

## Weitere Positionsbestimmungssensoren - Ultraschall-Abstandssensoren

Zur Messung von Position und Geschwindigkeit sind Ultraschall-Meßsysteme geeignet, bei denen Laufzeitmessungen zur Bestimmung von Abständen genutzt und (Doppler-) Frequenzverschiebungen zur Geschwindigkeitsmessung verwendet werden.

Prinzip: Schall-Reflexion und Streuung an Objekten; Frequenzbereich: 30 – 400 kHz.

### Vorteile von Ultraschall-Distanzsensoren:

Wie optische oder induktive Sensoren und damit anders als berührende Sensoranordnungen besitzen Distanzsensoren den Vorteil, dass

- sie außerhalb des Bereichs, in dem die zu erfassenden Objekte zu erwarten sind, angeordnet werden können und so eine gegenseitige Störung zwischen Sensor und Objekt vermieden wird. Insbesondere können durch rechtzeitige Erfassung der Objekte Kollisionen verhindert werden.
- ihre Funktion und Genauigkeit nicht durch Abnutzung beeinträchtigt wird.

Forderungen an den Sensor:

- Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse
- großer, variabel einstellbarer Messbereich
- hohe Ortsselektivität
- Robustheit, Langzeitstabilität
- möglichst geringer Umfang der anfallenden Datenmenge, geringe Redundanz
- Möglichkeiten einer effektiven Weiterverarbeitung der Informationen

Typen: Luftultraschall-Distanzsensoren

### Unterscheidung dreier Reflexionsstreuer

**Punktstreuer:** Als Punktstreuer werden solche Streuobjekte bezeichnet, deren lineare Abmaße deutlich kleiner sind als die Wellenlänge des Schalls. An ihnen tritt ungerichtete Streuung auf. Sie sind somit von allen Seiten sichtbar, eine Ausrichtung zum Wandler ist nicht notwendig. Die Signalleistung ist jedoch meist extrem gering. Punktstreuer sind daher oft schwer zu detektieren. Das Objekt wirkt wie eine Punktquelle mit einer Sendeleistung, welche proportional zur Intensität  $I_{\text{einf}}$  des auf das Objekt auftreffenden Schalls ist. Da die Intensität des Echos  $I_{\text{refl}}$  ebenfalls mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, wird die reflektierte Schallwelle also mit dem Faktor  $1/r^4$  gedämpft am Sendepunkt empfangen. Ursachen dafür sind

- die sog. „Schalldivergenzdämpfung“, die entfernungsabhängige Aufweitung des Schallbündels, und
- die „Ausbreitungsdämpfung“ (Schallabsorption: Umwandlung der Schallenergie in Wärme) des schallübertragenden Mediums.

Die Intensitätsabnahme wird unter Vernachlässigung der Absorptionsdämpfung unter Fernfeldbedingungen durch die sog. „Radargleichung“ (in Luft!) beschrieben:

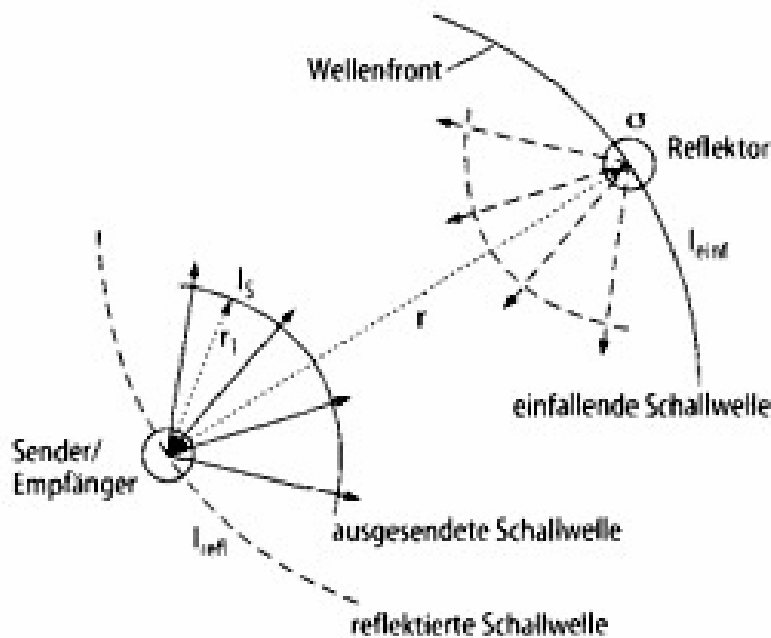
$$I_{\text{einf}} = I_s \cdot \left(\frac{r_1}{r}\right)^2$$

