

## Kap1: Was ist Schall?

### 1. Was ist Schall?

Schwingungen und Wellen in Luft, Flüssigkeiten und Festkörpern. Erzeugung durch Anregung von mechanischen Schwingungen und Wellen. Die Störung überträgt sich verzögert auf die umgrenzenden Gebiete und breitet sich dadurch vom Erregerzentrum in den Raum hinaus aus. In Luft (und Flüssigkeiten) handelt es sich um longitudinale Wellen: Teilchenoszillationen in Ausbreitungsrichtung. Durch das Medium (Luft) wird dabei Energie transportiert (kein Materietransport), das Medium (Luftteilchen) schwingt an einem bestimmten Ort um die Position ohne Schallwelle (Ruhe). Mit der Schwingung der Luft sind Druckschwankungen, Dichteschwankungen und Bewegungsschwankungen (Auslenkung  $x$  und Schnelle  $v$ ) verbunden. Wahrgenommen wird der Schall über die Luftdruckschwankungen am Trommelfell im Ohr.

### 2. Wieviel Oktaven umfaßt der Hörschall?

10 Oktaven, die werden aber nur von einem „idealen Hörer“ gehört. 20Hz, 40 Hz, ..., 10000Hz, 20000 Hz.

### 3. Wie groß sind die Schallwellenlängen für 32 Hz, für 0,5 kHz, 4 kHz und für 8 kHz?

$$c_0 := 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$i := 1..4$$

$$f_1 := 32 \cdot \text{Hz} \quad f_2 := 500 \cdot \text{Hz} \quad f_3 := 4000 \cdot \text{Hz} \quad f_4 := 8000 \cdot \text{Hz}$$

$$\lambda_i := \frac{c_0}{f_i}$$

$$\lambda_1 = 10.625 \text{ m} \quad \lambda_2 = 0.68 \text{ m} \quad \lambda_3 = 0.085 \text{ m} \quad \lambda_4 = 0.043 \text{ m}$$

### 4. Wie ist der Schallpegel definiert?

Schallpegel ist ein logarithmisches Maß für den Schalldruck bzw die Schallintensität. Der Bezugswert ist der Schalldruck bzw. die Schallintensität bei 1 kHz an der Hörschwelle. (Effektivwert)

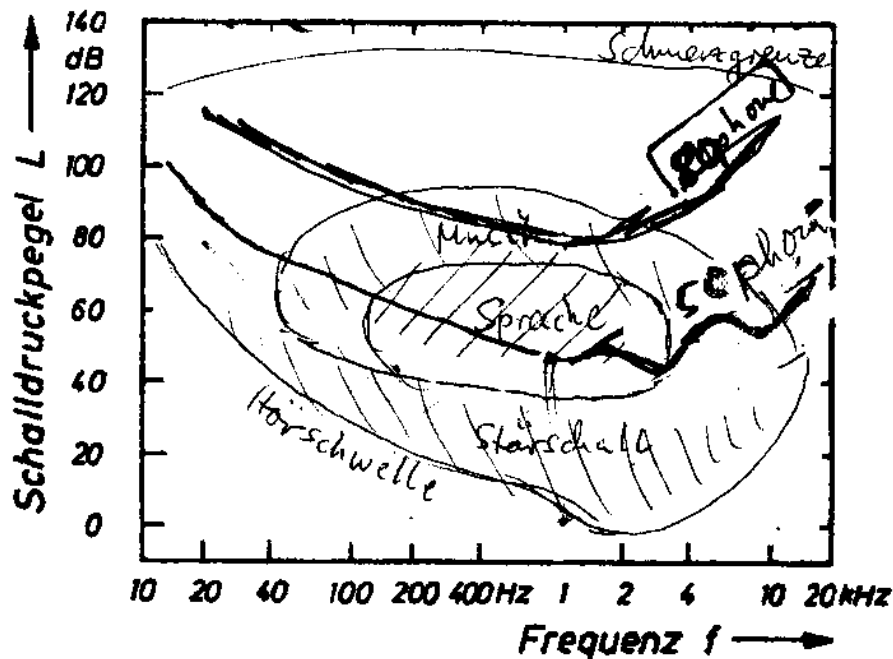
$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ at Effektivwert eines Sinustones bei } 1000 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad I_0 = \frac{p_0^2}{Z_0} = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$L_p = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \text{ dB}, \quad L_I = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ dB}$$

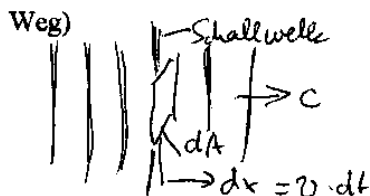
Im Fernfeld, also etwa 2 Wellenlängen von der Schallquelle entfernt, geht der komplexe Wellenwiderstand der Kugelwelle in den der ebenen Welle über und es gilt  $L_p = L_I$ .

5. Skizzieren Sie in dem folgenden Diagramm die Umrisse des Hörfeldes und tragen Sie Kurven für eine Lautstärke von 50 phon und 80 phon ein.



6. Was versteht man unter der Schallintensität ?

Die von der Schallwelle durch eine gedachte kleine Fläche (senkrecht zur Ausbreitungsrichtung) pro Zeit und Fläche transportierte (Schall-) Energie (Kraft mal Weg)



$$\begin{aligned} \text{Leistung} &= \frac{\text{Arbeit}}{\text{zeit}} = \frac{\text{Kraft} \cdot \text{Weg}}{\text{zeit}} \\ &= \frac{p \cdot dA \cdot dx}{dt} = p \cdot v \cdot dA \\ \text{Leistung/Fläche} &= \text{Schallintensität} = p \cdot v = I \end{aligned}$$

Ausgehend von der Schallquelle breitet sich der Schall als Kugelwelle aus. Während in der Nähe der Schallquelle Schalldruck und Schallschnelle nicht in Phase sind und die Schallintensität mit dem Abstand stärker als prop zu  $r^2$  ab fällt, ist im Fernfeld  $p$  und  $v$  in Phase und die Schallintensität fällt mit  $1/r^2$  ab. Für diesen Fall ist der Wellenwiderstand konstant :  $Z_0 = \hat{p}/\hat{v} = 410 \text{ (N/m}^2\text{)/(m/s)}$ . Damit ist der Schalldruckpegel gleich dem Schalleistungspegel.

$$\begin{aligned} I(t) &= p(t) \cdot v(t) \quad \text{falls } p(t) = \hat{p} \cos \omega t \quad \text{u. } v(t) = \hat{v} \cos \omega t \\ \hat{v} &= \frac{\hat{p}}{Z_0} = \frac{\hat{p}}{410} = 410 \frac{\text{N/m}^2}{\text{m/s}} \\ \text{gemittelte Schallintensität:} \\ \bar{I} &= \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{p} \hat{v} \cos^2 \omega t dt = \frac{1}{2} \hat{p} \hat{v} = \frac{1}{2} \frac{\hat{p}^2}{Z_0} \end{aligned}$$

