

# Kommunikationstechnik I

---

Prof. Dr. Stefan Weinzierl

## Musterlösung 4. Aufgabenblatt

### 1. Psychoakustik

#### 1.1 Was ist ein Tonschwellenaudiogramm ?

Durch ein Tonschwellenaudiogramm (engl: hearing loss) wird die Hörfähigkeit einer Versuchsperson bestimmt. Dabei wird frequenzabhängig die Empfindlichkeit des Gehörs gemessen und das Ergebnis relativ zur mittleren Hörfähigkeit der Bevölkerung angegeben. Die Messung erfolgt an sieben Frequenzstellen im Bereich von 125 Hz bis 8 kHz im Oktavabstand.

#### 1.2 Beschreiben Sie die Methode der Békésy-Audiometrie zur Bestimmung des Tonschwellenaudiogramms.

Das Verfahren von Békésy dient der Bestimmung der Hörschwelle einer Versuchsperson. Dabei wird die Frequenz eines Sinustons langsam kontinuierlich von 125 Hz bis 8 kHz erhöht (typischerweise in einem Zeitraum von 5 Minuten). Mithilfe eines Knopfes kann die Versuchsperson die Lautstärke des Tones erhöhen und verringern. Der Ton pendelt dabei in einem Bereich von knapp über der Hörschwelle bis knapp unterhalb der Hörschwelle. Die Aufgabe der Person ist es, den Knopf gedrückt zu halten, falls der Ton nicht mehr zu hören ist, sodass sich die Lautstärke wieder erhöht, und ihn loszulassen, wenn er wieder zu hören ist. Die Amplitudenänderungen der Sinustöne werden durch einen Pegelschreiber aufgezeichnet und das Ergebnis entspricht der Hörschwelle der Versuchsperson.

#### 1.3 Beschreiben Sie einige methodische Fehlerquellen, die bei dieser Methode auftreten können, insbesondere das sog. Kriterienproblem.

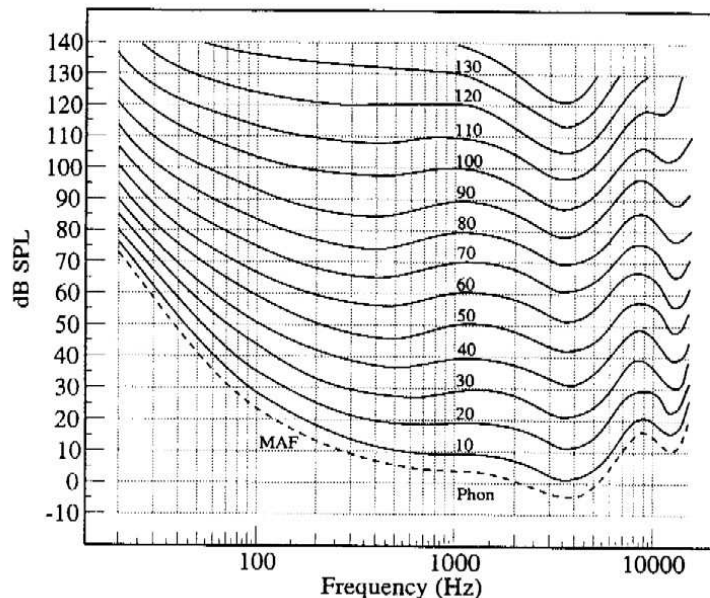
Die wesentlichen Fehlerquellen bei der Messmethode nach von Békésy sind zum einen sog. „Habituations- und Antizipationsfehler“ und zum anderen das sog. Kriterienproblem.

„Habituations- und Antizipationsfehler“ entstehen dadurch, dass der Versuchsperson der Versuchsablauf bekannt ist. Sie hat demnach eine gewisse Erwartungshaltung, auf was sie im folgenden achten soll. Dadurch ist es möglich, dass die Versuchsperson entweder Wahrnehmungen vorwegnimmt (antizipiert) oder zu lange wartet, weil sie eine bestimmte Reizwahrnehmung erwartet.

Das Kriterienproblem besteht darin, dass jede Versuchsperson die Entscheidung treffen muss, wann ein Ton gehört wurde und wann nicht. Das Kriterium für diese Entscheidung wird dabei von verschiedenen Versuchspersonen unterschiedlich gesetzt. Während manche ein sehr striktes Kriterium anwenden und nur dann die Entscheidung treffen, wenn sie sich wirklich sicher sind, werden andere Personen ein weniger striktes Kriterium anwenden und die Entscheidung auch dann treffen, wenn sie sich noch unsicher sind.

