

# 9 Anhang B

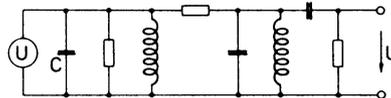
## 9.1 Beispiele zu Kapitel 2

### Beispiel 2.1

Wie lautet die Dualwandlung einer Induktivität?

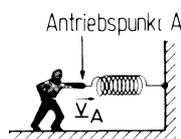
### Beispiel 2.2

Führen Sie die formale Dualwandlung folgender Schaltung durch:



### Beispiel 2.3

Gegeben ist folgendes mechanische System:



Auf das eine Ende einer Feder (= Antriebspunkt) wird eine sinusförmige Kraft  $\underline{F} = \hat{F} \cdot e^{j\omega t}$  eingeprägt. Das andere Federende ist fest eingespannt.

- Geben Sie das mechanische Ersatzschaltbild an.
- Geben Sie die beiden elektrischen Ersatzschaltbilder an.
- Wie groß ist die Schnelle am Antriebspunkt?

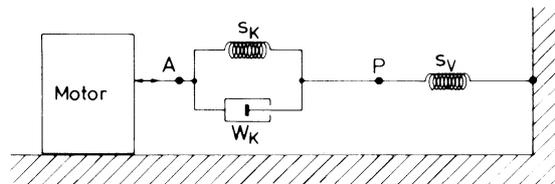
### Beispiel 2.4

Geben Sie für die folgenden beiden Anordnungen über die FI-Analogie Ersatzschaltbilder an:



**Beispiel 2.5**

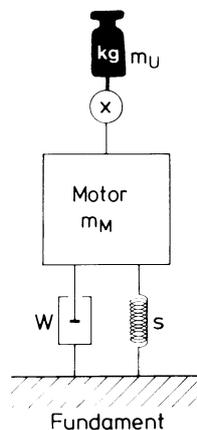
Ein Motor mit starker Unwucht vibriert (Antriebspunkt  $A$ ) und leitet über sein Anschlusskabel diese Vibration an einen Versuchsaufbau großer Steifigkeit weiter. Im interessierenden Frequenzbereich wird das Kabel durch eine Feder  $s_K$  und einen Reibwiderstand  $R_{m,K}$  beschrieben, der Versuchsaufbau (Punkt  $P$ ) steht auf Federn ( $s_V$ ), seine Masse wird vernachlässigt.



Wie muss das Kabel beschaffen sein, damit der Versuchsaufbau möglichst wenig angeregt wird, wenn der Motor alternativ (a) als Kraft- und (b) als Schnellequelle aufgefasst wird?

**Beispiel 2.6**

Um die Welle eines Motors (Masse  $m_M$ ) läuft exzentrisch eine Unwuchtmasse  $m_U$  auf einem Kreis mit Radius  $r$ . Der Motor steht auf einem „Maschinenschuh“ (Masse in  $m_M$  enthalten) mit Steifigkeit  $s$  und Reibwiderstand  $R_m$ , der seinerseits auf einem Fundament unendlicher Masse befestigt ist. Es sollen nur vertikal wirkende Kräfte berücksichtigt werden.



- Wie sieht das Ersatzschaltbild aus und um welche Quelle handelt es sich?
- Welche Kraft  $F(\omega)$  wird in das Fundament eingeleitet?
- Wie müssen  $m_M$ ,  $s$ ,  $R_m$  für hohe Schwingungsdämpfungen dimensioniert werden?

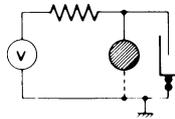
**Beispiel 2.7**

Wie lauten die entsprechenden elektrischen Größen der gegebenen mechanischen Größen bei FU-Analogie?

$$F = 5 \text{ N} \quad v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad m = 8 \text{ kg} \quad s = 2 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

**Beispiel 2.8**

Gegeben ist folgendes mechanische Ersatzschaltbild:



Entwickeln Sie durch Einfügen eines FU-Einheitswandlers das elektrische Ersatzschaltbild!

**Beispiel 2.9**

Die Dimensionierung eines Bassreflexrohres ergibt eine Querschnittfläche  $A_0 = 36 \text{ cm}^2$  und eine Rohrlänge von  $l_0 = 12 \text{ cm}$ .