7. Auf welchen Schallintensitätswert wird der Pegel der Schallintensität bezogen?  
 $I_0 = p_0^2/Z_0 = 10^{-10}$  Watt / m<sup>2</sup>.
8. Wie verändert sich der Schallpegel a) bei Verdopplung des Schalldrucks und b) bei Verdopplung der Schallintensität?

$$L_p' = 20 \log\left(\frac{2p}{p_0}\right) dB = 20 \log(2) dB + 20 \log\left(\frac{p}{p_0}\right) dB = L_p + 6 dB$$

$$L_I' = 10 \log\left(\frac{2I}{I_0}\right) dB = 10 \log(2) dB + 10 \log\left(\frac{I}{pI_0}\right) dB = L_I + 3 dB$$

## 1.2 Schallwahrnehmung

1. Wahr oder Falsch, zum Teil mit Auswahl?

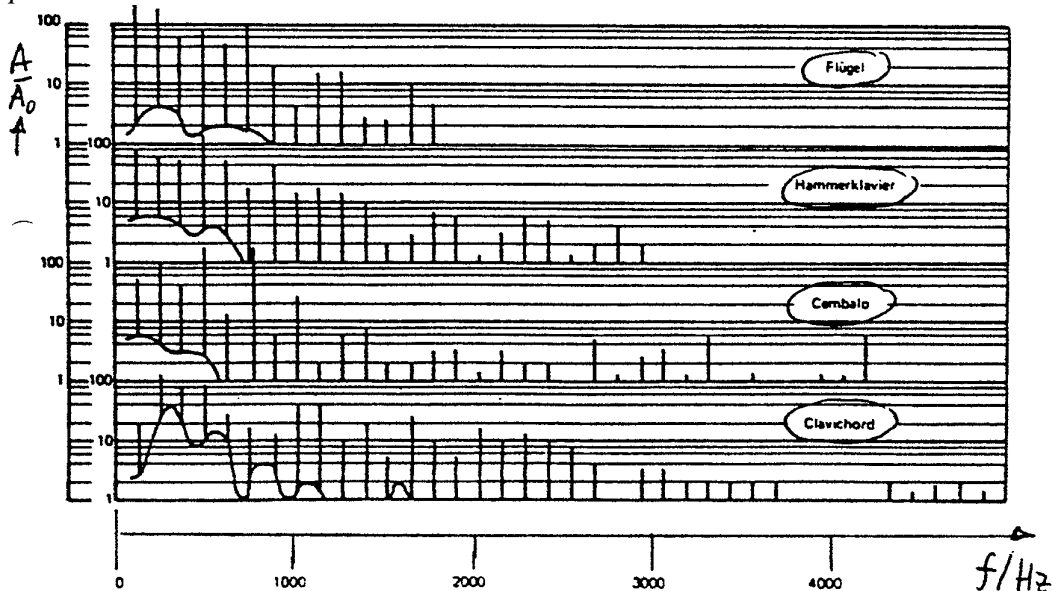
- Im Innenohr ist die Schallwellenlänge gegenüber Luft verkürzt, aufgrund der **höheren** Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten **und der hohen Dämpfung der Wellen**.
- Im Innenohr sind die Schallwellen sehr stark bedämpft. → **richtig**
- Im Innenohr wird eine Fourieranalyse des Schalls durchgeführt. → **nur Amplitudenspektrum**
- Der Höreindruck für Lautstärke ist proportional dem Schalldruck → **falsch**
- Der Höreindruck für die Tonhöhe ist proportional der Frequenz. → **Falsch, proportional dem Log der Frequenz**
- Die Tonhöhe eines Tones wird aufgrund der höchsten im Ton enthaltenen Teilschwingung zugeordnet. → **falsch**
- Die Richtungswahrnehmung basiert auf Zeitunterschieden in den Signalen an beiden Ohren in der Größenordnung von **ms**, **10ms**, → **100ms**, ms oder 10 ms.

Wegunterschiede zwischen 0,6 cm und 20 cm (Weg von einem Ohr zum anderen) ergeben einen Laufzeitunterschied von  $t = s/c = s/340$  m/s von 20 µs bis 600 µs.

- Die Richtungswahrnehmung basiert zum Teil auf Pegelunterschieden in den Signalen an beiden Ohren in der Größenordnung von **Milli dB**, → **dB**, oder vielen dB.

0 bis 30 dB → siehe Ort der virtuellen Schallquelle beim Stereobild.

2. In der angefügten Abbildung sind Spektren für Töne dargestellt, die von verschiedenen Saiteninstrumenten (Flügel, Hammerklavier, Cembalo und Clavichord) stammen. Dabei wurde die Frequenz in linearem Maßstab gezeichnet. Erläutern Sie den Grund dafür. Was läßt sich über die angeschlagenen Töne sagen? Wurden bei jedem Instrument eine oder mehrere Tasten angeschlagen? Wenn ja, wieviele? Woher stammen die kontinuierlichen Teile im Spektrum?



linearer Maßstab: Man erkennt die Obertöne mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz  
Es handelt sich immer um denselbe Ton, Grundton mit Oberschwingungen, bei jedem Instrument wurde dieselbe Taste oder eine Akkord bestehend aus Oktavtönen angespielt.  
Die kontinuierlichen Teile der Spektren stammen von den pulshaltigen Anschlagsgeräuschen.

3. Was versteht man unter Verdeckung?

Anhebung der Hörschwelle in der Nähe eines Tones. Laute Töne oder Teile im Spektrum können dadurch benachbarte überdecken.

4. Was versteht man unter dem Gesetz von der ersten Schallfront?

Kommt ein Schallereignis über unterschiedliche Weg zum Hörer, so wird das Schallereignis und eine zeitlich verzögerte Version am Hörer eintreffen. Diese beiden Kopien können sich auch zeitlich überlappen. Das Gehirn erkennt, dass es sich um dasselbe Schallereignis handelt und interpretiert (sofern der zeitliche Abstand  $< 30$  ms beträgt) es nur als ein Schallereignis. Dabei wird die erste eintreffende Schallfront als die wichtige interpretiert und ausgewertet. Dies gilt auch dann, wenn der verzögerte Schall mit deutlich höherer Amplitude und aus einer anderen Richtung (wie beim durch Lautsprecher unterstützten Sprach- oder Musikschall) kommt.

