

1 KT I SCF UE04 Aufgabe - Mikrofon - mechanische Übertragungsfunktionen

Leiten sie ausgehend vom Masse-Feder System (DGL 2. Ordnung) die mechanischen Übertragungsfunktionen für verschiedene Mikrofontypen ab und diskutieren Sie die Unterschiede.

- 1. Druck- & Auslenkungsempfänger
- 2. Druck- & Schnellempfänger
- 3. Druckgradienten- & Auslenkungsempfänger
- 4. Druckgradienten- & Schnellempfänger

2 KT I SCF UE04 Lösung - Mikrofon - mechanische Übertragungsfunktionen

2.1 Druck- & Auslenkungsempfänger

Für ein Masse-Feder System gilt folgende Differentialgleichung

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

mit $[m] = kg$, $[r] = kg/s$ und $[D] = kg/s^2$. Für harmonische Anregung

$$F = \Re \left\{ \hat{F} e^{j\omega t} \right\} \quad x = \Re \left\{ \hat{x} e^{j\omega t} \right\} \quad (2)$$

kann man dann mit Hilfe komplexer Notation schreiben

$$\underline{F} = (-\omega^2 m + j\omega r + D) \underline{x} \quad (3)$$

Es gilt weiterhin

$$\underline{F} = \underline{p} S \quad (4)$$

und damit

$$\underline{p} S = (D - \omega^2 m + j\omega r) \underline{x} \quad (5)$$

Nun kann die mechanische Übertragungsfunktion (Auslenkung bezogen auf Schalldruck, Auslenkungsempfänger, Druckempfänger) aufgestellt werden zu

$$\frac{\underline{x}}{\underline{p}} = \frac{S}{D - \omega^2 m + j\omega r} \quad (6)$$

Die Resonanzfrequenz (für $r=0$, ohne Reibungsbetrachtung) erhält man, wenn

$$\left| \frac{\underline{x}}{\underline{p}} \right| = \infty \quad (7)$$

gefordert ist, also der Nenner Null wird. Es folgt

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (8)$$

Nun kann man noch ein wenig umformulieren und auf die Resonanzfrequenz normieren

$$\frac{\underline{x}}{\underline{p}} = \frac{\frac{S}{D}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\eta \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (9)$$

mit

$$\eta = \frac{r \omega_0}{D} \quad (10)$$

Es folgt eine Diskussion der Glg. 9 für $\omega \ll \omega_0$, $\omega \gg \omega_0$ und $\omega = \omega_0$. Für $\omega \ll \omega_0$ wird der Nenner zu Eins und es resultiert eine frequenzunabhängige Durchlassverstärkung

$$\left| \frac{\underline{x}}{\underline{p}} \right| = \left| \frac{S}{D} \right| = K_0 \quad (11)$$

Für die Abschätzung $\omega \gg \omega_0$ kann man Folgendes ansetzen: die Eins ist vernachlässigbar klein, genauso wie der Imaginärteil des Nenners klein zum dann noch verbleibenden quadratischen Term ω^2/ω_0^2 ist. Daraus ergibt sich eine mit 12dB/Oktave abfallende Asymptote. Für den Fall $\omega = \omega_0$ ergibt sich

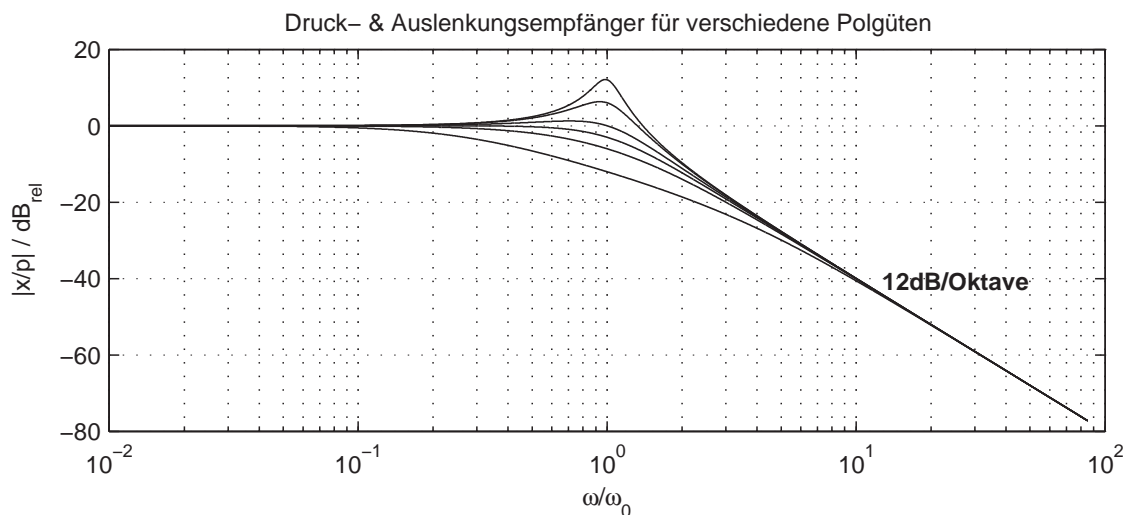


Abbildung 1: Tiefpassfilter 2. Ordnung für verschiedene Polgüten

$$\frac{\underline{x}}{\underline{p}} = \frac{\frac{S}{D}}{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} + j \eta \frac{\omega_0}{\omega}} \quad (12)$$

und damit

$$\left| \frac{\underline{x}}{\underline{p}} \right| = \frac{\frac{S}{D}}{\eta} \quad (13)$$

Man sieht: Der Faktor η stellt eine normierte Polgüte dar. Die allgemeine Form der Übertragungsfunktion, bevorzugt in der Regelungs- und Nachrichtentechnik verwendet, lautet mit

$$\Omega = \frac{j\omega}{\omega_0} \quad (14)$$

dann

$$G(\Omega) = \frac{K_0}{1 + \eta\Omega + \Omega^2} \quad (15)$$

und kann bei der hier gestellten Problematik als Tiefpassfilter 2. Ordnung aufgefasst werden (siehe [TS02]). Abb. 1 zeigt den Amplitudenfrequenzgang für dieses Filter, in der Grafik werden die oben besprochenen drei Grenzfälle ($\omega \ll \omega_0$, $\omega \gg \omega_0$, $\omega = \omega_0$) deutlich.