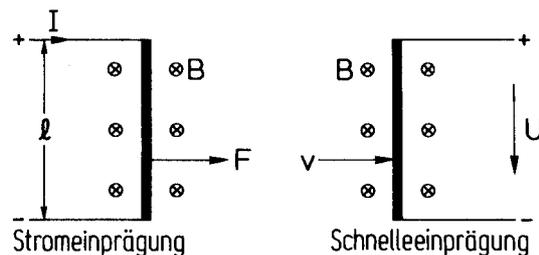
- Berechnen Sie die mechanische Masse  $m$  und die akustische Masse  $m_a$  (Dimensionen angeben!) und geben Sie an für welchen Frequenzbereich die akustische Masse wirksam ist.
- Aus Platzgründen soll das Bassreflexrohr in zwei gleich lange Rohre mit je  $A_1 = 12 \text{ cm}^2$  Querschnittfläche aufgeteilt werden. Berechnen Sie die Rohrlänge  $l_1$  so, dass beide Rohre gemeinsam die gleiche akustische Impedanz ergeben wie das ursprüngliche Bassreflexrohr.
- Wie groß ist die gesamte Masse der Luft in den beiden Rohren?  
(Dichte der Luft:  $\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ).

## 9.2 Beispiele zu Kapitel 3 und 4

### Beispiel 3.1

Die Kenndaten eines dynamischen Lautsprechers lauten:

$$B = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 1 \text{ T} \quad \text{Schwingspulendurchmesser} = 2,5 \text{ cm} \quad N = 50 \text{ Windungen}$$

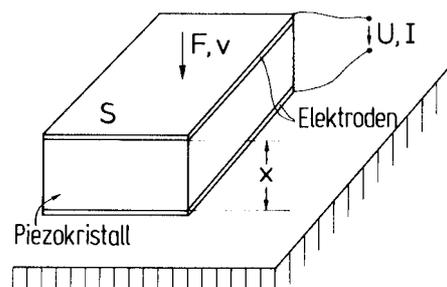


Welche Kraft wirkt bei einer Stromeinprägung von  $I = 1 \text{ A}$  auf die Membran?

### Beispiel 3.2

Die Kenndaten eines piezoelektrischen Wandlers sind:

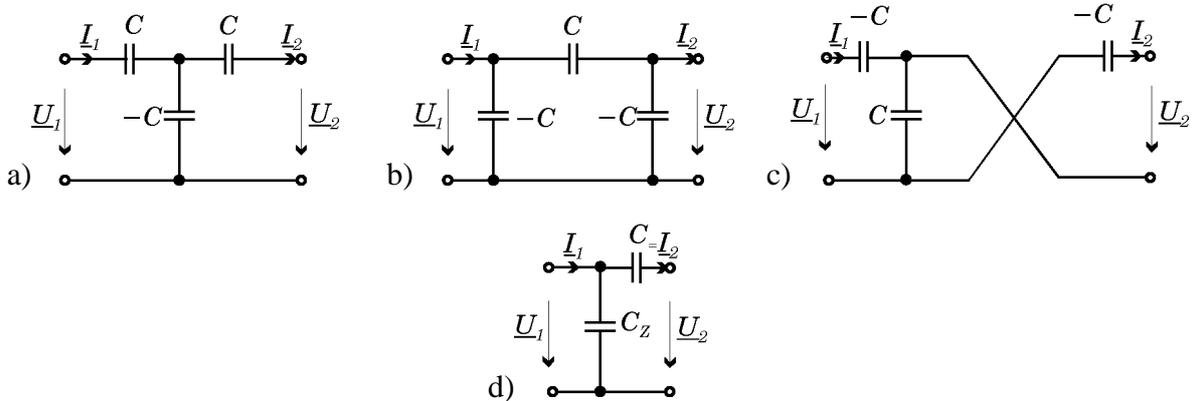
$$A = 3 \text{ cm}^2 \quad x = 0,5 \text{ mm} \quad e = 100 \frac{\text{N}}{\text{Vm}}$$



- Dieser Wandler wird zur Kraftmessung zwischen einer Maschine und deren Fundament eingesetzt. Welche Kraft wird auf das Fundament übertragen, wenn am Piezokristall eine Spitzenspannung von  $80 \text{ V}$  entsteht?
- Der selbe Wandler wird als Lautsprecher eingesetzt und ein Strom von  $300 \text{ mA}$  eingepreßt. Wie groß ist seine Schnelle?

