

# Piezoelemente – versteckte Heinzelmännchen

**Piezoelemente erfüllen in Haushaltgeräten, in der Industrie und in der Wissenschaft grundlegende Funktionen. Indem sie zwischen Kraft und elektrischer Spannung vermitteln, sind sie die direkteste Brücke zwischen Mechanik und Elektrotechnik. In jedem Haushalt dürften inzwischen weit über 10 Piezoelemente aufzufinden sein – beispielsweise in Computern, in Radio- und Fernsehgeräten, in Handys, in der Küchenwaage, im Feuerzeug und im Auto.**

Der grundlegende Effekt, der Piezoelemente zu einem wichtigen Element in vielen elektrischen und elektronischen Geräten macht, wurde 1880 von den Brüdern Pierre und Jacques Curie entdeckt. Die beiden konnten beim Druck auf Quarz und einige andere Kristalle eine Spannung nachweisen, die proportional zur aufgewendeten Kraft ist. Nach der griechischen Bezeichnung piezi (πίεζη) für Druck wurde die wichtige Entdeckung «Piezo-effekt» genannt.

Im Folgejahr wurde das umgekehrte Phänomen demonstriert («inverser Piezoeffekt»): Kristalle werden in einem elektrischen Feld deformiert. Bei geeigneter Wahl der Schnittflächen kann beispielsweise die Länge eines Piezoplättchens durch

eine Spannung sehr fein und präzise um Bruchteile von Nanometern verändert werden. Abb. 1 zeigt, wie ein Quarzkristall geschnitten werden muss, damit sich die Längenänderung des Plättchens parallel zum elektrischen Feld einstellt.

## Kristallstruktur und Piezoeffekt

Der Piezoeffekt hängt mit der Ladungsverteilung innerhalb der Einheitszelle eines Kristalls zusammen. Viele Anwendungen basieren auf den künstlich hergestellten keramischen Piezoelementen PZT (Blei-Zirkonat-Titanat  $\text{PbO}_3\text{Ti}_x\text{Zr}_{1-x}$ ), die einen besonders starken Piezoeffekt zeigen.

Oberhalb einer kritischen Temperatur, der sogenannten Curie-Temperatur, liegt immer die kubische Form vor (Abb. 2, links). Eine Punktspiegelung am Mittelpunkt des Würfels führt den Kristall in sich selbst über, weshalb die Schwerpunkte von negativen und positiven Ladungen in diesem Mittelpunkt zusammenfallen und sich exakt aufheben. Ein solcher Kristall zeigt demzufolge auch keinen Piezo-Effekt.

## Asymmetrische Gleichgewichtslage

Unterhalb der Curie-Temperatur von ca. 350 bis 500 °C finden die vierfach positiv geladenen Titan- und Zirkonionen (bei einem Titananteil  $x$  von über 50 Prozent) jedoch eine neue, asymmetrische Gleichgewichtslage in der oberen oder unteren



Abb. 1: Quarzkristall (Bergkristall) aus Minas Gerais (Brasilien) mit eingezeichnetem Quarzplättchen, das in Längsrichtung piezoaktiv ist. (Ausschnitt aus Gesamtbild)

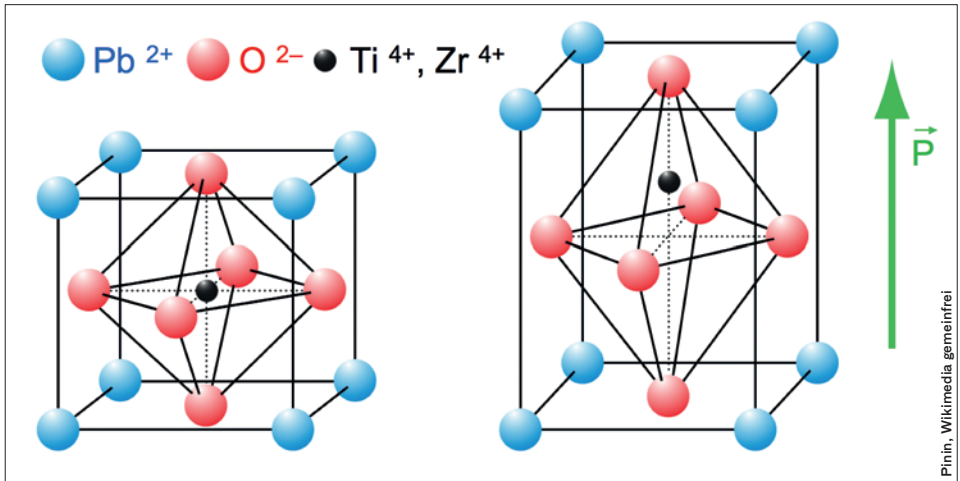


Abb. 2, links: Perowskit-Einheitszelle von PZT oberhalb der Curie-Temperatur. Rechts: Unterhalb der Curie-Temperatur entsteht ein vektorielles Dipolmoment  $\vec{P}$  und die Einheitszelle wird etwas gestreckt (in der Grafik stark übertrieben gezeichnet). Erklärungen im Text.

