

# Kommunikationstechnik I

Prof. Dr. Stefan Weinzierl

## Musterlösung 8. Aufgabenblatt

### 1. Mikrofone

- 1.1 Wodurch unterscheidet sich ein freifeldentzerrter von einem diffusfeldentzerrten Druckempfänger? Skizzieren Sie die resultierenden Frequenzgänge dieser beiden Mikrofontypen im **Freifeld**.

Der sog. Druckstauereffekt entsteht bei der Reflexion einer Schallwelle an der Mikrofonmembran. Durch die Reflexion überlagern sich hin- und rücklaufende Welle unmittelbar vor der Membran und es entsteht ein erhöhter Druck. Dies macht sich besonders bemerkbar im Freifeld, da hier der Schall im wesentlichen von vorne auf die Membran auftrifft. Dazu wirkt sich der Druckstau lediglich im hohen Frequenzbereich aus, da die Mikrofonmembran für diesen Frequenzbereich ein Hindernis darstellt. Tiefe Frequenzen werden um die Membran herumgebeugt. Ein Druckempfänger ohne weitere Entzerrungsmaßnahme ist somit ein sog. diffusfeldentzerrter Druckempfänger, da er nur im diffusen Schallfeld einen annähernd konstanten Frequenzgang aufweist. Setzt man einen diffusfeldentzerrten Druckempfänger im Freifeld ein, so tritt eine Überhöhung der hohen Frequenzen um bis zu 6 dB auf.

Freifeldentzerrte Druckempfänger gleichen diese Überhöhung aus, klingen dementsprechend im Diffusfeld dumpfer.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Frequenzgang eines diffusfeldentzerrten Mikrofons:

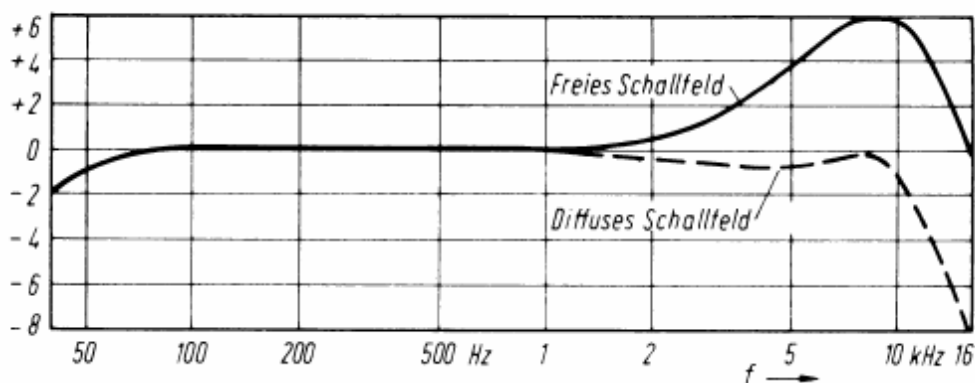
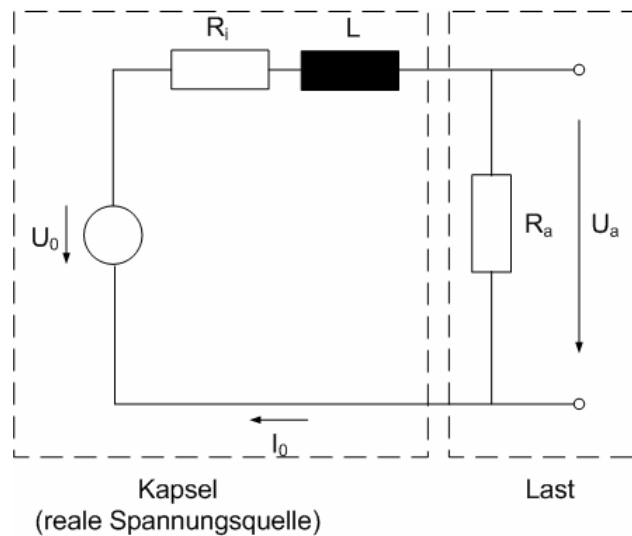