1.4 Wann verwendet man bei der Messung von Schallpegeln Frequenzbewertungskurven?

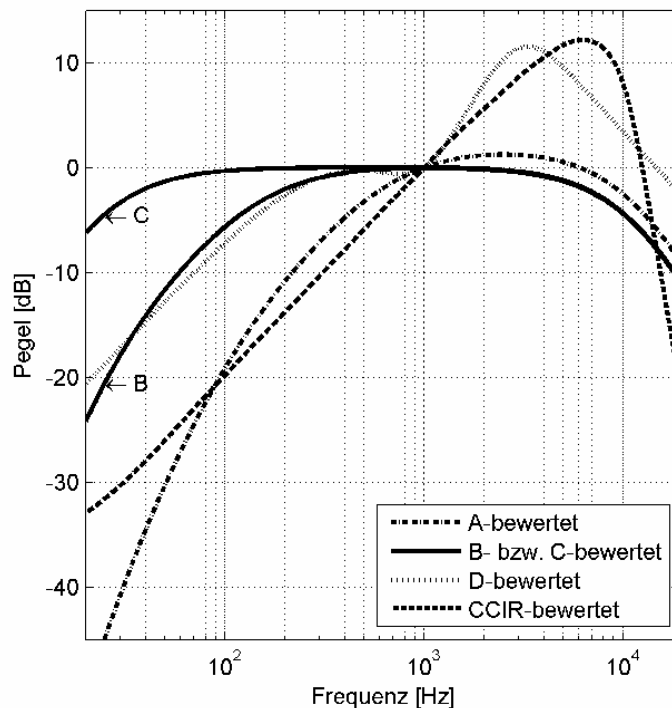
Frequenzbewertungskurven werden immer dann verwendet, wenn man ein an die menschliche Wahrnehmung angepasstes Lautstärkemaß benötigt. Man unterscheidet in der Psychoakustik die Begriffe „Lautstärke“ und „Lautheit“. Die „Lautstärke“ bezieht sich in diesem Zusammenhang auf den Pegel eines Signals. Spricht man zum Beispiel davon, die Lautstärke eines Signals um 3dB zu erhöhen, dann wird man die Amplitude des Signals um 3dB erhöhen und dabei alle im Signal enthaltenen Frequenzen gleichmäßig anheben. Signale mit gleichem (Schalldruck-)Pegel rufen jedoch nicht notwendigerweise die gleiche Lautstärkeempfindung hervor. Betrachtet man die „Kurven gleicher Lautheit“, die von Fletcher-Munson für Kopfhörer- und von Robinson-Dadson für Lautsprecherwiedergabe gefunden wurden, dann kann man erkennen, dass Sinustöne mit verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Pegel erfordern um die gleiche wahrgenommene Lautstärke hervorzurufen. Oder anders herum betrachtet: Sinustöne mit gleicher Amplitude aber unterschiedlicher Frequenz werden meist als unterschiedlich laut wahrgenommen.



Aus dieser Erkenntnis hat man die sog. Bewertungskurven entworfen. Bewertungskurven sind Frequenzgänge von Filtern, die auf ein Signal angewendet werden, um ein Maß für die vom Menschen wahrgenommene Lautheit zu bekommen.

1.5 Welche Frequenzbewertungskurven kennen Sie? Wenn die Messung eines Störgeräuschpegels 1. A-bewertet und 2. C-bewertet vorgenommen wird, wie unterscheidet sich das Ergebnis ?

Die bekanntesten Bewertungskurven sind die A-, B-, C-, D- und CCIR-Bewertungskurven (siehe Abbildung).



Die Bewertungskurven A bis D sind den Kurven gleicher Lautheit mit unterschiedlichen phon-Werten angenähert. Der reziproke Verlauf mag zunächst verwundern, erklärt sich jedoch sehr leicht: wie in Aufgabe 1.4 erläutert, werden tiefe und hohe Frequenzen bei gleichem Pegel leiser wahrgenommen als mittlere Frequenzen. Um also ein Lautstärkemaß zu bekommen, das dem menschlichen Hören entspricht, müssen also ebenfalls diese Frequenzanteile entsprechend abgesenkt werden.

Die A-Kurve ist den phon-Kurven unterhalb von 30 phon, die B-Kurve den Kurven zwischen 30 und 60 phon und die C-Kurve den Kurven über 60 phon angenähert. Die D-Kurve entspricht den phon-Kurven mit sehr großer Lautstärke und wird gern bei z.B. bei Messungen von Fluglärm angewendet.

Wie man dem Diagramm entnehmen kann, senkt die A-Bewertungskurve deutlich stärker tiefe Frequenzen ab als die C-Kurve. Frequenzen oberhalb von 1 kHz werden von der A-Kurve etwas stärker bewertet als von der C-Kurve. In der Regel wird man daher bei breitbandigen Signalen durch Anwendung eines A-Bewertungsfilters geringere Pegelwerte erhalten als bei einem C-Bewertungsfiler. Bei der Lärmmessung ist das A-bewertete Ergebnis also besser als das C-bewertete.

