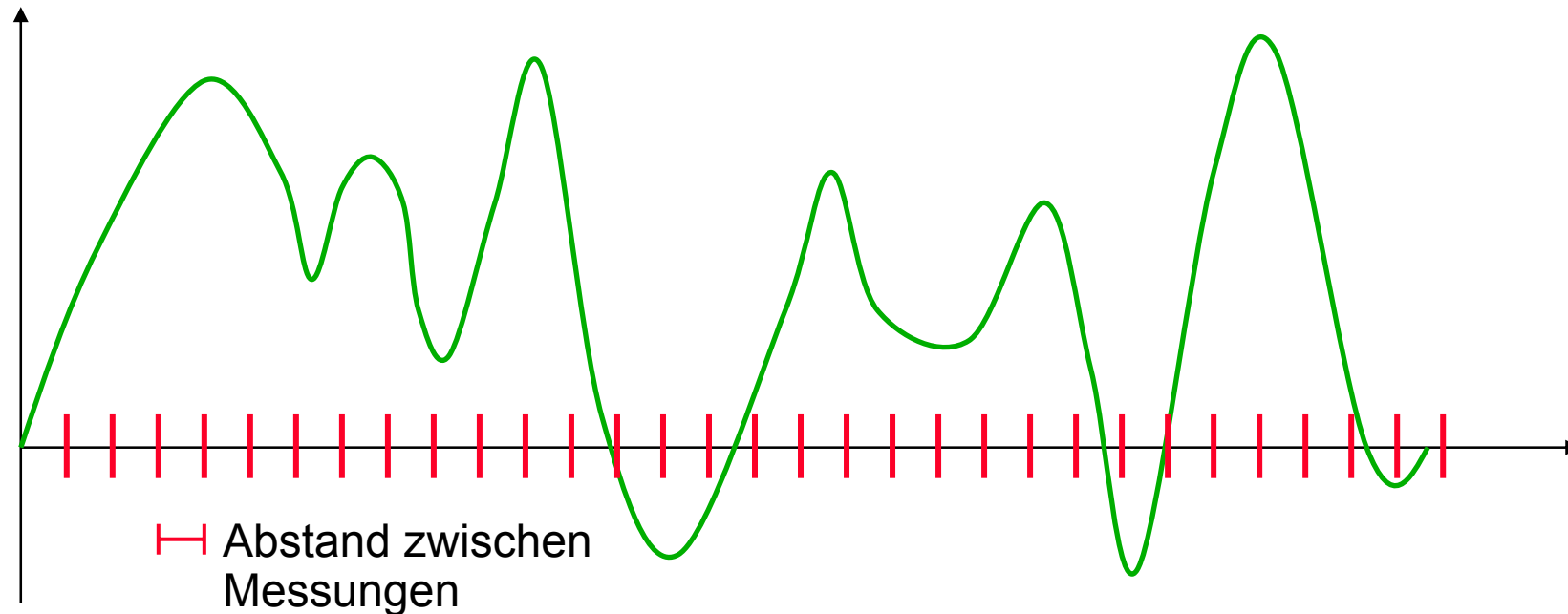
- Helligkeit einer Lichtquelle (Lichtstärke in cd)
- Farbton einer Lichtquelle
  - Anteil von Licht einer bestimmten Wellenlänge
- Helligkeit/Farbton von reflektiertem Licht
- Luftdruck: Schwankungen im Bereich 20 Hz – 20 kHz hörbar
  - Frequenz und Pegel
- Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung eines 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:

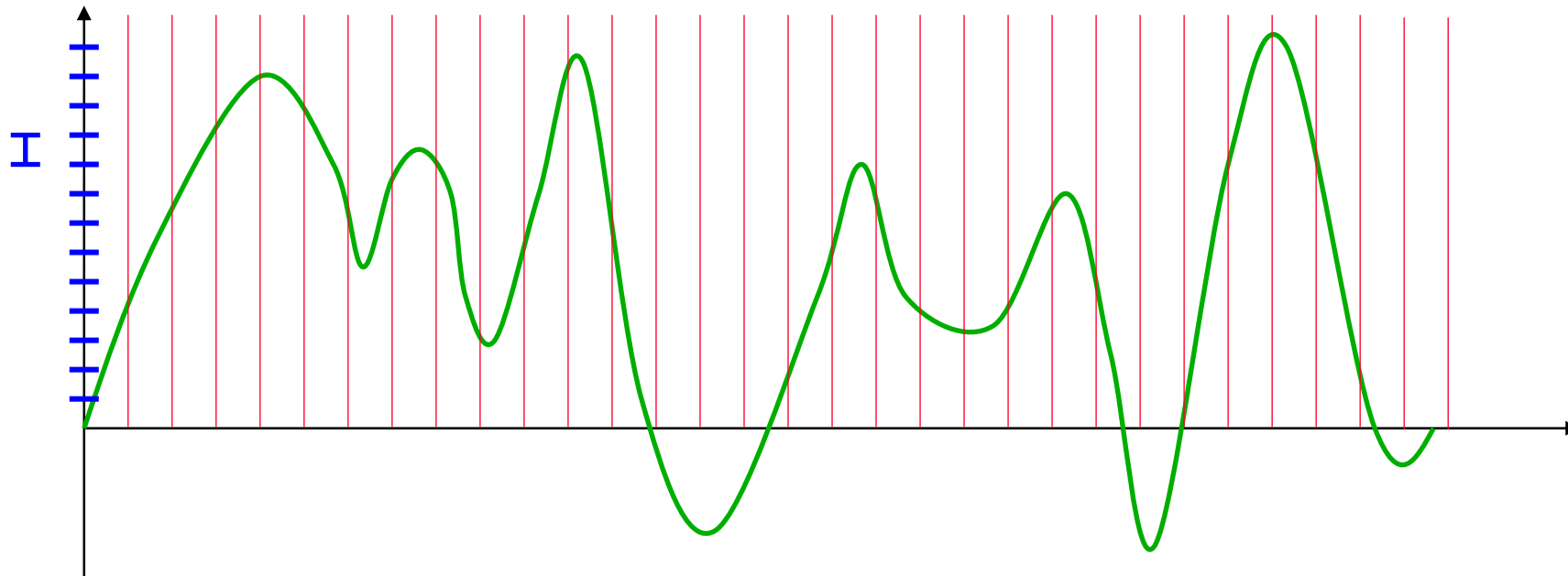


# Diskretisierung



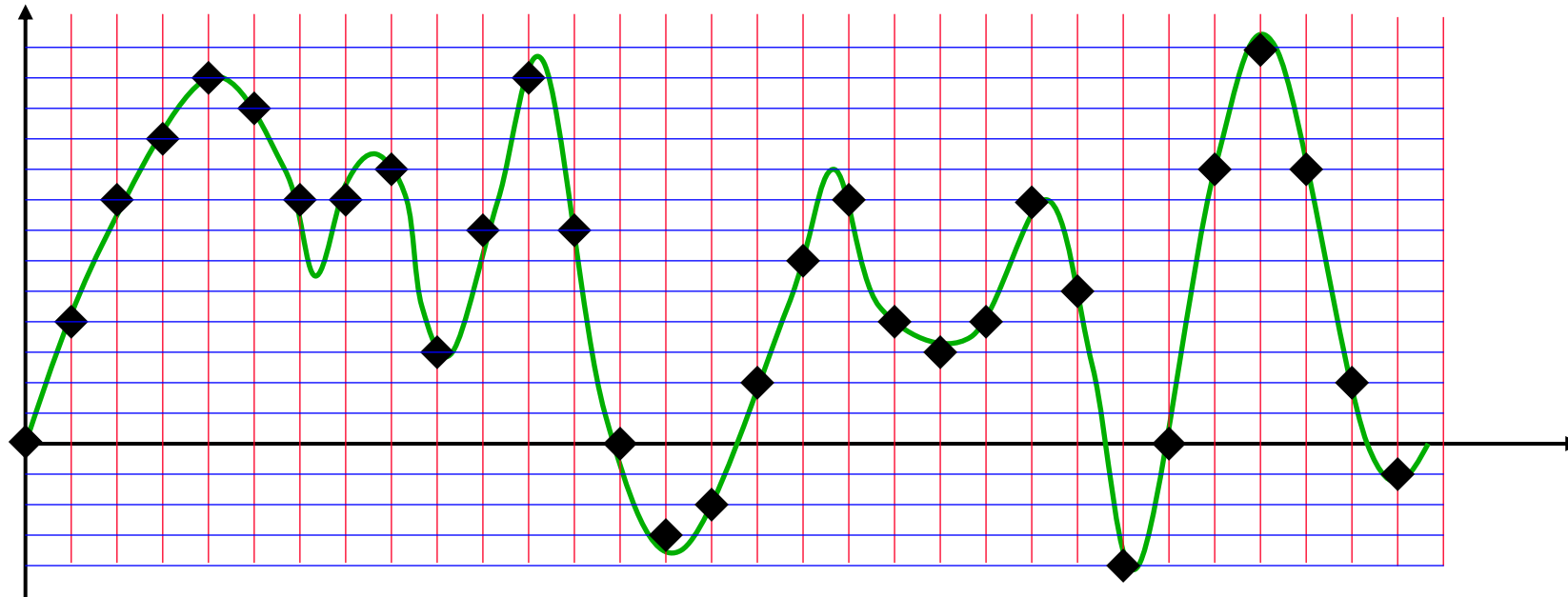
- Bei der *Diskretisierung* wird ein festes Raster von Messpunkten gleichen Abstands auf der Achse festgelegt, über die sich das Signal verändert (z.B. Zeitachse, räumliche Dimension)
- Zu jedem Messpunkt wird der aktuelle Wert des Signals (*Sample*) bestimmt (*Sampling*).

# Quantisierung



- Die *Quantisierung* besteht in der Darstellung der Messwerte in einem festen ganzzahligen Wert raster (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

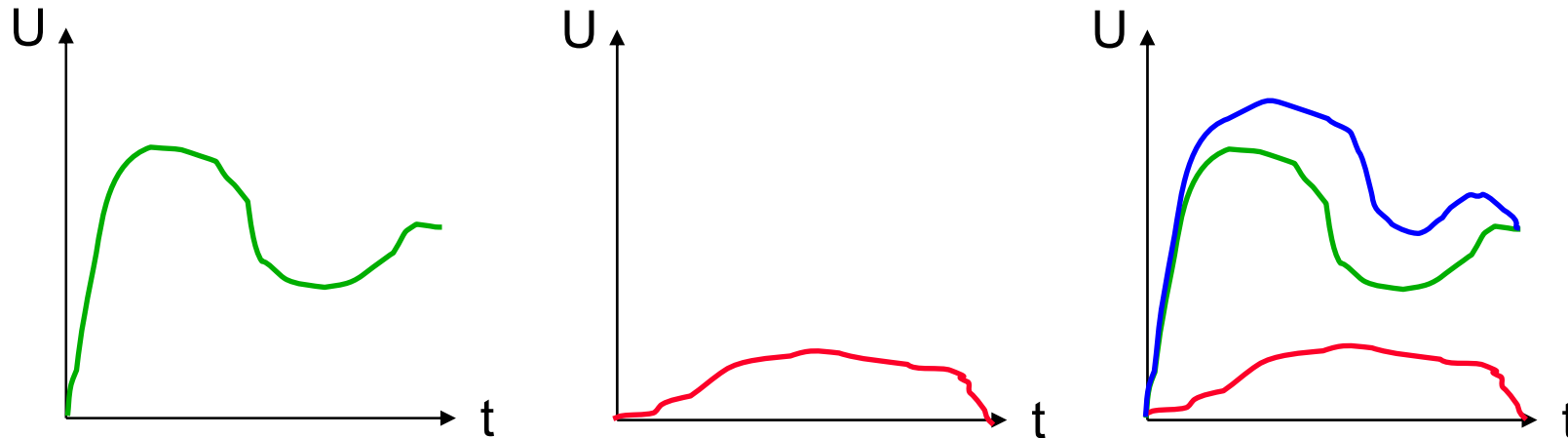
- Verschiedene (Repräsentations-)Medien haben verschiedene Arten von x-Achsen für die Signale.
- Auch die Terminologie weicht leicht ab!
- **Audio:**
  - x-Achse = Zeit
  - Genauigkeit der Diskretisierung = "Abtastrate" (*sampling rate*)
  - Genauigkeit der Quantisierung = "Auflösung" (*resolution*)
- **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:

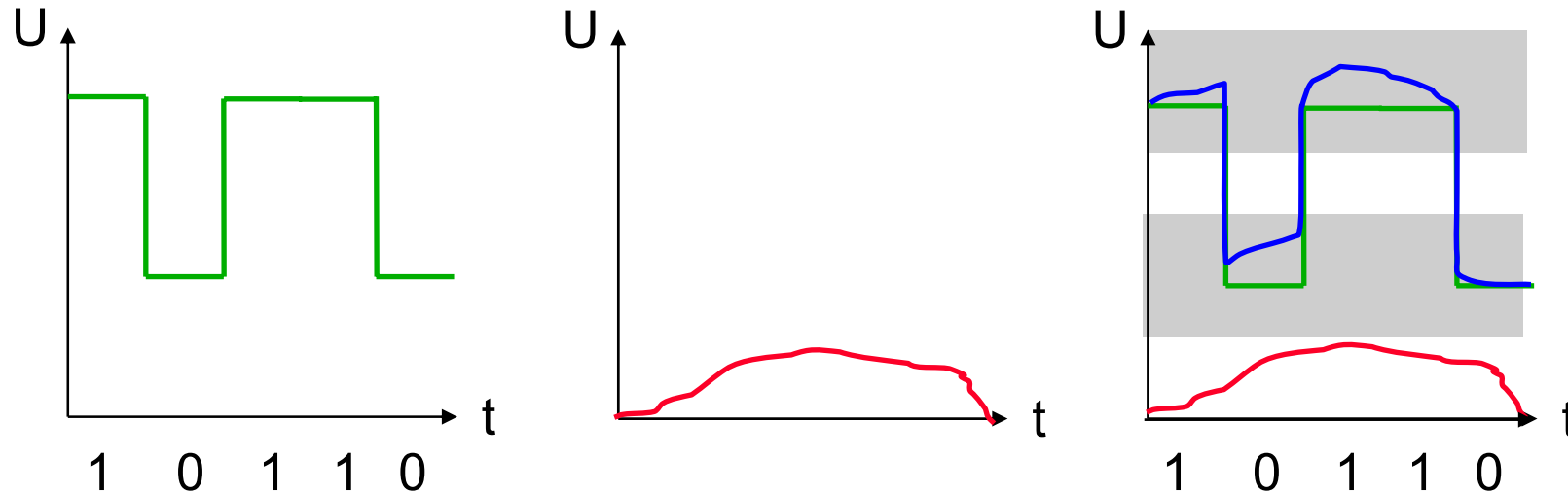
- Signalfremde Bestandteile (Rauschen) nicht vom Nutzsignal unterscheidbar