5. Erläutern Sie den Einsatz von verzögertem Lautsprecherschall in Vortragsräumen oder beim Live-Konzert.

Wie groß muß die Verzögerungszeit für einen Lautsprecher im Delay-Tower gegenüber den Bühnenlautsprechern gewählt werden, wenn deren Abstand 30 m beträgt.

Siehe Vorlesung

$$\Delta t = \frac{30m}{310m/s} + 0,02s \approx 0,12s$$

### 1.3 Stereoverfahren

Wahr oder falsch?

- *der Summenlokalisierungseffekt ist beim Intensitätsverfahren deutlicher als beim Laufzeitverfahren* → **richtig**
- *Beim Mitte /Seite Verfahren müssen vor der Wiedergabe durch die Lautsprecher das  $u_D$  und  $u_M$  Signal addiert bzw. subtrahiert werden.* → **Richtig**

$$u_M(t) = u_L(t) + u_R(t)$$

$$u_S(t) = u_L(t) - u_R(t)$$

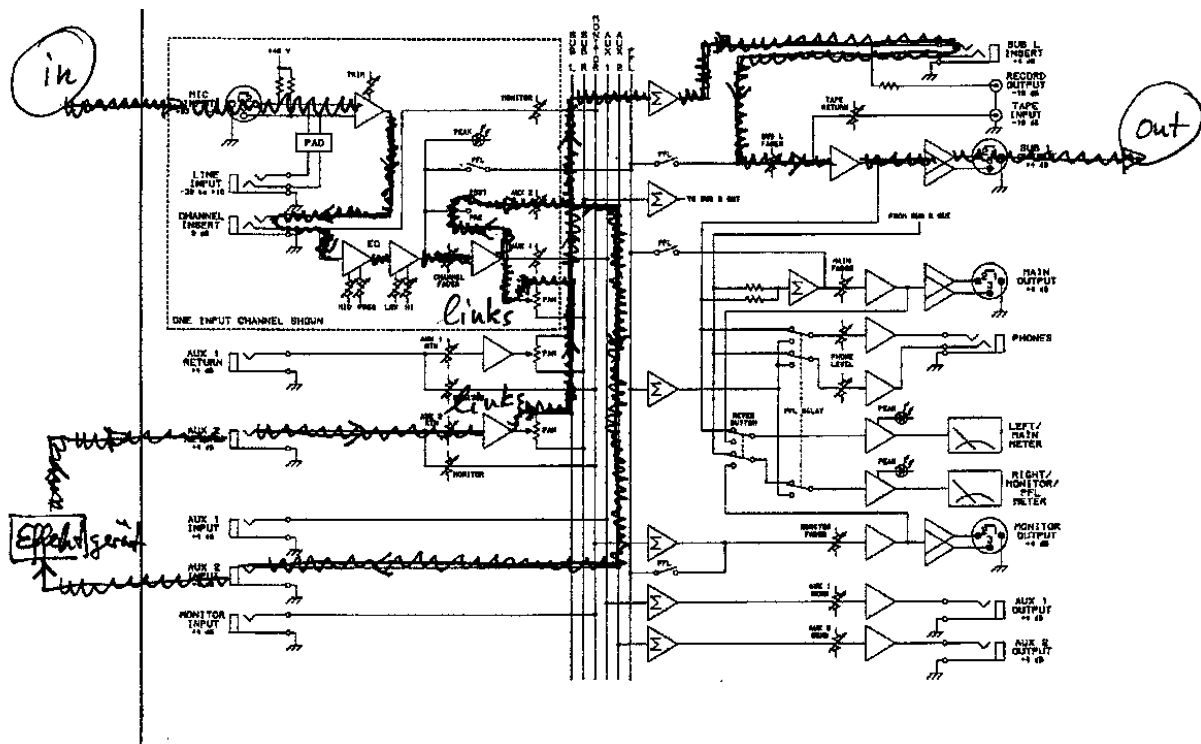
⇒

$$u_L(t) = \frac{1}{2} [u_M(t) + u_S(t)]$$

$$u_R(t) = \frac{1}{2} [u_M(t) - u_S(t)]$$

## 1.4 Raumakustik, Effekte

- Die Abbildung zeigt das Schaltbild des EV Mischers BK 1642. Gezeigt ist nur ein Eingangskanal (1) und der Ausgang für den linken Lautsprecher (Sub L Output). Über den Mikrophoneingang des Kanal 1 wird ein Signal eingegeben. Es soll auf den linken Lautsprecher gegeben werden und außerdem soll ihm ein mit Nachhall versehener Anteil des Signals zugemischt werden. Zeichnen Sie die Stellung der eingekreisten Potis bzw. Fader ein und die herzustellende Verbindung zum Effektgerät. Markieren Sie den Signalweg farblich.



- Man betrachte einen Lautsprecher im schalltoten Raum, dessen Schallpegel bei sinusförmiger Anregung in 1 m Entfernung 80 dB beträgt. Die Anregung erfolge mit einer Frequenz im unteren Übertragungsbereich, so dass der Schall in alle Richtungen gleichmäßig abgestrahlt wird (keine Bündelung). a) Welchen Wert hat der Schallpegel in 2 m Abstand?

$$\text{Schallintensität} = \frac{\text{von Quelle abgegebene Schallleistung}}{\text{Oberfläche Fläche einer Halbkugel}}$$

$$I = \frac{P_{ak}}{4\pi r^2} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

$$L_{I_1} - L_{I_2} = 10 \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) - 10 \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = 10 \log\left(\frac{r_2^2}{r_1^2}\right) = 20 \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$\text{falls } r_2 = 2r_1 \Rightarrow \Delta L = 20 \log(2) = 6 \text{ dB}$$

oder in Worten : Die von der Schallquelle abgegebene Schallleistung P fließt in den gesamten Raum ab . Dadurch nimmt die Schallintensität I, die proportional dem Schalldruck p ist,

$$\text{umgekehrt proportional mit dem Quadrat des Abstandes ab } I(r) = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$$

Schalldruckpegel = Schallintensitätspegel , Einsetzen des doppelten Abstandes ergibt eine Schallpegelabnahme von  $\Delta L = 10 \log(2^2) \text{ dB} = 6 \text{ dB}$

b) Welchen Schallpegel erzeugt diese Schallquelle in einem Raum mit den Abmessung 2,5m x 3m x 5 m = 37,5 m<sup>3</sup> und einer Nachhallzeit von T<sub>N</sub> = 1 sec in 1 m Entfernung?

$$P_{ak} = I \cdot 4\pi \cdot r^2 = I_0 10^{L/10} 4\pi \cdot r^2 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} 10^8 4\pi (1\text{m})^2 = 1,26 \text{ mW}$$

$$I_{Raum} = \frac{P_{ak}}{aA} \quad T_N = 0,163 \frac{\text{s}}{\text{m}} \frac{V}{aA} \Rightarrow I_{Raum} = \frac{P_{ak}}{0,163 \frac{\text{s}}{\text{m}} V} T_N$$

Ich habe vergessen das Raumvolumen anzugeben. z.B. 2.5x3x5m<sup>3</sup> = 37.5m<sup>3</sup>

$$I_{Raum} = \frac{1,26 \cdot 10^{-3}}{0,163 \cdot 37,5} \cdot 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \Rightarrow L_I = 10 \log\left(\frac{I_{Raum}}{I_0}\right) \text{ dB} = 10 \log\left(\frac{2 \cdot 10^{-3}}{10^{-12}}\right) \text{ dB} = 93 \text{ dB}$$

3. In einem Raum sei eine Beschallungsanlage aufgebaut. Um welchen Wert nimmt der Schallpegel im Bereich des diffusen Schallfeldes bei Verdopplung der Verstärkerleistung zu?