Abbildung 1: Frequenzgang eines diffusfeldentzerrten Druckempfängers

- 1.2 Gegeben seien das elektrische Ersatzschaltbild des elektrodynamischen Mikrofons und dessen elektromechanische Wandergleichung (Gl. 1.1). Dieser zufolge ist die Ausgangsspannung direkt von der Membranschnelle abhängig:



$$U_0 = B \cdot I \cdot v \quad (\text{Gl. 1.1})$$

$U_0$  = Induktionsspannung

$U_a$  = Ausgangsspannung

$R_a$  = Abschlusswiderstand

$R_i$  = ohmscher Innenwiderstand der Schwingspule

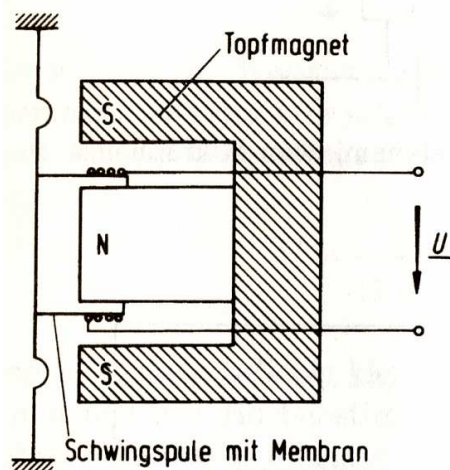
$L_i$  = Induktivität der Schwingspule

Leiten Sie anhand des frequenzabhängigen Verhaltens der elektrischen und mechanischen Baugruppen den Frequenzgang des Übertragungsfaktor  $G_{up} = U_a/p$  des Mikrofons her.

Der Frequenzgang des Mikrofons wird durch zwei Komponenten bestimmt:

1. durch das mechanische Verhalten der Mikrophonkapsel und
2. durch den elektrischen Aufbau des Übertragungssystems

Der mechanische Aufbau eines dynamischen Mikrofons wird im folgenden Bild veranschaulicht:



Der elektrische Aufbau des Übertragungssystems ist der Aufgabenstellung zu entnehmen.

Gleichung 1.1 verbindet diese beiden Teile, indem sie angibt wie die (mechanische) Geschwindigkeit  $v$  in (elektrische) Spannung umgesetzt wird. Im Folgenden betrachten wir den mechanischen und den elektrischen Teil zunächst getrennt voneinander und fügen beide später zu einer Gleichung zusammen.

### 1. Mechanischer Aufbau

Der Schalldruck, der auf die Membran wirkt, hat eine Kraft auf die Membranfläche zur Folge:

$$p = \frac{F}{S}$$

Die aufgehängte Membran lässt sich als Feder-Masse-System auffassen. Für sie gilt die Schwingungsgleichung:

$$F = m \cdot \ddot{x} + r \cdot \dot{x} + D \cdot x \quad (1)$$

Zur Erläuterung: Die insgesamt auf die Membran wirkende Kraft setzt sich zusammen aus drei Kräften:

1. der Kraft  $F$ , die von außen auf die Membran einwirkt. Diese hat in unserem Falle ihre Ursache im Schalldruck.

2. der Federkraft der Membran, die der Auslenkung entgegen wirkt.

$$F_D = D \cdot x$$

$D$  – Federkonstante

$x$  – Auslenkung aus der Ruhelage

3. der Reibungskraft, die in unserem Fall der Luftreibung entspricht. Sie sorgt dafür, dass die Membran nicht ungedämpft schwingt, sondern nach einiger Zeit in ihre Ruhelage zurückkehrt.

$$F_r = r \cdot v$$

$r$  – Reibungskoeffizient

$v$  – Geschwindigkeit der Membran

Die resultierende Kraft, die zu einer beschleunigten Bewegung der Membran führt, lässt sich also wie folgt ausdrücken (die Vorzeichen berücksichtigen die Richtung der Kräfte):

$$F_{\text{gesamt}} = F - F_D - F_r$$

$$m \cdot \ddot{x} = F - D \cdot x - r \cdot \dot{x}$$

$$\Rightarrow F = m \cdot \ddot{x} + r \cdot \dot{x} + D \cdot x$$

Um einen Zusammenhang zwischen den mechanischen und den elektrischen Eigenschaften des Mikrofons herzustellen, ist später notwendig, die Geschwindigkeit in Gleichung 1.1 durch die Geschwindigkeit zu ersetzen, die der mechanische Aufbau hervorruft. Daher drücken wir Gleichung (1) mithilfe der Geschwindigkeit aus und erhalten so einen Ausdruck für die durch den Schalldruck erzeugte Geschwindigkeit der Membran.