Punktstreuer wirkt wie eigener Sender, der in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlt:

$$I_{\text{refl}} = \sigma I_{\text{einf}} \cdot \left(\frac{r_1}{r}\right)^2 = \sigma I_s \cdot \left(\frac{r_1}{r}\right)^4$$

wobei  $\sigma$  die effektive Reflexionsfläche des Reflektors und  $r$  den Abstand Sensor-Reflektor bezeichnen.  $I_s$  ist die auf den Normabstand  $r_1$  bezogene Sendeleistung.

Die *Ausbreitungsdämpfung* ist von der Beschaffenheit des Ausbreitungsmediums abhängig (Luft: 0,01 dB pro cm (bzw. pro Wellenlänge), dagegen CO<sub>2</sub>: 2 dB/cm oder N<sub>2</sub>O (Lachgas): 6 dB/cm). Dadurch ergeben sich andere exponentielle Faktoren in der Intensitätsgleichung. Ultraschall-Entfernungssensoren müssen also auf die entsprechende Atmosphäre, in der sie verwendet werden sollen, geeicht werden (z.B. unter Wasser oder bei Raumfahrtmissionen auf anderen Planeten).



Zur Erläuterung der Radargleichung für Wandler und Reflektor als Punktquellen.

**Linienstreuer:** Zum Erkennen einer Linie ist die senkrechte Ausrichtung des Wandlers zum Linienstreuer notwendig. Der Wandler kann auch um die Linie rotiert werden. Das Maß der rückgestreuten Schallenergie ergibt sich für einen Linienstreuer als einer Vielzahl von Punktstreuern in eindimensionaler Anordnung aus der Integration der Intensität von Punktstreuern über die Ausdehnung der Linie. Die Intensität der empfangenen Schallwelle nimmt mit  $1/r^3$  ab:

$$I_{\text{refl}} = \sigma I_s \cdot \left(\frac{r_1}{r}\right)^3$$

Erheblich größere Signalleistung als für Punktstreuer: Erleichterung der Detektion.

**Reflektierende Fläche:** Eine ebene Fläche weist eine ausgeprägte räumliche Richtwirkung auf. Eine Ausrichtung des Wandlers sowohl in Elevations- als auch in Azimutalrichtung ist zur Detektion der reflektierten Signale folglich unumgänglich. Die Signalleistung am Empfänger ist groß im Vergleich zum Punkt- und Linienstreuer. Bei einem Abstand  $r$  zwischen Wandler und reflektierender Fläche wird die Intensität der Schallwelle proportional zu  $1/(2r)^2$  gedämpft, da sich der Schallkegel über die Entfernung  $2r$  gleichmäßig aufweitet (virtuelle Schallquelle im Abstand  $2r$  vom Empfänger):

$$I_{\text{refl}} = \sigma I_s \cdot \left(\frac{r_1}{2r}\right)^2$$

Prinzip der Abstandsmessung

Einfachen Bestimmbarkeit der Laufzeit eines reflektierten Ultraschallimpulses erlaubt eine genaue Abstandsmessung. Die Entfernung  $d$  zum Objekt ergibt sich somit aus folgender Beziehung:

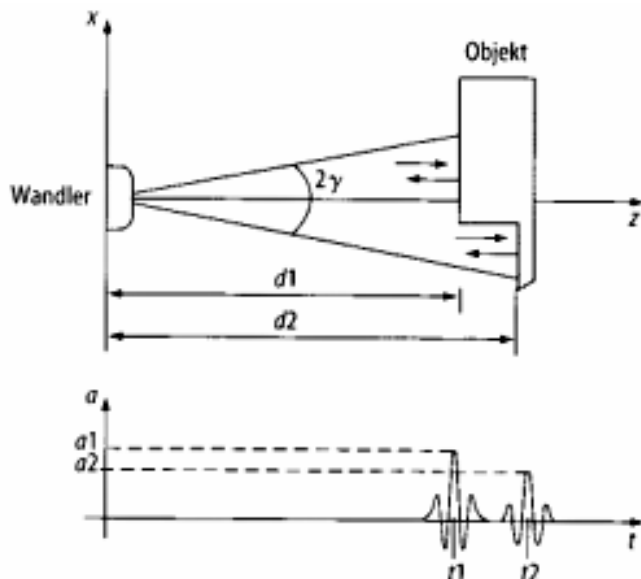
$$d = \frac{c\tau}{2}$$

Die Ultraschallsignale bestehen in der Regel aus Paketen mit einer Anzahl von Schwingungen (typisch 5 ... 100), die auf die Betriebsfrequenz des Sendewandlers abgestimmt sind. Die gesendeten Signale pflanzen sich mit der Schallgeschwindigkeit  $c$  im Ausbreitungsmedium fort und werden von einem Objekt im Abstand  $d$  reflektiert. Das Echo erreicht nach einer Laufzeit  $\tau$  den Empfangswandler und wird von diesem in elektrische Empfangssignale umgewandelt.

Die empfangenen Signalamplituden hängen von

- der Entfernung des Sensors von den reflektierenden Flächen des Objektes
- vom Reflexionsverhalten der Oberflächen (d.h. von deren Größe, Ausrichtung und Textur)

ab.



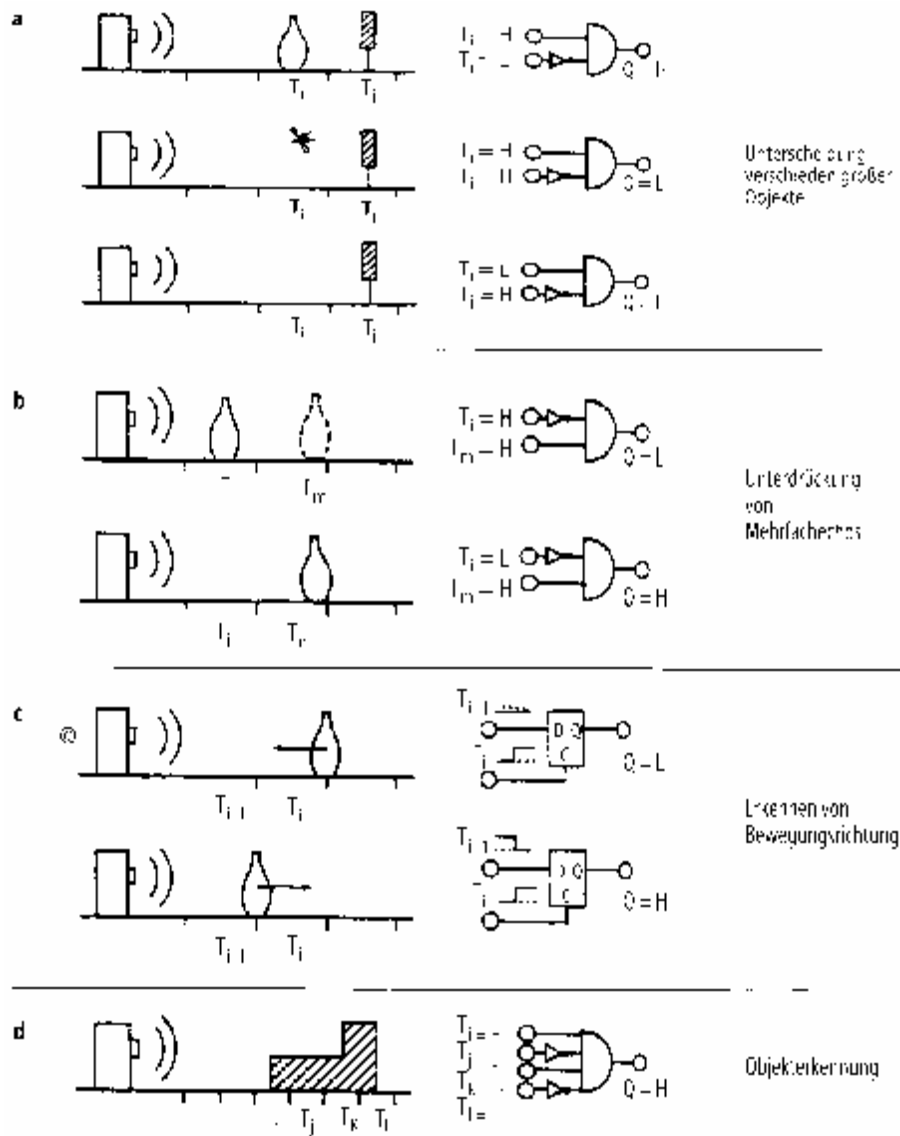
Impuls-Echo-Prinzip für eine Objektszene mit zwei Reflektoren in unterschiedlichem Abstand vom Sensor; darunter das Empfangssignal

Verhinderung der Auslöschung des Empfangssignals durch Interferenz des Echos mit dem Sendesignal über Aussendung von nicht nur einer einzigen Frequenz, sondern sequenziell von mehreren aufsteigenden Frequenzen.