2.2 Druck- & Schnellempfänger

Für ein Masse-Feder System gilt folgende Differentialgleichung

$$F = m \dot{v} + r v + D \int v dt \quad (16)$$

Für harmonische Anregung

$$F = \Re \left\{ \hat{F} e^{j\omega t} \right\} \quad v = \Re \left\{ \hat{v} e^{j\omega t} \right\} \quad (17)$$

kann man dann mit Hilfe komplexer Notation schreiben

$$\underline{F} = \left(j\omega m + r + \frac{D}{j\omega} \right) \underline{v} \quad (18)$$

Es gilt weiterhin

$$\underline{F} = \underline{p} S \quad (19)$$

und damit

$$\underline{p}S = (j\omega m + r - \frac{jD}{\omega})\underline{v} \quad (20)$$

Nun kann die mechanische Übertragungsfunktion (Schnelle bezogen auf Schalldruck, Schnelleempfänger, Druckempfänger) aufgestellt werden zu

$$\frac{\underline{v}}{\underline{p}} = \frac{S}{j\omega m + r - j\frac{D}{\omega}} \quad (21)$$

Die Resonanzfrequenz (für $r=0$, ohne Reibungsbetrachtung) erhält man, wenn

$$|\frac{\underline{v}}{\underline{p}}| = \infty \quad (22)$$

gefordert ist, also der Nenner Null wird. Es folgt

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (23)$$

Damit folgt

$$\frac{\underline{v}}{\underline{p}} = \frac{S}{j\frac{\omega}{\omega_0} m \sqrt{\frac{D}{m}} + r - j\frac{D\omega_0}{\omega \sqrt{\frac{D}{m}}}} \quad (24)$$

und mit

$$\alpha = m \sqrt{\frac{D}{m}} \quad \beta = \frac{D}{\sqrt{\frac{D}{m}}} \quad (25)$$

weiter

$$\frac{\underline{v}}{\underline{p}} = \frac{\frac{S}{\alpha}}{j\frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j\frac{\beta}{\alpha}\frac{\omega_0}{\omega}} \quad (26)$$

bzw.

$$\frac{\underline{v}}{\underline{p}} = \frac{\frac{S}{\alpha}}{j\frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j\frac{\omega_0}{\omega}} \quad (27)$$

Es folgt eine Diskussion für $\omega \ll \omega_0$, $\omega \gg \omega_0$ und $\omega = \omega_0$. Eine einfache Abschätzung gelingt, wenn der Term r/α einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf das Ergebnis der Grenzfälle hat. Dann bleibt für $\omega \ll \omega_0$ der Nenner-Term ω_0/ω von Wichtigkeit. Dies entspricht einer 6dB/Oktave ansteigenden Asymptote 'zu ω_0

hin'. Für $\omega \gg \omega_0$ überwiegt der Nenner-Term ω/ω_0 , dies resultiert in einer 6dB/-Oktave fallenden Asymptote 'weg von ω_0 '. Für $\omega = \omega_0$ wird das Betragsmaximum der Übertragungsfunktion zu

$$\left| \frac{v}{p} \right| = \left| \frac{S}{r} \right| \quad (28)$$

Auch hier kann man die Übertragungsfunktion in typisch nachrichtentechnischer

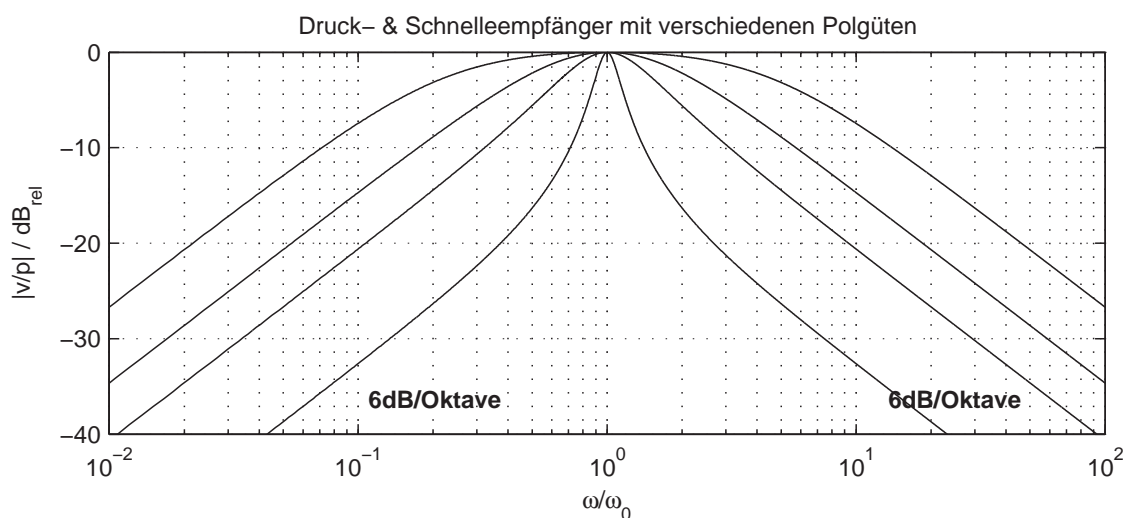


Abbildung 2: Bandpassfilter 2. Ordnung für verschiedene Polgüten

Schreibweise als Bandpassfilter 2. Ordnung notieren

$$\frac{v}{p} = \frac{\frac{K_m}{Q} \Omega}{1 + \frac{1}{Q} \Omega + \Omega^2} \quad (29)$$

mit normierter komplexer Kreisfrequenz

$$\Omega = \frac{j\omega}{\omega_0} \quad (30)$$

und der Bandpassgüte (Polgüte)

$$Q = \frac{\alpha}{r} \quad (31)$$

sowie dem Betragsmaximum bei der Resonanzfrequenz

$$K_m = \left| \frac{S}{r} \right| \quad (32)$$

Anhand Glg. 29 könnte man noch wesentlich einfacher die Filtercharakteristik diskutieren, als bisher getan.