**Beispiel 3.3**

Die folgenden 4 Netzwerke treten beim idealen und realen dielektrischen Wandler als Korrekturzweitor auf:



Berechnen Sie die Kettenmatrizen dieser Netzwerke!

**Beispiel 3.4**

Gegeben sei ein dynamischer Wandler mit folgenden Kenndaten:

Membranmasse  $m = 30$  g, Membransteifigkeit  $s = 1000$  N/m, Reibwiderstand der Membranaufhängung  $R_m = 1,4$  Ns/m,

Schwingspulendurchmesser  $d = 4$  cm, Windungsanzahl der Schwingspule  $N = 75$ , Schwingspulenwiderstand  $R_S = 4$   $\Omega$ , Schwingspuleninduktivität  $L_S = 3$  mH,  $B = 1$  T

- Geben Sie das elektromechanische Ersatzschaltbild (ESB) für den realen dynamischen Wandler an und das elektrische ESB für FI-Analogie
- Bestimmen Sie die Wandlerkonstante  $\alpha$  und alle Bauteilwerte für das elektrische ESB.
- Berechnen Sie alle Resonanzfrequenzen, die im Impedanzverlauf auftreten, und geben Sie näherungsweise die Impedanz bei den Resonanzfrequenzen an.
- Welches Einschwingverhalten ergibt sich bei Stromeinprägung?
- Welches Einschwingverhalten ergibt sich bei Spannungseinprägung?
- Wie muss der Vorwiderstand für optimale Dämpfung (aperiodischer Grenzfall) dimensioniert werden?

**Beispiel 3.5**

Von einem dielektrischen Wandler sind folgende Kenndaten bekannt:

Membranradius  $r_M = 9$  mm, Membranabstand  $x_- = 30$   $\mu$ m, Membranmasse  $m = 1$  mg, Membransteifigkeit  $s = 50$  kN/m, Reibwiderstand der Membran  $R_m = 0,5$  Ns/m.

Polarisationsspannung am Plattenkondensator  $U_- = 48$  V, Zuleitungskapazität  $C_Z = 1$  pF.

- Geben Sie das elektromechanische Ersatzschaltbild (ESB) für den realen dielektrischen Wandler an und das elektrische ESB für FU-Analogie
- Bestimmen Sie die Wandlerkonstante  $\alpha$  und alle Bauteilwerte für das elektrische ESB. (Dielektrizitätskonstante für Luft:  $\epsilon_L \approx \epsilon_0 = 8,8542$  pF/m).

## 9.3 Beispiele zu Kapitel 5

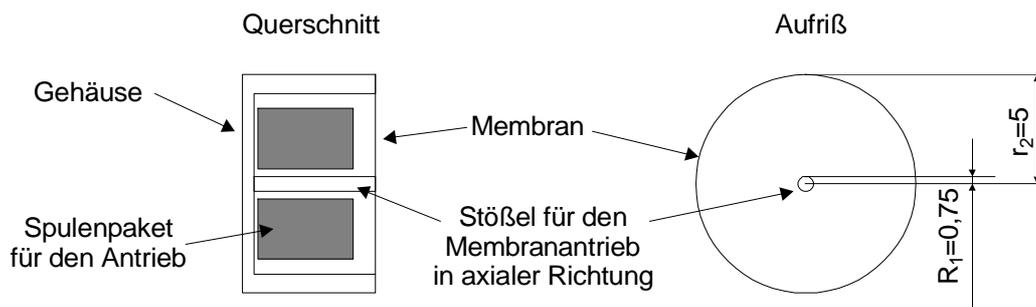
### Beispiel 5.1

Ein Lautsprecher, der als Kolbenmembran ( $\varnothing$  38 cm) aufgefasst werden soll, ist in eine unendliche Schallwand eingebaut. Bei  $f = 50$  Hz beträgt seine maximale Auslenkung  $\xi_M = 7$  mm.