— 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 (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

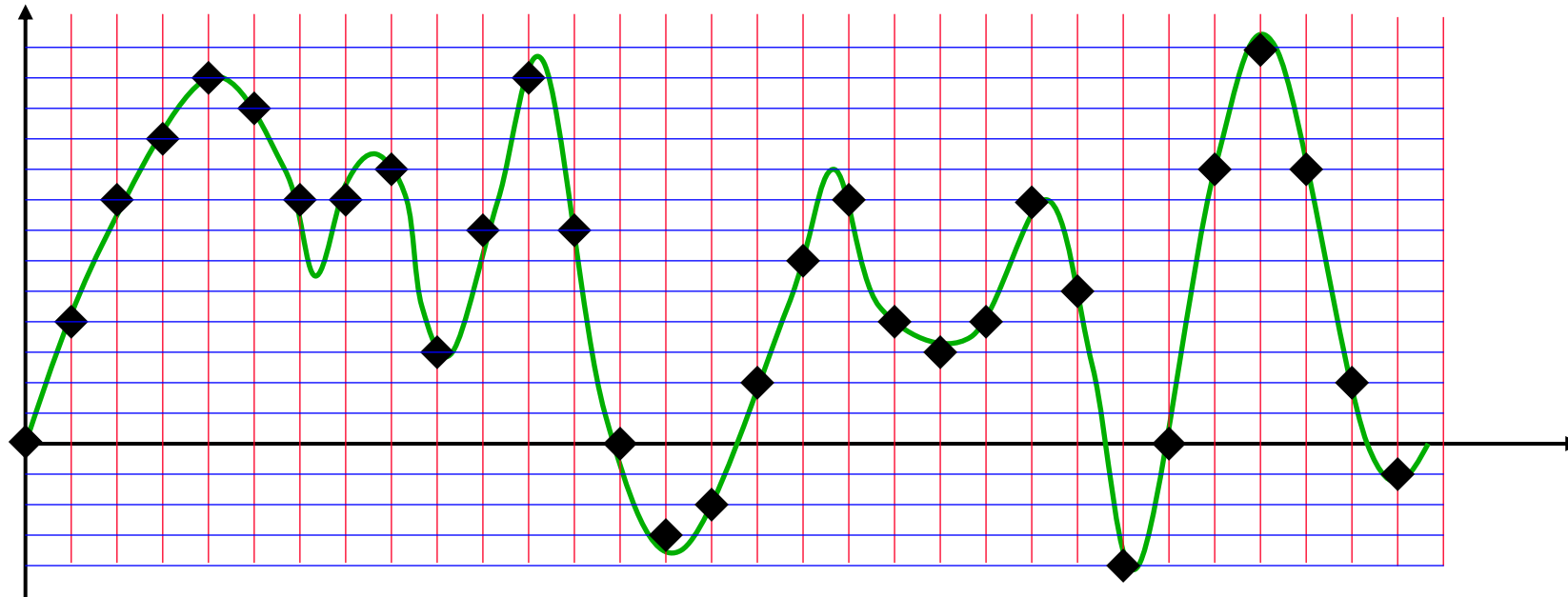
# Beispiele digitaler Medien

- 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.:

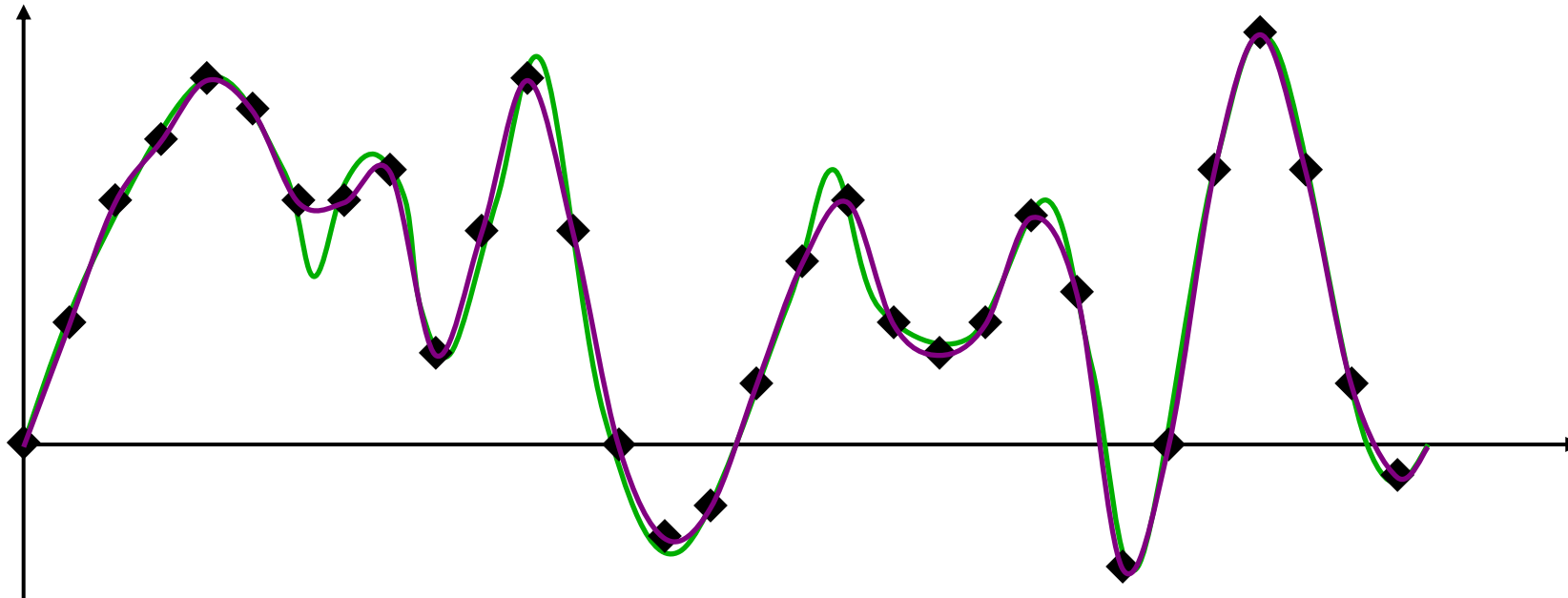
- Klassische Zeitungen und Zeitschriften
  - Aber: Produktion wird immer stärker digitalisiert
- Klassisches (analoges) Festnetz-Telefon (POTS = Plain Old Telephone System)
- Klassischer Rundfunk (im Gegensatz z.B. zu DAB, ADR)
  
- Der Trend zur Digitalisierung aller Medien ist unverkennbar.