2.3 Druckgradienten- & Auslenkungsempfänger

Es war beim Druck- & Auslenkungsempfänger

$$\underline{p} S = (D - \omega^2 m + j \omega r) \underline{x} \quad (33)$$

Nun wird mit dem Druckgradienten und dem Umweg dx für den Schalldruck (wobei für die hier gemachte Betrachtung $\lambda \gg dx$ gelten muss)

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx S = (D - \omega^2 m + j \omega r) \underline{x} \quad (34)$$

Für die weitere Betrachtung des Druckgradienten beschränke ich mich hier auf die Hauptachse (orthogonal zur Membran), dann wird dieser nämlich maximal und es folgt wieder mit harmonischer komplexer Schreibweise

$$-j k \underline{p} dx S = (D - \omega^2 m + j \omega r) \underline{x} \quad (35)$$

bzw. mit $k = \omega/c$ wird daraus die Übertragungsfunktion

$$\frac{\underline{x}}{\underline{p}} = \frac{-j S \omega dx}{D - \omega^2 m + j \omega r} \frac{1}{c} \quad (36)$$

Mit der Einführung von $\omega_0 = \sqrt{D/m}$ kann man wieder normieren

$$\frac{\underline{x}}{\underline{p}} = \frac{\frac{S}{D}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \eta \frac{\omega}{\omega_0}} \frac{-j \omega dx}{\omega_0 c} \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (37)$$

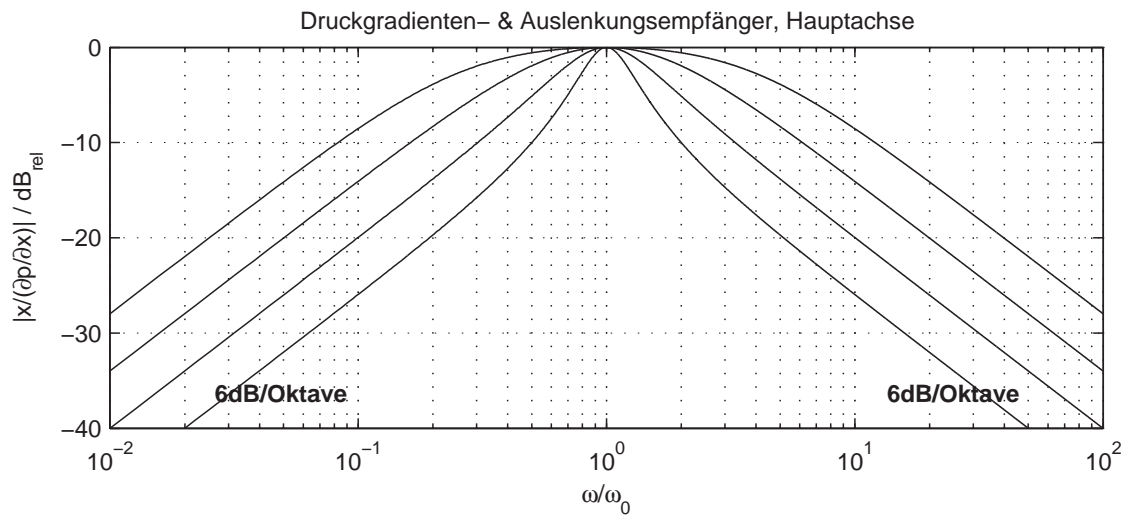


Abbildung 3: Bandpassfilter 2. Ordnung für verschiedene Polgüten

$$\eta = \frac{r \omega_0}{D} \quad (38)$$

bzw. mit $\Omega = j \omega / \omega_0$ schöner geschrieben

$$\frac{\underline{x}}{\underline{p}} = \frac{\eta \Omega}{1 + \eta \Omega + \Omega^2} \cdot \frac{-S dx \sqrt{\frac{D}{m}}}{D c \eta} \quad (39)$$

Mit der Bandpassgüte (Polgüte)

$$Q = \frac{1}{\eta} \quad (40)$$

sowie dem Betragsmaximum $|K_m|$ bei der Resonanzfrequenz

$$K_m = \frac{-S dx \sqrt{\frac{D}{m}}}{D c \eta} \quad (41)$$

ergibt sich dann wieder das bekannte normierte Bandpassfilter 2. Ordnung

$$\frac{\underline{x}}{\underline{p}} = \frac{\frac{K_m}{Q} \Omega}{1 + \frac{1}{Q} \Omega + \Omega^2} \quad (42)$$

Es gelten analog die Überlegungen zu den Asymptoten wie beim Druck- & Schnelleempfänger.

2.4 Druckgradienten- & Schnelleempfänger

Es war beim Druck- & Schnelleempfänger

$$\underline{p} S = \left(j \omega m + r + \frac{D}{j \omega} \right) \underline{v} \quad (43)$$

bzw.

$$\frac{\underline{v}}{\underline{p}} = \frac{\frac{S}{\alpha}}{j \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j \frac{\omega_0}{\omega}} \quad (44)$$

$$\underline{p} S = \left(j \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j \frac{\omega_0}{\omega} \right) \underline{v} \alpha \quad (45)$$

mit

$$\alpha = m \sqrt{\frac{D}{m}} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (46)$$

Nun wird mit dem Druckgradienten und dem Umweg dx für den Schalldruck (wobei für die hier gemachte Betrachtung $\lambda \gg dx$ gelten muss)

$$\frac{\partial \underline{p}}{\partial x} dx S = \left(j \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j \frac{\omega_0}{\omega} \right) \underline{v} \alpha \quad (47)$$

