

res Forschungsgebiet ist die Entwicklung von peristaltischen Miniaturpumpen in der Medizintechnik mit Hilfe von Polymeraktoren [74].

In Tabelle 9.2 sind die Merkmale von dielektrischen Polymeraktoren zusammengestellt. Gegenstand der laufenden Forschungsarbeiten sind die reproduzierbare Herstellung der elastischen Elektroden und die Reduzierung der Steuerspannung.

Tabelle 9.2. Merkmale dielektrischer Polymeraktoren [72]

sehr große Dehnungen realisierbar:	bis 20% (ca. Faktor 100 gegenüber Piezokeramik)
hohe elektrostatisch erzeugte Drücke:	bis 7 MPa
geringe Dichte:	ca. 1 g/cm ³
sehr hohe Durchbruchfeldstärke:	30 V/ μ m (ca. Faktor 10 gegenüber Luft)
geringe Verschmutzungsgefahr:	Festkörper
Funktionsintegration möglich:	Dielektrikum, Rückstellfeder, Elektroden
Parallelfertigung (Batch Prozess):	möglich

9.2 Piezoelektrische Wandler mit konzentrierten Bauelementen

9.2.1 Modellvorstellungen zum piezoelektrischen Effekt

Die zweite praktisch bedeutungsvolle Klasse der elektrischen Wandler stellen die piezoelektrischen Wandler dar. Die elektromechanische Verkopplung erfolgt auch hier zwischen den mechanischen und elektrischen Feldgrößen. Der Übergang zu den integralen Größen, die an einem Punkt oder einer Fläche räumlich konzentriert auftreten, ist zunächst nicht so einfach möglich wie bei den elektrostatischen Wandlern. Betrachtet man jedoch zunächst tiefe Frequenzen – *quasistatischer* Fall – so können die piezoelektrischen Werkstoffe als praktisch masselos angesehen werden. Unter dieser Voraussetzung haben die Feldgrößen im Innern des piezoelektrischen Werkstoffs an jedem Punkt den

gleichen Wert. Die Feldgrößen sind integrierbar und man kann zur Beschreibung mit integralen Größen und konzentrierten Bauelementen übergehen. In einem zweiten Schritt werden einfache piezoelektrische Schwinger betrachtet, deren Masse- und Ortsabhängigkeit der Bauelementeparameter nun nicht mehr vernachlässigt werden kann. Das Übertragungsverhalten der Schwinger wird durch die Übernahme der Lösungen für *eindimensionale Wellenleiter* und Bauelemente mit *verteilten Parametern* aus den Abschnitten 6.1 und 6.2 bestimmt. Zur Vertiefung wird auf die Spezialliteratur verwiesen [2, 75, 76]. Auf eine ausführliche Betrachtung der Theorie piezoelektrischer Werkstoffe wird im Rahmen dieses Buches verzichtet. Auch hier wird auf vertiefende Darstellungen in der Fachliteratur verwiesen [77–79]. Die Ableitung der Schaltungsstruktur des quasistatischen piezoelektrischen Wandlers beruht im Abschnitt 9.2.2 auf der phänomenologischen Beschreibung des Piezoeffekts (griech.: *piezein* \equiv drücken).

Beim gleichzeitigen Wirken von mechanischen und elektrischen Größen treten in *isotropen Werkstoffen*, wenn man wie im Abschnitt 9.1.5 die MAXWELL-Spannung und die Elektrostriktion vernachlässigt (Gl. 9.10), keine elektromechanischen Verkopplungen auf. Beim Einleiten einer mechanischen Spannung T wird in Abbildung 9.31 lediglich über die elastische Konstante s eine Dehnung S bzw. beim Anlegen einer Feldstärke E über die Dielektrizitätskonstante ε eine Verschiebung D hervorgerufen.

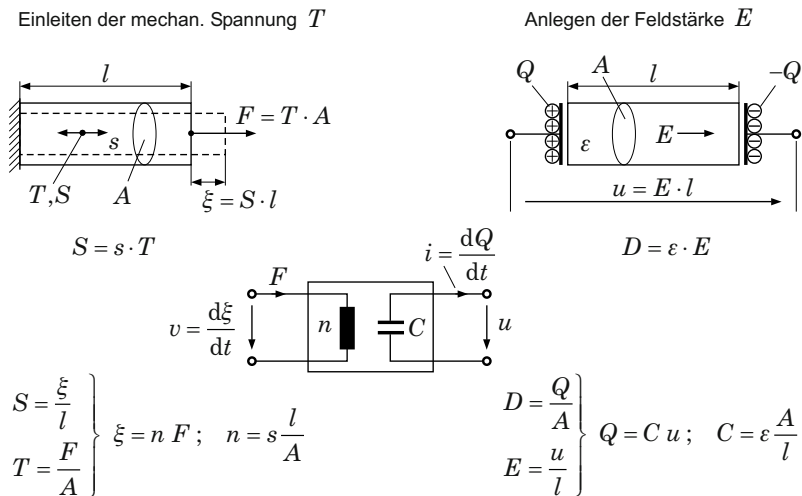


Abbildung 9.31. Wirkung von mechanischen und elektrischen Größen bei isotropen Werkstoffen

Ausgewählte *anisotrope Werkstoffe*, wie Piezokristalle und Ferroelektrika, weisen dagegen eine ausgeprägte Verkopplung der mechanischen und elektrischen Größen auf. Bei Piezokristallen, z. B. *Quarz*, tritt wegen der molekularen Struktur grundsätzlich eine lineare Verkopplung zwischen den elektrischen und mechanischen Größen auf. Bei Ferroelektrika, z. B. *Piezokeramik*, wird durch Anlegen eines elektrischen Gleichfeldes (s. Abschn. 9.2.6) eine innere Polarisation des Werkstoffs hervorgerufen, die nach Abschnitt 9.1.5 den quadratischen Effekt der Elektrostriktion linearisiert (Gl. 9.11).

Nach außen ist der piezoelektrische Effekt (Abb. 9.32) durch die Fähigkeit zur Ladungsverschiebung bei mechanischer Erregung durch Kräfte oder Verformungen, oder umgekehrt durch eine Werkstoffdeformation bei elektrischer Erregung durch Spannung oder Strom, gekennzeichnet. In Abbildung 9.32 ist phänomenologisch die Ladungsverschiebung beim Aufprägen einer Deformation und im zweiten Experiment die Krafterzeugung beim Anlegen einer elektrischen Spannung bei Verhinderung der Deformation für piezoelektrische Werkstoffe dargestellt. Dabei beruht der piezoelektrische Effekt auf einer elastischen Deformation von elektrischen Dipolen in einem Kristallgitter.

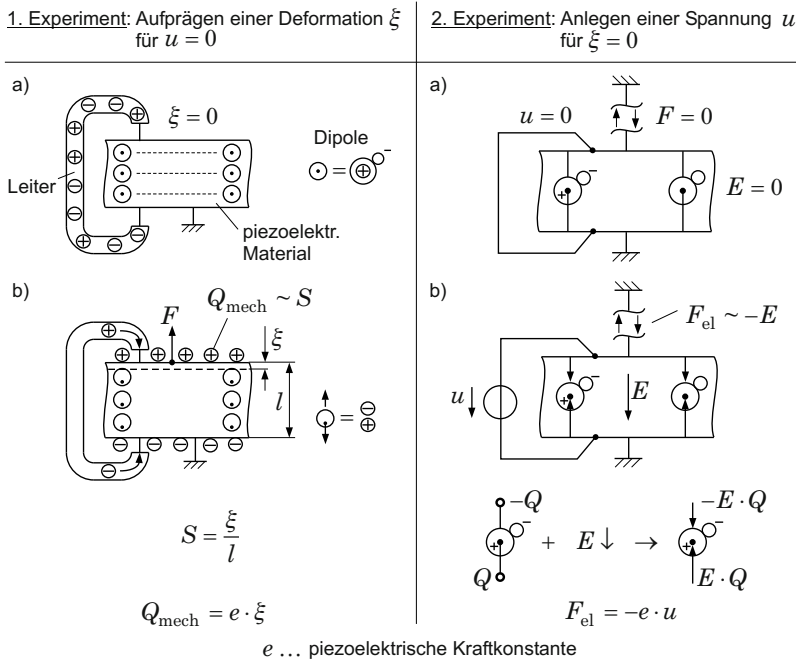
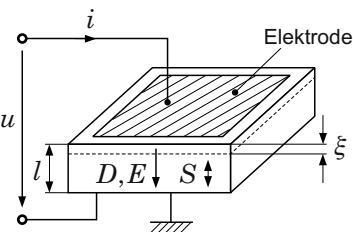
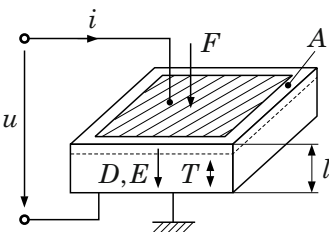


Abbildung 9.32. Phänomenologische Modellbeschreibung des piezoelektrischen Effekts

In Abhängigkeit von der Wirkungsrichtung in Tabelle 9.3 führt der Piezoeffekt zu einer Ladungs- oder Deformationsänderung. Technisch wird die Erzeugung einer Ladung bei mechanischer Anregung für Sensoren zur Messung mechanischer Größen verwendet. Umgekehrt lassen sich Aktoren durch elektrische Anregung zur Deformations- oder Krafterzeugung ableiten.