- Welche akustische Wirkleistung gibt er dabei an die Luft ab?
- Welche Kraft wirkt auf die (masselos gedachte) Membran?
- Welcher Schalldruck entsteht in 3 m Entfernung?
- Wie groß ist die Membranbeschleunigung?
- Welche Luftmasse wird von der Membran bewegt (Massenhemmung) und wie groß ist das Volumen dieser zylinderförmig gedachten Luftmassen bzw. die Höhe des Zylinders? (Dichte der Luft:  $\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$ )

### Beispiel 5.2

Gegeben sei der Piepser eines Weckers mit dem skizzierten Aufbau. Ein axial angetriebener Stößel mit einem Radius von 0,75 mm treibt eine Membran mit einem Radius von 5 mm an. Der Stößel wird mit einer Frequenz von 2 kHz angetrieben und hat einen Hub von insgesamt 0,01 mm.



- Wie groß ist die abgestrahlte Schalleistung und der Schalldruck [in dB] in einem Abstand von 1 m, wenn der Piepser ohne Membran betrieben wird?
- Wie groß ist die abgestrahlte Schalleistung und der Schalldruck [in dB] in einem Abstand von 1 m, wenn der Piepser mit der Membran betrieben wird.
- Um wieviel dB steigt die abgestrahlte Schalleistung durch die Verwendung der Membran?

**Beispiel 5.3**

Gegeben sei ein Lautsprecher in einer unendlichen Schallwand mit  $r = 10 \text{ cm}$ .

- Ab welcher Frequenz kann ein Abstrahlwinkel angegeben werden.
- Bei welcher tiefstmöglichen Frequenz verschwindet die Abstrahlung in die  $90^\circ$ -Richtung (= parallel zur Schallwand).
- Bei welcher Frequenz treten 2 vollständige Nebenkeulen zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  auf? Wie groß ist das Richtungsmaß bei den Keulenmaxima und bei welchen Winkeln  $\vartheta$  liegen sie? Bis zu welchem Winkel  $\vartheta$  reicht die Hauptkeule?
- Geben Sie den Abstrahlwinkel  $\Phi$  in Abhängigkeit von der Frequenz an ab der in b) berechneten Frequenz.

**Beispiel 5.4**

Gegeben sei ein Zweiwegsystem mit einem Tieftöner ( $r_T = 10 \text{ cm}$ ) und einem Hochtöner ( $r_H = 1 \text{ cm}$ ). Die Übernahmefrequenz liegt bei  $4,5 \text{ kHz}$ . Berechnen Sie den Abstrahlwinkel  $\Phi$  in Abhängigkeit von der Frequenz.

**Beispiel 5.5**

Gegeben sei ein Dreiwegsystem mit einem Tieftöner ( $r_T = 30 \text{ cm}$ ), einem Mitteltöner ( $r_M = 8 \text{ cm}$ ) und einem Hochtöner ( $r_H = 2 \text{ cm}$ ). Die Übernahmefrequenzen liegen bei  $f_{TM} = 1,5 \text{ kHz}$  und  $f_{MH} = 6 \text{ kHz}$ . Berechnen Sie den Abstrahlwinkel  $\Phi$  in Abhängigkeit von der Frequenz.