Für die weitere Betrachtung des Druckgradienten beschränke ich mich hier wieder auf die Hauptachse (orthogonal zur Membran), dann wird dieser nämlich maximal und es folgt wieder mit harmonischer komplexer Schreibweise

$$-j k \underline{p} dx S = \left(j \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j \frac{\omega_0}{\omega} \right) \underline{v} \alpha \quad (48)$$

Daraus wird

$$\frac{\underline{v}}{\underline{p}} = \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{j \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j \frac{\omega_0}{\omega}} \cdot \frac{-S dx \sqrt{\frac{D}{m}}}{\alpha c} \quad (49)$$

bzw. wieder mit $\Omega = j\omega/\omega_0$ schöner geschrieben

$$\frac{\underline{v}}{\underline{p}} = \frac{\Omega^2}{1 + \frac{r}{a}\Omega + \Omega^2} \cdot \frac{-S \, dx \sqrt{\frac{D}{m}}}{\alpha c} \quad (50)$$

Nun folgt wieder die Diskussion $\omega \ll \omega_0$, $\omega \gg \omega_0$ und $\omega = \omega_0$. Für $\omega \ll \omega_0$ bzw. für den Extremfall $\Omega = 0$ wird der Betrag der Übertragungsfunktion Null, für $\omega \gg \omega_0$ bzw. extremer $\Omega \rightarrow \infty$ wird der Betrag zu

$$\left| \frac{\underline{v}}{\underline{p}} \right| = \left| \frac{-S \, dx \sqrt{\frac{D}{m}}}{\alpha c} \right| \quad (51)$$

und ergibt eine frequenzunabhängige Durchlassverstärkung. Da im Nenner der Übertragungsfunktion ein Polynom 2. Ordnung vorhanden ist, kann man nunmehr schlussfolgern, dass die Übertragungsfunktion einem Hochpass 2. Ordnung mit 12dB/Oktave Asymptote für Frequenzen $\omega \ll \omega_0$ entspricht, was [TS02] oder [Mey00], als auch die Grafik 4 bestätigen.

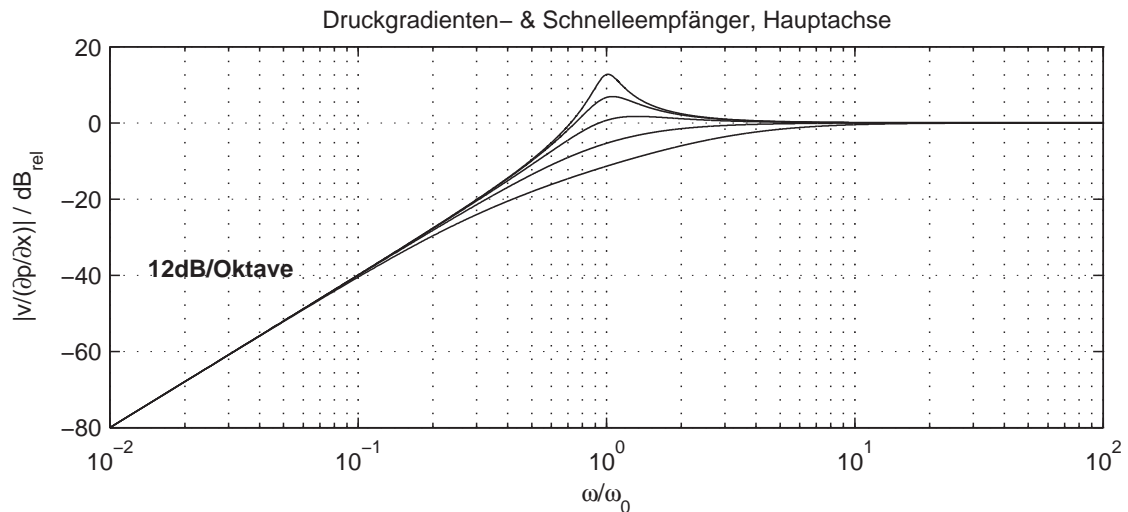


Abbildung 4: Hochpassfilter 2. Ordnung für verschiedene Polgüten

3 KT I SCF UE04 Aufgabe - Mikrofon - elektrische & mechanische Übertragungsfunktionen

Diskutieren Sie anhand des elektrostatischen Wandlers (Auslenkungsempfänger, z.B. Kondensatormikrofon) und des elektrodynamischen Wandlers (Schnellempfänger, z.B. Tauchspulenmikrofon) das Zusammenspiel zwischen den obig hergeleiteten mechanischen und den jeweiligen elektrischen Übertragungsfunktionen.

4 KT I SCF UE04 Lösung - Mikrofon - elektrische & mechanische Übertragungsfunktionen

4.1 Elektrodynamischer Wandler

Der elektrodynamische Wandler arbeitet nach dem Prinzip der Bewegungsinduktion, d.h. wird ein Leiter (in Praxis eine Spule) innerhalb eines Magnetfeldes bewegt, wird eine Spannung induziert. Mit der magnetischen Flussdichte B

$$B = \frac{d\Phi}{dA} \quad (52)$$

und dem Induktionsgesetz (Minus klären)

$$u_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (53)$$

wird

$$u_{\text{ind}} = -\frac{B dA}{dt} \quad (54)$$

Das Flächenelement ergibt sich aus der Leiterlänge l im Magnetfeld und der Auslenkung dx

$$u_{\text{ind}} = -\frac{Bl dx}{dt} = -Blv \quad (55)$$

Mit Glg. 55 erhält man einen Zusammenhang zwischen Membranschnelle und Span-

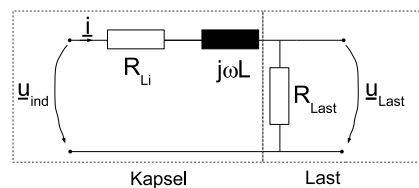


Abbildung 5: elektrisches Ersatzschaltbild des elektrodynamischen Mikrofons

nung. Das elektrische Ersatzschaltbild (Wechselstromtechnik) zeigt Abb. 5. Mittels der Kirchhoffschen Regeln lässt sich das Verhältnis Ausgangsspannung zu Eingangs-

spannung des Vierpoles angeben.