Tabelle 9.3. Grundgleichungen des piezoelektrischen Effekts für sensorische und aktorische Anwendungen

sensorische Anwendungen	
 <p>Anregung: Dehnung S, für $E = 0$</p> <p>Antwort: $D = e \cdot S$</p> <p>mit $D = \frac{Q}{A}$, $T = \frac{F}{A}$ und $S = \frac{\xi}{l}$ folgt:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $Q = e \cdot \frac{A}{l} \cdot \xi$ </div> <p>$e \dots$ piezoelektrische Kraftkonstante</p>	 <p>Anregung: mechan. Spannung T, für $E = 0$</p> <p>Antwort: $D = d \cdot T$</p> <p>mit $D = \frac{Q}{A}$, $T = \frac{F}{A}$ und $S = \frac{\xi}{l}$ folgt:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $Q = d \cdot F$ </div> <p>$d \dots$ piezoelektrische Ladungskonstante</p>
aktorische Anwendungen	
<p>Anregung: elektrisches Feld E, für $S = 0$</p> <p>$T = -e \cdot E$</p> <p>mit $E = \frac{u}{l}$, $T = \frac{F}{A}$ und $S = \frac{\xi}{l}$ folgt:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $F = -e \cdot \frac{A}{l} \cdot u$ </div>	<p>Anregung: elektrisches Feld E, für $T = 0$</p> <p>$S = d \cdot E$</p> <p>mit $E = \frac{u}{l}$, $T = \frac{F}{A}$ und $S = \frac{\xi}{l}$ folgt:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $\xi = d \cdot u$ </div>

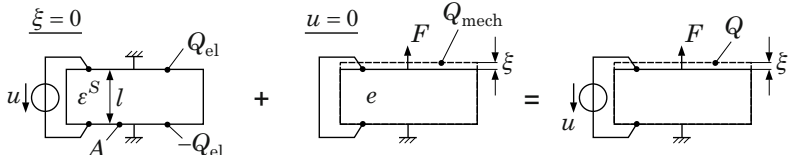
9.2.2 Piezoelektrische Zustandsgleichungen und Schaltbild für die eindimensionale Längskopplung

Die elektromechanischen Verkopplungen in piezoelektrischen Werkstoffen kann man durch Zustandsgleichungen beschreiben. Durch zwei einfache Gedankenexperimente werden in Abbildung 9.33 unter Verwendung der piezoelektrischen Konstante e die *piezoelektrischen Zustandsgleichungen* aufgestellt. Neben dieser Form sind, wie im Abschnitt 9.2.3 dargestellt, noch drei andere Formen der Zustandsgleichungen mit ihren speziellen piezoelektrischen, elastischen und dielektrischen Konstanten ableitbar.

Beim ersten Experiment wird die Spannung u angelegt und die Ladung Q_{el} bei verhinderter Deformation $\xi = 0$ erzeugt. Anschließend wird für Kurzschluss eine Deformation eingeleitet und die Ladung Q_{mech} ist messbar. Die Gesamtladung ergibt sich aus der Addition der beiden Teilladungen.

1. Experiment:

$$\xi, u \Rightarrow Q$$



$$Q_{\text{el}} = \varepsilon^S \frac{A}{l} u$$

$$D_{\text{el}} = \varepsilon^S \cdot E$$

$$Q_{\text{mech}} = e \frac{A}{l} \xi$$

$$D_{\text{mech}} = e \cdot S$$

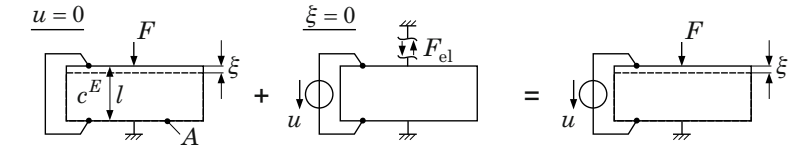
$$Q = Q_{\text{el}} + Q_{\text{mech}} = \varepsilon^S \frac{A}{l} u + e \frac{A}{l} \xi$$

$$C_b = \varepsilon^S \frac{A}{l} \text{ Kapazität im festgebremsten Zustand } (\xi = 0)$$

$D = \varepsilon^S \cdot E + e \cdot S$

2. Experiment:

$$u, \xi \Rightarrow F$$



$$F_{\text{mech}} = c^E \frac{A}{l} (-\xi)$$

$$T_{\text{mech}} = c^E \cdot S$$

$$F_{\text{el}} = e \frac{A}{l} u$$

$$T_{\text{el}} = -e \cdot E$$

$$F = F_{\text{mech}} + F_{\text{el}} = -c^E \frac{A}{l} \xi + e \frac{A}{l} u$$

$$n_K = \frac{1}{c^E} \frac{l}{A} \text{ Nachgiebigkeit für elektr. Kurzschluss } (u = 0)$$

$T = c^E \cdot S - e \cdot E$

Abbildung 9.33. Gedankenexperimente zur Definition der piezoelektrischen Konstante e und Ableitung der piezoelektrischen Zustandsgleichungen

Die erste Zustandsgleichung

$$D = \varepsilon^S E + e S \quad (9.18)$$

folgt nach Einsetzen der Feldgrößen in diese Beziehung.

Die zweite Zustandsgleichung erhält man mit dem zweiten Gedankenexperiment aus der Überlagerung der mechanisch und elektrisch erzeugten Teilkräfte F_{mech} und F_{el} :

$$T = c^E S - e E \quad (9.19)$$

Mit Hilfe dieser Zustandsgleichungen ist nun die Ableitung des Schaltbildes in Abbildung 9.34 für den piezoelektrischen Wandler möglich.

Die Ausgangsgleichungen werden durch die integrale Schreibweise der Zustandsgleichungen gebildet:

$$Q = \varepsilon^S \frac{A}{l} u + e \frac{A}{l} \xi \quad (9.20)$$

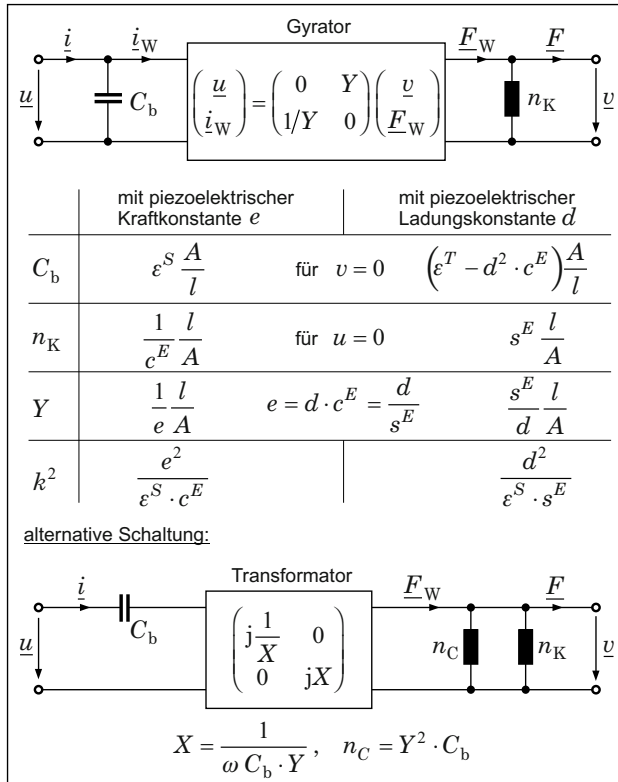


Abbildung 9.34. Schaltbilder des piezoelektrischen Wandlers und Bauelementeparameter für den Längseffekt

$$F = e \frac{A}{l} u - c^E \frac{A}{l} \xi \quad (9.21)$$

Auch hier geht man zu der Schreibweise mit komplexen Amplituden

$$Q \rightarrow \underline{Q} = \frac{1}{j\omega} \dot{Q}, \quad u \rightarrow \underline{u}, \quad F \rightarrow \underline{F}, \quad \xi \rightarrow \underline{\xi} = \frac{1}{j\omega} \dot{\xi}$$

über und stellt die Gln. (9.20) und (9.21) nach $\underline{\dot{u}}_W$ und \underline{F}_W um:

$$\underline{\dot{u}} - j\omega \varepsilon^S \frac{A}{l} \underline{u} = \underline{\dot{u}}_W = e \frac{A}{l} \underline{v} \quad (9.22)$$

$$\underline{F} + \frac{1}{j\omega} c^E \frac{A}{l} \underline{v} = \underline{F}_W = e \frac{A}{l} \underline{u} \quad (9.23)$$

Die Gln. (9.22) und (9.23) entsprechen der Struktur des allgemeinen elektrischen Wandlers. Der Zahlenwert der Werkstoffkennwerte s , c , ε ist von den experimentellen Randbedingungen abhängig. Der jeweils zu „Null” erzwungene Randwert wird als hochgestelltes Symbol an den Kennwert geschrieben.

Die gyratorische Wandlerkonstante Y lässt sich mit

$$Y = \frac{1}{e} \frac{l}{A} \quad (9.24)$$

ablesen. Das Schaltbild und die Beziehungen zur Berechnung der Bauelementeparameter aus den Werkstoffkennwerten e , c , ε und den Wandlerabmessungen l und A sind in Abbildung 9.34 zusammengefasst. Wegen der parallelen Wirkungsrichtung der mechanischen und elektrischen Feldgrößen wird diese Verkopplung als *piezoelektrischer Längseffekt* bezeichnet.

Zusätzlich zum Schaltbild mit reeller gyratorischer Verkopplung ist in Abbildung 9.34 das alternative Schaltbild mit imaginärer transformatorischer Verkopplung angegeben. Diese alternative Schaltung wird bei der Ableitung der Schaltung des piezoelektrischen Dickenschwingers als Wellenleiter im Abschnitt 9.3.3 verwendet.

In Abhängigkeit von der Energiewandlungsrichtung – Aktor- oder Sensorbetrieb – ergeben sich in Abbildung 9.35 unterschiedliche Vorzeichenfestlegungen im Schaltbild aus Abbildung 9.34.

9.2.3 Allgemeine piezoelektrische Zustandsgleichungen

Bisher wurde im Abschnitt 9.2.2 lediglich ein Sonderfall der allgemeinen piezoelektrischen Verkopplungen betrachtet. Sowohl das elektrische, als auch das mechanische Feld waren eindimensional und hatten die gleiche Wirkungsrichtung. Im allgemeinen Fall sind alle Spannungs- und Dehnungskomponenten mit allen Feldstärke- und Verschiebungskomponenten verknüpft.