**Beispiel 5.6**

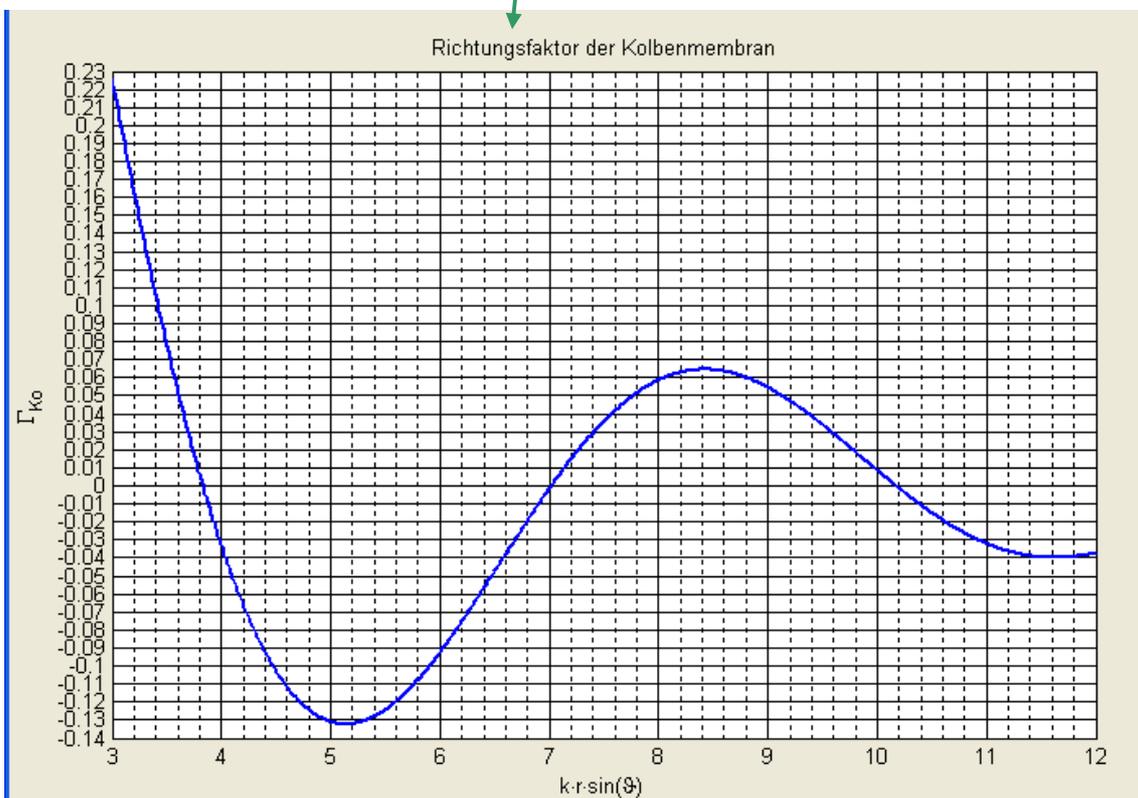
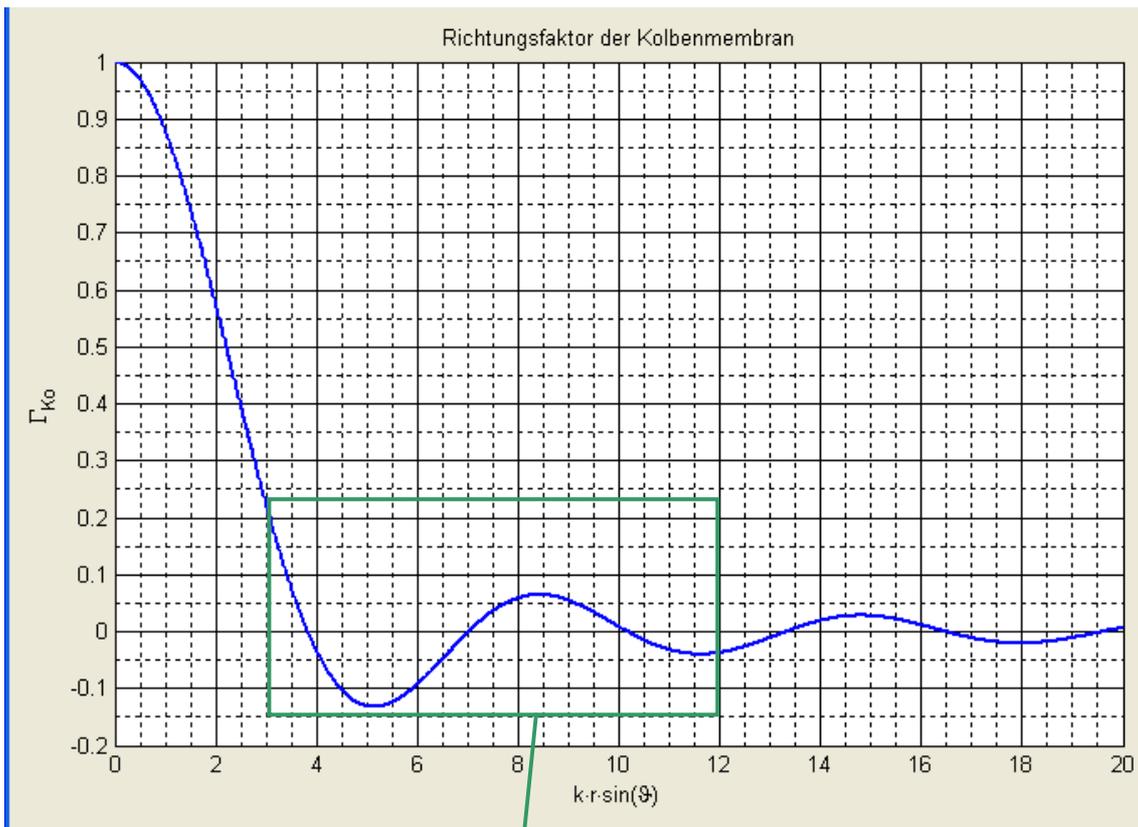
Gegeben sei ein Dreiwegsystem mit einem Tieftöner ( $r_T = 10 \text{ cm}$ ), einem Mitteltöner ( $r_M = 2,5 \text{ cm}$ ) und einem Hochtöner ( $r_H = 0,6 \text{ cm}$ ). Wie müssen die Übernahmefrequenzen gewählt werden, damit der Abstrahlwinkel  $\Phi$  nie kleiner als  $150^\circ$  wird.

