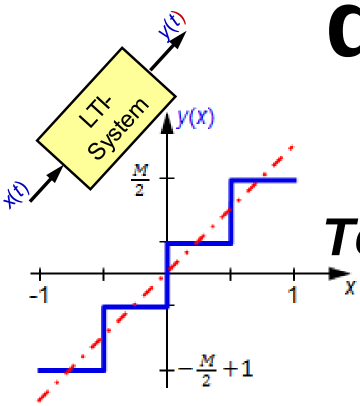
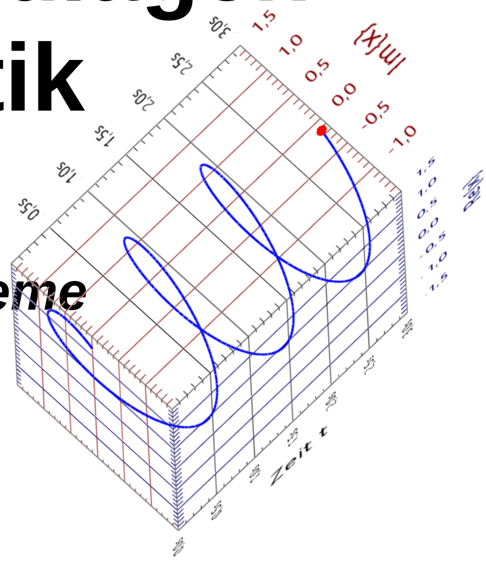
Technische Hochschule Rosenheim

Anleitung zu den praktischen Übungen zur Veranstaltung

Technische Grundlagen der Informatik

für Informatiker





Teil 2: Signale & Systeme

Prof. Dr.-Ing. Holger Stahl

Inhalt:

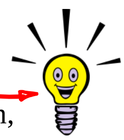
Ablauf der praktischen Übungen

Ziel der Übungen ist es, die Kernziele des Themenkomplexes *Signale & Systeme* zu wiederholen, und die Bedienung der Demoprogramme soweit zu intensivieren, dass sie Ihnen nutzen! Zu 10 Demoprogrammen gibt es Experimente (fünf zu den praktischen Übungen Nr. 3, und vier zu Nr. 4), die Sie individuell an Ihrem eigenen Notebook durchführen. Dazu bekommen Sie Unterstützung & Erläuterungen von uns (d.h. Ihren Betreuern). **Ganz wichtiger Hinweis: Bezüglich der Unterstützung haben Sie eine Holschuld ☺!!**

Notwendige Voraussetzungen für Ihre Teilnahme

1. Sie haben **diese Anleitung auf DIN-A4 (doppelseitig) ausgedruckt** und **geheftet** dabei.
2. Sie haben Ihr **Vorlesungsmanuskript Teil 2 ausgedruckt** (oder auf'm separaten **Tablet**) dabei.
3. Sie haben sich **mit dem Stoff im Skript auseinandergesetzt**, siehe ***Verweise*** am Seitenrand!
4. Sie haben Ihren **PC mit laufbereit installierten Demoprogrammen** dabei, sowie **ein Headset**

Bewertung mit „Bonuspunkten"



Wenn Sie **(a)** obige 4 Voraussetzungen erfüllen & **(b)** alle (oder zumindest fast alle 😊) Experimente der jeweiligen Übung bearbeitet haben & **(c)** den Betreuern knackige Fragen stellen, so erhalten Sie **2,5 Bonuspunkte** für die *schrP* gut geschrieben! Ansonsten individuell weniger…

Praktische Übung 3: Signale und Spektren

Experiment 3-1 mit dem Demoprogramm `8_AudioSignalUndSpektrum` (25 min)

Skript S. 6-21

Ziele: Sie werden Ihr eigenes Sprachsignal im Zeit- und Frequenzbereich analysieren. Sie können beurteilen, ob es sich bei dem Signal um einen Vokal oder einen stimmlosen Konsonanten handelt. Sie lesen die Parameter *Periodendauer*, *Grundfrequenz*, *Formanten* heraus.

a) Stimmhafte und stimmlose Laute

Stimmhafte Laute (z.B. alle Vokale) sind periodisch im Zeitbereich, und haben ein Linienspektrum. Frikative (Rauschlaute, z.B. „f“, „s“, „sch“, „ch“, „h“) sind zufällig im Zeit- und Frequenzbereich.