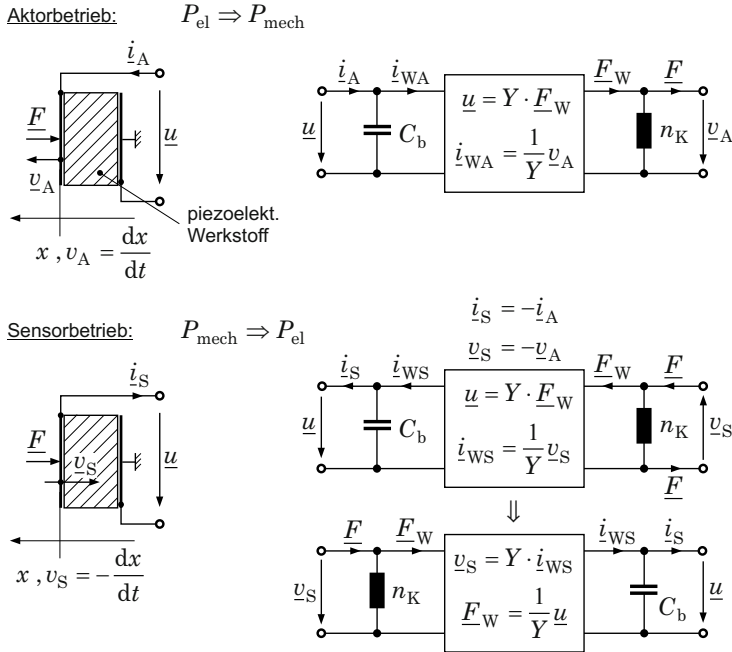


Abbildung 9.35. Vorzeichenfestlegung bei unterschiedlichen Übertragungsrichtungen

Nach [2, 75–77] kann man bei Verwendung der piezoelektrischen Kraftkonstante e für die lineare Verknüpfung sämtlicher elektrischer und mechanischer Feldgrößen schreiben:

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \varepsilon_{11}^S E_1 + \varepsilon_{12}^S E_2 + \varepsilon_{13}^S E_3 + e_{11} S_1 + e_{12} S_2 \cdots e_{16} S_6 \\
 D_2 &= \varepsilon_{21}^S E_1 + \varepsilon_{22}^S E_2 + \varepsilon_{23}^S E_3 + e_{21} S_1 + e_{22} S_2 \cdots e_{26} S_6 \\
 D_3 &= \varepsilon_{31}^S E_1 + \varepsilon_{32}^S E_2 + \varepsilon_{33}^S E_3 + e_{31} S_1 + e_{32} S_2 \cdots e_{36} S_6 \\
 T_1 &= -e_{11} E_1 - e_{21} E_2 - e_{31} E_3 + c_{11}^E S_1 + c_{12}^E S_2 \cdots c_{16}^E S_6 \\
 &\vdots \\
 T_6 &= -e_{16} E_1 - e_{26} E_2 - e_{36} E_3 + c_{61}^E S_1 + c_{62}^E S_2 \cdots c_{66}^E S_6
 \end{aligned}$$

Diese Matrizenanschreibweise lässt sich bei Einführung von Summationszeichen verkürzen zu:

$$\begin{aligned}
 D_n &= \sum_{m=1}^3 \varepsilon_{mn}^S E_m + \sum_{j=1}^6 e_{nj} S_j & n = 1 \dots 3, m = 1 \dots 3, j = 1 \dots 6 \\
 T_i &= \sum_{m=1}^3 -e_{mi} E_m + \sum_{j=1}^6 c_{ij}^E S_j & i = 1 \dots 6, m = 1 \dots 3, j = 1 \dots 6
 \end{aligned}$$

Mit Hilfe der EINSTEIN'schen Summationsvereinbarung – über doppelt vorkommende Indizes ist zu summieren – ergibt sich schließlich die Kurzschreibweise

$$D, T = f(E, S): \quad D_n = \varepsilon_{mn}^S E_m + e_{nj} S_j \quad \begin{array}{l} n = 1 \dots 3, m = 1 \dots 3, \\ j = 1 \dots 6 \end{array} \quad (9.25)$$

$$T_i = -e_{mi} E_m + c_{ij}^E S_j \quad \begin{array}{l} i = 1 \dots 6, m = 1 \dots 3, \\ j = 1 \dots 6. \end{array} \quad (9.26)$$

Die Koeffizienten ε_{mn}^S sind die dielektrischen Konstanten unter der Bedingung $S = 0$, d. h. sie werden experimentell im mechanisch festgebremsten Zustand ermittelt. Die Koeffizienten c_{ij}^E sind elastische Konstanten unter der Bedingung $E = 0$, d. h. für elektrischen Kurzschluss.

Für die *zweite* Form der piezoelektrischen Zustandsgleichungen ergibt sich unter Verwendung der piezoelektrischen Ladungskonstante d in ähnlicher Weise

$$D, S = f(E, T): \quad D_n = \varepsilon_{mn}^T E_m + d_{nj} T_j \quad \begin{array}{l} n = 1 \dots 3, m = 1 \dots 3, \\ j = 1 \dots 6 \end{array} \quad (9.27)$$

$$S_i = d_{mi} E_m + s_{ij}^E T_j \quad \begin{array}{l} i = 1 \dots 6, m = 1 \dots 3, \\ j = 1 \dots 6. \end{array} \quad (9.28)$$

Diesmal wurde bei der experimentellen Ermittlung der Dielektrizitätskonstanten ε_{mn}^T die mechanische Spannung T und bei den elastischen Konstanten s_{ij}^E die Feldstärke E gleich Null gesetzt, d. h. mechanischer Leerlauf und elektrischer Kurzschluss.

In [2], [75] und [78] werden noch die dritte und vierte Form der piezoelektrischen Zustandsgleichungen

$$E, S = f(D, T) \quad \text{und} \quad T, E = f(D, S)$$

angegeben, die aber im Rahmen dieses Buches nicht benötigt werden. Zwischen den Konstanten der Zustandsgleichungen (9.25) bis (9.28) bestehen folgende Beziehungen:

$$e_{nj} = d_{nj} c_{ij}^E, \quad d_{nj} = e_{ni} s_{ij}^E$$

$$c_{ij} = c_{ji}, \quad s_{ij} = s_{ji}$$

$$\varepsilon_{nm}^T - \varepsilon_{nm}^S = e_{ni} e_{mj} s_{ij}^E = c_{ij}^E d_{mi} d_{nj}$$

9.2.4 Technisch übliche Konfigurationen piezoelektrischer Wandler und zugehörige Ersatzparameter

Ausgehend von den allgemeinen Zustandsgleichungen (9.25) bis (9.28) aus Abschnitt 9.2.3 besteht jetzt die Aufgabe, für technisch wichtige Konfigurationen durch Einführung elektrischer und mechanischer Randbedingungen die Bauelementeparameter der Schaltung in Abbildung 9.34 aus den Konstantensätzen ε , s , c , d , e und den geometrischen Abmessungen zu bestimmen. Die Zusammenstellung der erforderlichen piezoelektrischen, elastischen und dielektrischen Konstanten für technisch wichtige Werkstoffe erfolgt im Abschnitt 9.2.6.

Die prinzipielle Vorgehensweise soll an zwei Beispielen erläutert werden.

Freier Dickenschwinger (Längseffekt)

In Abbildung 9.36 ist die Anordnung des freien Dickenschwingers und die dazugehörigen Randbedingungen dargestellt.

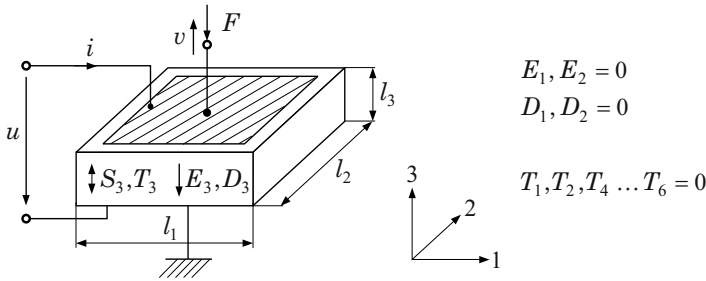


Abbildung 9.36. Freier Dickenschwinger (Längseffekt)

Im ersten Schritt erfolgt die Umformung der allgemeinen Zustandsgleichungen $D, T = f(E, S)$ oder $D, S = f(E, T)$ unter Beachtung der Randbedingungen in zwei Gleichungen zwischen den vier verkoppelten Feldgrößen:

$$D_3 = \varepsilon_{33}^T E_3 + d_{33} T_3, \quad S_3 = d_{33} E_3 + s_{33}^E T_3$$

Diese Zustandsgleichungen werden im Folgenden in die Form $D, T = f(E, S)$ mit

$$T_3 = \frac{1}{s_{33}^E} S_3 - \frac{d_{33}}{s_{33}^E} E_3 = c_{33}^E S_3 - e_{33} E_3$$

und

$$\begin{aligned} D_3 &= \varepsilon_{33}^T E_3 + d_{33} \left(\frac{1}{s_{33}^E} S_3 - \frac{d_{33}}{s_{33}^E} E_3 \right) \\ &= \varepsilon_{33}^T \left(1 - \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E} \right) E_3 + \frac{d_{33}}{s_{33}^E} S_3 = \varepsilon_{33}^T E_3 + e_{33} S_3 \end{aligned}$$

überführt, die den Ausgangspunkt zur Ableitung der Schaltung in Abbildung 9.34 im Abschnitt 9.2.3 bildet.