Sauerstoffpyramide (Abb. 2, rechts) und bilden einen vierfach positiven Ladungsschwerpunkt. Die Blei- und Sauerstoffionen erzeugen einen vierfach negativen Ladungsschwerpunkt im Zentrum der Einheitszelle. Die beiden Ladungsschwerpunkte fallen also nicht mehr zusammen und es entsteht ein sogenanntes Dipolmoment  $\vec{P}$ .

Der Betrag dieses Vektors  $\vec{P}$  ist definiert als Produkt von positiver Ladung und Abstand der Ladungen; die Richtung des Vektors  $\vec{P}$  ist parallel zur Verbindungslinie der beiden Ladungen und zeigt von der negativen gegen die positive Ladung. Wichtig ist auch, dass diese asymmetrische Einheitszelle gegenüber der punktsymmetrischen, kubischen leicht gedehnt ist.

### Elektrisches Feld im Kristall

Falls alle Einheitszellen parallel ausgerichtet sind, addieren sich die winzigen Dipolmomente und erzeugen zueinander entgegengesetzte Oberflächenladungen auf beiden Endflächen eines PZT-Stabes (Dipolmoment pro Volumen hat die Masseinheit Ladung mal Länge pro Volumen, also Ladung pro Fläche, was multipliziert mit der Oberfläche des Piezoelementes eine Ladung ergibt).

Diese Oberflächenladungen erzeugen ihrerseits ein elektrisches Feld zwischen den beiden Endflächen, das das Polarisationsfeld neutralisiert; es entsteht deshalb im Ruhezustand keine Spannung zwischen den Endflächen (dies muss so sein, denn andernfalls ergäbe sich ein Perpetuum Mo-

bile in Form einer Batterie). Wird nun eine Spannung zwischen den Endflächen angelegt, entsteht im Kristall ein elektrisches Feld, das je nach Richtung die Dipolmomente verstärkt oder abschwächt. Dadurch stellt sich eine neue Gleichgewichtslage für die Titan- und Zirkonatome ein und der Kristall wird etwas deformiert. Die Länge eines Piezostabes kann so kontinuierlich und proportional zur angelegten Spannung um maximal etwa  $\pm 0,1$  Prozent variiert werden.

### Druck erzeugt Spannung

Umgekehrt bewirkt ein Druck auf den Kristall auf Grund seiner Elastizität eine Verkürzung des Abstandes der beiden Ladungszentren in den Einheitszellen. Dadurch werden alle Dipolmomente verkleinert und so die Oberflächenladung sowie das durch sie erzeugte elektrische Feld im Innern des Kristalls verringert. Die Veränderung des elektrischen Feldes multipliziert mit der Dicke des Kristalls ergibt eine Spannung, die viele Kilovolt betragen kann.

Da Kraft mal Kompressionsweg ebenso eine Energie darstellt wie Oberflächenladung mal Spannung, wird ein Druck auf den Kristall transformiert in einen kurzzeitigen Spannungs-Stromstoß, der aufsummiert weniger Energie enthält als die zur Kompression aufgewendete Energie (der Wirkungsgrad von Piezoelementen beträgt 25 bis 50 Prozent). Ein hochempfindlicher Ladungsverstärker integriert diesen Spannungs-Stromstoß in ein zur Kraft proportionales Signal.