### *Präsenzdetektion*

Test, ob ein Objekt anwesend (präsent) ist oder nicht: Auswertung der Laufzeit des Ultraschallimpulses. Zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten und Störeinflüssen kann der Auswertebereich in axialer Richtung durch ein bezüglich des Sendezeitpunktes definiertes zeitliches Intervall, ein Zeitfenster, festgelegt werden. Es wird also nur ein bestimmter Entfernungsbereich ausgewertet, davor- und dahinterliegende Bereiche werden ausgeblendet.

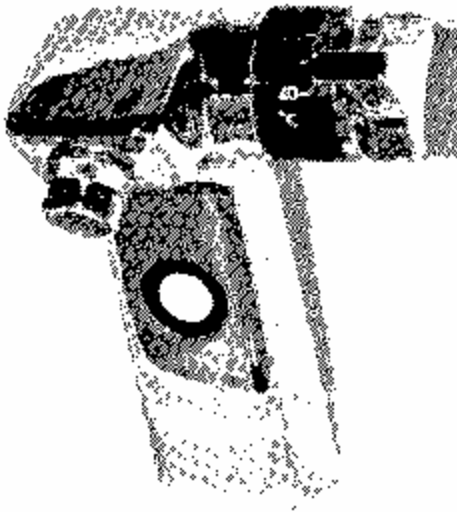
Durch Definition mehrerer aufeinanderfolgender Zeitfenster wird das Empfangssignal zeitlich „abgetastet“. Dem Zeitfenster wird eine logische 1 zugeordnet, wenn in seinem Zeitintervall ein Echo registriert wurde und sonst eine logische 0. Die logische Verknüpfung der Ergebnisse von verschiedenen Zeitfenstern ermöglicht eine gezielte Analyse des Empfangssignals. Mit ihrer Hilfe können Objekte nach ihrer Größe (a) unterschieden, Muster erkannt (d) oder Bewegungen (c) registriert werden.



a, b, und d: Logische „UND“-Verknüpfung von Signalen aus zwei Zeitfenstern:  $T_i$  ((Stör-)objekt) und dem invertierten Signal bei  $T_j$  (Reflektor) bzw.  $T_{i-1}$  und  $T_i$ ; a: großes Objekt steht vor dem Reflektor: Output = high (H); b: Kein Objekt im Zeitfenster nahe des Sensors: Output = H; c: Bewegungsrichtung nach rechts, wenn Objekt in beiden Zeitfenstern erscheint: D-Flip-Flop-Ausgang = H; d: Grobstrukturerkennung eines Objekts über Gatterbaustein.

## Anwendungen

Steuerung von Maschinen Materialbearbeitung	Detektion, Identifizierung und Zählen von Objekten Unterscheidung von Objekten unterschiedlicher Höhe Erkennung von Zwischenräumen
Steuerung von Transportvorgängen	Anzeige von Gütern auf Transportbändern, Kollisionsschutz bei Transport- und Fördereinrichtungen Unterscheidung von leeren und vollen Transportbehältern Durchgangskontrolle von Förderbändern
Pegelüberwachung	Erfassung der Grenzwerte von Materialstapeln Überwachung des Füllstandes in Behältern Überwachung des Pegels industrieller Flüssigkeiten Pegelüberwachung bei Wasser (Brunnen, Abwasser)
Personendetektion	Überwachung von Zugängen automatische Türöffner Sicherheitsüberwachung gefährlicher oder gefährdeter Bereiche



Mit Ultraschall-Präsenzdetektor gesteuerter Wasserhahn: Der Distanzsensor gibt bei vorliegendem Signal (Hand im Erfassungsbereich) die Wasserzufuhr frei.