Im zweiten Schritt wird, wie im Abschnitt 9.2.2 bereits vollzogen, zu den integralen Koordinaten \underline{v} , \underline{E} , \underline{u} und \underline{i} übergegangen. Es folgt das Schaltbild aus Abbildung 9.34. Unter Berücksichtigung der elektrisch und mechanisch wirksamen Abmessungen

$$l_{\text{el}} = l_{\text{mech}} = l_3 \quad \text{und} \quad A_{\text{el}} = A_{\text{mech}} = l_1 l_2$$

ergibt sich nach Einsetzen von ε , c , e für die Ersatzparameter schließlich:

$$C_b = \varepsilon_{33}^T \left(1 - \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E} \right) \frac{l_1 l_2}{l_3}, \quad n_K = s_{33}^E \frac{l_3}{l_1 l_2}$$

$$Y = \frac{s_{33}^E}{d_{33}} \frac{l_3}{l_1 l_2}, \quad k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E}$$

Im Abschnitt 9.2.7 wird ein freier Dickenschwinger aus PZT-Keramik in einem Beschleunigungssensor verwendet.

Freier Längsschwinger (Quereffekt):

Die Anordnung des freien Längsschwingers ist gemeinsam mit den Randbedingungen in Abbildung 9.37 angegeben.

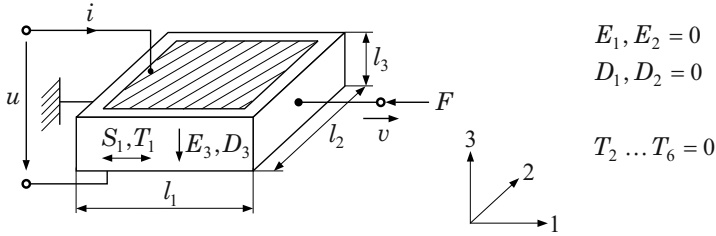


Abbildung 9.37. Freier Längsschwinger (Quereffekt)

Auch hier erfolgt im ersten Schritt die Umformung der allgemeinen Zustandsgleichungen in zwei Gleichungen mit vier verkoppelten Feldgrößen

$$D_3 = \varepsilon_{33}^T E_3 + d_{31} T_1, \quad S_1 = d_{31} E_3 + s_{11}^E T_1.$$

Diese Zustandsgleichungen werden wieder in die Form $D, T = f(E, S)$ mit den Konstanten ε , c , e überführt:

$$T_1 = \frac{1}{s_{11}^E} S_1 - \frac{d_{31}}{s_{11}^E} E_3 = c_{11}^E S_1 - e_{31} E_3$$

$$\begin{aligned}
D_3 &= \varepsilon_{33}^T E_3 + d_{31} \left(\frac{1}{s_{11}^E} S_1 - \frac{d_{31}}{s_{11}^E} E_3 \right) \\
&= \varepsilon_{33}^T \left(1 - \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T s_{11}^E} \right) E_3 + \frac{d_{31}}{s_{11}^E} S_1 = \varepsilon_{33}^T E_3 + e_{31} S_1.
\end{aligned}$$

Beim Quereffekt sind die elektrisch und mechanisch wirksamen Abmessungen

$$l_{\text{el}} = l_3, \quad l_{\text{mech}} = l_1 \quad \text{und} \quad A_{\text{el}} = l_1 l_2, \quad A_{\text{mech}} = l_2 l_3$$

nicht mehr identisch. Nach Einsetzen der Konstanten ε , c , e und der Abmessungen in die Beziehungen aus Abbildung 9.34 erhält man für die Ersatzparameter

$$\begin{aligned}
C_b &= \varepsilon_{33}^T \left(1 - \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T s_{11}^E} \right) \frac{l_1 l_2}{l_3}, \quad n_K = s_{11}^E \frac{l_1}{l_2 l_3} \\
Y &= \frac{s_{11}^E}{d_{31}} \frac{1}{l_2}, \quad k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T s_{11}^E}.
\end{aligned}$$

In den Tabellen 9.4 und 9.5 sind die Randbedingungen und Kennwerte der freien Dicken- und Längsschwinger, des geklemmten Dickenschwingers und des Scherschwingers angegeben. Die Vorgehensweise bei der Parameterermittlung erfolgt analog wie bei den erläuterten Beispielen.

Freie Dicken- und Biegeschwinger werden vor allem in Beschleunigungssensoren, seitlich geklemmte Dickenschwinger für Ultraschallsendeelemente, Flächenscherschwinger als Sender in der Sonartechnik sowie Dickenscherschwinger als Filterelemente und pyroeffektfreie Beschleunigungssensoren verwendet. Die typischen Arbeitsfrequenzbereiche dieser Schwinger sind in Abbildung 9.38 dargestellt.

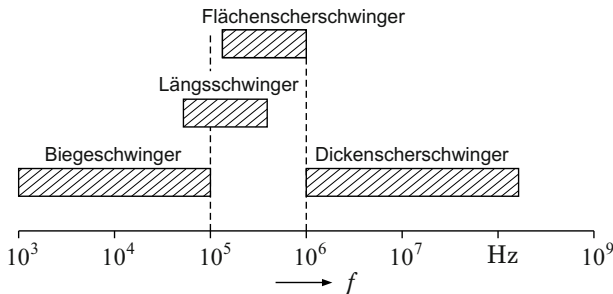


Abbildung 9.38. Typische Arbeitsfrequenzbereiche piezoelektrischer Schwinger

Tabelle 9.4. Ausgewählte Schwingungsformen piezoelektrischer Schwinger und zugehörige Kenngrößen

	freier Dickenschwinger	geklemmter Dickenschw.	Längsschwinger
geometrische Anordnung			
mechan. u. elektr. Randbedingungen	$T_1, T_2, T_4 \dots T_6 = 0$ $F = -T_3 \cdot l_1 \cdot l_2$ $\underline{v} = j\omega \underline{S}_3 \cdot l_3$	$S_1, S_2, S_4 \dots S_6 = 0$ $F = -T_3 \cdot l_1 \cdot l_2$ $\underline{v} = j\omega \underline{S}_3 \cdot l_3$	$T_2 \dots T_6 = 0$ $F = -T_1 \cdot l_2 \cdot l_3$ $\underline{v} = j\omega \underline{S}_1 \cdot l_1$
	$E_1, E_2 = 0, \quad \underline{u} = l_3 \cdot \underline{E}_3, \quad \underline{i} = j\omega \underline{D}_3 \cdot l_1 \cdot l_2$		
A	$A_{\text{el}} = A_{\text{mech}} = l_1 \cdot l_2$	$A_{\text{el}} = A_{\text{mech}} = l_1 \cdot l_2$	$A_{\text{el}} = l_1 \cdot l_2, A_{\text{mech}} = l_2 \cdot l_3$
l	$l_{\text{el}} = l_{\text{mech}} = l_3$	$l_{\text{el}} = l_{\text{mech}} = l_3$	$l_{\text{el}} = l_3, l_{\text{mech}} = l_1$
e	$\frac{d_{33}}{s_{33}^E}$	e_{33}	$\frac{d_{31}}{s_{11}^E}$
ε	$\varepsilon_{33}^T \left(1 - \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T \cdot s_{33}^E} \right)$	ε_{33}^S	$\varepsilon_{33}^T \left(1 - \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T \cdot s_{11}^E} \right)$
c	$\frac{1}{s_{33}^E}$	c_{33}^E	$\frac{1}{s_{11}^E}$
k^2	$\frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T \cdot s_{33}^E}$	$\frac{e_{33}^2 / (\varepsilon_{33}^S \cdot c_{33}^E)}{1 + e_{33}^2 / (\varepsilon_{33}^S \cdot e_{33}^E)}$	$\frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T \cdot s_{11}^E}$
Vierpol-schaltung	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div> $C_b = \varepsilon \frac{A_{\text{el}}}{l_{\text{el}}}$ </div> <div> $n_K = \frac{1}{c} \frac{l_{\text{mech}}}{A_{\text{mech}}}$ </div> </div> <div style="margin-top: 10px;"> $\frac{1}{Y} = e \frac{A_{\text{el}}}{l_{\text{mech}}} = e \frac{A_{\text{mech}}}{l_{\text{el}}}$ $k^2 = \frac{e^2 / (c \cdot \varepsilon)}{1 + e^2 / (c \cdot \varepsilon)} = \frac{1}{1 + Y^2 C_b / n_K}$ </div>		

Tabelle 9.5. Ausgewählte Schwingungsformen piezoelektrischer Schwinger und zugehörige Kenngrößen

	Flächendehnungsschwinger	Dickenscherschwinger	Flächenscherschwinger
geometrische Anordnung			
mechan. u. elektr. Randbedingungen	$T_3 \dots T_6 = 0, T_1 = T_2 = T/2$ $F = T \cdot l_1 \cdot l_3$ $\underline{v} = j\omega \underline{S} \cdot l, S_1 = S_2 = S$	$T_1 \dots T_4, T_6 = 0$ $F = -T_5 \cdot l_2 \cdot l_3$ $\underline{v} = j\omega \underline{S}_5 \cdot l_1$	$T_1 \dots T_4 = 0$ $F = -T_5 \cdot l_2 \cdot l_3$ $\underline{v} = j\omega l_1 \cdot \underline{S}_5$
	$E_1 = E_2 = 0$ $\underline{u} = l_3 \underline{E}_3, \underline{i} = j\omega \underline{D}_3 l_1 l_2$	$E_2 = E_3 = 0$ $\underline{u} = l_1 \underline{E}_1, \underline{i} = j\omega \underline{D}_1 l_2 l_3$	$E_1 = E_3 = 0$ $\underline{u} = l_2 \underline{E}_2, \underline{i} = j\omega \underline{D}_2 l_1 l_3$
A	$A_{el} = l^2, A_{mech} = l l_3$	$A_{el} = A_{mech} = l_2 l_3$	$A_{el} = l_1 l_3, A_{mech} = l_2 l_3$
l	$l_{el} = l_3, l_{mech} = l$	$l_{el} = l_{mech} = l_3$	$l_{el} = l_2, l_{mech} = l_3$
e	$\frac{2d_{31}}{s_{11}^E + s_{12}^E}$	$\frac{d_{15}}{s_{55}^E}$	$\frac{d_{25}}{s_{55}^E}$
ε	$\varepsilon_{33}^T (1 - k_p^2)$	$\varepsilon_{11}^T (1 - k_s^2)$	$\varepsilon_{22}^T (1 - k_F^2)$
c	$\frac{2}{s_{11}^E + s_{12}^E}$	$\frac{1}{s_{55}^E}$	$\frac{1}{s_{55}^E}$
k^2	$\frac{2d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T (s_{11}^E + s_{12}^E)}$	$\frac{d_{15}^2}{\varepsilon_{11}^T \cdot s_{55}^E}$	$\frac{d_{25}^2}{\varepsilon_{22}^T \cdot s_{55}^E}$
Vierpol-schaltung	$C_b = \varepsilon \frac{A_{el}}{l_{el}} \quad n_K = \frac{1}{c} \frac{l_{mech}}{A_{mech}}$		$\frac{e^2}{\varepsilon c} = \frac{k^2}{1 - k^2} = \frac{C_n}{C_b}$ $\frac{1}{Y} = \frac{k}{\sqrt{1 - k^2}} \sqrt{\frac{C_b}{n_K}}$