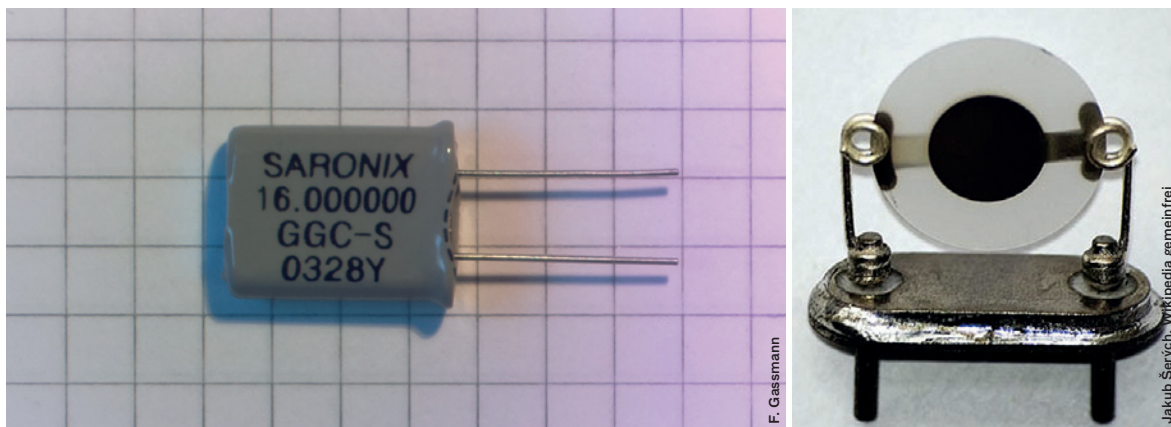


Abb. 3, links: Schwingquarz für 16 Megahertz auf 4-Millimeter-Raster. Rechts: Schwingquarz ohne Gehäuse. Das Quarz-Kreisscheibchen ist 0,15 Millimeter dick und hat einen Durchmesser von 8 Millimetern. Die beiden aufgedampften Silberelektroden haben den halben Durchmesser. Das zerbrechliche Plättchen wird durch eine Federhalterung fixiert und mit den Anschlussdrähten verbunden.

### Herstellung von keramischen PZT-Elementen

Nach dem Sinterungsprozess sind die mikroskopisch kleinen Weiss'schen Bezirke (mit je parallelen Dipolmomenten) unter sich noch nicht parallelisiert. Um diese zu parallelisieren, wird das noch inaktive PZT-Element bis knapp unter die Curie-Temperatur erhitzt und einem sehr starken elektrischen Feld von etwa 1 Kilovolt pro Millimeter ausgesetzt. Nach der Abkühlung bleiben die Dipolmomente auch ohne äusseres Feld parallel und das PZT-Element kann als Kraft-Spannungs-Wandler eingesetzt werden.

### Piezoelemente als Sensoren

*Kraftsensoren* befinden sich in Personen- oder Küchenwaagen, Tonabnehmern bei Musikinstrumenten wie Gitarren oder in alten Geräten zur Musikwiedergabe wie Grammofonen. In «elektronischen» Feuerzeugen wird ein Stößel auf ein PZT-Stäbchen von einigen Millimetern Länge geschlagen, wodurch Spannungen bis zu 15 Kilovolt entstehen. Damit lassen sich bis einen Zentimeter lange Funken zur Entzündung von Gasen erzeugen. Piezoelemente dienen auch zur Auslösung des Airbags bei einem Zusammenstoß: Der entstehende Funke zündet eine Sprengladung und das bei der Explosion erzeugte Gas bläst den Airbag auf.

*Drucksensoren* findet man in Kristallmikrofonen, Hydrofonen, Dehnungsmessern, Luft- oder Wasserdrukmessern, etc.

*Beschleunigungssensoren* bilden das Herzstück für Vibrationsmesser, Einbruch-Alarmanlagen, Klopfensensoren, Rauigkeitsmesser, etc.

### Piezoelemente als Aktoren

*Quasistatische Anwendungen* (bezogen auf die Resonanzfrequenz langsame Veränderungen) betreffen Piezolausprecher, -kopfhörer, Braillezeilen-Lesegeräte für Blinde, Tintenstrahldrucker, Piezomotoren, Einspritzventile für Dieselmotoren, etc.

*Resonanzanwendungen:* Piezosummer, -sirenen, Ultraschallerzeugung in der Medizin (Ultraschallbilder, Zahnreinigung), piezoelektrischer Hochspannungstransformator, etc. In Abb. 3 gezeigte Schwingquarze dienen in jedem Computer, Tablet, Handy oder in der Quarzuhr als stabiler Taktgeber. Dafür werden künstlich hergestellte Quarzplättchen verwendet, da sie gegenüber keramischen Piezoelementen wie PZT stabiler gegenüber Temperaturschwankungen und Alterung sind. Durch seine Geometrie hat ein Quarzscheibchen eine genau definierte Resonanzfrequenz, die elektronisch angeregt wird.

Bei Distanzmessern, wie beispielsweise der Parkhilfe im Auto, wird dieselbe Sonde als Aktor zur Erzeugung von Ultraschall sowie als Sensor zur Detektion des Echos eingesetzt. Man vergleiche dazu den Artikel «Sehen» mit den Ohren» in der Vierteljahrsschrift 1|2015 S. 16-17.