#### 1.6 Erklären sie den Sinn der „Loudness“-Taste an Ihrer Hifi-Anlage.

Die Loudness-Taste soll ebenfalls dem Frequenzgang des Gehörs Rechnung tragen. Wie man den Kurven gleicher Lautheit entnehmen kann, werden bei geringen Pegeln sehr tiefe und sehr hohe Frequenzen im Verhältnis zu mittleren Frequenzen stärker benachteiligt als dies bei mittleren oder höheren Pegeln der Fall ist; die Kurven verlaufen in diesen Frequenzbereichen deutlich steiler. Der Loudness-Schalter dient daher dazu, bei geringen Abhörlautstärken eine Korrektur des Frequenzgangs durch Anhebung tiefer und hoher Frequenzen vorzunehmen.

#### 1.7 Für einen psychoakustischen Codec zur Bitratenreduktion soll ermittelt werden, wo die „Transparenzschwelle“ liegt, d.h. bei welcher Bitrate (wobei wir annehmen, dass sie sich stufenlos verändern lässt) ein gerade wahrnehmbarer Unterschied zum Original hörbar ist.

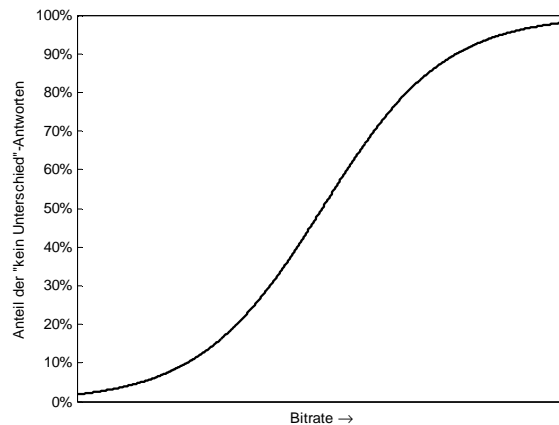
Skizzieren Sie ein mögliches Versuchsdesign 1. nach dem Konstanzverfahren und 2. als adaptiver forced-choice-Versuch und diskutieren Sie Vor- und Nachteile der beiden Verfahren.

Für beide Verfahren bedarf es mehrerer Hörbeispiele, die nach dem zu untersuchenden Kriterium variiert wurden. In dem konkreten Fall handelt es sich dabei also um ein kurzes Stück Audio, das zunächst in unkomprimierter Form vorliegt (Original) und dann mit verschiedenen Bitraten kodiert wurde. Je geringer die Bitrate, desto deutlicher werden Artefakte hörbar sein.

## 1. Konstanzverfahren

Beim Konstanzverfahren wird der Versuchsperson jeweils ein kodiertes Hörbeispiel im Vergleich zum Original vorgespielt. Die Versuchsperson soll dabei jeweils entscheiden, ob sie einen Unterschied zwischen den beiden Signalen gehört hat, oder nicht.

Für jedes Hörbeispiel wird nach Versuchsende berechnet, welcher Prozentsatz der Versuchspersonen den Unterschied gehört hat. Es ergibt sich ein Kurvenverlauf, der in etwa folgende Form aufweist:



Die Position, an der die Hälfte der Versuchspersonen einen Unterschied zum Original gehört hat, wird als „Schwellwert“ bezeichnet.

Auch bei diesem Verfahren ist das Kriterienproblem vorhanden.

## 2. Forced-Choice-Verfahren

Die sog. Forced-Choice-Verfahren nehmen der Versuchsperson das Kriterium zu entscheiden, ob ein Unterschied gehört wurde oder nicht, ab.

Bei diesen Verfahren werden der Versuchsperson ebenfalls jeweils zwei Signale vorgespielt: das Original und ein Beispiel mit verringerter Bitrate. Die Versuchsperson weiß im Vorhinein, dass immer ein Beispiel das Original ist und das andere eines der zu testenden Signale. Die Versuchsperson soll nun entscheiden, welches der beiden Signale das richtige war.

Bei diesem Verfahren kann es also keine „Jasage“-Tendenz geben, da die Versuchsperson ja weiß, dass es in jedem Durchgang ein zu entdeckendes Beispiel vorkommt.

Meist wird das Forced-Choice-Verfahren auch adaptiv angewendet. Das bedeutet, dass sich das Vorspielen eines Beispiels nach der vorherigen Antwort der Versuchsperson richtet. Hat sie also ein Beispiel richtigerweise als unterschiedlich erkannt und ausgewählt, dann wird das Beispiel im folgenden Durchgang eines sein mit geringerem Unterschied zum Original und umgekehrt.