9.2.5 Piezoelektrische Bimorph-Biegeelemente

Verklebt oder verkittet man zwei Piezokeramikelemente mit gleicher Polarisationsrichtung und betreibt sie in elektrischer Parallelschaltung oder bei entgegengesetzter Polarisationsrichtung in Reihenschaltung, so erhält man einen *Parallel-* oder *Serienbimorph*. Neben dem Bimorph sind in Abbildung 9.39 der *Monomorph* und der *Trimorph* jeweils mit einem Träger dargestellt. Piezoelektrische Biegeelemente werden in Aktoren zur Erzeugung großer Wegamplituden bis zu 2 mm und in hochempfindlichen Beschleunigungssensoren verwendet.

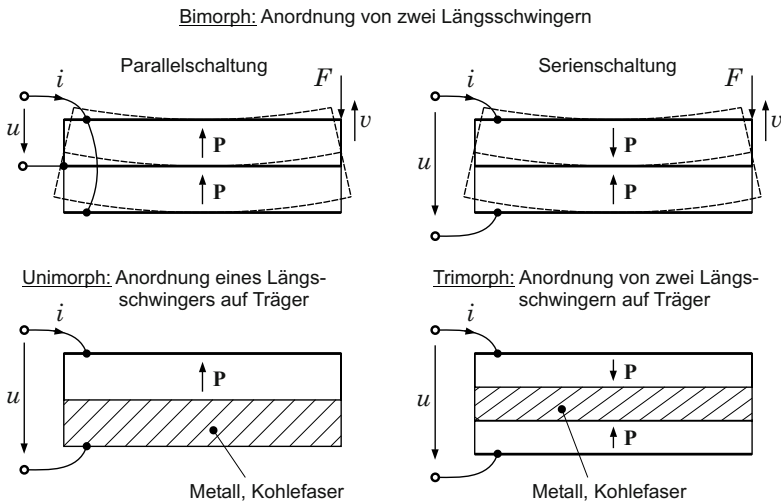


Abbildung 9.39. Piezoelektrische Biegeschwinger
P Polarisationsrichtung

In Abschnitt 5.1 wird das Schaltbild des Biegeelementes abgeleitet. Ergänzt mit dem piezoelektrischen Wandler ergibt sich das in Abbildung 9.40 angegebene Schaltbild des piezoelektrischen Biegeelementes. Der verlustfreie piezoelektrische Wandler verknüpft zunächst die elektrischen mit den mechanisch rotatorischen Koordinaten. Durch die transformatorische Verkopplung zwischen dem rotatorischen und translatorischen mechanischen Netzwerk beim Biegestab im Abschnitt 5.1.2 erhält man schließlich die in Abbildung 9.41 dargestellte Zehnpolschaltung des piezoelektrischen Bimorph-Biegeelementes. Diese Schaltung gilt für tiefe Frequenzen. Im Abschnitt 9.3.5 wird auf dieses Biegeelement als finites Netzwerkelement unter Berücksichtigung von eindimensionalen Biegewellen zurückgegriffen.

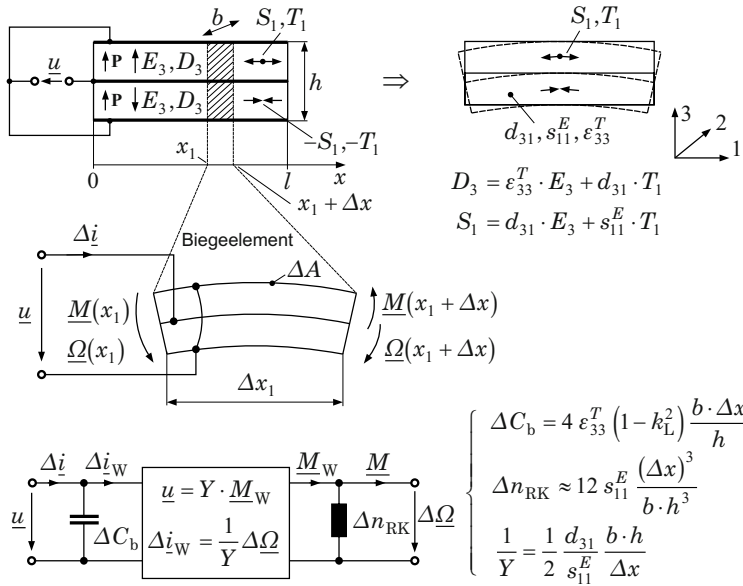


Abbildung 9.40. Schaltbild des piezoelektrischen Biegeelementes bei Verknüpfung der elektrischen und mechanisch rotatorischen Koordinaten

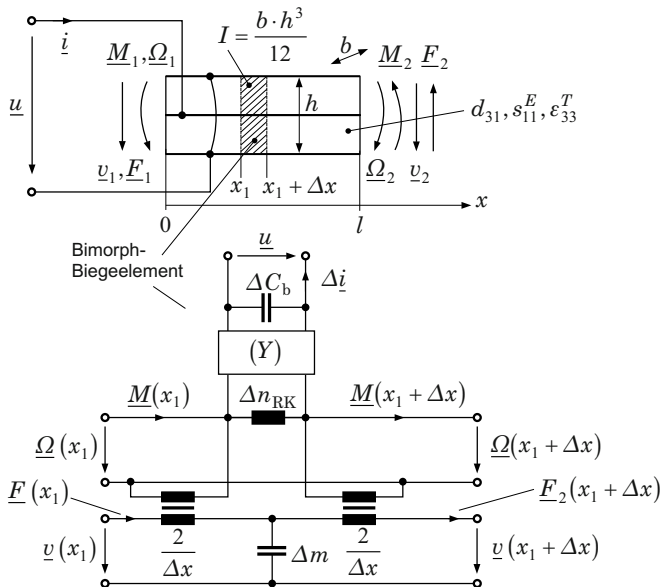


Abbildung 9.41. Vollständige quasistatische Zehnpolschaltung eines piezoelektrischen Bimorph-Biegeelementes

Als Sonderfall ist in Abbildung 9.42 die Schaltung des häufig verwendeten einseitig eingespannten Bimorphs angegeben. Die Konstanten der Kennwerte entsprechen denen des piezoelektrischen Längsschwingers.

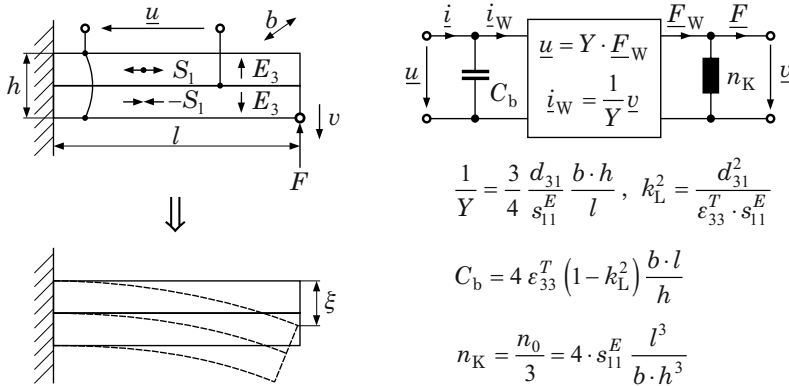


Abbildung 9.42. Quasistatisches Schaltbild und Kennwerte des einseitig eingespannten piezoelektrischen Bimorphs
 k_L Kopplungsfaktor des Längsschwingers

9.2.6 Piezoelektrische Werkstoffe

Die technisch wichtigsten piezoelektrischen Werkstoffe sind

- als *Einkristalle*:
Quarz, Gallium Orthophosphate, Langasit, Lithiumniobat, Lithiumtantalat
- als *polykristalline Ferroelektrika*:
piezoelektrische Keramiken (z. B. BaTiO₃, Pb(Zr, Ti)O₃)
- als *kristallin-amorpher Kunststoff*:
Polyvinylidenfluorid PVDF

Die wichtigsten Eigenschaften dieser Werkstoffe – außer den ausschließlich für die Telekommunikation wichtigen Kristallen Lithiumniobat und Lithiumtantalat – sind in den Tabellen 9.6 bis 9.8 angegeben. Weiterführende Angaben findet man in entsprechender Fachliteratur [64, 79].