⇒ Erzeugen Sie stimmhafte Laute und Frikative, vergleichen Sie diese im Zeit- & Spektralbereich.

⇒ Listen Sie einige Konsonanten, die – falls lang gesprochen – auch stimmhaft sind!

b) Periodendauer und Grundfrequenz

Erzeugen Sie ein Signal mit der Grundfrequenz $f_0 = 200$ Hz:

⇒ Welcher Periodendauer entspricht das ?

⇒ Ist diese Grundfrequenz eher typisch für einen Mann oder eine Frau?

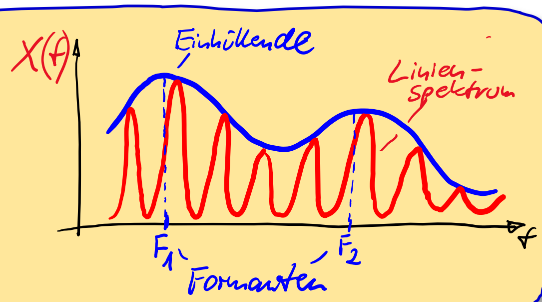
⇒ Schaffen Sie es, mit Ihrer Stimme einen Ton mit exakt 200 Hz anzuzeigen und einzufrieren?

c) Die spektrale Einhüllende und *Formanten*

Wie oben beschrieben, haben stimmhafte Laute ein Linienspektrum. Die einhüllende Kurve des Linienspektrums liefert dem Zuhörer die Information, welcher Laut gesprochen wurde.

Die Frequenzen an den Maxima dieser Einhüllenden bezeichnet man als *Formanten* F_1, F_2, F_3, …:

Die Formanten stellen die wesentliche Information.



⇒ Schaffen Sie es, einen 200 Hz-Vokal zu erzeugen, der im Zeitbereich in etwa sinusförmig ausschaut? Welcher Laut ist das?

⇒ Was unterscheidet diesen sinusförmigen Laut von einem gesprochenen **/e/** im Frequenzbereich?

Experiment 3-2 mit dem Demoprogramm `5_FourierreiheSynthese` (10 min)

Skript S. 6-5 ff.

Ziele: Sie können beliebige periodische Signale als Summe von Sinus- und Kosinusschwingungen zusammensetzen. Diese Schwingungen heißen *Harmonische*, weil deren Frequenzen genau ein ganzzahliges Vielfaches der *Grundfrequenz* des Signals betragen. Sie wissen, dass ein Signal, dass ausschließlich aus Sinus- oder ausschließlich aus Kosinusschwingungen besteht, *achsen-* bzw. *punktsymmetrisch* ist, und dass ein Signal, das nur aus ungeradzahligen Harmonischen besteht, *halbwellensymmetrisch* ist.

a) Ein ganz einfaches Signal ohne Grundfrequenz

Auf der Seite 6-5 Mitte im Vorlesungsskript hatten wir folgendes Signal betrachtet:

$$\tilde{x}(t) = \cos\left(2\pi \cdot 4\,\mathrm{kHz} \cdot t\right) + \sin\left(2\pi \cdot 6\,\mathrm{kHz} \cdot t\right)$$

⇒ Erzeugen Sie exakt dieses Signal mit dem Demoprogramm `5_FourierreiheSynthese`.

⇒ Lesen Sie aus dem Diagramm die *Grundperiode* T_0 des Signals heraus, und berechnen Sie daraus dessen Grundfrequenz f_0.

T_0 =	f_0 =

⇒ Enthält das Signal eine Harmonische mit der Grundfrequenz?

b) Synthese eines achsensymmetrischen Signals

Skript S. 6-8

Halbwellensymmetrische Signale enthalten ausschließlich ungeradzahlige Harmonische (d.h. mit den Indices 1, 3, 5, 7, …). Achsensymmetrische Signale enthalten ausschließlich Harmonische mit Kosinusschwingungen!

⇒ Was bedeutet *Halbwellensymmetrie* bei einem rechteckförmigen Signal?