# Digitalisierungsfehler (Bsp. von vorher)



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

# Digitalisierungsfehler



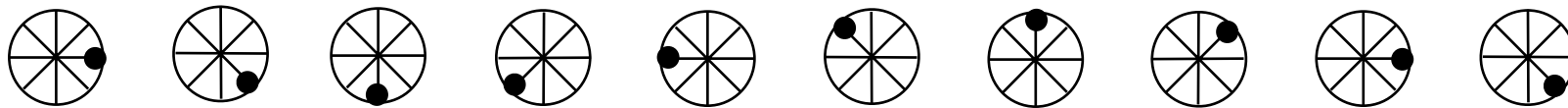
- Fehlerursachen:
  - Zu grobe Quantisierung: Linearer Zusammenhang Fehler/Ursache
  - Zu grobe Diskretisierung, d.h. Fehler in der Abtastrate:  
Zusammenhang schwerer zu verstehen; führt zu gravierenden Fehlern!



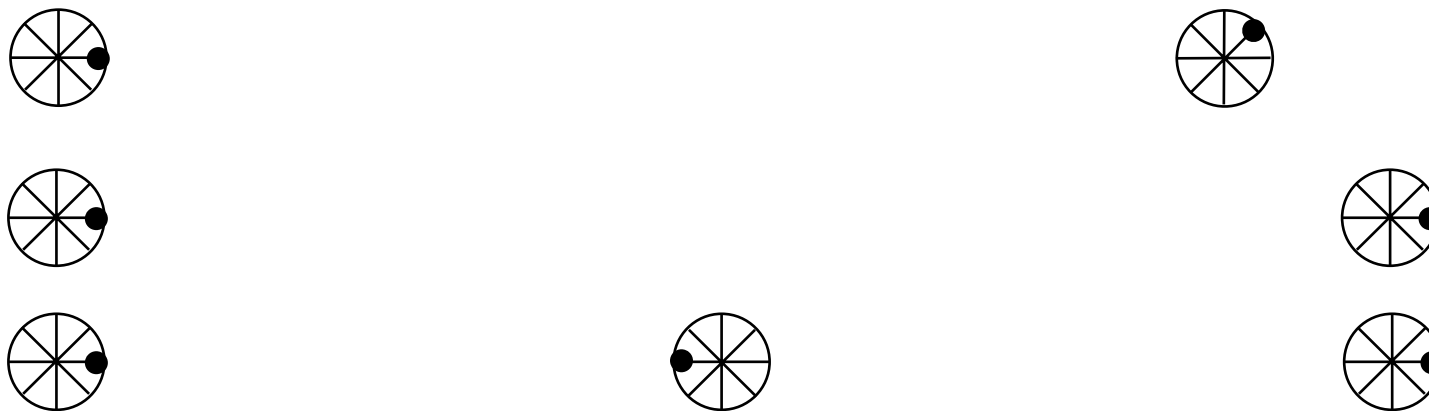
# Abstrakte: Einführendes Beispiel

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

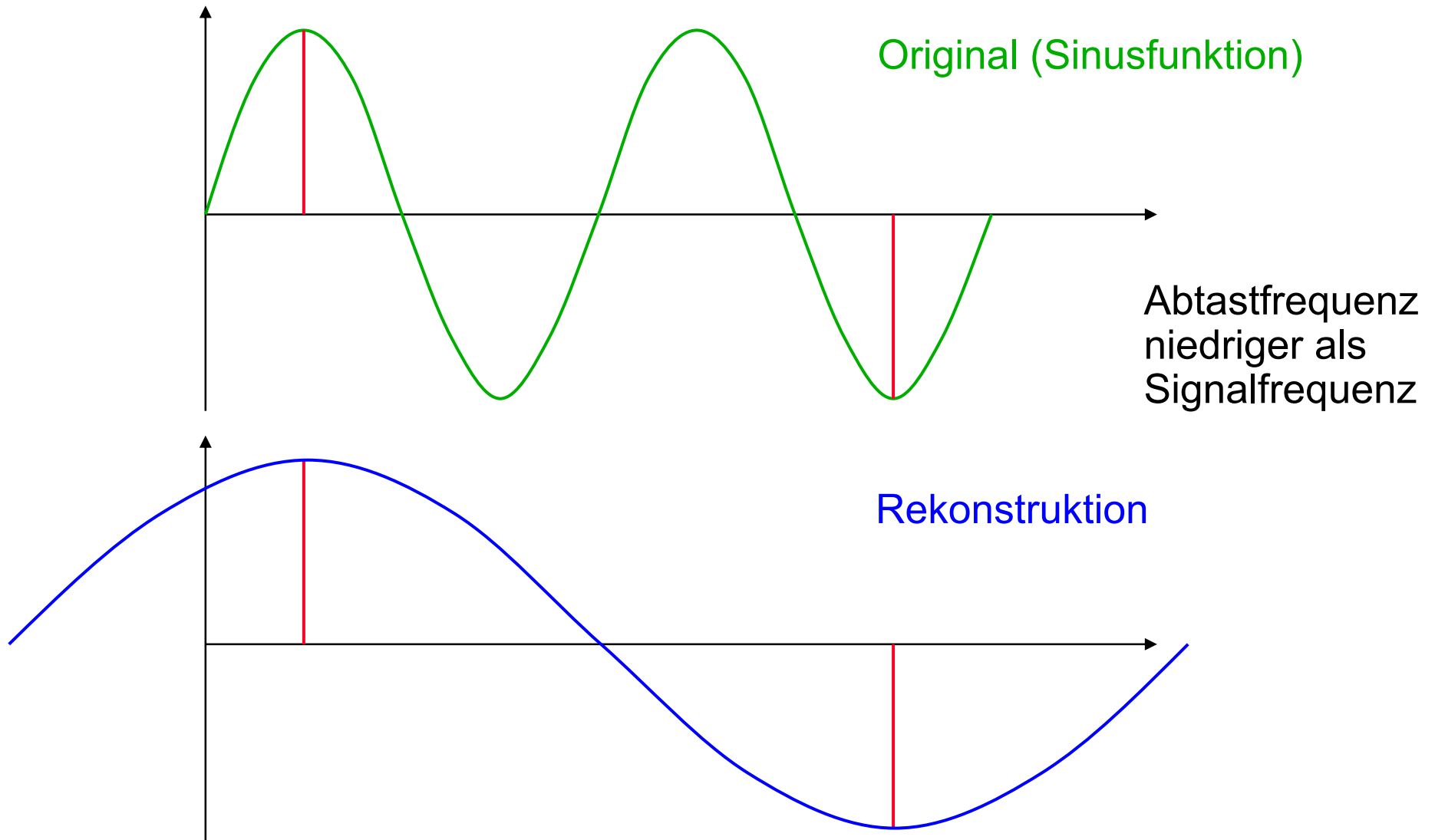
Zugrad (über die Zeit):