Einkristalle

Quarz als piezoelektrischer Kristall gehört zur Symmetriegruppe 32 des trigonalen Systems. Quarz zeichnet sich durch seine sehr große mechanische Güte und der großen zeitlichen Stabilität seiner Koeffizienten aus. Außerdem weist Quarz, wie auch Gallium Orthophosphat und Längs, keinen *pyroelektrischen* Effekt auf. Daher wird es für Präzisionssensoren zur dynamischen Beschleunigungs-, Kraft- und Druckmessung verwendet. Weitere wichtige Einsatzgebiete für Quarz sind hochstabile Resonatoren und Filter. Von praktischer Bedeutung sind vor allem die X- und AT-Schnitte im Quarz-Kristall (Tabelle 9.6).

Längs-LGS ist ein synthetischer Kristall ($\text{Li}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$) und gehört auch zur Symmetriegruppe 32 des trigonalen Systems. Die industrielle Kristallzüchtung und Bereitstellung von 4 Zoll-Scheiben erfolgt seit den 90er Jahren. Längs wird als Basismaterial für BAW (Bulk Acoustic Wave)- und SAW (Surface Acoustic Wave)-Resonanzsensoren zur Kraft-, Druck- und Drehmomentmessung verwendet. Gegenüber Quarz weist Längs einen erweiterten Temperaturbereich von mindestens bis 700 °C auf.

Polykristalline Ferroelektrika

Piezoelektrische Keramiken, z. B. **Blei-Zirkonat-Titanat (PZT)**, sind polykristalline Werkstoffe, die durch Sintern keramischer Pulver hergestellt werden (Tabelle 9.7). Diese Werkstoffe sind zunächst inhomogen polarisiert, d. h. die Richtungen der permanenten Polarisation sind zufällig verteilt und es ergibt sich kein resultierender linearer piezoelektrischer Effekt. Die Werkstoffe verhalten sich elektrostriktiv. Beim Anlegen einer hinreichend großen Feldstärke, z. B. 2 kV mm^{-1} , oberhalb der jeweiligen *CURIE-Temperatur* wird die Polarisation der einzelnen Bereiche überwiegend in eine Richtung gedreht, d. h. der Werkstoff wird piezoelektrisch. Die Polarisation bleibt nach Abschalten des Feldes, sofern die Temperatur nicht über die Curie-Temperatur erhöht wird, erhalten. In Abbildung 9.43 sind die typischen Abhängigkeiten der inneren Polarisation P von der Feldstärke E und der Dehnung S von der von der Feldstärke E einer polarisierten Keramik einschließlich deren Arbeitsbereiche angegeben. Durch Variation des Titan-Zirkon-Verhältnisses lassen sich eine große Zahl von Keramikvarianten erzeugen.

Aufgrund des großen Kopplungsfaktors werden Piezokeramiken für Leistungswandler, z. B. Ultraschallsender, aber auch für Sensoren und Filterelemente verwendet. Gegenüber Quarz weisen Piezokeramiken eine geringere Langzeitstabilität und den *pyroelektrischen Effekt* auf.

Tabelle 9.6. Materialeigenschaften technisch wichtiger piezoelektrischer Werkstoffe

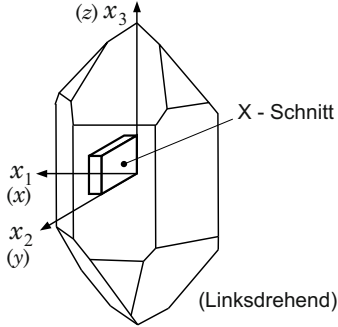
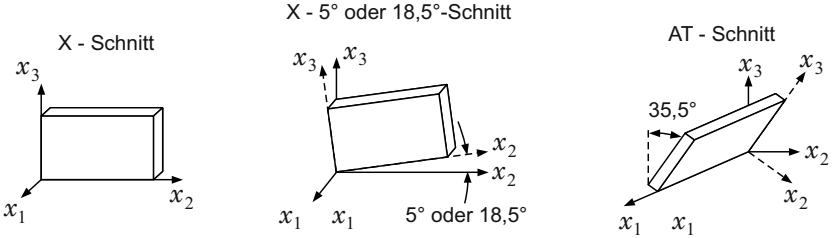
Quarz (linksdrehend)	
<p><u>Werkstoff:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> einkristalliner, hexagonaler Werkstoff; chemisch: Kieselsäure (SiO_2); tritt in mehreren Kristallmodifikationen auf; technisch wichtig: α-Quarz ($\vartheta < 573^\circ\text{C}$) α-Quarz: anisotrope Werkstoffeigenschaften; 	
<p><u>Schnitte von α-Quarz:</u></p>	
<p><u>Herstellung:</u></p>	<p>Kristallzüchtung im Autoklaven bei 450°C und 1000 bar</p>
<p><u>Eigenschaften:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> weist eine zur mechanischen Spannung proportionale Polarisation auf (keine Polarisation im spannungsfreien Zustand) sehr gute Langzeitstabilität der piezoelektrischen Koeffizienten, da keine Depolarisation möglich sehr gute Linearität, keine Hysterese hohe Druckfestigkeit ($4 \cdot 10^5 \text{ N/cm}^2$) keine Pyroelektrizität hoher Isolationswiderstand bis ca. 400°C ($10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$) sehr große Güte $Q = 5 \cdot 10^3$ bis 10^6 <p><i>aber:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> nur kleiner Kopplungsfaktor (ca. 0,1) Neigung zur Zwillingsbildung oberhalb 400°C oder bei mechanischer Überlastung Änderung des Übertragungsverhaltens 	

Tabelle 9.7. Materialeigenschaften technisch wichtiger piezoelektrischer Werkstoffe

Piezokeramik	
<u>Werkstoff:</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Ferroelektrischer Werkstoff, z. B. Bariumtitanat (BaTiO_3) oder Blei-Zirkonat-Titanat ($\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$)
<u>Herstellung:</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Sintern (1200 °C), Sägen und Schleifen des polykristallinen Grundkörpers • Aufbringen der Metallelektroden • Polarisierung oberhalb der Curie-Temperatur (200 bis 350) °C mit einer Gleichfeldstärke von ca. 2 kV/mm, Einfrieren der ausgerichteten Dipole beim Abkühlen, Polarisationsrichtung: x_3-Richtung
<u>Eigenschaften:</u>	<ul style="list-style-type: none"> • weist nicht wie Quarz eine spontane Polarisierung auf, sondern muss künstlich polarisiert werden • hysteresenbehaftete Dehnungs-Feldstärke-Kennlinie im polarisierten Zustand • hohe mechanische Druckfestigkeit, aber nur geringe Zug- und Scherfestigkeit, mechanische Vorspannung ist daher bei Aktoranwendungen erforderlich • deutlich größerer Kopplungsfaktor als Quarz: bis 0,7 • hoher spezifischer Widerstand: bis $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ • Ausführungen: <ul style="list-style-type: none"> - Platten, Scheiben: $h = (0,1 \dots 2) \text{ mm}$ - Rohre: $R_a = (1 \dots 10) \text{ mm}$, $R_i = (0,5 \dots 9) \text{ mm}$ - Folien: $(20 \dots 100) \mu\text{m}$ (Multilayer-Technologie) <p><i>aber:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • piezoelektrische Koeffizienten sind von der mechanischen Spannung (Nichtlinearität), der mechanischen Vorgeschichte (Hysterese) und der Frequenz (Nachwirkung) abhängig • pyroelektrischer Effekt ist zu berücksichtigen • geringere Langzeitstabilität als Quarz wegen Neigung zur Depolarisation • größere Temperaturabhängigkeit der piezoelektrischen Koeffizienten

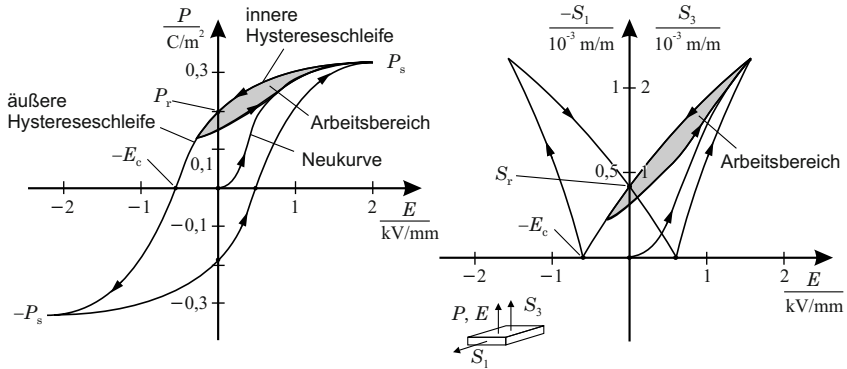


Abbildung 9.43. Arbeitskennlinien ($P = f(E)$, $S = f(E)$) polarisierter PZT-Piezokeramik für $T = 0$ [64, 76]

Kristallin-amorpher Kunststoff

Tabelle 9.8. Materialeigenschaften technisch wichtiger piezoelektrischer Werkstoffe

PVDF - Folien (Polyvinylidenfluorid)	
<u>Werkstoff:</u>	<ul style="list-style-type: none"> Ferroelektrischer Werkstoff, kristallin-amorpher Kunststoff
<u>Herstellung:</u>	<ul style="list-style-type: none"> Extrudieren und Gießen mechanisch Verstrecken auf ca. fünffache Länge Polarisation oberhalb der Curie-Temperatur ca. 200 °C mit einer Gleichfeldstärke von ca. 100 kV/mm
<u>Eigenschaften:</u>	<ul style="list-style-type: none"> Herstellung sehr dünner Folien bis 5 µm Dicke <p>aber:</p> <ul style="list-style-type: none"> Möglichkeit des hygroskopischen Einlagerns von Wasser, Gefahr der Depolarisation kleiner Kopplungsfaktor, $k = 0,1 \dots 0,2$, als Piezokeramiken

Polyvinylidenfluorid (PVDF, Tabelle 9.8), ein kristallin-amorpher Kunststoff, besteht aus langen Molekülketten von Kohlenstoff, Wasserstoff und

Fluor. Die VDF-Monomere bilden durch Polymerisation große kristalline Domänen in amorpher Umgebung. Die kristallinen Domänen liegen zunächst in einer nicht polarisierbaren α -Phase vor. Erst durch ein mechanisches Verstrecken auf fünffache Länge werden die Molekülketten in eine polarisierbare β -Phase überführt. Die Polarisierung erfolgt auch hier oberhalb der CURIE-Temperatur von ca. 200°C bei sehr hohen Feldstärken von etwa 100 kV mm^{-1} . Aufgrund der geringen Folienstärke bei ausgeprägten piezoelektrischen Eigenschaften finden PVDF-Folien in Sensoren, z. B. Miniaturhydrofonen und als Folienbiegeschwinger in HiFi-Kopfhörern Anwendung.