Die benutzte Frequenz liegt bei solchen Geräten im Bereich 30 bis 40 Kilohertz, um Schall

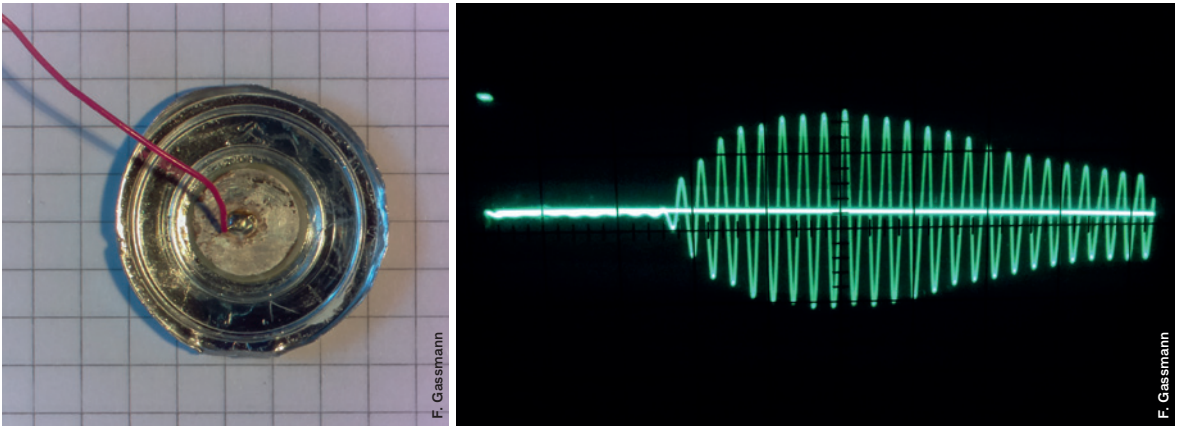


Abb. 4, links: Schallsonde mit einer Resonanzfrequenz von 17 Kilohertz nach entfernter Kunststoffhalterung auf 4-Millimeter-Raster. Der 0,15 Millimeter dicke grünliche PZT-Piezokristall mit einem Durchmesser von 10 Millimetern wurde auf eine dünne Aluminiumscheibe geklebt. Auf der Gegenseite wurde eine Silberelektrode mit etwas kleinerem Durchmesser aufgedampft und daran ein Draht angelötet. Die Spannung wird zwischen diesem Draht und der Aluminiumscheibe zugeführt oder abgegriffen. Die Sonde ist als Verbundbieger aufgebaut: Ändert sich die Dicke und damit der Durchmesser des Piezokristalls um einige Mikrometer, verbiegt sich die Aluminiumscheibe mit einem 20 bis 40 mal grösseren Hub. Betreibt man die Sonde bei der Resonanzfrequenz, vergrössert sich der Hub weiter und die Sonde gibt einen intensiven Ton ab. Rechts: Von einer identischen zweiten Sonde empfangenes Signal nach Anregung der ersten Sonde mit einem kurzen (30 Mikrosekunden) Impuls von 0,8 Volt (kleine Linie links oben, die Fortsetzung dieses Signals ist die Nulllinie quer durch das Bild). Auf Grund der Schallgeschwindigkeit trifft das Schallsignal 0,5 Millisekunden später auf die 17 Zentimeter entfernte Empfangs-sonde, die in Resonanz gerät und nach rund 10 Schwingungen ein maximales Signal von 7 Millivolt abgibt. Es ist im Bild beinahe so gross wie der 0,8 Volt Impuls, weil es hundertmal verstärkt wurde.

mit Wellenlängen von etwa einem Zentimeter zu erzeugen. Die Messgenauigkeit für die Distanz liegt dann ebenfalls um einen Zentimeter. Analoge Sonden mit einer Resonanzfrequenz von 17 Kilohertz (Abb. 4) werden unter anderem eingesetzt, um Marder zu verscheuchen.

### Wichtig für die Wissenschaft

Für optische Experimente sowie bei astronomischen Beobachtungen müssen teilweise Spiegel um Bruchteile der Lichtwellenlänge verschoben werden, was mit Piezoaktoren einfach und präzise möglich ist. Eine bekannte Anwendung ist das Rasterkraftmikroskop, bei dem eine sehr feine Nadelspitze beispielsweise die Kontouren der Kohlenstoffatome auf einer Graphitoberfläche mit sub-Nanometer-Genauigkeit abtastet. Die entstehenden realistischen Bilder erlaubten gegen Ende der 1980er-Jahre erstmals eine direkte Sichtbarmachung der Atome und zerstreuten die letzten Zweifel über deren Existenz.

Fritz Gassmann

Der Autor ist Physiker und arbeitete früher am Paul Scherrer Institut PSI in Villigen.