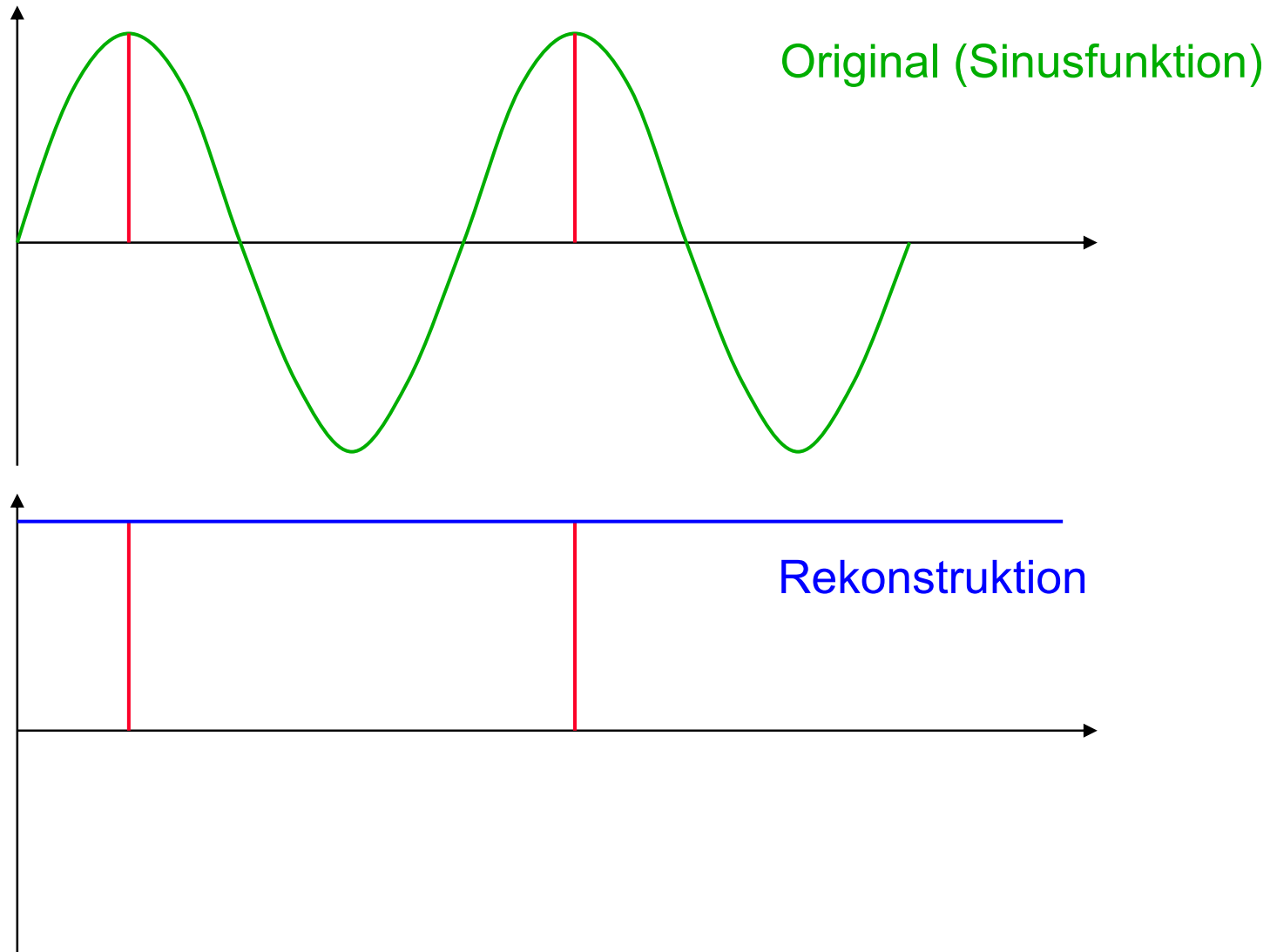
Aufnahmen (über die Zeit):