⇒ Erzeugen Sie mit dem Demoprogramm ein näherungsweise rechteckförmiges Signal, das *achsensymmetrisch* ist.

c) Synthese eines punktsymmetrischen Signals

Skript S. 6-8

Punktsymmetrische Signale enthalten ausschließlich Harmonische mit Sinusschwingungen!

⇒ Erzeugen Sie mit dem Demoprogramm ein näherungsweise rechteckförmiges Signal, das *punktsymmetrisch* (= *ungerade*) & *halbwellensymmetrisch* ist.

Experiment 3-3 mit den Programmen `3_KomplexeZahl` & `4_KomplexeSchwingung` (15 min)

Skript S. 6-27 ff.

Ziele: Komplexe Zahlen sind in der Elektrotechnik und Signaldarstellung ein wichtiges mathematisches Hilfsmittel, um Schwingungen und deren Amplituden und Phasenlage kompakt darzustellen. Sie können komplexe Zahlen in *Normal*- und *Exponentialform* schreiben und diese als Punkt in der GAUß'schen Ebene darstellen. Sie haben verstanden, dass eine komplexe Zahl damit den Sinus und den Kosinus eines Winkels darstellt, multipliziert mit dem Betrag der Zahl. Zu jeder komplexen Zahl können Sie auch die konjugiert komplexe bilden. Eine *exponentielle Schwingung* stellt einen sich drehenden Zeiger in der GAUß'schen Ebene dar, der sich auf eine eindimensionale Sinus- und eine eindimensionale Kosinusfunktion projizieren lässt.

a) Darstellung einer komplexen Zahl

Bei der *Normalform* wird eine komplexe Zahl durch ihren Real- und Imaginärteil dargestellt – letzterer multipliziert die imaginäre Zahl $\boldsymbol{j}$. Bei der *Exponentialform* wird die komplexe Zahl durch ihren *Betrag* (Abstand vom Ursprung) und ihre *Phase* (Winkel mit der reellen Achse) dargestellt. Die *konjugiert komplexe Zahl* erhält man durch Invertierung des Imaginärteils oder der Phase.

⇒ Bestimmen Sie mit Hilfe des Programms `3_KomplexeZahl` die Normalform zu $\underline{z} = 1,5 \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}$.

⇒ Bestimmen Sie mit Hilfe von `3_KomplexeZahl` die Exponentialform zu $\underline{z} = (-1 - j)$.

Schreiben Sie die komplexe Zahl rechts…

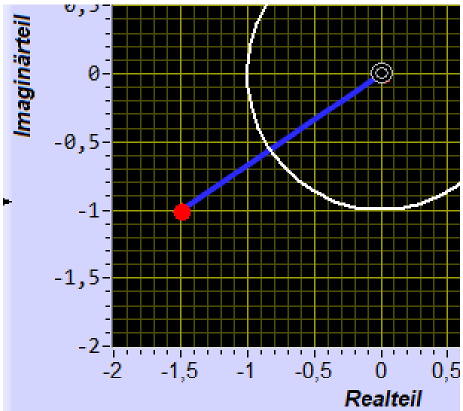
⇒ … in *Normalform* (in kartes. Koordinaten):

$\underline{z}$ =

⇒ … in *Exponentialform* (in Polarkoordinaten):

$\underline{z}$ =

⇒ … als konjugiert Komplexe:



b) Exponentielle Schwingungen

Befindet sich bei einer komplexen Zahl in Exponentialdarstellung die Zeit *t* im Exponenten, so kreist die Zahl im Abstand ihres Betrages um den Ursprung. Die Geschwindigkeit wird von der Kreisfrequenz vorgegeben, dem Multiplikator der Zeit im Exponenten.

⇒ Wie lautet der mathematische Ausdruck für eine exponentielle Schwingung, die einen Kosinus und einen Sinus der Amplitude 1,5 und der Periodendauer 3 s repräsentiert?

Experiment 3-4 mit dem Demoprogramm `6_FourierreiheAnalyse` (15 min)

Skript S. 6-9 ff.