## 2. Mikrofone

### 2.1 Was versteht man unter dem (Feld-)Übertragungsfaktor eines Mikrofons?

Der Übertragungsfaktor eines Mikrofons (engl. Sensitivity) ist das Verhältnis von ausgegebener Spannung zu anliegendem Schalldruck:

$$B = \frac{U}{p}$$

Er wird in  $\frac{\text{mV}}{\text{Pa}}$  angegeben.

### 2.2 Welche Komponenten haben einen Einfluss auf den Frequenzgang eines Mikrofons und in welcher Weise beeinflussen sie ihn?

#### 1. Kapselkonstruktion

Druckempfänger weisen bei frontalem Schalleinfall einen konstanten Frequenzgang auf. Der Frequenzgang von Druckgradientenempfängern hingegen fällt zu tiefen Frequenzen hin stark ab.

#### 2. Wandlungsprinzip

Man unterscheidet zwischen Auslenkungsempfängern (z.B. Kondensatormikrofone) und Geschwindigkeits-Empfängern (z.B. elektrodynamische Mikrofone / Tauchspulenmikrofone).

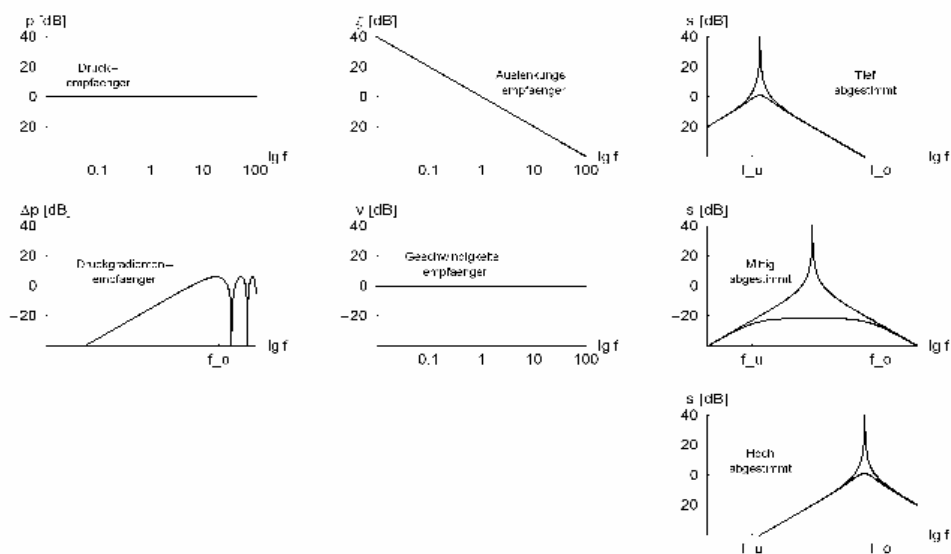
Im ebenen Schallfeld ergibt sich bei konstanten Druck über alle Frequenzen eine konstante Geschwindigkeit.

Da die Auslenkung das Integral der Geschwindigkeit ist, ergibt sich ein Abfall mit  $1/\omega$ .

#### 3. Abstimmung

Durch die Lage der Resonanzfrequenz der Mikrofonmembran lässt sich der Frequenzgang ebenfalls beeinflussen. Man unterscheidet zwischen tief abgestimmten, mittlenabgestimmten und hoch abgestimmten Membranen.

Die bauartbedingten Frequenzgänge ergeben sich wie folgt:



- 2.3 Welchen prinzipiellen Frequenzgang weist ein Mikrofon auf, das 1. auf den Schalldruck reagiert, 2. als Auslenkungsempfänger arbeitet und 3. hoch abgestimmt ist?

Der Frequenzgang des Mikrofons ergibt sich aus der Überlagerung der Frequenzgänge, die sich durch die einzelnen Komponenten ergeben. In diesem Fall also den Frequenzgang eines Druckempfängers (idealerweise über den gesamten Frequenzbereich konstant), eines Auslenkungsempfängers (Abnahme mit  $1/\omega$  also 6dB/Oktave) und einer hohen Abstimmung (Zu- und Abnahme unterhalb und oberhalb der Grenzfrequenz mit 6dB/Oktave).

Qualitativ ergibt sich demnach ein Frequenzgang, der bis zur Resonanzfrequenz der Membran konstant verläuft, da sich die Frequenzgänge, die sich durch den Auslenkungsempfänger und die hohe Abstimmung ergeben sich kompensieren. Oberhalb der Resonanzfrequenz fällt der Frequenzgang schließlich mit 12dB/Oktave ab.

- 2.4 Wodurch ist die obere Grenzfrequenz des Systems gegeben und wie lässt sie sich konstruktiv nach oben ausdehnen?

Die obere Grenzfrequenz ist durch die Resonanzfrequenz der Membran gegeben. Um diese Frequenz weiter nach oben zu verschieben, wäre es denkbar, die Membran stärker einzuspannen, bzw. die Masse der Membran zu verkleinern.