$$\frac{\underline{u}_{\text{Last}}}{\underline{u}_{\text{ind}}} = \frac{R_{\text{Last}}}{R_{\text{Li}} + R_{\text{Last}} + j \omega L} \quad (56)$$

Für den (praxisnahen) Fall, dass $R_{\text{Li}} \ll R_{\text{Last}}$ kann man mit

$$\frac{\underline{u}_{\text{Last}}}{\underline{u}_{\text{ind}}} \approx \frac{R_{\text{Last}}}{R_{\text{Last}} + j \omega L} \quad (57)$$

bzw. mit

$$\omega_g = \frac{R}{L} \quad (58)$$

normiert

$$\frac{\underline{u}_{\text{Last}}}{\underline{u}_{\text{ind}}} \approx \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_g}} \quad (59)$$

eine Abschätzung über das elektrische Verhalten des elektrodynamischen Wandlers machen. Für $\omega \ll \omega_g$ ergibt sich eine frequenzunabhängige Durchlassverstärkung Eins, für $\omega \gg \omega_g$ geht die Ausgangsspannung gegen Null. Das LR-Glied (siehe analog auch RC-Glied) stellt einen Tiefpass 1. Ordnung (6dB/Oktave) dar.

Druck- & Schnellewandler :

Mit Glg. 27 und Glg. 59

$$\frac{\underline{v}}{\underline{p}} = \frac{\frac{S}{\alpha}}{j \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j \frac{\omega_0}{\omega}} \quad (60)$$

$$\frac{\underline{u}_{\text{Last}}}{Bl \underline{v}} \approx \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_g}} \quad (61)$$

kann man dann die Übertragungsfunktion $\frac{\underline{u}_{\text{Last}}}{\underline{p}}$ für den elektrodynamischen Druckempfänger aufstellen zu:

$$\frac{\underline{u}_{\text{Last}}}{\underline{p}} \approx \frac{\frac{S}{\alpha}}{j \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j \frac{\omega_0}{\omega}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_g}} \cdot Bl \quad (62)$$

Man sieht: es ergibt sich eine Reihenschaltung von zwei Übertragungsfunktionen, und man kann sich eine erneute ausführliche Diskussion der resultierenden Übertragungsfunktionen sparen, denn eine additive Überlagerung der logarithmischen Amplitudenfrequenzgänge genügt zur Abschätzung, Grafik 6 verdeutlicht für den

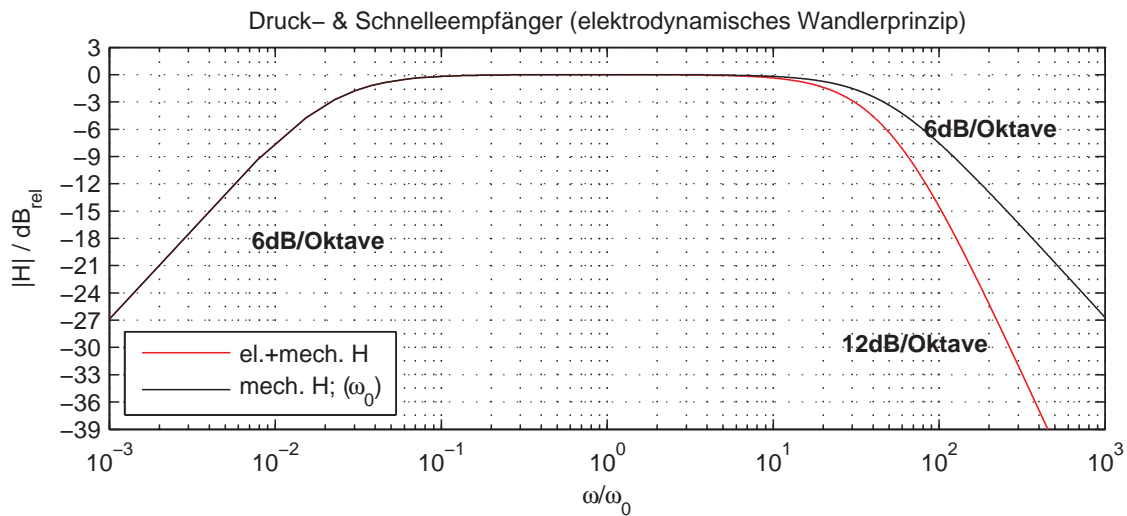


Abbildung 6: Übertragungsfunktion für elektrodynamischen Druck-Schnellewandler

praxisrelevanten Fall $\omega_g > \omega_0$. Aus dem Bandpass 2. Ordnung, der aus dem mechanischen Teil hervorging, entsteht ein Bandpass (deshalb spricht man hier gerne von **mittig abgestimmt**) mit einer 6dB/Oktave Asymptote zu ω_0 hin. Aus der 6dB/Oktave Asymptote weg von ω_0 wird je nach Wahl von ω_g eine mit 12dB/Oktave, da sich hier die Bandpass-Asymptote mit der elektrischen Tiefpassflanke additiv überlagert zu einer steileren Flanke. Denormiert kann man die Übertragungsfunktion noch exakt zu

$$\frac{u_{\text{Last}}}{p} = \frac{S}{j\omega m + r - j\frac{D}{\omega}} \cdot \frac{R_{\text{Last}}}{R_{\text{Li}} + R_{\text{Last}} + j\omega L} \cdot Bl \quad (63)$$

angeben.