**Beispiel 5.7**

Gegeben ist ein  $10 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ -HELMHOLTZ-Resonator mit einer Tunnellänge von  $3 \text{ cm}$  und einem Tunneldurchmesser von  $3 \text{ mm}$  (Raumtemperatur  $\vartheta = 20^\circ \text{C}$ ).

- Berechnen Sie die Resonanzfrequenz!  
Wie lange müsste eine Orgelpfeife mit gleicher Grundfrequenz sein?
- Berechnen Sie die Resonanzgüte unter Vernachlässigung der Reibungsverluste!

**Zu den Beispielen 5.3 bis 5.6**



## 9.4 Beispiele zu Kapitel 6

### Beispiel 6.1

Für den Hörbereich ist ein Kondensatormikrofon zu entwickeln, das folgende Eigenschaften aufweist:

- Übertragungsbereich von 10 Hz bis 16 kHz
- Das Mikrofon soll als Freifeldmikrofon konzipiert werden. Der bei hohen Frequenzen auftretende Druckstau soll daher teilweise durch die Membranresonanz-Bedämpfung kompensiert werden; Annahme für die Güte der Membrankonstruktion:  $Q_{Mk} = 0,5$
- Richtwirkungsfreiheit auch bei hohen Frequenzen; Annahme für das Bündelungsmaß:  
 $d_{K0}(f = 15 \text{ kHz}) = 4 \text{ dB}$

(Berechnen Sie zusätzlich, ab welcher Frequenz ein Abstrahlwinkel  $\Phi$  angebbbar wäre!)

- Das Mikrofon soll bis zu Schalldruckpegeln von 148 dB eingesetzt werden können. Um in diesem Bereich hinreichend linearen Betrieb zu gewährleisten, soll ein Luftspalt von ca. 10facher Membranauslenkung vorgesehen werden.
- Einsatztemperatur liegt bei 20°C
- Die Membran soll aus Nickel gefertigt werden; Materialdaten:

$$\rho = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Zugfestigkeit} = 500 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} = \frac{F_S}{t_M} = \frac{\text{Spannkraft}}{\text{Membrandicke}}$$

- Fertigungstechnisch ist eine minimale Membrandicke von 5  $\mu\text{m}$  erreichbar.
- Der Durchmesser der Gegenelektrode beträgt etwa 70% des Membrandurchmessers.
- Die Durchschlagfeldstärke von Luft beträgt bei den zu erwartenden Kondensatorkapselabmessungen etwa  $E_{\max} = 12 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ .
- Für die Dielektrizitätskonstante von Luft gilt  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \approx 8,8542 \frac{\text{pF}}{\text{m}}$ .
- Die Zuleitungskapazität  $C_Z$  und die Eingangskapazität des Verstärkers  $C_V$  sollen sehr klein gegenüber der Kapselkapazität  $C_+$  gehalten werden (Mikrofonempfindlichkeit).
- Damit die untere Grenzfrequenz nicht wesentlich durch die Koppelkapazität  $C$  (die hier berücksichtigt werden muss) erhöht wird, muss  $C \gg (C_+ + C_M^*)$  sein; Annahme eines Faktors 20.