### *Bewegungsdetektion mit Dopplerverfahren*

Relative Bewegung zwischen Sensor und Reflektor: Bei einem Abstand  $l$  zwischen Sender und reflektierendem Objekt beträgt die Lauflänge des Schalls  $2l$ . Damit besteht zwischen Sende- und Empfangssignal eine Phasendifferenz  $\varphi$ , welche sich aus dem Laufweg und der Wellenlänge ergibt:

$$\varphi = \frac{2\omega l}{c}$$

$\omega$  bezeichnet die Mittenfrequenz der Schallwelle,  $c$  ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Bei einer Änderung des Abstandes um  $dl$  oder der Frequenz um  $d\omega$  verändert sich der Phasenwinkel um  $d\varphi$ :

$$d\varphi = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial l}\right) dl + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\omega}\right) d\omega$$

Die zeitliche Änderung der Phasendifferenz, die sich aus einer Relativbewegung  $v = dl/dt$  zwischen Sensor und Reflektor oder einer zeitlichen Änderung der Frequenz mit der Änderungsgeschwindigkeit  $S = d\omega/dt$  ergibt, wird als Dopplerfrequenz  $\omega_D$  bezeichnet:

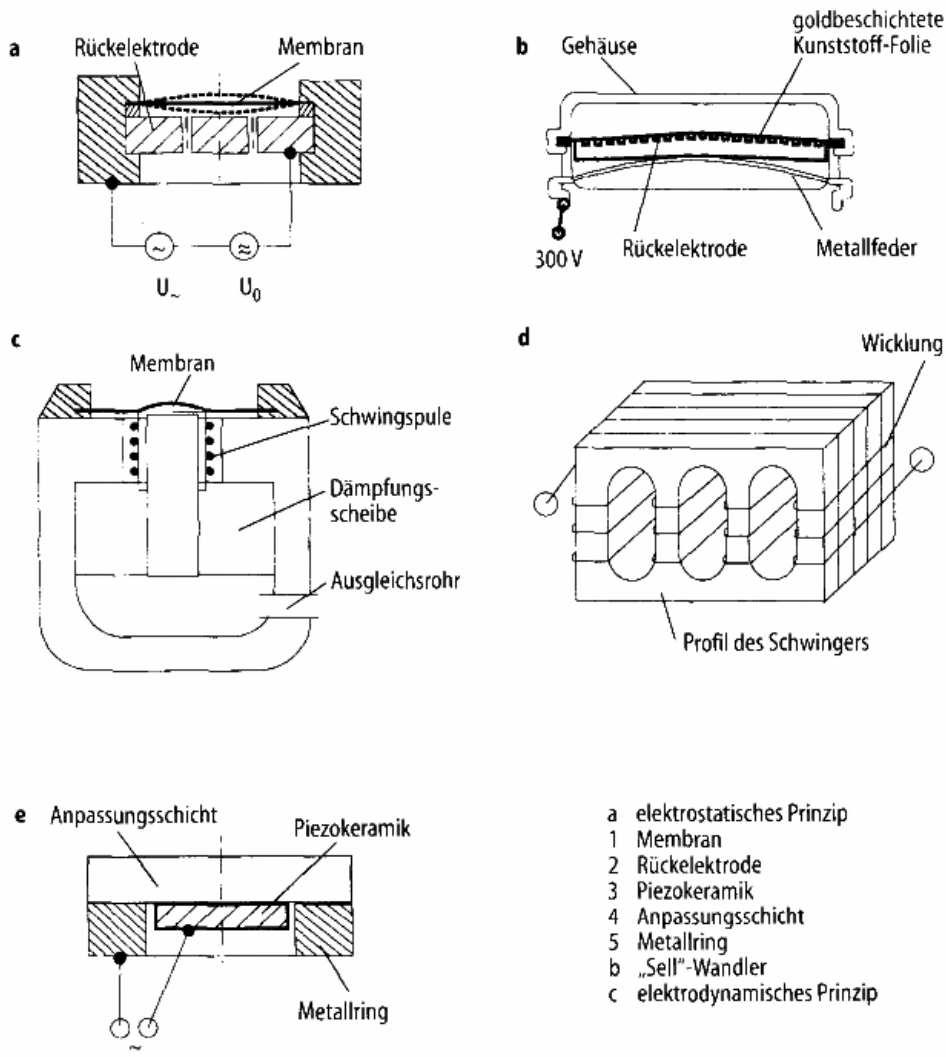
$$\omega_D = \frac{d\varphi}{dt} = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial l}\right) v + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\omega}\right) S = \frac{2\omega}{c-v} \cdot v + \frac{2l}{c} \cdot S$$