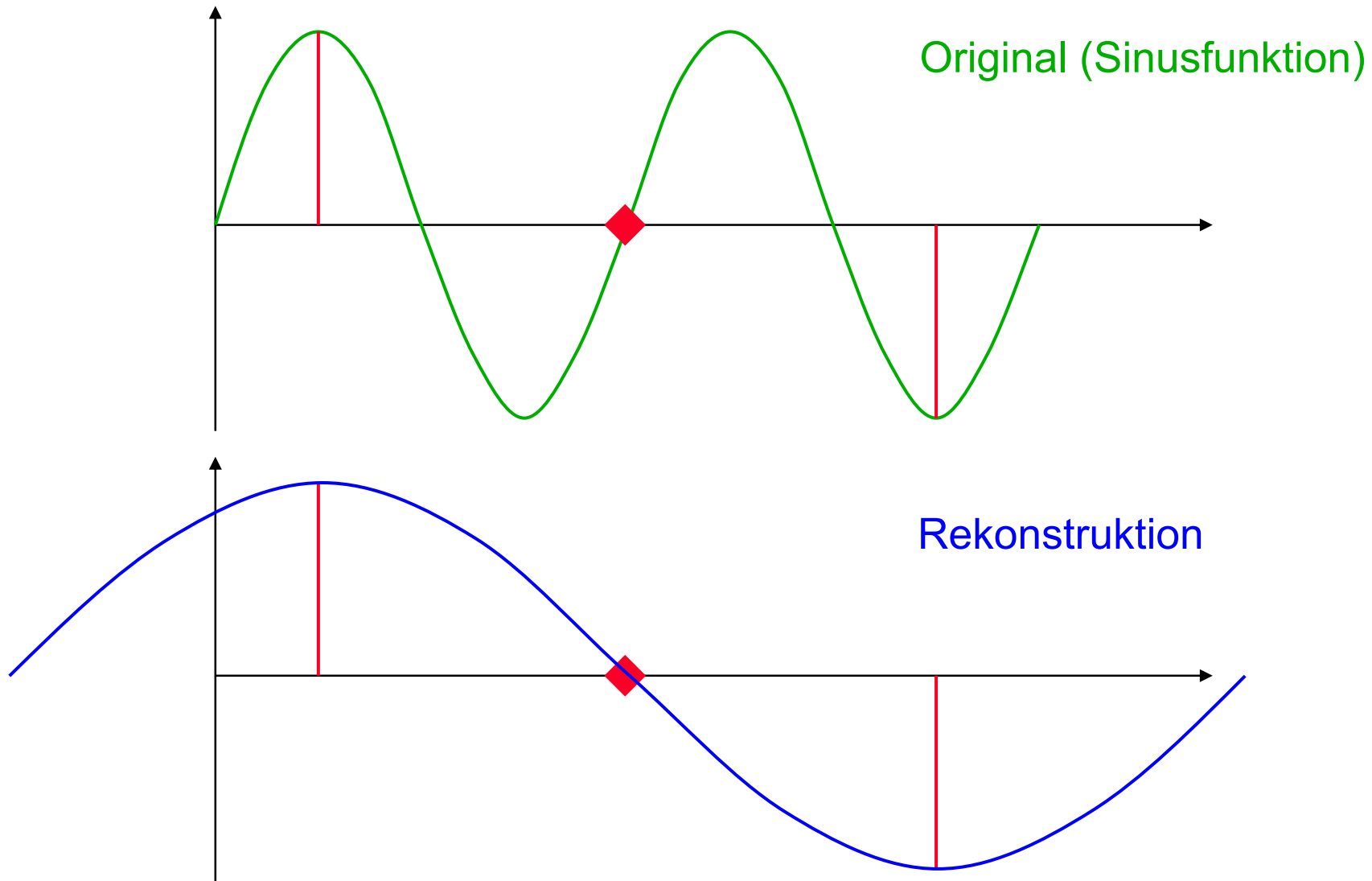
# Sehr niedrige Abtastrate



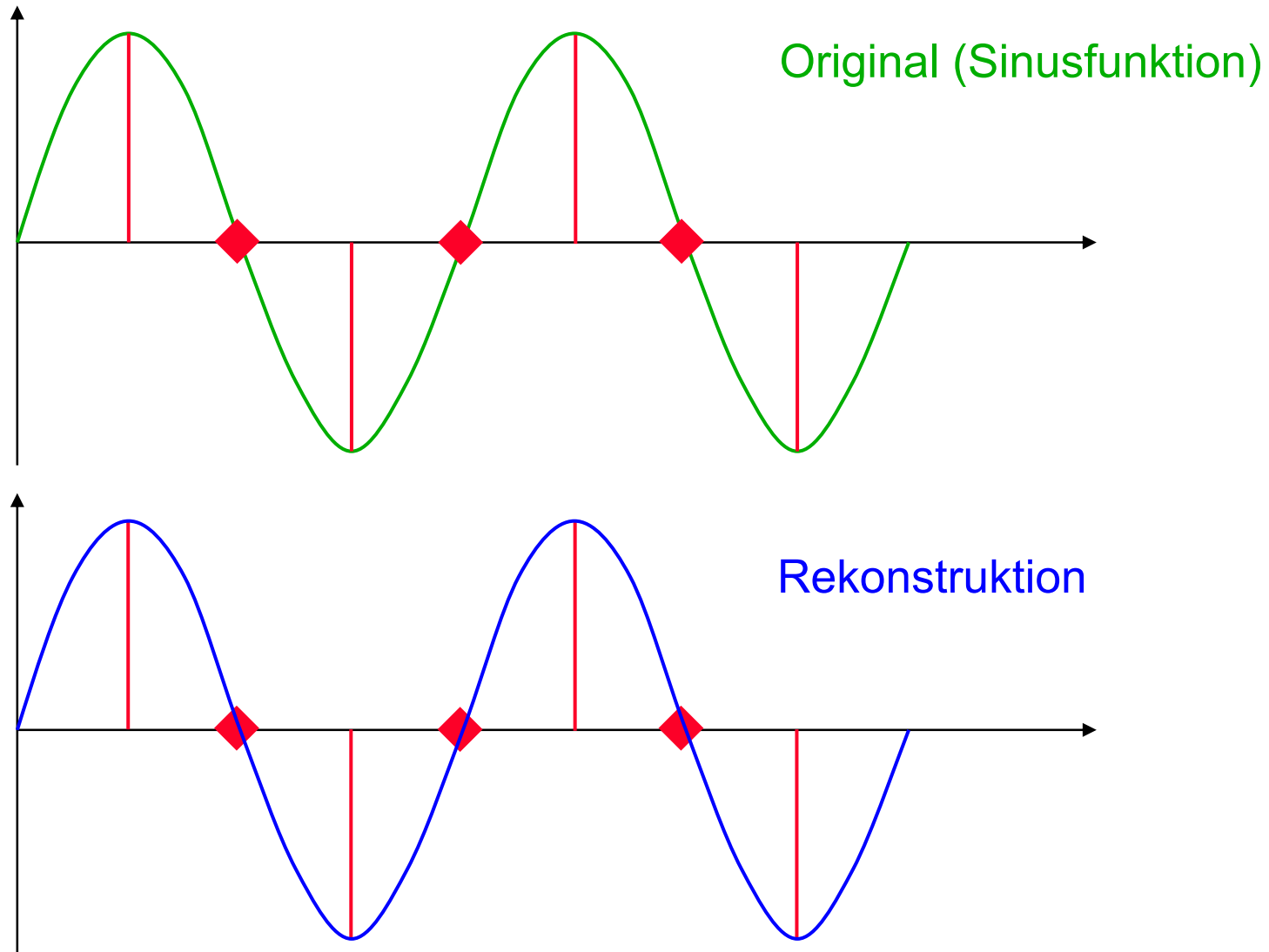
# Abtastrate gleich Signalfrequenz



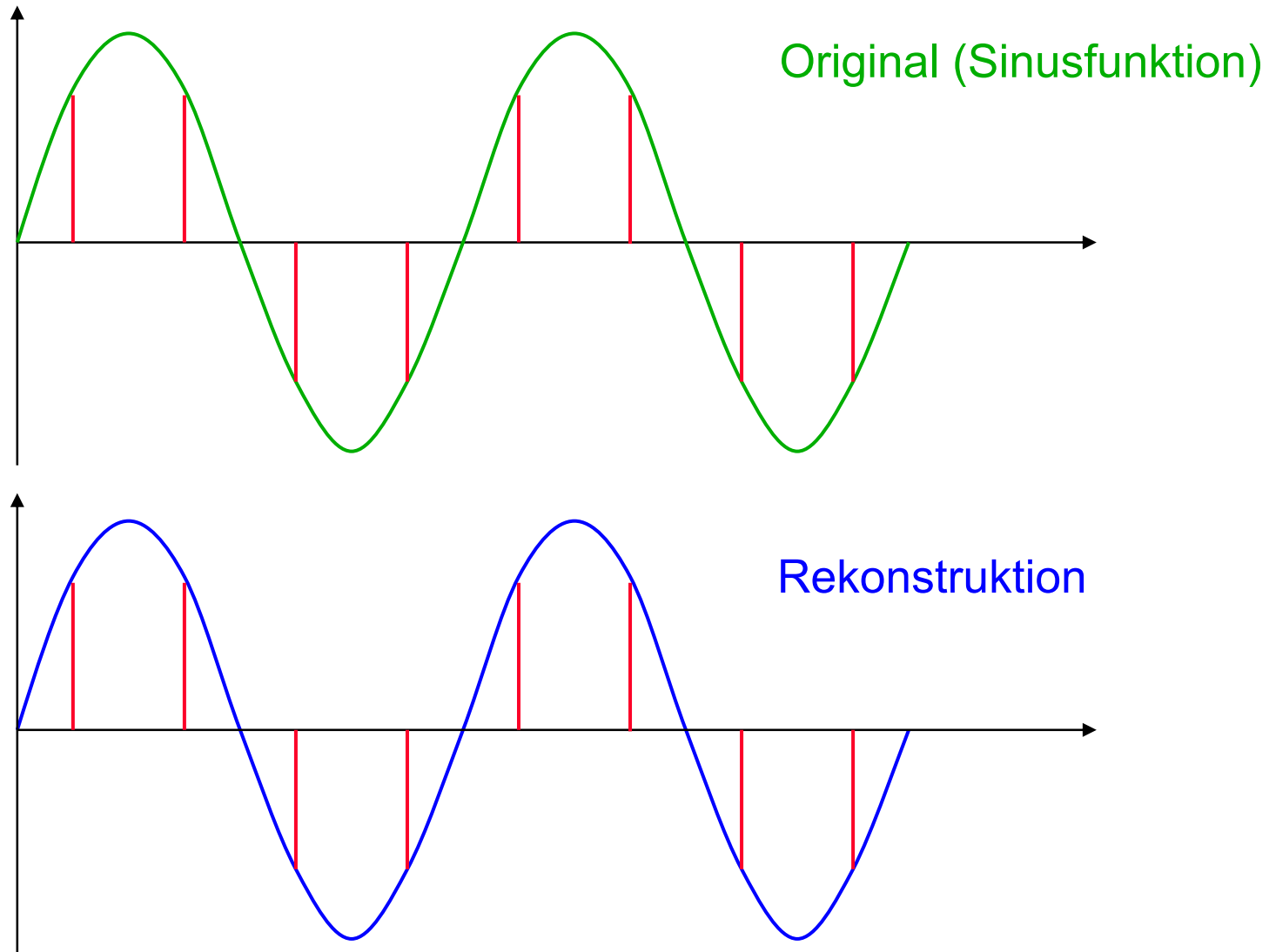
# Abtastrate größer als Signalfrequenz