I<sub>raum</sub> ist proportional der akustischen und damit der elektrischen Leistung. Bei Verdopplung von P<sub>ak</sub> verdoppelt sich I<sub>raum</sub> und damit nimmt der Schallpegel um 3 dB zu

4. Von welchen Parametern hängt die Nachhallzeit ab?

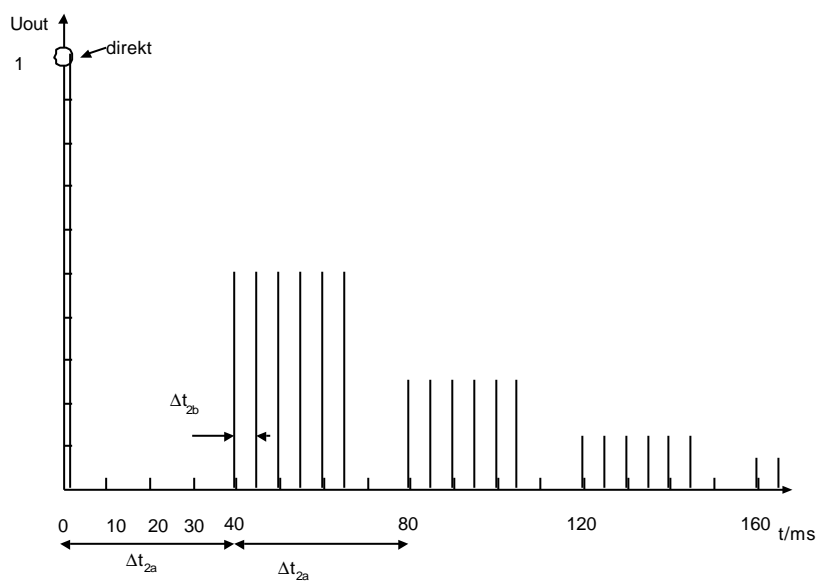
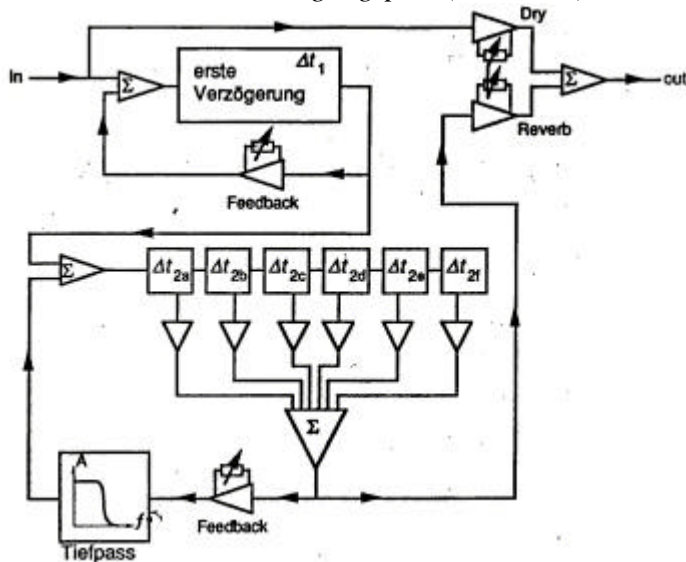
$$T_N = 0,163 \frac{\text{s} \cdots}{\text{m} \cdots}$$

Vom Raumvolumen, den Flächen der Wände und ihren Absorptionskoeffizienten.

Die Nachhallzeit vergrößert sich proportional zum Raumvolumen V und verringert sich umgekehrt proportional zu der spezifischen Absorption der Wände

$$\bar{a} \cdot A = a_1 A_1 + a_2 A_2 + \cdots + a_n A_n$$

5. Gezeigt ist das Schema für ein digitales Hallgerät. Die Verzögerungszeiten seien  $\Delta t_1 = 0$ ,  $\Delta t_{2a} = 40 \text{ ms}$ ,  $\Delta t_{2b} = \Delta t_{2c} = \Delta t_{2d} = \Delta t_{2e} = \Delta t_{2f} = 5 \text{ ms}$ . Der Feedback – Verstärker für die erste Verzögerung habe die Verstärkung Null, und der für den Nachhallblock Eins. Die Verstärkung nach den einzelnen Verzögerungsgliedern a bis f sei jeweils auf 0,5 eingestellt. Skizzieren Sie in das unten dargestellte Diagramm das Ausgangssignal für einen sehr schmalen Eingangspuls ( $\Delta t < 1 \text{ ms}$ ).





## 1.5 Lautsprecher

1. *Der Strahlungswiderstand einer Kolbenmembran in schallharter Wand*
  - nimmt mit zunehmender Frequenz zu, bis  $f_{gr} = c/l_{gr}$ ,  $l_{gr} \gg 3a$ . **richtig** $\ddot{O}$
  - fällt mit zunehmender Frequenz, bis  $f_{gr} = c/l_{gr}$ ,  $l_{gr} \gg 3a$ .
  - hängt von der Steifigkeit der Aufhängung ab.
  
2. *Die Resonanzfrequenz der Schwingspule liegt beim Lautsprecher*
  - außerhalb des Übertragungsbereichs
  - innerhalb des Übertragungsbereichs
  - in der Mitte des Übertragungsbereichs.
  - an der unteren Grenze des Übertragungsbereichs. **richtig** $\ddot{O}$
  - an der oberen Grenze des Übertragungsbereichs.
  
3. *Die Schallbündelung (Richtwirkung) eines Lautsprecher hängt ab von*
  - dem Membrandurchmesser
  - dem Verhältnis von Membrandurchmesser zu Frequenz
  - dem Verhältnis von Membrandurchmesser zu Wellenlänge **richtig** $\ddot{O}$
  - dem Verhältnis von Gehäusemesser zu Wellenlänge **auch etwas**
  - der Zahl der Einzellautsprecher.
  