Bei fest vorgegebener Frequenz kann damit durch Auswertung der Dopplerfrequenz die Relativgeschwindigkeit  $v$  bestimmt werden. Durch fortlaufende Integration von  $v$  wird eine sog. „inkrementale“ Wegmessung ermöglicht, d.h. es wird die Länge des vom Objekt fortlaufend zurückgelegten Weges bestimmt, nicht aber dessen Absolutentfernung zum Sensor.

Wird die Frequenz moduliert, dann kann auch der absolute Abstand zum Objekt bestimmt werden: sog. FMCW-Doppler-Entfernungsmesser, die fortlaufend ein Signal aussenden (engl. frequency modulated continuous wave), das eine periodische Frequenzmodulation aufweist.

#### Ultraschallwandler – Wirkprinzipien und Bauweisen

- elektrostatisch
- elektrodynamisch
- magnetostruktiv
- piezoelektrisch



- a elektrostatistisches Prinzip
- 1 Membran
- 2 Rückelektrode
- 3 Piezokeramik
- 4 Anpassungsschicht
- 5 Metallring
- b „Sell“-Wandler
- c elektrodynamisches Prinzip

### Bauformen

Lautsprecher- und Mikrofonprinzip: (a) Bei *elektrostatistischen Wandlern* befindet sich eine dünne Membran (1), durch einen isolierenden Spalt getrennt, gegenüber einer Rückelektrode (2). Durch Anlegen einer Gleichspannung zwischen Membran und Rückelektrode wird eine elektrostatische Kraft auf die Membran ausgeübt. Durch Überlagern dieser Gleichspannung mit einer Wechselfspannung wird die Membran durch elektrostatische Kräfte zu Schwingungen angeregt und strahlt dabei Schall ab. Umgekehrt verursachen auf die Membran auftreffende Schallwellen elektrische Wechselfspannungssignale zwischen Membran und Rückelektrode. Die Gleichspannung wird entweder über einen hochohmigen Widerstand zugeführt oder durch den internen Elektret-Effekt erzeugt. (b) Der Wandler kann aus einer Vielzahl kleiner Partialwandler mit hoher Resonanzfrequenz bestehen („SellWandler“).

Auch bei *elektrodynamischen Wandlern* (c) wird der Schall mittels einer dünner Membran erzeugt. Diese ist mit elektrischen Leitern gekoppelt, welche in einem Magnetfeld angeordnet sind und bei Stromdurchfluss ihre Bewegung auf die Membran übertragen. Für Ultraschall-Echolote werden derartige Wandler jedoch kaum eingesetzt.

*Magnetostruktive Wandler* (d) benutzen zur Schwingungserzeugung magnetostruktive Materialien (wie z.B. Eisen, Nickel, Kobalt), die sich in einem Magnetfeld entsprechend seiner Stärke zusammenziehen. Durch magnetische Wechselfelder können diese Materialien zum Schwingen gebracht werden, wodurch Ultraschall erzeugt wird. Da die Verformung von der Richtung des äußeren Magnetfeldes unabhängig ist, muss der Wandler für linearen Betrieb vormagnetisiert werden. Magnetostruktive Wandler sind sehr

robust, werden aber aufgrund ihres komplizierteren Aufbaus mittlerweile weitgehend durch piezoelektrische Wandler ersetzt.

Piezoelektrische Wandler (e) nutzen die Eigenschaft bestimmter kristalliner Materialien (Quarz, Piezokeramik, Piezopolymer), bei mechanischer Deformation proportionale elektrische Signale abzugeben (direkter piezoelektrischer Effekt) bzw. sich bei geeignet angelegtem elektrischem Feld mechanisch zu verformen (indirekter piezoelektrischer Effekt). Mit piezokeramischen Materialien, wie z.B. Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) oder piezoelektrische Polymerfolien (PVDF), wird ein hoher Anteil der bei der mechanischen Verformung aufgebrauchten Arbeit in elektrische Arbeit umgewandelt und umgekehrt. Durch eine zusätzliche Schicht aus Kunststoff einer geringen akustischen Impedanz kann die Impedanzanpassung an Luft verbessert werden.