Die Materialkonstanten und Kopplungsfaktoren von Quarz als X-Schnitt, von ausgewählten Piezokeramiken für Sensor- und Aktoranwendungen sowie von PVDF-Folien sind in Tabelle 9.9 zusammengefasst. Ergänzt werden die Werkstoffe durch das piezoelektrische Halbleitermaterial Zinkoxid (ZnO), das in hexagonal kristalliner Struktur vorliegt. Durch die Halbleitereigenschaften sind Anwendungen in der Silizium-Mikromechanik, z. B. zur Erzeugung und zum Empfang mechanischer Bulk- oder Oberflächen-Wellen in Resonanzsensoren, möglich. Die ZnO -Schichten werden in Stärken von wenigen Mikrometern abgeschieden.

Die Piezokeramik PIC155 weist bei einem großen k -Wert eine geringe Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante auf. Sie eignet sich daher besonders für US-Sender und Empfänger im Pulsbetrieb, aber auch für Beschleunigungssensoren mit breitem Temperatureinsatzbereich. Die Piezokeramik C82 eignet sich aufgrund des großen k -Wertes vor allem als Aktormaterial.

9.2.7 Anwendungsbeispiele

Die Anwendung des Schaltbildes für piezoelektrische Wandler aus Abbildung 9.34 und aus den Tabellen 9.4 und 9.5 soll unter Verwendung der Materialkonstanten aus Tabelle 9.9 am Beispiel eines Beschleunigungssensors und eines Mikrofons erläutert werden.

Piezoelektrischer Beschleunigungssensor

Der piezoelektrische Beschleunigungssensor weist das Konstruktionsprinzip und das Schaltbild aus Abbildung 9.44 a) auf. Die durch die seismische Masse erzeugte Kraft $F_0 = ma_0$ wirkt auf ein piezoelektrisches Dickenelement aus PZT-4-Keramik und bewirkt die über den Eingangswiderstand R der Sensorelektronik messbare Spannung u . Als Nachgiebigkeit wird nur die der Keramik n_K berücksichtigt, d. h. Kontaktnachgiebigkeiten zwischen Masse m und Keramik bzw. Gehäuseboden werden vernachlässigt. Zusätzlich werden noch die Kabelkapazität C_K und die mechanischen Verluste in Form der Reibungsimpedanz r berücksichtigt. Ausgehend vom Gesamtschaltbild aus Abbildung 9.44 b) wird in Abbildung 9.44 c) die Spannungsquelle durch eine Stromquelle ersetzt. Unter Anwendung der Transformationsbeziehungen des Gyrtors

Tabelle 9.9. Materialeigenschaften technisch wichtiger piezoelektrischer Werkstoffe *PZT Brush Clevite Comp., PIC PI Ceramic, C Fuji Ceramics, PXE Morgan Electroceramics*

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$

Konstanten	Quarz	Gallium Orthophosphat	Langasit	ZnO	PZT-4	PZT-5a	PIC 155	C 82	PXE52	PXE54	PVDF
$d_{33} \left\{ \frac{10^{-12}}{C} \right\} \text{ m/V}$ $d_{31} \left\{ \frac{10^{-12}}{C} \right\} \text{ m/V}$	2,3 (d_{11}) -2,3 (d_{12})	4,5 (d_{11}) —	6,16 (d_{11}) —	12,3 -5,1	289 -123	374 -171	360 -165	540 -260	580 -270	> 450	-27 20
$e_{33} \left\{ \frac{\text{As}}{\text{m}^2} \right\}$ $e_{31} \left\{ \frac{\text{As}}{\text{m}^2} \right\}$	0,181 (e_{11}) -0,181 (e_{12})	— —	0,45 (e_{11}) —	1,7 -2	15,1 -5,2	15,8 -5,4	18,3 -10,6	28,1 -15,4	— —	— —	108 —
$g_{33}^E \left\{ \frac{10^{-12}}{\text{m}^2/\text{N}} \right\}$ $g_{31}^E \left\{ \frac{10^{-12}}{\text{m}^2/\text{N}} \right\}$	12,78 (g_{11}) 9,74 (g_{31})	17,93 (g_{11}) 11,35 (g_{31})	— —	6,9 7,9	15,4 12,3	18,8 16,4	19,7 15,6	19,2 16,9	20 16	— —	— —
$c_{33}^E \left\{ \frac{10^{10}}{\text{N/m}^2} \right\}$ $c_{11}^E \left\{ \frac{10^{10}}{\text{N/m}^2} \right\}$	8,68 (c_{11}) 10,58 (c_{33})	10,21 (c_{11}) 6,66 (c_{33})	— —	1,4 -4,3	6,5 8,1	5,3 6,1	5,1 6,4	5,2 5,9	6...9 —	— —	— —
$\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} ; \frac{\varepsilon_{31}^T}{\varepsilon_0}$ $\frac{\varepsilon_{11}^T}{\varepsilon_0} ; \frac{\varepsilon_{12}^T}{\varepsilon_0}$	4,68 ; — 4,52 ; —	6,6 ; — 6,1 ; —	— —	8,2 ; — 8,1 ; —	1300 ; 635 1475 ; 730	1730 ; 960 1700 ; 830	1700 ; — 1500 ; —	3400 ; — 3100 ; —	3500 ; — 3000 ; —	3000 ; —	12 ; 12 —
k_{33} k_{31}	0,1 (k_{11}) 0,12 (k_{12})	0,14 (k_{11}) —	— —	0,23 0,05	0,7 0,33	0,71 0,34	0,69 0,35	0,72 0,36	0,74 0,39	> 0,6 > 0,3	0,20 0,15
$\vartheta_{\text{Curie}}/^{\circ}\text{C}$	573	~ 700	~ 1400	—	328	365	345	190	165	220	80
$\rho / \text{kg m}^{-3}$	2655	3570	—	5680	7500	7500	7700	7400	7800	7900	1790

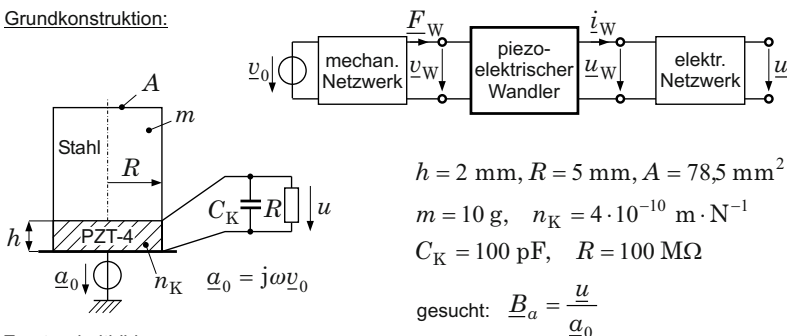
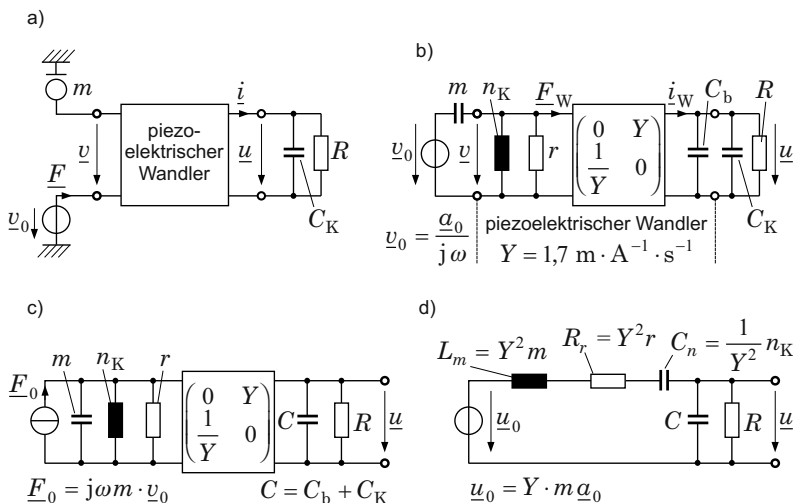
Grundkonstruktion:Ersatzschaltbild:

Abbildung 9.44. Konstruktion und Schaltung eines piezoelektrischen Beschleunigungssensors mit PZT-Dickenelement

lässt sich jetzt das mechanische Teilsystem komplett auf die elektrische Seite in Abbildung 9.44 d) transformieren.