4. *Die untere Grenzfrequenz eines Lautsprechers wird bestimmt durch*
  - das Gehäusevolumen **etwas**
  - Membrandurchmesser des Tieftöners  $l_{gr} \gg 2a$
  - Baßreflexsystem **richtig** $\ddot{O}$
  - die Resonanzfrequenz der Schwingspule des Tieftöners  **$\ddot{O}$**
  - untere Grenzfrequenz des Verstärkers
  - die Grenzfrequenz  $f_{gr} = c/l_{gr}$ ,  $l_{gr} \gg 3a$ .
  
5. *Die obere Grenzfrequenz des Lautsprechers wird bestimmt durch*
  - das Gehäusevolumen
  - Membrandurchmesser des Hochtöners  $l_{gr} \gg 2a$  **richtig** $\ddot{O}$
  - Hornsystem
  - die Resonanzfrequenz der Schwingspule des Hochtöners
  - obere Grenzfrequenz des Verstärkers
  - die Grenzfrequenz  $f_{gr} = c/l_{gr}$ ,  $l_{gr} \gg 3a$ . **richtig** $\ddot{O}$
  
6. *Ein Hornlautsprecher zeichnet sich gegenüber einem normalen Lautsprecher aus durch*
  - einen erhöhten Strahlungswiderstand im unteren Übertragungsbereich **richtig** $\ddot{O}$
  - erhöhte Klangqualität
  - erhöhten Schalldruck **richtig** $\ddot{O}$
  - breitbandigere Abstrahlung
  - geringere Bündelung
  - stärkere Bündelung **richtig** $\ddot{O}$

7. Ein Druckkammer-System zeichnet sich gegenüber einem normalen Lautsprecher aus durch

- einen erhöhten Strahlungswiderstand
- erhöhte Klangqualität
- erhöhten Schalldruck
- breitbandigere Abstahlung
- geringere Bündelung
- stärkere Bündelung

richtigÖ

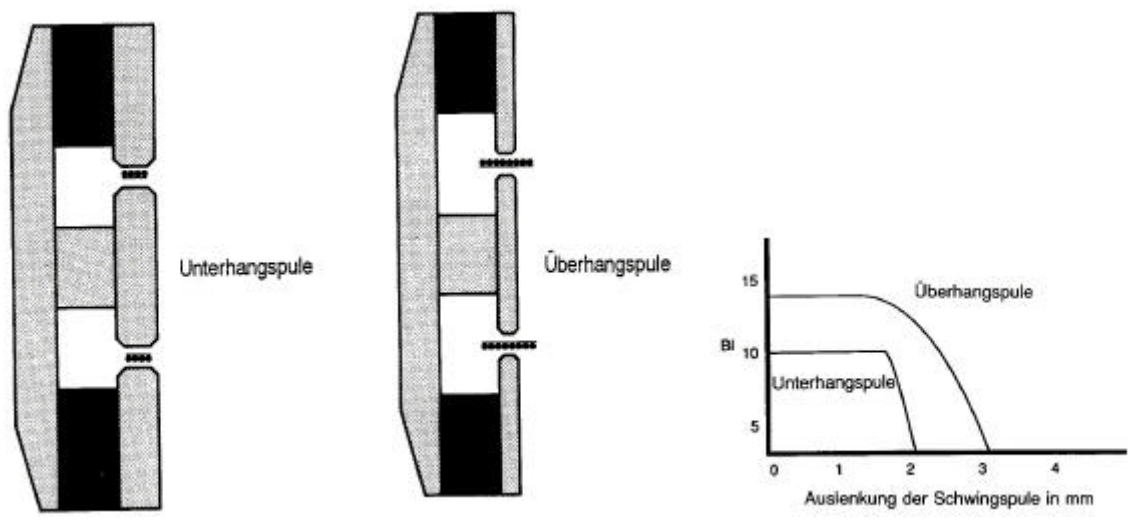
richtigÖ

8. Eine 3-Wegekombination ist besser als eine 2-Wegekombination

- ja
- nein

richtigÖ

9. Die Abbildungen zeigen das Prinzip einer Unterhang- und einer Überhangspule in einem elektrodynamischen Lautsprecher. Vergleichen Sie die beiden Varianten bzgl. Linearität, Masse (Grenzfrequenz), und Wirkungsgrad (magn. Flußdichte).



Linearität (d.h. Auslenkung als Funktion der Anregungsspannung) ist bei Unterhangspule besser, da Magnetfeld stärker verzerrt wird (siehe Abbildung oben rechts). Andererseits ist aber bei der Unterhangspule gegenüber der Überhangspule die untere Grenzfrequenz des Übertragungsbereichs höher und der Wirkungsgrad schlechter, da die Masse geringer ist (und somit die Resonanzfrequenz höher liegt) und - wie oben aus der Abb. ersichtlich - der „Kraftfaktor“ = Magnetfeld x Länge des Spulendrahtes (Bl), und somit die treibende Kraft  $F = I Bl$ , geringer ist.

## 2.1 AD-DA –Wandler

### 1. Was versteht man unter der Transparenz eines digitalen Audiokanals?

Die durch A/D-Wandlung, digitale Signalverarbeitung und anschließende D/A-Wandlung hervorgerufenen Änderungen im Audiosignal werden vom Menschen als Empfänger des Hörerlebnisses nicht wahrgenommen. Insbesondere sollen Quantisierungsfehler bzw. Quantisierungsrauschen für alle Lautstärkepegel unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegen. Auch Signalverzerrungen aufgrund Jitter, d.h. die Ausgabeabstastwerte werden nicht mit denselben zeitlichen Abständen wie bei der Probennahme ausgegeben, sollen nicht hörbar sein.

### 2. Listen Sie Vorteile auf, die sich mit dem Einsatz der Digitaltechnik in der Audiotechnik ergeben.

Keine Signalveränderungen aufgrund analoger Signalverarbeitung : Schwankungen durch Drift von Spannungen, Bauteileparametern , mechanischen und elektrischen Komponenten und Schaltungen. Beliebig gute Aufnahme –Verarbeitungs- und Wiedergabequalität. Qualität wird nur noch durch die Wandlerqualität bestimmt (A/D-D/A- Wandler Mikros und Lautsprecher). Zusammenfassung von Signalen (Multiplexen) , Zwischenspeicherung, Verarbeitung und Bearbeitung nach (mathematisch) exakter Theorie. Nichtezeit und auch Echtzeitverarbeitung ( innerhalb der Abtastperiode) , Einfügen und Mischen mit Zusatzinformation (Fehlercodierung, Codierung zur Komprimierung, Textinformation , Video ...)