Ziele: Ausgehend von der Fourierreihe (FR) mit reellen Koeffizienten können Sie auch komplexe Koeffizienten als Gewichte von Kosinus- und Sinusfunktionen interpretieren. Sie wissen, wie sich Symmetrien im Signal auf die Eigenschaften der komplexen Koeffizienten auswirken. Sie wissen, dass (erklärbar mit der EULER'schen Formel!)

a) Analyse eines konstanten Signal

Bei der FR mit komplexen Koeffizienten werden die Harmonischen durch die komplexen Koeffizienten $\underline{X}_k$ repräsentiert. Der Koeffizient $\underline{X}_0$ stellt den Gleichanteil dar.

⇒ Wie lauten die komplexen Koeffizienten eines konstanten Signals $\tilde{x}(t) = 1$?

⇒ Verifizieren Sie Ihre Antwort in dem Demoprogramm `6_FourierreiheAnalyse`!

b) Analyse von sinusförmigen Signalen

Sinusförmige Signale bestehen nur aus einer einzigen Harmonischen!

⇒ Wie lautet die Grundfrequenz und alle von Null verschiedenen komplexen Koeffizienten eines reinen Sinussignals

$$\tilde{x}(t) = \sin(2\pi \cdot 1\,\mathrm{kHz} \cdot t)\ ?$$

⇒ Erzeugen Sie jetzt in `6_FourierreiheAnalyse` ein reines Kosinussignal und geben Sie die von Null verschiedenen Koeffizienten an:

c) Analyse symmetrischer Signale

Halbwellensymmetrische Signale enthalten ausschließlich ungeradzahlige Harmonische (d.h. mit den Indices 1, 3, 5, 7, …). Achsensymmetrische Signale enthalten ausschließlich Harmonische mit reellen Koeffizienten; punktsymmetrische mit ausschließlich imaginären Koeffizienten!

⇒ Überprüfen Sie diese Aussagen mit je einem Beispiel im Demoprogramm `6_FourierreiheAnalyse` und zeigen Sie dies einem Betreuer!

Experiment 3-5 mit dem Demoprogramm `7_Fouriertransformation` (25 min)

Skript S. 6-13 ff.

<u>Ziele:</u> Für nicht-periodische Signale verwendet man statt der FR die *Fouriertransformation* (FT). Sie wissen, dass sich die FT mit gewissen Einschränkungen aber auch zur Darstellung periodischer Signale verwenden lässt. Es gelten exakt dieselben Symmetrieeigenschaften, wie auch für die FR mit komplexen Koeffizienten.

a) Die FT-Analyse periodischer und aperiodischer Signale

Periodische Signale haben ein *Linienspektrum*, enthalten also nur Sin- und Cos-Schwingungen (*Harmonische*), deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz beträgt. Aperiodische Signale haben ein kontinuierliches Spektrum.

⇒ Öffnen Sie das Demoprogramm `7_Fouriertransformation`. Unter „Signaltyp" lassen sich verschiedene Signale selektieren. Wie viele aperiodische und wie viele periodische Typen lassen sich wählen?

aperiodisch:

periodisch:

⇒ Periodische Signale sollten ein FT-Spektrum haben, dass aus DIRAC'schen δ-Impulsen besteht; warum sind diese im Demoprogramm nicht sichtbar?

b) FT-Analyse symmetrischer Signale

Die FT <u>gerader</u> Signale ist <u>rein reell</u>. <u>Ungerade</u> Signale haben ein <u>rein imaginäres</u> Spektrum. Bei <u>halbwellensymmetrischen</u> Signalen existieren nur <u>ungeradzahlige</u> Harmonische.

⇒ Stellen Sie den Signaltyp „Überlagerung 2er cos-Funktionen" ein und leiten Sie aus den Darstellungen im Zeit- und Frequenzbereich die Formeldarstellung für dieses Signal ab:

$\tilde{x}(t) =$

⇒ Erzeugen Sie durch zeitliche Verschiebung ein <u>rein reelles</u> bzw. ein <u>rein imaginäres</u> Spektrum.