Druckgradienten- & Schnellewandler:

Mit Glg. 49 und Glg. 59

$$\frac{v}{p} = \frac{j\frac{\omega}{\omega_0}}{j\frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j\frac{\omega_0}{\omega}} \cdot \frac{-S dx \sqrt{\frac{D}{m}}}{\alpha c} \quad (64)$$

$$\frac{u_{\text{Last}}}{Blv} \approx \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_g}} \quad (65)$$

wird die Übertragungsfunktion $\frac{u_{\text{Last}}}{p}$ für den elektrodynamischen Druckgradientenempfänger zu

$$\frac{u_{\text{Last}}}{p} \approx \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{j \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{r}{\alpha} - j \frac{\omega_0}{\omega}} \cdot \frac{-S dx \sqrt{\frac{D}{m}}}{\alpha c} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_g}} \cdot Bl \quad (66)$$

Zu der Hochpassflanke des mechanischen Teils kommt also noch die 6dB/Oktave Tiefpassflanke des elektrischen Teils, in Abb. 7 ist dies für $\omega_g > \omega_0$ dargestellt. Man spricht hier von einem **tief abgestimmten** System

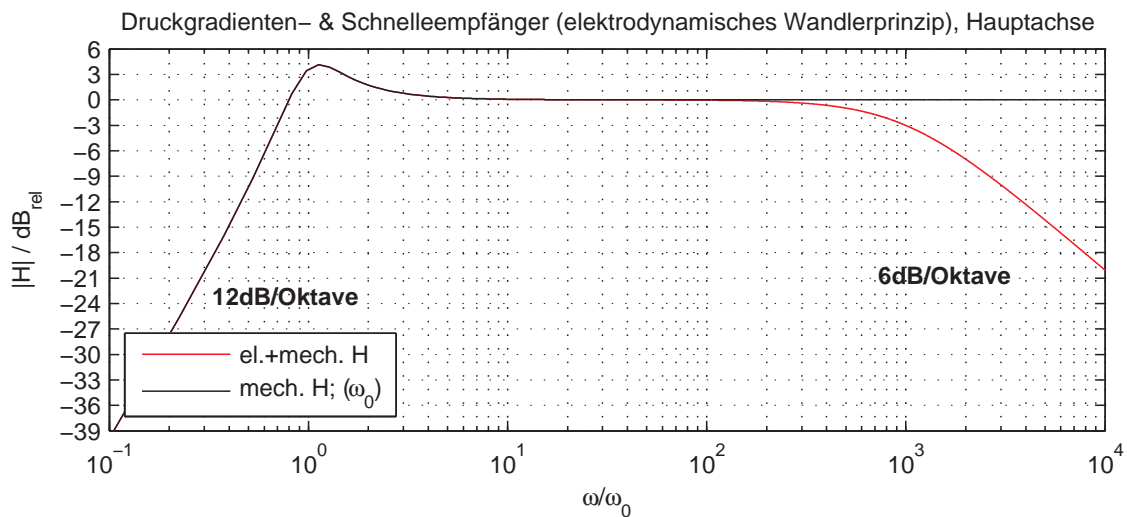


Abbildung 7: Übertragungsfunktion für elektrodynamischen Druckgradienten-Schnelle-wandler

4.2 Kondensator - elektrostatischer Wandler

Der elektrostatische Wandler ist ein Auslenkungswandler, wie die Herleitung in [Mös07] zeigt; diese soll hier noch einmal kurz wiedergegeben werden. Die Bemessungsgleichung (Plattenfläche A, Dielektrizitätszahl ϵ_r , Dielektrizitätskonstante ϵ_0 ,

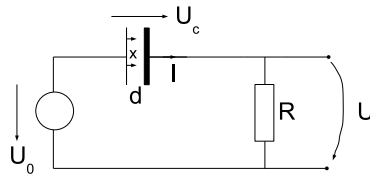


Abbildung 8: elektrisches Ersatzschaltbild des elektrostatischen Mikrofons

Abstand der Platten d) für einen Plattenkondensator lautet

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (67)$$

und man erkennt für das Kondensatormikrofon mit der Membran in Ruhelage die Proportionalität

$$C_0 \propto \frac{1}{d} \quad (68)$$

Bei Verringerung des Plattenabstands um x wird

$$C \propto \frac{1}{d-x} \quad (69)$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\frac{1}{d-x}}{\frac{1}{d}} = \frac{1}{1 - \frac{x}{d}} \quad (70)$$

Aus Abb. 8 kann man den Maschenumlauf angeben

$$U_0 = U_c + U \quad \text{bzw.} \quad U = U_0 - U_c \quad (71)$$

und weiterhin gilt mit der Definitionsgleichung des Kondensators und Glg. 70

$$U_c = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_0} \left(1 - \frac{x}{d}\right) \quad (72)$$

Die Kondensatorladung setzt sich aus dem Gleichanteil und einer Wechselladung zusammen

$$U_c = \frac{Q_0 + q}{C_0} \left(1 - \frac{x}{d}\right) \quad (73)$$

$$U_c = \frac{q}{C_0} + \frac{Q_0}{C_0} - \frac{q x}{C_0 d} - \frac{Q_0 x}{C_0 d} \quad (74)$$

Unter Vernachlässigung der kleinen Größe $q x$ (wg. $x \ll d$, $q \ll Q_0$) und mit $U_0 = Q_0/C_0$ folgt

$$U_c = \frac{q}{C_0} + U_0 - U_0 \frac{x}{d} \quad (75)$$

Nun folgt mit Glg. 71

$$U = -\frac{q}{C_0} + U_0 \frac{x}{d} \quad (76)$$

Die Wechselladung kann man mit Definition des Stroms und harmonischer komplexer Rechnung

$$I = \frac{dq}{dt} \quad I = j\omega q \quad (77)$$

ersetzen zu

$$U = -\frac{I}{j\omega C_0} + U_0 \frac{x}{d} \quad (78)$$

Außerdem ist der Strom der gleiche der durch den Lastwiderstand R fließt, also mit Ohmschen Gesetz

$$U = -\frac{U}{j\omega R C_0} + U_0 \frac{x}{d} \quad (79)$$

Daraus wird

$$U = \frac{U_0 \frac{x}{d}}{1 + \frac{\omega_g}{j\omega}} \quad (80)$$

mit

$$\omega_g = \frac{1}{RC_0} \quad (81)$$

Dies stellt ein Hochpass 1. Ordnung dar, wie folgende Abschätzung untermauert. Für $\omega \gg \omega_g$ wird der Term sehr klein im Gegensatz zur Eins und es resultiert im Grenzfalle $\omega \rightarrow \infty$ die frequenzunabhängige Durchlassverstärkung $U_0 \frac{x}{d}$. Für $\omega \ll \omega_g$ wird der Nenner sehr klein, bis es zum Grenzfalle $\omega \rightarrow 0$ wg. $1/\infty$ zur Ausgangsspannung Null kommt.