Immer mehr Rechen- und Speicherleistung der PC's sowie von Soundkarten machen es möglich, alle Studioaufgaben zur Musikaufnahme und Musikproduktion digital durchzuführen .

### 3. Was besagt das Shannon'sche Abtasttheorem?

Abtastfrequenz sollte mindestens doppelt so hoch wie die Frequenz der Teilschwingung mit der höchsten im Signal vorkommenden Frequenz sein (Bandbegrenzttes Signal) .D.h. diese Teilschwingung wird dann zweimal pro Periode abgetastet. Am Eingang des A/D-Wandlers ist ein analoges Tiefpaßfilter zur Begrenzung des Frequenzbereichs auf die halbe Abtastfrequenz eingebaut (Anti-Aliasing –Filter AAF) .

### 4. Der A/D- Wandlungsprozeß verläuft in 3 Schritten

--Bandbegrenzung ( Antialiasing Filter)

--Abtasten und Halten

--Quantisieren und Codieren

Erläutern Sie jeweils die Funktionen und die Eigenschaften für jeden Schritt (Annahme normale Audioqualität:  $f_g = 20 \text{ kHz}$  und  $k = 16 \text{ Bit}$ )

**Bandbegrenzung** : Spektrum  $|F(f)| = 0$  für  $f < f_{gr} = 20 \text{ kHz} < f_A/2$  . Damit ist die Information von allem im Signal vorkommenden Teilschwingungen im abgeasteten Signal enthalten. Bei Unterabtastung können bei der Rekonstruktion des Signals im D/A-Wandler Artefakte entstehen, sogenannte Spiegelfrequenzen, die im ursprünglichen Signal nicht vorhanden waren

(Aliasing).

Abtasten und Halten: Abtasten: es werden im Abstand  $T_A = 1/f_A$  dem Signal Abtastwerte entnommen und gehalten, um sie dem A/D-Wandler zur Verarbeitung hinreichend lange am Eingang zur Verfügung zu stellen.

Quantisieren und Codieren : dies erfolgt durch Speicherung der Abtastwerte als 16-Bit Worte ( $2^{16}$  Stufen konstanter Stufenhöhe , lineare Quantisierung) ggf. unter Beimischung von statistischem Rauschen mit einer Amplitude kleiner als die halbe Stufenhöhe ( $\rightarrow$  Dither, dann 20 Bit oder 24 Bit). Bei Weiterverarbeitung durch digitale Signalverarbeitung wird der numerische Wert in Zweierkomplementdarstellung codiert (positive Zahlen beginnen mit MSB 0, neg. mit MSB 1, Zahlenbereich geht von 1000...0000, [untere Grenze des Aussteuerungsbereichs] bis 0111.....1111[ obere Grenze des Aussteuerungsbereichs]).

5. *Der D/A-Wandlungsprozeß vollzieht sich in 2 Schritten*

--Erzeugung von analogen Pulssignalen gemäß den Codewörtern

--Filterung des Puls-Amplituden-modulierten Signals

*Erläutern Sie jeweils die Funktion und die Eigenschaften für jeden Schritt (Annahme normale Audioqualität:  $f_g = 20$  kHz und  $k = 16$  Bit)*

Aus den Codewörtern werden nacheinander im zeitlichen Abstand der Abtastperiode analoge Spannungspulse mit einer Amplitude gemäß dem Wert des Codewortes erzeugt. Diese Pulsfolge wird mit einem Tiefpass-Filter , dessen Grenzfrequenz gleich der halben Abtastfrequenz ist, gefiltert und so in das analoge Signal umgewandelt.

6. *Wie groß ist das Signal- Rausch- Verhältnis für einen 16 Bit und einen 20 Bit Wandler im günstigsten Fall ( Sinus bei Vollaussteuerung ) und im ungünstigsten Fall (Musik mit wechselnder Aussteuerung)?*

$$S_R = 10 \log \frac{P_S}{P_R} \text{ dB} = (6k + K) \text{ dB}$$

$$k = 16 \quad K = 6,8 \quad \text{Sinus} \quad \text{Vollaussteuerung} \quad S_R = 103 \text{ dB}$$

$$k = 16 \quad K = -10 \quad \text{Musik} \quad \text{ungünstige Aussteuerung} \quad S_R = 86 \text{ dB}$$

7. *Was versteht man unter der Zweierkomplement-Darstellung?*

*Siehe 4.*

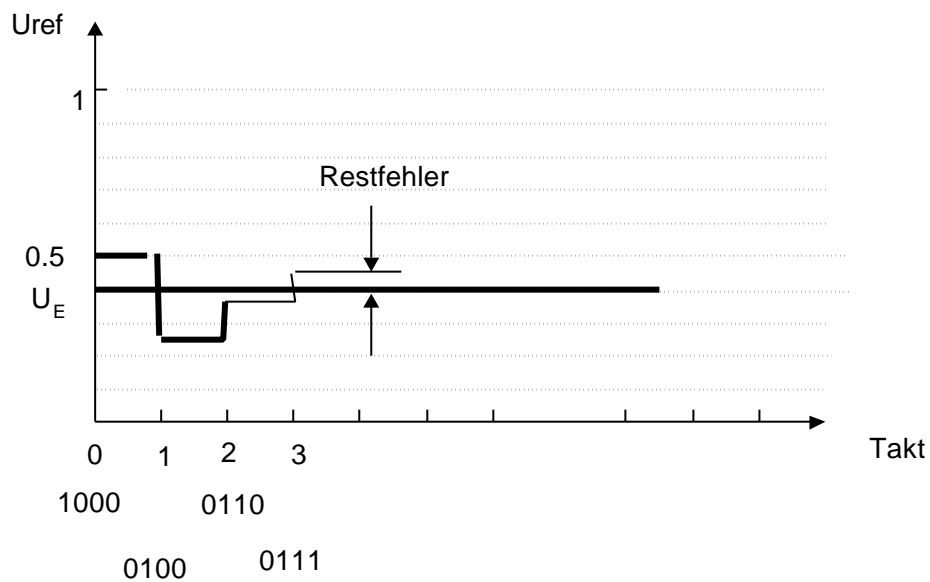
8. *Was versteht man unter Dither, wozu dient er , wo wird er eingesetzt?*

Bei Wandlung Zumischung eines Rauschsignals mit Amplitude kleiner als halbes Quantisierungsintervall  $1/2^{16}$  , führt zu einer Linearisierung der treppenförmigen Wandlerkennlinie, so dass Quantisierungsrauschen auch bei kleinen Amplituden nicht stört. Was bleibt, ist das zugeführte Rauschen. Im Studio häufig auch Wandlung mit 24 Bit und 96 kHz

Abtastrate und erst später Begrenzung auf 16 Bit und 44,1 kHz .