Die weiteren Betrachtungen werden näherungsweise getrennt für sehr tiefe Frequenzen (Vernachlässigung von L_m und R_r) sowie für hohe Frequenzen (Vernachlässigung von R) durchgeführt. Die Übertragungsfunktionen für beide Näherungen \underline{B}_{a1} und \underline{B}_{a2} sind in Abbildung 9.45 angegeben. Die Bauelementwerte, Frequenzwerte und Übertragungsfaktoren erhält man unter Verwendung der Materialkonstanten für PZT-4 aus Tabelle 9.9 und den Beziehungen für den freien Dickenschwinger aus Tabelle 9.4. Der Gesamtfrequenzgang setzt sich schließlich aus dem Hochpass für tiefe Frequenzen und dem Tiefpass mit Resonanz bei hohen Frequenzen zusammen. Der Übertragungsfaktor B_0 im Arbeitsfrequenzbereich beträgt $B_0 = 2,9 \text{ mV/ms}^{-2}$. Die Resonanzfrequenz

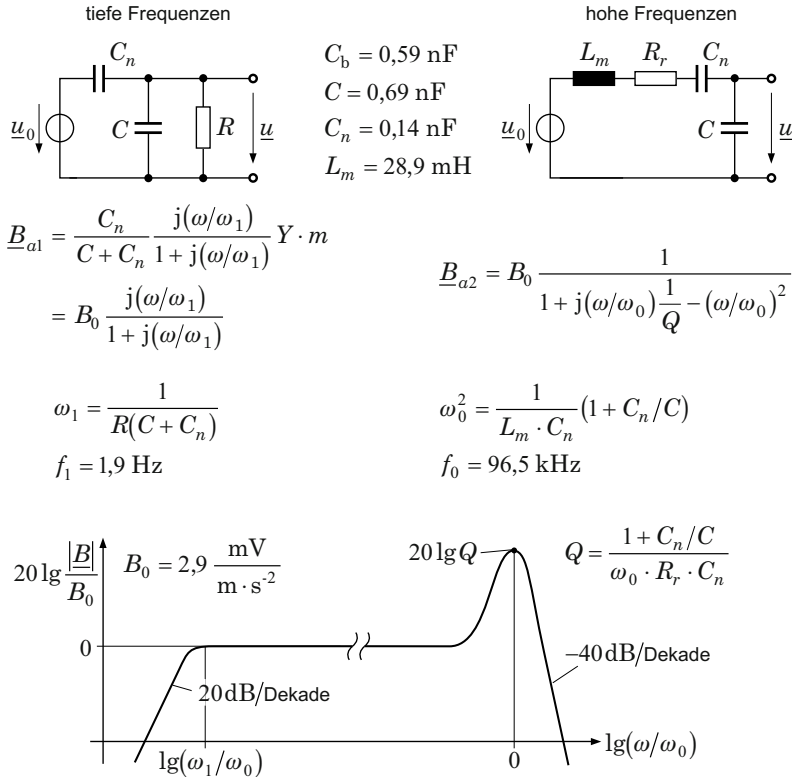


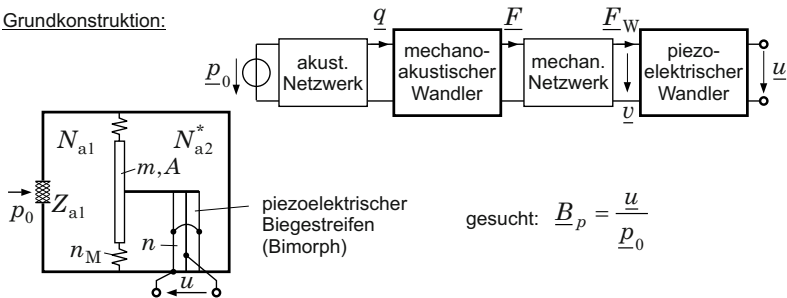
Abbildung 9.45. Amplitudenfrequenzgang des piezoelektrischen Beschleunigungssensors mit PZT-Dickenelement

liegt bei $f_0 = 96,5 \text{ kHz}$. Dieser Wert wird sich bei realen Sensoren bei Berücksichtigung der hier vernachlässigten Koppelnachgiebigkeiten verringern. Piezoelektrische Dickenelemente werden zur Messung hoher Frequenzen und hoher Beschleunigungsamplituden verwendet. Zur Vergrößerung des Übertragungsfaktors werden üblicherweise zwei Dickenelemente in elektrischer Parallelschaltung eingesetzt.

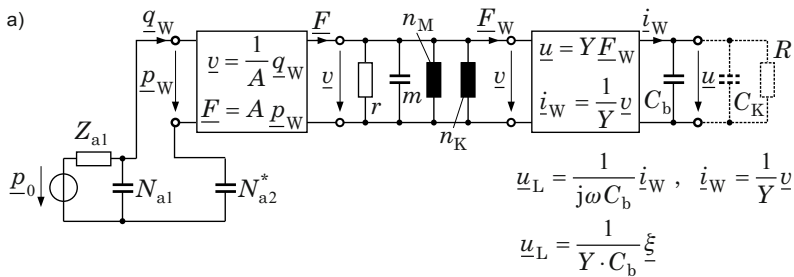
Piezoelektrisches Mikrofon

Als zweites Beispiel ist in Abbildung 9.46 die Grundkonstruktion und das Schaltbild eines piezoelektrischen Mikrofons mit Bimorph-Biegeelement dargestellt. Der auf die federnd aufgehängte Platte wirkende Schalldruck wird in eine Kraft umgeformt, die eine Auslenkung des einseitig eingespannten Bimorphs bewirkt. Zusätzlich zur Schaltung des Bimorphs aus Abbildung 9.42 einschließlich der Beziehungen für Y , C_b und n_K werden mechanische und akustische Bauelemente hinzugefügt. Als mechanische Bauelemente werden

Grundkonstruktion:



Schaltung:



b) für elektrischen Leerlauf: $\underline{u} = \underline{u}_L$

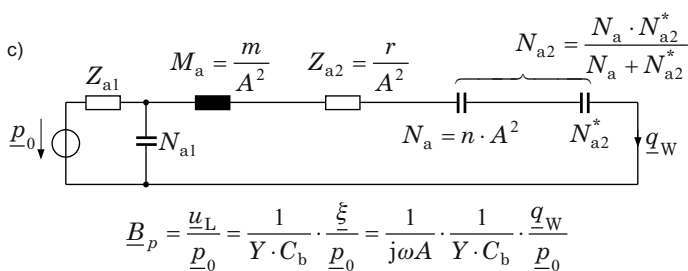
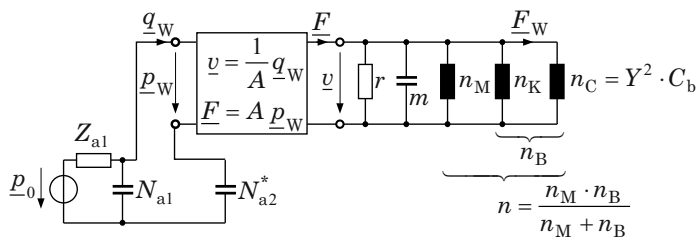


Abbildung 9.46. Konstruktion und Schaltbilder eines piezoelektrischen Mikrofons mit Bimorph-Messelement

die Masse m und die Nachgiebigkeit n_M der federnd aufgehängten Platte und als akustische Bauelemente die akustische Reibung $Z_{a,1}$ der Schalldruckzuführung und die akustischen Nachgiebigkeiten $N_{a,1}$ und $N_{a,2}^*$ der luftgefüllten Hohlräume vor und hinter der Platte ergänzt. Auf der elektrischen Seite werden die Kabelkapazität C_K und der Eingangswiderstand R der Sensorelektronik berücksichtigt. Die mechanisch-akustische Wandlung wird durch den Gyrator mit $Y = 1/A$ beschrieben.

Ausgehend von der Schaltung aus Abbildung 9.46 a) wird zunächst unter der angenommenen Randbedingung des elektrischen Leerlaufs die Kapazität C_b auf die mechanische Seite (Abb. 9.46 b)) und anschließend werden alle mechanischen Bauelemente auf die akustische Seite (Abb. 9.46 c)) transformiert. Zur Ermittlung der Übertragungsfunktion \underline{B}_p ist nun aus dieser Schaltung die Funktion $\underline{q}_W/\underline{p}_0$ zu berechnen. Aus der Netzwerkanalyse von Abbildung 9.46 c) folgt:

$$\frac{\underline{q}_W}{\underline{p}_0} = \frac{j\omega N_{a,2}}{\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{Q_1}\right) \left(1 + j\frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{Q_2} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right) + j\frac{\omega}{\omega_0} \frac{N_{a,2}}{N_{a,1}} \frac{1}{Q_1}}$$

mit

$$\omega_0^2 = \frac{1}{M_a N_{a,1}}, \quad Q_1 = \frac{1}{\omega_0 N_{a,1} Z_{a,1}}, \quad Q_2 = \frac{1}{\omega_0 N_{a,2} Z_{a,2}}.$$

Die Übertragungsfunktion \underline{B}_p erhält man nun mit:

$$\underline{B}_p = \frac{\underline{u}_L}{\underline{p}_0} = \frac{1}{j\omega AY C_b} \frac{\underline{q}_W}{\underline{p}_0}$$

Unter der Annahme $1/Q_1 \ll 1$ lässt sich diese Beziehung weiter vereinfachen zu

$$\underline{B}_p = \frac{\underline{u}_L}{\underline{p}_0} \approx B_0 \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{Q_2} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad \text{mit} \quad B_0 = \frac{N_{a,2}}{AY C_b}.$$

Der Amplitudenfrequenzgang dieser vereinfachten Übertragungsfunktion ist in Abbildung 9.47 angegeben. Für tiefe Frequenzen ist der Einfluss der elektrischen Bauelemente zu berücksichtigen. Wegen des endlichen Innenwiderstandes der Auswerteelektronik erfolgt wie bei allen anderen piezoelektrischen Wandlern für tiefe Frequenzen ein zunehmender Ladungsabfluss von den Elektroden, d. h. der Frequenzgang knickt für abnehmende Frequenzen ab.

9.3 Piezoelektrischer Wandler als eindimensionaler Wellenleiter

Für höhere Frequenzen können die mechanischen Eigenschaften des Piezoelements nicht mehr allein durch die konzentrierten Bauelemente Nachgiebigkeit

Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und
Mechatronik

Dynamischer Entwurf - Grundlagen und Anwendungen

Ballas, R.G.; Pfeifer, G.; Werthschützky, R.

2009, XXV, 454 S., Softcover

ISBN: 978-3-540-89317-2