Druck- & Auslenkungswandler:

Mit Glg. 9 und Glg. 80

$$\frac{\underline{x}}{\underline{p}} = \frac{\frac{S}{D}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\eta \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (82)$$

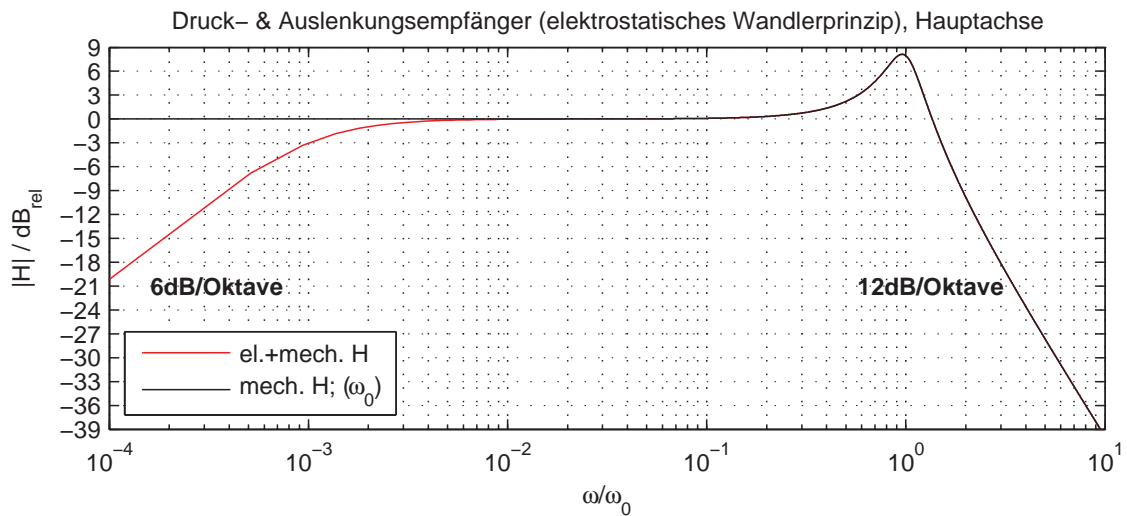


Abbildung 9: Übertragungsfunktion für elektrostatischen Druck-Auslenkungswandler

$$U = \frac{U_0 \frac{x}{d}}{1 + \frac{\omega_g}{j\omega}} \quad (83)$$

wird die Übertragungsfunktion für den elektrostatischen Druckempfänger

$$\frac{U}{p} = \frac{\frac{S}{D}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\eta \frac{\omega}{\omega_0}} \cdot \frac{U_0 \frac{1}{d}}{1 + \frac{\omega_g}{j\omega}} \quad (84)$$

Für $\omega_0 \gg \omega_g$ ist dies in Abb. 9 visualisiert: Zum Tiefpass 2. Ordnung des mechanischen Wandlers kommt das Hochpassfilter 1. Ordnung hinzu. Die Grenzfrequenz ω_0 sollte über die größte zu übertragende Frequenz geschoben werden, deshalb spricht man hier auch von einem **hoch abgestimmten** Wandler.

Druckgradienten- & Auslenkungswandler:

Mit Glg. 37 und Glg. 80

$$\frac{x}{p} = \frac{\frac{S}{D}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\eta \frac{\omega}{\omega_0}} \frac{-j\omega dx}{\omega_0 c} \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (85)$$

$$U = \frac{U_0 \frac{x}{d}}{1 + \frac{\omega_g}{j\omega}} \quad (86)$$

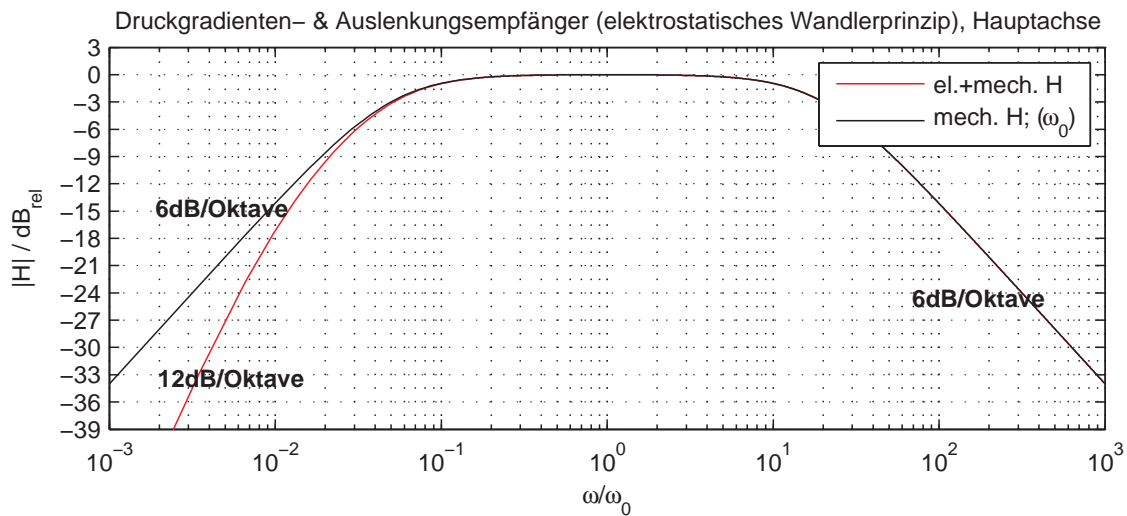


Abbildung 10: Übertragungsfunktion für elektrostatischen Druckgradienten-Auslenkungswandler

wird die Übertragungsfunktion des elektrostatischen Druckgradientenempfängers

$$\frac{\underline{U}}{\underline{p}} = \frac{\frac{S}{D}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\eta \frac{\omega}{\omega_0}} \frac{-j\omega dx}{\omega_0 c} \sqrt{\frac{D}{m}} \cdot \frac{U_0 \frac{1}{d}}{1 + \frac{\omega_g}{j\omega}} \quad (87)$$