9. In der Zeichnung ist die Prinzipschaltung für einen A/D –Wandler nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation gezeichnet , sowie ein Diagramm für die Referenzspannung. Der Verlauf der Referenzspannung ist für die ersten zwei Schritte eingetragen . Vervollständigen Sie das Bild und erläutern Sie das Verfahren.

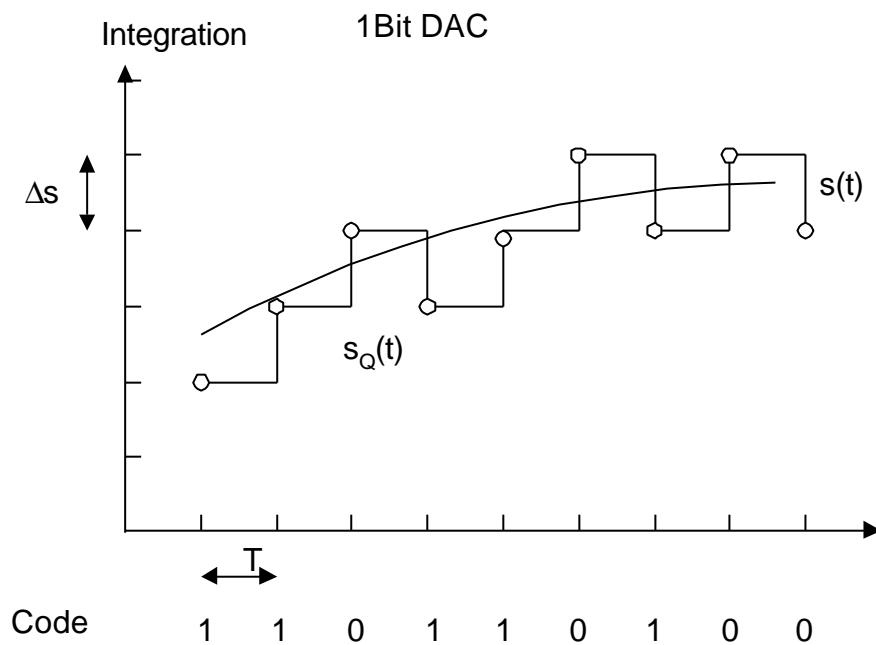
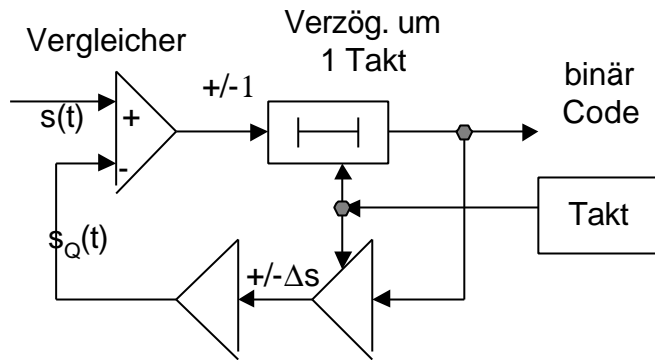
Zu Beginn wird von der Steuerlogik das höchste Bit gleich 1 und die tieferen Bits gleich Null gesetzt. Der Komparator erkennt , ob die vom D/A-Wandler ausgegebene Referenzspannung kleiner oder größer als die zu wandelnde Spannung ist. Ist sie kleiner, so wird beim nächsten Takt durch die Steuerlogik zuerst das zuletzt gesetzte Bit wieder zurückgesetzt, im anderen Fall bleibt es gesetzt. Dann wird das nächst tiefere Bit gesetzt und der Vorgang wiederholt sich.



10. Differentielles PCM und Deltamodulation sind verwandt. Worin besteht die Verwandtschaft?

Deltmodulation ist differentielles PCM , wobei die Differenz zwischen zwei Abtastwerten kleiner als ein Quantisierungsintervall ist. Dadurch ergibt sich ein Ein-Bit Code.

11. In der Abbildung ist das Schema für einen Ein-Bit-Wandler (Delta-Modulator) gezeigt. Vervollständigen Sie den gezeigten Signalverlauf für  $s_Q(t)$  und zeichnen Sie den 1 Bit Code ein.



12. Wahr oder Falsch?

- Ein Sigma –Delta Wandler arbeitet mit einem 16 Bit Wandler nach dem Verfahren der Sukzessiven Approximation **Falsch**
- Beim Deltamodulator braucht man oversampling, beim Sigma Delta Wandler braucht man auch /kein oversampling. **Wahr, auch**
- Die Abtastrate ist beim Sigma-Delta Wandler intern **höher** / niedriger als 44,1 kHz
- Bei Oversampling beträgt die Abtastrate bis zu 64 x44.1 kHz. → **Wahr**
- Die Sigma-Delta-Wandlertechnik mit oversampling ermöglicht es
  - Flache analoge Antialiasing Filter einzusetzen **Ö**
  - Digitale Antialiasing Filter einzusetzen **falsch**
  - Ein 16 Bit PCM Signal zu erzeugen **Ö**
  - Einen schnellen 1-5 Bit AD-Wandler einzusetzen **Ö**
  - Einen hochratigen „niederbittigen Code“ (1-5 Bit) zu erzeugen **Ö**
  - Digitale Dezimations- und Interpolationsfilter zu verwenden. **Ö**

4. Wie wird der DVD –Code erzeugt?

Durch eine Sigma-Delta Wandler , die hochratigen Codeworte werden nicht mehr in die niederratigen Codeworte für die 44,1 kHz Abtastwerte umgewandelt.

5. Wie läßt sich der DVD- Code in normalen PCM- Code überführen ?

Durch das sog. Dezimationsfilter . Es werden aus den Codewörtern für den differentiellen Code die Codewörter für den Code der Abtastwerte berechnet.

6. Wie läßt sich der normale PCM-Code in den DVD –Code überführen?

Durch ein Interpolationsfilter, Umkehrung des Prozesses aus Frage Nr. 5.

7. Was versteht man unter fehlerkorrigierenden Codes?

Zu den Codewörtern der Abtastwerte werden nach einem mathematischen Verfahren Zusatzbits berechnet. Dadurch wird Redundanz geschaffen. Im Empfänger können Übertragungsfehler erkannt und korrigiert werden.

8. Wie werden beim normalen CD-System Burst-Fehler behoben, obwohl der eingesetzte fehlerkorrigierende Code nur wenige Bit pro Block korrigieren kann?

Durch Interleaving. Mehrere Datenblöcke werden zu einem großen Block zusammengefaßt. In diesem Block werden die Bits verwürfelt ( zum Bsp. zeilenweise in Feld bzw. Matrix einlesen und spaltenweise auslesen) . Im Empfänger wird die Verwürfelung wieder rückgängig gemacht. Wenn bei der Übertragung mehrere Bits intereinander gestört werden , so werden sie nach der

Entwürfelung im Empfänger wieder separiert.