⇒ Einer der acht Signaltypen lässt auch mit Verschieben <u>kein</u> rein reelles Spektrum zu. Welcher?

c) Eigenschaften der FT – Identität von Faltung und Filterung

Skript S. 6-19

Jeder Operation auf Signale im Zeitbereich entspricht eine entsprechende Operation im Frequenzbereich: Besonders wichtig ist die <u>Faltung im Zeitbereich</u>, der eine einfache Multiplikation im Spektrum entspricht:

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad \circ\!\!\stackrel{FT}{-}\!\!\bullet \quad \underline{Y}(f) = \underline{X}(f) \cdot \underline{H}(f)$$

⇒ Die Faltung zweier gleicher Rechteckfunktionen ergibt eine Dreieckfunktion. Dementsprechend lässt sich das Spektrum eines Dreiecks aus dem Quadrat zweier si-Funktionen bilden. Auf <u>welche Breite</u> müssen Sie den „Dreieckimpuls gerade" strecken, damit diese quadratische Beziehung tatsächlich gilt? Erklären Sie das abschließend einem Betreuer!

Praktische Übung 4: Signalverarbeitung

Experiment 4-1 mit dem Demoprogramm `2_Faltung` (20 min)

Skript S. 5-11 ff.

<u>Ziele:</u> Wenn ein Signal durch eine Leitung oder durch ein anderes LTI-Filter geschickt wird, erlebt das Signal eine *Faltung*. Sie kennen die „5 Schritte zur Faltung", und können diese für einfache Signale grafisch anschaulich durchführen. Sie wissen, dass die Faltung eine *lineare* und *zeitinvariante* Operation ist.

a) Die „5 Schritte zur Faltung":

Im Demoprogramm `2_Faltung` können Sie nicht nur das Ergebnis der Faltung zweier Signale sehen, sondern auch eine Veranschaulichung der 5 Schritte, um zu dem Ergebnis zu kommen.

1. Darstellung von $x(t)$ auf der τ-Achse: $\boldsymbol{x(t) \to x(\tau)}$
2. Spiegelung von $h(\tau)$: $\boldsymbol{h(\tau) \to h(-\tau)}$
3. Verschiebung um t auf der τ-Achse: $\boldsymbol{h(-\tau) \to h(t-\tau)}$
4. Berechnung des **Produktes** $\boldsymbol{x(\tau) \cdot h(t-\tau)}$ für alle t.
5. Berechnung des **Integrals über** $\boldsymbol{x(\tau) \cdot h(t-\tau)}$ für alle t.

Skript S. 5-12

⇒ Was bedeutet die strichpunktierte Linie genau?

⇒ Wo finden Sie den Schritt 5, die abschließende Integration?

⇒ Erklären Sie Ihrem Nachbarn / Ihrer Nachbarin, <u>wo Sie jeden einzelnen Schritt animiert</u> finden!

b) Faltung von Rechtecksignalen

Werden <u>Rechteck</u>signale miteinander gefaltet, entsteht ein <u>Geradenzug</u>.

⇒ Falten Sie den „Rechteck breit" mit dem „Rechteck schmal".
Warum ergibt sich im Bereich [-1; 0] eine <u>ansteigende</u> Gerade, und im Bereich [0; 1] eine <u>Konstante</u>? Erklären Sie das anhand der Integralgrenzen in den beiden unteren Diagrammen:

c) Start, Ende und Dauer eines Faltungsproduktes

Der <u>Startzeitpunkt</u> eines Faltungsproduktes ergibt sich als Summe der Startzeitpunkte der gefalteten Signale! Gleiches gilt entsprechend für den <u>Endezeitpunkt</u>, sowie für die <u>Dauer</u> des Ergebnissignals.

⇒ Prüfen Sie diese These an mindestens 10 verschiedenen Kombinationen aus Signalen mit zeitlichen Verschiebungen. Erläutern Sie eine davon dem Betreuer!

Experiment 4-2 mit dem Demoprogramm `9_FaltungIstFilterung` (25 min)

Skript S. 7-3 ff.

Ziele: Die Faltung im Zeitbereich entspricht im Frequenzbereich einer *Filterung* mit dem Spektrum der Impulsantwort. Sie wissen, dass es sich bei der Filterung um eine reine Multiplikation des Spektrums mit Gewichtungsfaktoren, dem sog. *Frequenzgang* handelt. Ihnen ist bewusst, dass ideale Filter rechteckförmige Frequenzgänge haben, mit denen sich u.a. Harmonische periodischer Signale unterdrücken lassen.

a) Faltung mit einem δ-Impuls

Der δ-Impuls stellt quasi das „neutrale Signal" der Faltung dar, sein Spektrum ist eine Konstante.