Geht man davon aus, dass die Membran harmonisch schwingt, dann lässt sich die Auslenkung  $x$  beschreiben durch:

$$x = \hat{x}e^{j\omega t}$$

und es ergeben sich Geschwindigkeit  $v$  und Beschleunigung  $a$  als Ableitung von  $x$  nach der Zeit:

$$v = \dot{x} = j\omega \cdot \hat{x}e^{j\omega t} = j\omega \cdot x$$

$$a = \ddot{x} = -\omega^2 \cdot \hat{x}e^{j\omega t} = -\omega^2 \cdot x$$

Eingesetzt in die Gleichung für  $F$  ergibt sich:

$$F = -m\omega^2 x + r \cdot j\omega x + D \cdot x$$

$$= \underbrace{j\omega x}_v \cdot \left( j\omega m + r + \frac{D}{j\omega} \right)$$

$$= v \cdot \left( j\omega m + r + \frac{D}{j\omega} \right)$$

$$\Rightarrow v = \frac{F}{j\omega m + r + \frac{D}{j\omega}} = \frac{pS}{j\omega m + r + \frac{D}{j\omega}} \quad (2)$$

## 2. Elektrischer Aufbau

Der elektrische Aufbau lässt sich nach dem Ersatzschaltbild der Abbildung und dem Ohmschen Gesetz folgendermaßen ausdrücken:

$$\frac{U_a}{U_0} = \frac{R_a}{R_a + R_i + j\omega L_i}$$

$$\Rightarrow U_a = U_0 \frac{R_a}{R_a + R_i + j\omega L_i} \quad (3)$$

Durch Verknüpfen der mechanischen (2) und elektrischen (3) Anteile, ergibt sich der Übertragungsfaktor, also der Zusammenhang von einfallendem Schalldruck zur Ausgangsspannung zu:

$$U_a = U_0 \frac{R_a}{R_a + R_i + j\omega L_i} \quad \text{Gl. 1.1 einsetzen}$$

$$= Blv \cdot \frac{R_a}{R_a + R_i + j\omega L_i} \quad \text{Gl. (2) einsetzen}$$

$$= Bl \frac{pS}{j\omega m + r + \frac{D}{j\omega}} \cdot \frac{R_a}{R_a + R_i + j\omega L_i}$$

$$G_{up} = \frac{U_a}{p} = BlS \cdot \underbrace{\frac{1}{j\omega m + r + \frac{D}{j\omega}}}_{\text{mechanischer Aufbau}} \cdot \underbrace{\frac{R_a}{R_a + R_i + j\omega L_i}}_{\text{elektrisches Übertragungssystem}}$$

- 1.3 Leiten Sie aus der Formel für  $G_{up}$  asymptotisch den Frequenzgang des Übertragungsfaktors ab (Skizze). Kennzeichnen Sie die charakteristische Frequenzen und das Anstiegsverhalten des Betragsfrequenzgangs in [dB/oct].

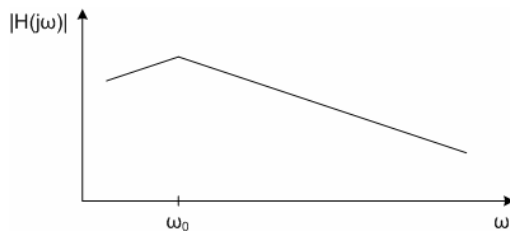
Der Frequenzgang, der sich durch den mechanischen Aufbau ergibt gleich dem eines Feder-Masse-Systems: Bis zur Resonanzfrequenz steigt er mit  $\omega$  an, nimmt also mit 6 dB pro Oktave zu, oberhalb der Resonanzfrequenz nimmt er mit 6 dB pro Oktave ab. Dies lässt sich auch aus der Gleichung ablesen: Für sehr kleine

Frequenzen  $\omega$  überwiegt die Gleichung der Term  $\frac{1}{D/j\omega} = \frac{j\omega}{D}$ , der Frequenzgang

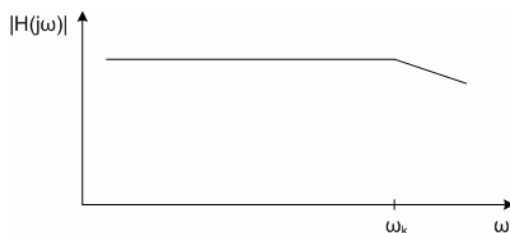
steigt also mit der Frequenz an. Für sehr große Frequenzen  $\omega$  hingegen ist dieser

Term zu vernachlässigen und es überwiegt der Term  $\frac{1}{j\omega m}$ , der Frequenzgang sinkt