9. *Wozu dient beim normalen CD-System die zusätzliche Leitungscodierung?*

Zur Entfernung des Gleichanteils, zur Gewährleistung, dass nur max. 4 gleiche Bits aufeinander folgen, zur Erzeugung eines differentiellen Codes, das optische Abtastsystem nur erkennt, ob es einen Wechsel gibt aber nicht erkennt, ob es  $1 \rightarrow 0$  oder  $0 \rightarrow 1$  war.

10. *Wie hoch ist beim normalen CD-System die Codeeffizienz (Zahl der Nutzbits zur Zahl der übertragenen Bits)*

*Signalratenrate* = 2,0338 Mbit/s

*Kanalratenrate* = 4,321 Mbit/s

$\rightarrow 2,15$

11. *Wie groß ist die Datenrate für digitales Audiomaterial (Wave) mit 2 Kanälen (Stereo) und normaler Studioqualität? Wieviel Speicherplatz benötigen 3 Min. Musik in diesem Format?*

$k_{xf_A} \times 2 = 16 \times 44,1 \times 10^3 \times 2 / \text{sec} = 1411,2 \text{ kbit/s}$

3 Min = 30,28 MByte



## 2.2 MP3

1. *In einem MP3 Encoder (z.B. Xing) kann die Zieldatenrate von 30 kbit/s bis 128 kbit/s eingestellt werden. Was ist realistisch einzustellen, wovon hängt es ab, welchen Wert man einstellt?*

Kompressionfaktor 10 bis 20 verändert die Qualität von Stereo-Audio nicht. Da normales PCM Audio im Format Wave (16 Bit, 44,1 kHz, 2 Kanäle) eine Datenrate von 1411,2 kbit/s hat, ergibt sich bei 160 kbit/s bis 80 kBit/s Zieldatenrate keine Veränderung des Höreindrucks.

2. *Das psychoakustische Modell das beim MP3 Codierungsprozeß eingesetzt wird, setzt an den folgenden drei Dimensionen (Aspekten) des Hörereignisses ein: Frequenzbereich, Zeitbereich und Räumliche Empfindung. Am wichtigsten sind Verdeckungs-Effekte im Frequenzbereich. Erläutern Sie das psychoakustische Modell.*

Im Ohr wird durch das Schallsignal die Ausbreitung einer gedämpften Welle angeregt. Dadurch ergibt sich auf der Basilarmembran ein Schwingungsmuster, bei dem die Orte mit maximaler Auslenkung den Amplituden der Teilschwingungen im Signal entsprechen. Das momentane Amplituden-Frequenzspektrum wird erfasst. Dabei ergeben sich auf der Basilarmembran durch starke Auslenkungen Beeinflussungen der Nachbarbereiche. Dies führt zu einer Reduzierung der Empfindlichkeit der Sinneszellen in der Nähe einer starken Auslenkung der Membran:

Verdeckungseffekt. Dieser Verdeckungseffekt kann auch im Zeitbereich auftreten.

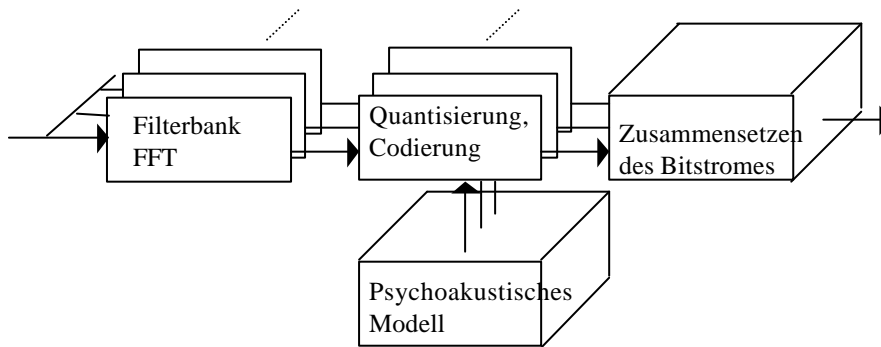
Das Stereosignal kann als Summen- und als Differenzsignal zwischen dem Links und dem Rechtssignal übertragen werden. Dabei kann das Differenzsignal mit wesentlich geringerer Datenrate übertragen werden, da die sich Links- und das Rechtssignal ähnlich sind. Im Empfänger wird aus dem Summen- und dem Differenzsignal wieder das Links- und das Rechts-Signal rekonstruiert.

Beim MP3- Codierungsprozeß wird das Zeitsignal abschnittsweise durch die diskrete Cosinustransformation in den Frequenzbereich transformiert und dort in (32) Frequenzbänder eingeteilt. In den Frequenzbändern, die Amplituden von dominierenden Teilschwingungen enthalten, wird die Quantisierung (Auflösung) verringert. Dadurch wird die Datemenge reduziert. Zusätzlich wird die Datenrate durch eine Huffman Codierung reduziert (variable Wortlänge gemäß der Häufigkeit von Codewörtern).

3. *Erläutern Sie schematisch die Schritte bei der MP3 Codierung. Insbesondere erläutere man, welche digitalen Signal- Transformationen benötigt werden.*

Siehe oben, Diskrete Cosinus-Transformation (wie Fouriertransformation, nur reell), inverse diskrete Cosinustransformation

4. (Prfg SS00 ) Die Abbildung 1 zeigt das Prinzip des MP3 Kompressionsverfahrens. Dabei wird das Audio-PCM-Signal zeitabschnittsweise in den Frequenzbereich transformiert (FFT). Die Spektralkomponenten des Signals werden innerhalb von 32 Frequenzbändern jeweils gemäß eines psychoakustischen Modells quantisiert und codiert (Encodierung). Auf der Empfängerseite erfolgt umgekehrt wieder die Decodierung und die Rückwandlung des Frequenzspektrums in ein Zeitsignal (IFFT).



- a) Erläutern Sie den psychoakustischen Effekt, aufgrund dessen die Quantisierung erfolgt. In welcher Größenordnung ist der erzielbare Kompressionsfaktor?  
Siehe Frage 1 bis 3

- b) Die Quantisierung wird so angepasst, daß das Quantisierungsrauschen nicht wahrnehmbar ist. Die Abbildung 2 zeigt das Spektrum eines Signals ( bestehend aus mehreren Einzel-Sinustönen) vor der Kompression. Zeichnen Sie in die Abbildung qualitativ den durch die geringere Quantisierung entstehenden Zusatz-Rauschanteil ein, wie er sich nach der Encodierung/Decodierung ergeben könnte.