- Bestimmen Sie das elektrische Ersatzschaltbild und dessen Bauteilgrößen, wodurch dann auch alle konstruktiven Größen (Membranradius, Membrandicke, Einspannkraft, mechanischer Reibwiderstand, Luftspaltgröße, Größe der Gegenelektrode, Polarisationsspannung, Koppelkapazität und Verstärkereingangswiderstand) bestimmt sind.
- Bestimmen Sie asymptotisch den Frequenzgang des Mikrofons (und damit auch die Mikrofonempfindlichkeit), wobei als Ausgangsgröße die Ausgangsspannung der Mikrofonkapsel (bzw. Eingangsspannung in den NF-Verstärker) herangezogen werden soll.

**Beispiel 6.2**

Berechnen Sie die Bündelungsmaße für folgende Richtcharakteristika:

- Achter
- Niere
- Superniere
- Hyperniere

**Beispiel 6.3**

Ein dynamisches Mikrofon mit einem Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz und einer Empfindlichkeit von  $T_{Up} = 2 \text{ mV/Pa}$  wird bei einer Raumtemperatur von  $25^\circ\text{C}$  eingesetzt. Der

Schwingspulenwiderstand beträgt  $200 \Omega$   $\left( k = 1,38 \cdot 10^{-23} \left[ \frac{\text{VAs}}{\text{K}} \right] \right)$ .

- Wie groß ist die thermische Rauschspannung?
- Wie groß ist der äquivalente Rauschschallpegel?
- Wie groß ist der Geräuschspannungsabstand?
- Wie groß ist die Ersatzlautstärke?

**9.5 Beispiele zu Kapitel 7****Beispiel 7.1**

Ein dynamischer Tieftonlautsprecher (VISATON W 200 S) ist in eine unendliche Schallwand eingebaut (Raumtemperatur  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ ). Die folgenden Parameter stammen aus dem Datenblatt:

$$\begin{array}{llll}
 A_M = 214 \text{ cm}^2 & m_{g,uS} = 26 \text{ g} & V_{\ddot{a},Ma} = 70 \text{ l} & Q_{m,Mk} = 3,45 \\
 R_S = 6,1 \Omega & L_S = 2,24 \text{ mH} & Bl = 9 \text{ Tm} & 
 \end{array}$$

- Bestimmen Sie den asymptotischen Verlauf des Frequenzganges der abgestrahlten Wirkleistung bei Betrieb an einer Spannungsquelle mit  $\tilde{U}_0 = 3 \text{ V}$  und  $R_g \approx 0 \Omega$ !
- Welcher Schallpegel entsteht im reflexionsarmen Raum in 1 m Entfernung ohne Berücksichtigung der Bündelung?

**Beispiel 7.2**

Gegeben ist der dynamische Tieftonlautsprecher VISATON W 200 S. Die folgenden Parameter stammen aus dem Datenblatt:

$$V_{\ddot{a},Ma} = 70 \text{ l} \quad Q_{g,Mk} = 0,33 \quad f_{uS} = 30 \text{ Hz}$$

- Dimensionieren Sie mit diesem Lautsprecher ein geschlossenes Gehäuse für beschränkten Platzbedarf, sodass das Gesamtsystem ein sehr gutes Impulsverhalten aufweist!
- Zu welchem Ergebnis würde die Dimensionierung eines solchen Gesamtsystems bei Verwendung von Dämmmaterial (lockere Füllung) führen?
- Berechnen Sie die Resonanzfrequenz des Lautsprechers im Gesamtsystem!
- Wie könnte das Gesamtsystem aussehen, wenn man in Punkt a die Forderung „für beschränkten Platzbedarf“ fallen ließe?