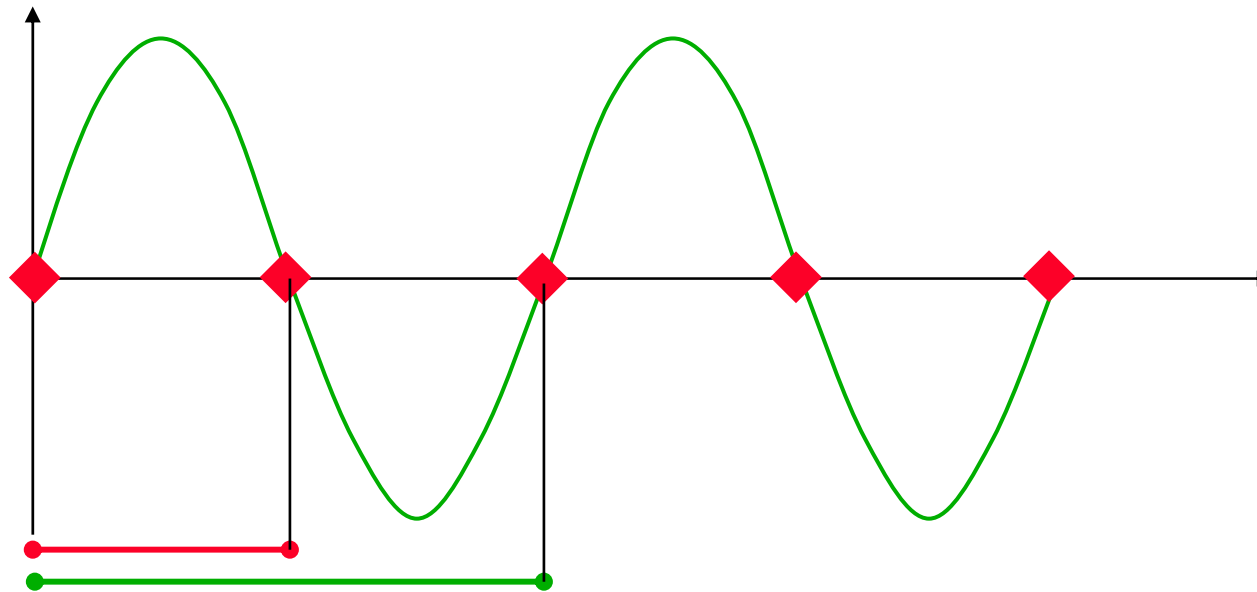
# Hohe Abtastrate (1)



# Hohe Abtastrate (2)



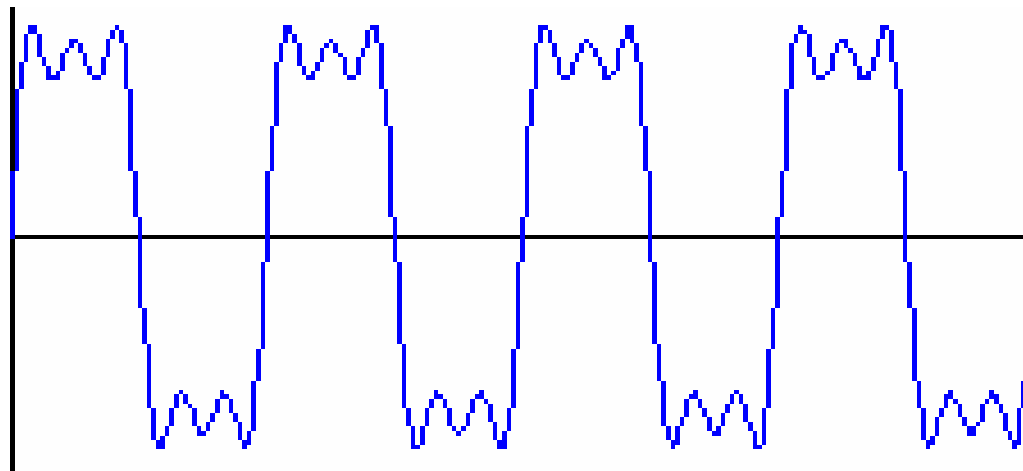
# Wie groß muss die Abtastrate sein?



- 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:

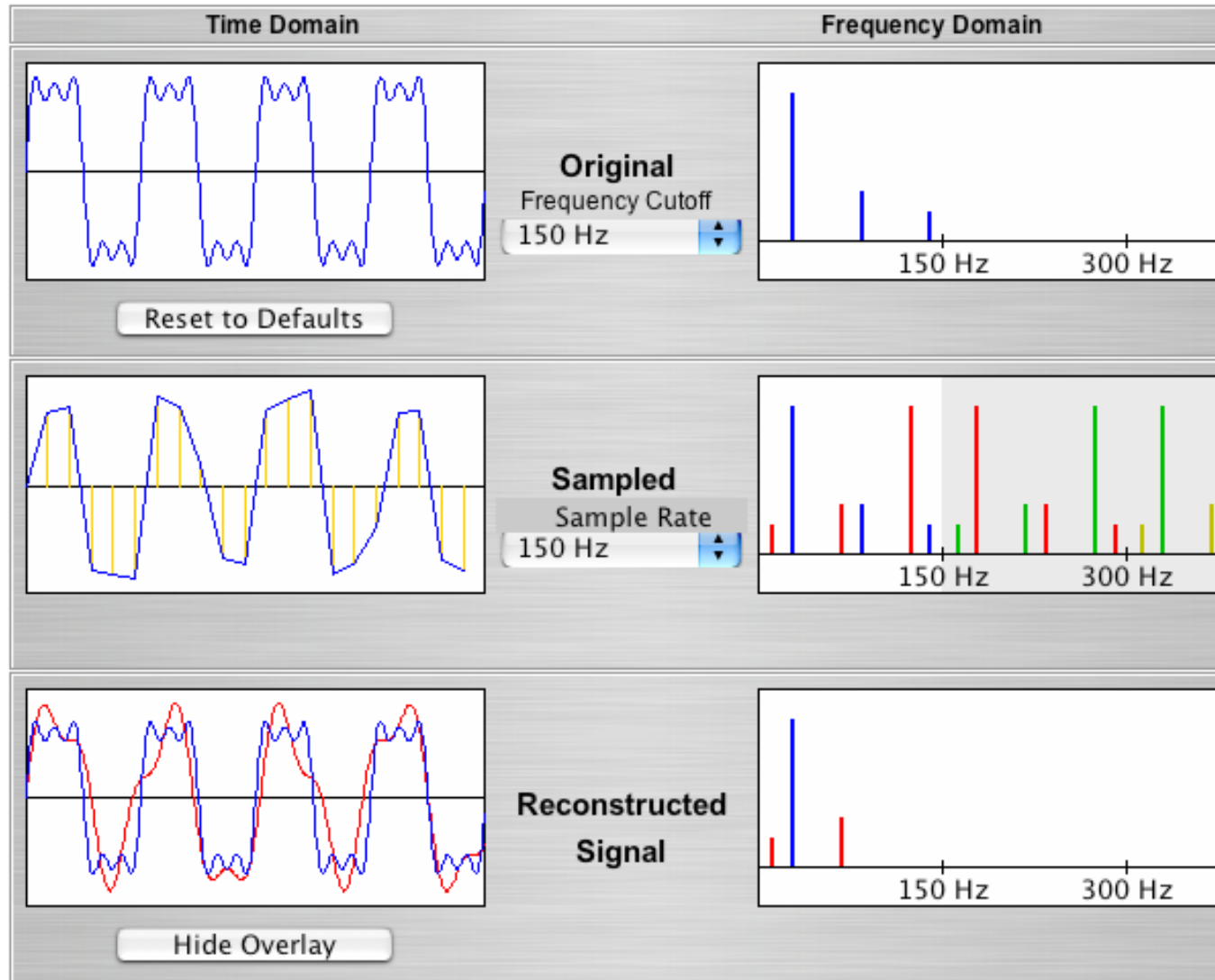
Überlagerung von  
Signalen mit 50 Hz  
(Grundfrequenz), 100 Hz  
und 150 Hz



# 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

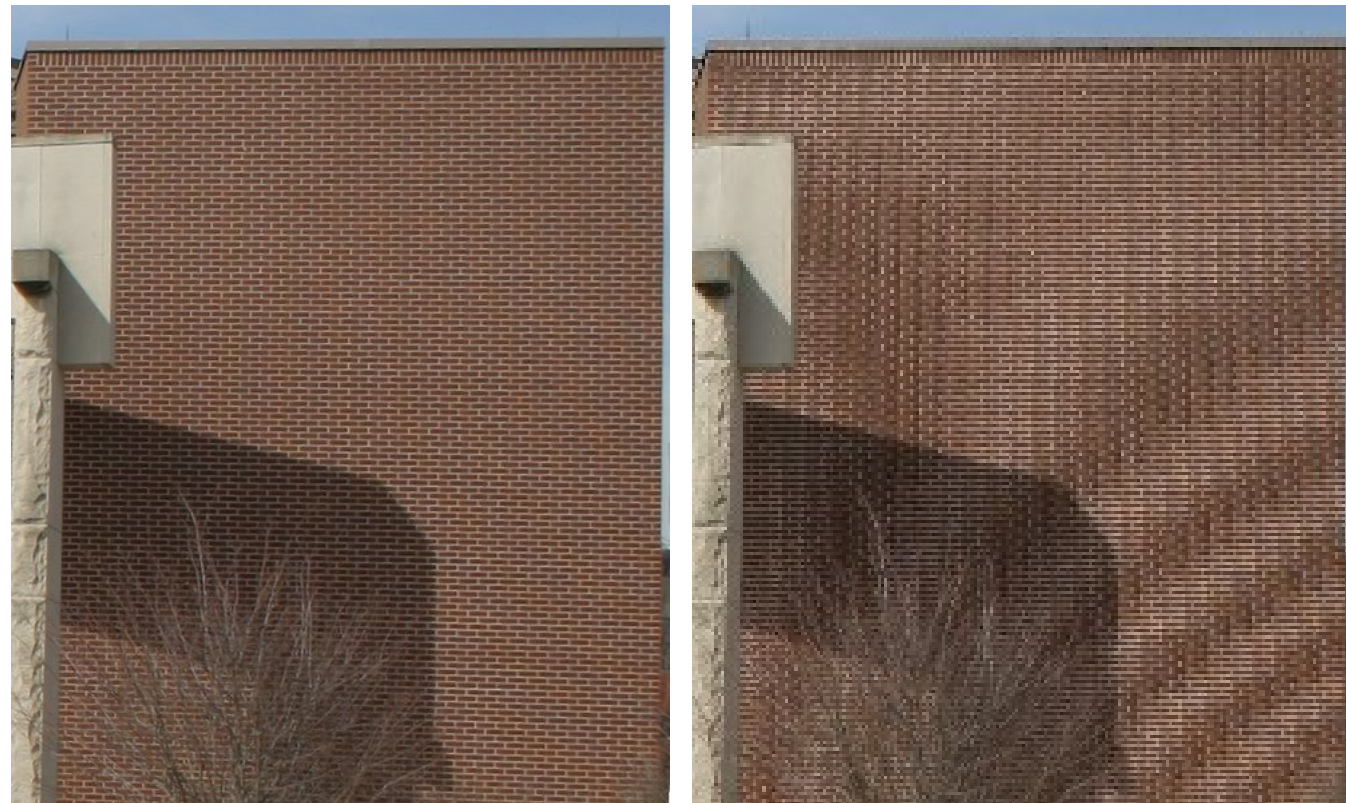
# Beispiel zum Abtasttheorem



<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)

# Speicherbedarf multimedialer Information

- Bsp. Audio-Signale
  - Sprachsignal niedriger Qualität (Mono, 8 bit, 11 kHz): 88 kbit/s
  - CD-Qualität (Stereo, 16 bit, 44,1 kHz): 1,4 Mbit/s
  - Eine Stunde Musik in CD-Qualität: 630 MByte
- Bsp. Bilder (9x13cm mit 300 ppi = 1062x1536 Pixel)
  - Schwarz/weiß (1 bit Farbtiefe): ca. 200 kByte
  - TrueColor (24 bit Farbtiefe): 4,9 MByte
- Bsp. Video (ohne Ton)
  - 720 x 525 Pixel, 25 Bilder/s, 16 bit Farbtiefe: 151,2 Mbit/s
  - 1280 x 720 Pixel, 60 Bilder/s, 24 bit Farbtiefe: 1,32 Gbit/s

Pixel= Bildpunkt  
ppi = Pixel per inch

# Gliederung

1. Grundbegriffe
2. Digitale Codierung und Übertragung
3. Zeichen und Schrift
4. Signalverarbeitung
5. Ton und Klang
6. Licht, Farbe und Bilder
7. Bewegtbilder
8. Animation und Interaktion
9. Mediendokumente
10. Internet-basierte digitale Medien
11. Computergrafik und Virtuelle Realität