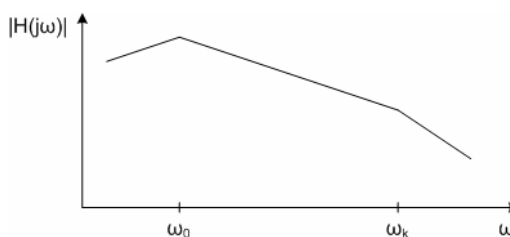
also mit der Frequenz ab. Der Verlauf ergibt sich wie folgt:



Das elektrische Übertragungssystem hingegen hat Tiefpasscharakter, der Frequenzgang sinkt oberhalb einer Knickfrequenz  $\omega_k$  mit 6 dB pro Oktave. Dies lässt sich auch aus Gleichung (1) ersehen: wächst die Frequenz  $\omega$  an, dann wächst auch der Nenner. Wenn der Nenner aber größer wird, dann sinkt die Stromstärke.



Der resultierende Frequenzgang sieht demnach wie folgt aus:



Unterhalb der Resonanzfrequenz ergibt sich ein Anstieg um 6 dB/Oktave, zwischen Resonanzfrequenz und Knickfrequenz sinkt der Frequenzgang um 6 dB/Oktave, oberhalb der Knickfrequenz mit 12 dB/Oktave.

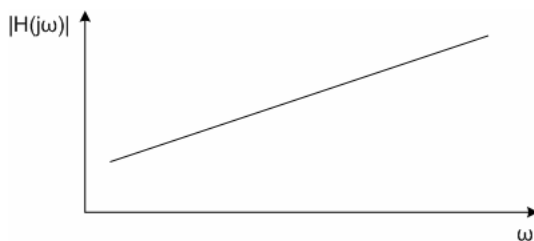
- 1.4 Wie unterscheidet sich der Übertragungsfaktor des elektrodynamischen Lautsprechers von dem des elektrodynamischen Mikrofons und warum?

Im Falle eines elektrodynamischen Lautsprechers wird das Verhältnis von abgegebenem Schalldruck zur angelegten Spannung betrachtet. In diesem Fall müssen zusätzlich noch die Abstrahlungseigenschaften des Lautsprechers berücksichtigt werden, die zu einem bestimmten Schalldruck an einem Punkt im Raum führen.

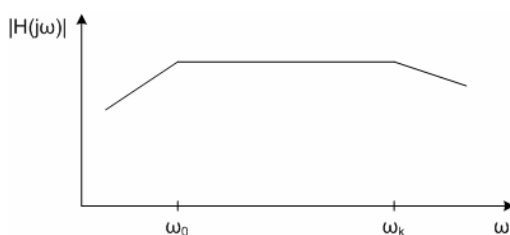
Da der Lautsprecher in der Akustik als Volumenquelle (Kugelquelle) behandelt wird, ergibt sich der Schalldruck an einem Punkt im Raum zu

$$p = j\omega\rho v a \frac{e^{-jkr}}{r}$$
, mit  $v$  als der Geschwindigkeit der schwingenden Kugeloberfläche und  $a$  als dem Radius der Kugel.

Für den insgesamt resultierenden Frequenzgang ergibt sich somit noch ein weiterer Teilfrequenzgang, der mit 6 dB/Oktave ansteigt:



Insgesamt ergibt sich dadurch der Frequenzgang des Lautsprechers wie folgt:



## 2. Stereofone Aufnahmeverfahren (AB)

- 2.1 Erläutern Sie die Funktionsweise eines laufzeitstereophonen Mikrofonsystems.

Trifft ein Schallereignis aus einer bestimmten Richtung beim Hörer ein, dann wird es zum einen an dem dem Schallereignis zugewandten Ohr geringfügig lauter wahrgenommen als an dem angewandten Ohr, und zum anderen trifft es auf der abgewandten Seite mit einer gewissen Verzögerungszeit ein. Das menschliche Ohr wertet diese Informationen aus, um das Ereignis zu lokalisieren.

Diese Tatsache bildet die Grundlage für die stereophonen Aufnahmeverfahren Laufzeitstereophonie, Pegeldifferenzstereophonie und Äquivalenzstereophonie.

Im Falle der Laufzeitstereophonie werden zwei Mikrofone in einem gewissen Abstand zueinander positioniert, sodass Schall, der etwas seitlich auf des Mikrofonsystem auftritt unterschiedliche Laufzeiten zu den einzelnen Mikrofonen aufweist.

Pegeldifferenzen, die sich durch diese Abstände ergeben, sind dabei sehr gering und werden in der Regel vernachlässigt.