**Beispiel 7.3**

Berechnen Sie die Gehäuse- und Chassisdaten für folgende verlustlose elektroakustische HP-Filter 4.Ordnung (Filter-Koeffizienten siehe TIETZE/SCHENK):

- BUTTERWORTH-Filter
- TSCHEBYSCHJEFF-Filter mit 0,5 dB, 1 dB, 2 dB und 3 dB Welligkeit
- BESSEL-Filter
- Quasi-3.Ordnung-BUTTERWORTH-Filter (QB3) für  $A = 4,1142$  und  $A = 3,3022$

Aus TIETZE/SCHENK-Filterkoeffiziententabellen:

- |    |                |                |                 |                |
|----|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| a) | $a_1 = 1,8478$ | $a_2 = 0,7654$ | $b_1 = b_2 = 1$ |                |
| b) | $a_1 = 2,6282$ | $a_2 = 0,3648$ | $b_1 = 3,4341$  | $b_2 = 1,1509$ |
|    | $a_1 = 2,5904$ | $a_2 = 0,3039$ | $b_1 = 4,1301$  | $b_2 = 1,1697$ |
|    | $a_1 = 2,4025$ | $a_2 = 0,2374$ | $b_1 = 4,9862$  | $b_2 = 1,1896$ |
|    | $a_1 = 2,1853$ | $a_2 = 0,1964$ | $b_1 = 5,5339$  | $b_2 = 1,2009$ |
| c) | $a_1 = 1,3397$ | $a_2 = 0,7743$ | $b_1 = 0,4889$  | $b_2 = 0,3890$ |

**Beispiel 7.4**

Gegeben ist der dynamische Tieftonlautsprecher VISATON W 200 S. Die folgenden Parameter stammen aus dem Datenblatt (Raumtemperatur  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ ):

$$\begin{array}{lll} V_{\ddot{a},Ma} = 70 \text{ l} & Q_{g,Mk} = 0,33 & f_{uS} = 30 \text{ Hz} \\ x_{M,\max} = 20 \text{ mm} & A_M = 214 \text{ cm}^2 & \end{array}$$

Dimensionieren Sie mit diesem Lautsprecher ein ventiliertes Gehäuse!

Welche Filtercharakteristik ergibt sich?

**Beispiel 7.5**

Gegeben sei das Lautsprecherchassis Visaton W 200 S mit den folgenden Daten:

$$m_{g,uS} = 26 \text{ g}, \quad R_S = 6,1 \Omega, \quad r_M = 8,25 \text{ cm}, \quad Bl = 9 \text{ Tm}$$

Das Lautsprecherchassis sei in ein geschlossenes Gehäuse eingebaut. Gesucht ist der Referenz-System-Wirkungsgrad  $\eta_0$  und die Empfindlichkeit des Lautsprechers (= Schalldruckpegel in 1 m Entfernung bei 1  $W_e$  am Eingang).

**Beispiel 7.6**

Gegeben ist ein Lautsprecher mit  $r_M = 2 \text{ cm}$ , der in einer unendlichen Schallwand mit  $f = 300 \text{ Hz}$  betrieben wird (Raumtemperatur  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ ).

- a) Dimensionieren Sie einen Konustrichter, sodass möglichst viel Wirkleistung abgestrahlt wird!
- b) Mit welcher Impedanz wird der Lautsprecher ohne bzw. mit Konustrichter belastet? In welchem Verhältnis ändert sich der Strahlungswirkwiderstand am Lautsprecher durch den Konustrichter?
- a) Wie groß ist die Impedanz an der Trichtermündung? Wie ist das Verhältnis des Strahlungswirkwiderstandes des Lautsprechers ohne Trichter und des Strahlungswirkwiderstandes an der Trichtermündung?

**Beispiel 7.7**

Gegeben ist ein Mitteltonlautsprecher mit  $r_M = 3 \text{ cm}$ , der ab  $f_u = 500 \text{ Hz}$  betrieben wird (Raumtemperatur  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ ).

- a) Dimensionieren Sie einen Exponentialtrichter so, dass sich kaum Trichterresonanzen ausprägen können!
- b) Berechnen Sie den Mündungswinkel!