⇒ Falten Sie im Demoprogramm `9_FaltungIstFilterung` alle drei verfügbaren Signale mit dem δ-Impuls. Erklären Sie im Zeit- und Spektralbereich, warum hier jeweils dasselbe Signal und dasselbe Spektrum am Ausgang sichtbar ist:

b) Tiefpassfilterung

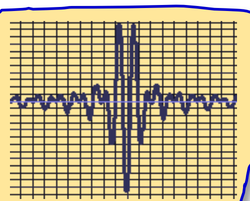
Das Spektrum eines Rechteckimpulses ist eine si-Funktion, umgekehrt ist das Spektrum einer si-funktion eine Rechteckfunktion.

⇒ Filtern Sie das Signal „periodische Rechteckfunktion" mit der „breiten si-Funktion". Erklären Sie, warum das Signal am Ausgang jetzt ausschaut, wie ein Sinus!

⇒ Filtern Sie das Signal „periodische Rechteckfunktion" jetzt mit der „schmalen si-Funktion". Welche Frequenzen unterdrückt der Filter jetzt?
Warum schaut das Signal am Ausgang jetzt wie eine abgeschnittene Fourierreihe aus?

c) Bandpassfilterung

Durch Multiplikation der si-Funktion mit einer Sinusfunktion ergibt sich eine Impulsantwort, die im Spektrum einer verschobenen Rechteckfunktion entspricht: Ein *Bandpassfilter*!



⇒ Filtern Sie die periodische Rechteckfunktion mit dem „Bandpass".
Erklären Sie, warum auch bei diesem Filter wieder ein sinusförmiges Signal ausgegeben wird!

⇒ Das „Musiksignal" am Ausgang des „Bandpasses" klingt blechern. Erläutern Sie, warum!

Experiment 4-3 mit dem Demoprogramm `A_Abtastung` (25 min)

Skript S. 7-8 ff.

Ziele: Zur Digitalisierung eines analogen Signals muss dieses u.a. *abgetastet* werden – idealerweise ohne *Aliasing*, so dass es unverändert *rekonstruiert* werden kann. Sie kennen das *Abtasttheorem*, und damit die Bedingungen, um das Signal anschließend wieder rekonstruieren zu können. Sie kennen die Funktion der Tiefpassfilter für das *Anti-Aliasing* und zur *Rekonstruktion* und können beide parametrisieren.

a) Die vier Zeit- und Spektraldiagramme und Parameter im Demoprogramm `A_Abtastung`:

Im Programm `A_Abtastung` können Sie links eines aus 4 verschiedenen Quellsignalen auswählen, und deren Bandbreite/Frequenz direkt bzw. über einen nachgeschalteten Anti-Aliasing-Tiefpass einstellen. Dieses Originalsignal wird anschließend abgetastet und dann wieder rekonstruiert. Der Rekonstruktionsfilter ist ein Tiefpass mit einstellbarer Grenzfrequenz.

⇒ Wie groß ist die Abtastrate?

⇒ Wählen Sie „Musiksignal“ als Quelle, mit der Bandbreite 1.500 Hz.
Erklären Sie genau, was von der 1. zur 3. Diagrammzeile im Amplitudenspektrum passiert:

⇒ Stellen Sie den *Rekonstruktionstiefpass* auf die Bandbreite 3.300 Hz ein.
Erklären Sie genau, was von der 3. zur 4. Diagrammzeile im Amplitudenspektrum passiert:

b) Das Abtasttheorem…

… ist genau dann erfüllt, wenn es bei der periodischen Fortsetzung keine Überlappungen gibt.

⇒ Stellen Sie die Signalbandbreite so ein, dass das Abtasttheorem gerade erfüllt ist. Wie groß ist diese sog. *Nyquistfrequenz*?

⇒ Im Ausgangssignal ist ein hochfrequentes Klingeln hörbar. Bei welcher Frequenz lassen sich diese Störungen entdecken?