Für $\omega_0 > \omega_g$ ist dies in Abb. 10 gezeigt. Der Bandpass des mechanischen Systems bleibt prinzipiell erhalten, die Hochpassflanke wird durch das elektrische Filter ab ω_g nur steiler. Wegen des Bandpasscharakters spricht man gern von einem **mittig abgestimmten** Wandler.

4.3 Übersicht

- Druck + Auslenkung: mechanischer **Tiefpass 2.** Ordnung
- Druck + Schnelle: mechanischer **Bandpass 2.** Ordnung
- Gradient + Auslenkung: mechanischer **Bandpass 2.** Ordnung
- Gradient + Schnelle: mechanischer **Hochpass 2.** Ordnung
- Spule, elektrodynamischer Wandler: elektrischer **Tiefpass 1.** Ordnung
- Kondensator, elektrostatischer Wandler: elektrischer **Hochpass 1.** Ordnung

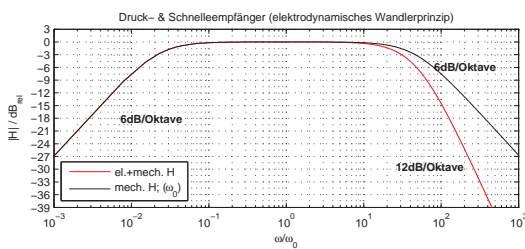


Abbildung 11: Spule, Druck

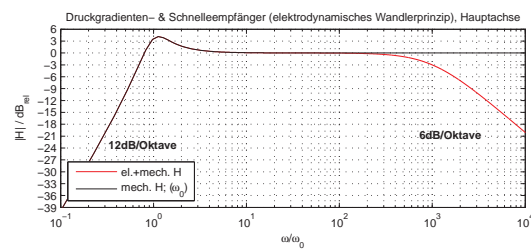


Abbildung 12: Spule, Gradient

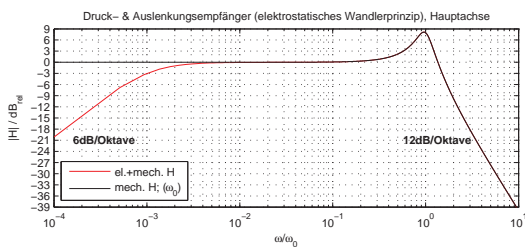


Abbildung 13: Kondensator, Druck

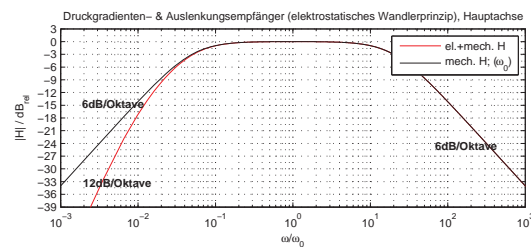


Abbildung 14: Kondensator, Gradient

Literaturempfehlungen: [Mös07], [Kut07] (oder [Kut04]), [Kut00], [KFCS00], [BX08], [Fah00], [Vor08], [ZZ03], [Wei08],[Gör06], [Mar99]

Frank Schultz (MKT'07), schueinh@mailbox.tu-berlin.de, +49 175 15 49 763

http://www.ak.tu-berlin.de/menue/mitarbeiterinnen/studentische_hilfskraefte/frank_schultz/

kompiliert: 14.07.2008, 0.03

Bei Fehlern bitte ich um Verzeihung und Info!

Literaturverzeichnis

- [BX08] BLAUERT, Jens ; XIANG, Ning: *Acoustics for Engineers*. Berlin Heidelberg : Springer, 2008
- [Fah00] FAHY, Frank: *Foundations of Engineering Acoustics*. Oxford : Elsevier Ltd., 2000
- [Gör06] GÖRNE, Thomas: *Tontechnik*. Leipzig München Wien : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006
- [KFCS00] KINSLER, Lawrence ; FREY, Austin ; COPPENS, Alan ; SANDERS, James: *Fundamentals of Acoustics, Fourth Edition*. John Wiley & Sons, Inc., 2000
- [Kut00] KUTTRUFF, Heinrich: *Room Acoustics 4th Ed*. London New York : Taylor&Francis, 2000
- [Kut04] KUTTRUFF, Heinrich: *Akustik, Eine Einführung*. Stuttgart : Hirzel, 2004
- [Kut07] KUTTRUFF, Heinrich: *Acoustics, An Introduction*. London New York : Taylor&Francis, 2007
- [Mar99] MARINESCU, Marlene: *Wechselstromtechnik*. Braunschweig Wiesbaden : Vieweg, 1999
- [Mey00] MEYER, Martin: *Signalverarbeitung*. Braunschweig Wiesbaden : Vieweg, 2000

- [Mös07] MÖSER, Michael: *Technische Akustik, 7. Auflage*. Berlin Heidelberg : Springer, 2007
- [TS02] TIETZE, Ulrich ; SCHENK, Christoph: *Halbleiter - Schaltungstechnik, 12. Auflage*. Berlin Heidelberg : Springer, 2002
- [Vor08] VORLÄNDER, Michael: *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modeling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin Heidelberg : Springer, 2008
- [Wei08] WEINZIERL, Stefan: *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin Heidelberg : Springer, 2008
- [ZZ03] ZOLLNER, Manfred ; ZWICKER, Eberhard: *Elektroakustik, 3. Auflage, 2. korrigierter Nachdruck*. Berlin Heidelberg : Springer, 2003