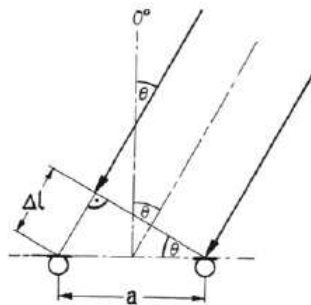
Bei der Pegeldifferenzstereophonie befinden sich die Mikrofone am gleichen Ort, es entstehen also keine Laufzeitunterschiede zwischen den beiden Mikrofonen.

Stattdessen werden bei der Pegeldifferenzstereophonie stets gerichtete Mikrofone verwendet und gegeneinander verdreht, sodass sich –bedingt durch die Richtcharakteristik der Mikrofone – bei verschiedenen Einfallsrichtungen verschiedene Pegeldifferenzen ergeben.

Die Äquivalenzstereophonie vereint die beiden Verfahren, indem gerichtete Mikrofone gegeneinander verdreht und in einem Abstand zueinander positioniert werden, sodass sowohl Laufzeit- als auch Pegelunterschiede entstehen.

- 2.2 Welchen Aufnahmewinkel besitzt ein AB-Mikrofonsystem, das eine Mikrofonbasis von 60 cm aufweist?

Die Skizze zur Laufzeitstereophonie ergibt sich wie folgt:



Dabei bezeichnet  $\Delta l$  die Wegdifferenz, die der Schall zum linken Mikrofon mehr zurücklegen muss, als zum rechten. Sie lässt sich mithilfe des Winkels  $\theta$  und der Basisbreite  $a$  ausdrücken:

$$\sin(\theta) = \frac{\Delta l}{a}$$

$$\Rightarrow \Delta l = a \cdot \sin(\theta)$$

Ist die Schallgeschwindigkeit bekannt, lässt sich die Laufzeit berechnen nach:

$$c = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{a \cdot \sin(\theta)}{c}$$

Der Aufnahmewinkel ergibt sich als  $2 \cdot \theta_{\max}$ , wobei  $\theta_{\max}$  der Winkel ist, der gerade für eine Lokalisation der Schallquelle aus einem der beiden Lautsprecher sorgt. Dies ist bei einer Laufzeitdifferenz von ca. 1,2 ms der Fall (siehe Weinzierl, „Handbuch der Audiotechnik“, S.573).

Demnach ergibt sich  $\theta_{\max}$  zu:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta t \cdot c}{a}\right)$$

$$\Rightarrow \theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{1,2 \cdot 10^{-3} \text{ s} \cdot 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{60 \cdot 10^{-1} \text{ m}}\right) \approx 43^\circ$$

Der Aufnahmewinkel beträgt demnach  $2 \cdot \theta_{\max} = 86^\circ$ .

- 2.3 Für eine Choraufnahme möchten Sie ein AB-Mikrofonsystem bestehend aus zwei Kugelmikrofonen verwenden. Das Ensemble hat eine Ausdehnung von 6m. Das

Mikrofonsystem soll in einem Abstand von 4m vom Chor entfernt positioniert werden. Welche Basisbreite müssen Sie wählen, damit der Chor sich über die gesamte Breite der Lautsprecherbasis erstreckt?

Der maximale Öffnungswinkel ergibt sich zu

$$\theta_{\max} = \arctan\left(\frac{6m/2}{4m}\right) \approx 37^\circ$$

Demnach ergibt sich als Basisbreite:

$$a = \frac{\Delta t \cdot c}{\sin(\theta)}$$
$$= \frac{1,2ms \cdot 340 \frac{m}{s}}{\sin(37^\circ)} = 68cm$$

- 2.4 Wie ändert sich die Lokalisation, wenn Sie statt der Kugelmikrofone Mikrofone mit Nierencharakteristik verwenden? Was ändert sich klanglich?

Sofern die Nierenmikrofone parallel ausgerichtet werden, ergibt sich keine veränderte Lokalisation, weil weiterhin die gleichen Laufzeitdifferenzen bestehen, und bei parallelem Schalleinfall keine Pegeldifferenzen hinzukommen.

Es ändert sich jedoch der relative Pegel durch die Richtcharakteristik: Seitlich einfallend Schallwellen werden beispielsweise um 6 dB leiser aufgenommen als frontal einfallende. Darüber hinaus ergibt sich durch die Verwendung von Druckgradientenempfängern ein entsprechend tieferärmeres Klangbild.