⇒ Stellen Sie die Rekonstruktionsbandbreite so ein, dass keine Störungen mehr in das Ausgangssignal gelangen. Wie groß ist diese Bandbreite?

⇒ Verletzen Sie nun bewusst das Abtasttheorem, indem Sie die Musiksignal-Bandbreite auf 10 kHz stellen. Hören Sie genau hin. Beschreiben und begründen Sie die Störungen im Spektrum!

c) Ein Sondersignal zum Experimentieren… ist die Spalt(=si)-Funktion!

⇒ Welches Spektrum hat dieses Signal?

⇒ Stimmen Sie die Signalbandbreite von 100 Hz…10 kHz durch und erklären Sie dem Betreuer, warum sich im Spektrum des abgetasteten Signals immer höher werdende Stufen aufbauen!

Experiment 4-4 mit dem Demoprogramm `B_Quantisierung` (20 min)

Skript S. 7-14 ff.

Ziele: Bei der Digitalisierung eines analogen Signals erfolgt neben der Abtastung auch noch eine *Quantisierung* zur Wertediskretisierung des Signals. Sie haben verstanden, dass diese auch als additive Überlagerung eines *Rundungsfehlers* oder *Quantisierungsrauschen* aufgefasst werden kann. Sie sind in der Lage, den *Dynamikbereich* abzuschätzen, der bei verschiedenen Quantisierungsstufen erzielt wird.

a) Animation des Quantisierungsprozesses mit dem Demoprogramm `B_Quantisierung`:

Das analoge Signal wird mit einer treppenförmigen *Quantisierungskennlinie* auf eine von *M Quantisierungsstufen* abgebildet. Bei linearer Quantisierung sind alle Stufen äquidistant groß. Der entstehende Rundungsfehler ist das annähernd zufällige *Quantisierungsrauschen*, welches man sich auch *additiv* zum Originalsignal hinzugefügt denken könnte.

⇒ Reduzieren Sie im Demoprogramm `B_Quantisierung` die Wortbreite auf vier Bit und drücken Sie den Button „Zeige Kennlinie“: Wie viele Signalstufen gibt es?

M =

⇒ Hören Sie sich das Sinussignal an, und betrachten Sie die blaue Kurve. Es gibt einen Fehler!

⇒ Schalten Sie die Signalquelle „Stumm“ und hören Sie sich nur das Fehlersignal an. Ist dies im Falle des sinusförmigen Signals wirklich <u>zufälliges</u> Quantisierungs<u>rauschen</u>? Warum (nicht)?

⇒ Wählen Sie als Signalquelle jetzt „Musiksignal“.
Ist das Fehlersignal jetzt annäherungsweise zufälliges <u>Rauschen</u>? Warum?

b) Dynamik des Quantisierers:

Das Verhältnis der maximalen Gesamtleistung eines sinusförmigen Signals zur mittleren Leistung des Quantisierungsrauschen bezeichnet man als *Dynamikbereich*. Mit jedem zusätzlichen Bit, das zur Quantisierung genutzt wird, erhöht sich der Dynamikumfang um den <u>Faktor vier</u> oder <u>6 dB</u>.

⇒ Erzeugen Sie ein „Sägezahn“-Signal. Verändern Sie die Wortbreite langsam und betrachten Sie die Amplitude des blauen Fehlersignals. Um welchen Faktor reduziert sich dessen Amplitude bei Erhöhung der Wortbreite *m* um einen Schritt?

⇒ Wie kann es sein, dass sich der Dynamikumfang trotzdem um den <u>Faktor vier</u> erhöht?

⇒ Schalten Sie wieder die Signalquelle „Musiksignal“ ein.
Ab welcher Wortbreite ist das Rauschen allein nicht mehr zu hören?

M =

⇒ Der ohne Schaden nutzbare Dynamikbereich des menschlichen Ohrs beträgt rund 100 dB.
Welche Wortbreite ist nötig, um diesen Dynamikumfang zu erzielen?

M =

Genau diese Wortbreite nutzen Standard-Soundkarten im PC und im Handy, sowie die CD, um Audiodaten zu übertragen und zu speichern.