

SOWAS-Projekt Piezoelektrischer Effekt

RUB

Gruppe E: Jan Grochowski, Rouven Lemmerz, Anaximander Stenkamp,

Projektleiter: Tim Höhne

Motivation

Bei diesem Projekt wird der vielfach im Alltag (Feuerzeug, Ultraschallwandler,...) auftretende piezoelektrische Effekt untersucht. Dabei wird sowohl der direkte als auch der indirekte/inverse Effekt betrachtet. Wir schätzen die Materialkonstante theoretisch ab und prüfen diese an zwei theoretischen Versuchsaufbauten.

Hypothesen

- Der direkte piezoelektrische Effekt ist direkt abhängig vom **Druck**, und nimmt zeitlich nicht ab.
- Der indirekte Effekt wird **proportional** zur angelegten Spannung erfolgen.
- Die beiden Effekte haben die **gleiche Proportionalitätskonstante**

Projektübersicht

Der piezoelektrische Effekt lässt sich aufteilen in den direkten und indirekten piezoelektrischen Effekt. Beim direkten Effekt, entsteht durch mechanische Verformung des Kristalles ein elektrisches Feld.

Vice versa entsteht bei dem indirekten Effekt eine mechanische Verformung des Kristalls durch ein elektrisches Feld.

Versuchsaufbauten

Versuchsaufbau 1 zum Messen des direkten Effektes. Dabei wurden verschiedene Gewichte (4,5,8,10,14,15,18,22,27kg) zur Druckerzeugung benutzt. Die Messung erfolgt über ein Kondensator mit einem Oszilloskop. Durch das auf und unterlegen eines Holzpanels wird das Gewicht gleichmäßiger auf den Kristall verteilt. Das Maximum der Spannungskurve wird auf dem Oszilloskop, unmittelbar nach Auflegen des Gewichts, abgelesen.

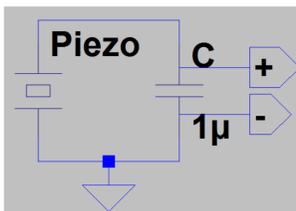


Abb. 1: Schaltbild des ersten Versuchsaufbaus

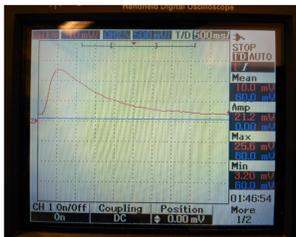


Abb. 2: Spannungskurven am Oszilloskop

Versuchsaufbau 2 zur Messung des inversen Effektes. Hierbei handelt es sich um ein Michelson-Interferometer, welches schon im Grundpraktikum benutzt wurde. [1]

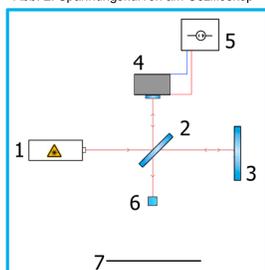


Abb. 3: Aufbau des Interferometers mit Kristall
1. Laser 2. Strahlteiler 3. Spiegel 4. Kristall
5. Spannungsquelle 6. Kugellinse 7. Schirm

Einer der optischen Spiegel wurde an dem Kristall befestigt. Der Kristall ist auch direkt an einer Hochspannungsquelle angeschlossen, an welcher die Spannung schrittweise erhöht werden kann.

Wird angenommen, dass der Kristall sich von der Mitte aus in beide Richtungen gleich stark ausbreitet, so erhält man:
 $Z * \lambda = \Delta l \equiv E * l = U$

Z Zahl der vorbeilaufenden Interferenzstreifen, Spannung U, Wellenlänge des Lasers λ , l Länge des Piezokristalls, E Elektrisches Feld im Piezokristall

Grundlagen

Die Grundformeln der Piezoelektrizität sind (für hinreichend kleine Amplituden): [2]

$$\text{- Direkter Effekt: } D = d * T + \epsilon^T * E$$

$$\text{- Indirekter Effekt: } S = d * E + s^E * T$$

mit D elektrische Flussdichte, T mechanische Spannung, E elektrisches Feld, S Mechanische Dehnung, d Piezoelektrischer Ladungskoeffizient, ϵ^T elektrische Permittivität (für T=const.), s^E Elastizitätskoeffizient

ZU VERSUCH 1

Die Ladung auf der oberen Kondensatorhälfte beträgt

$$q = D * A = d * T * A = d * F$$

Der Piezokristall selbst ist ein Plattenkondensator mit der Kapazität $\epsilon^T * \frac{A}{h}$ welcher parallel zu dem anderen Kondensator geschaltet ist.

$$\text{Man erhält: } U = \frac{q}{C + \epsilon^T * A/h} = \frac{d * F}{C + \epsilon^T * A/h}$$

mit $C \gg \epsilon^T * A/h$ folgt

$$d = \frac{C * U}{F}$$

mit A der Fläche des Kristalls und die auf den Kristall wirkende Kraft F, h der Höhe des Kristalls, C die Kapazität des Kondensator und U der Spannung am Kondensator

Theoretisches Modell

Die Piezokristalle in unseren Experimenten sind aus **Blei-Zirkonat-Titanat** {PZT, chem. Formel $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$ ($0 \leq x \leq 1$)}, eine der häufigsten Piezokeramiken im (industriellen) Gebrauch. Der piezoelektrische Effekt wird durch die **asymmetrischen**

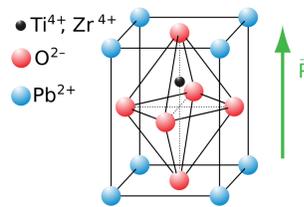


Abb. 4: Gitterstruktur eines PZT-Kristalls

Zirkonium- und Titan-Ionen hervorgerufen. Erst durch das Sintern im Fertigungsprozess wird erreicht, dass diese Ionen **gleich orientiert** sind.

Vereinfachend werden vier Annahmen getroffen:

- Das Gitter sei während des gesamten Vorgangs würfelförmig (vgl. Abb.4).
- Die relative Längenänderung S auf makroskopischer Ebene wird 1:1 übersetzt auf die Entfernung des Ion zum Gitterzentrum.
- Zr und Ti seien etwa gleich häufig vertreten.
- Die Dichte sei $\rho \approx 7,8 \text{ gcm}^{-3}$ und der Elastizitätskoeffizient sei $s^E = 20,7 * 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{N}}$ [3]

Die Gitterkonstante a steht wie folgt im Zusammenhang mit der Dichte ρ und den Atommassen m (Doppelzählung der Atome im Gitter werden durch Vorfaktoren vermieden):

$$\rho * a^3 = \frac{8}{3} * m_{Pb} + \frac{6}{3} * m_O + (0,5 * m_{Zr} + 0,5 * m_{Ti})$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{m_{Pb} + 2 * m_O + (0,5 * m_{Zr} + 0,5 * m_{Ti})}{\rho}} \approx 4 \text{ \AA}$$

$$D = \frac{q}{V} * \Delta l = \frac{4e}{a^3} * S * a = \frac{4e}{a^2} * s^E * T \equiv d * T$$

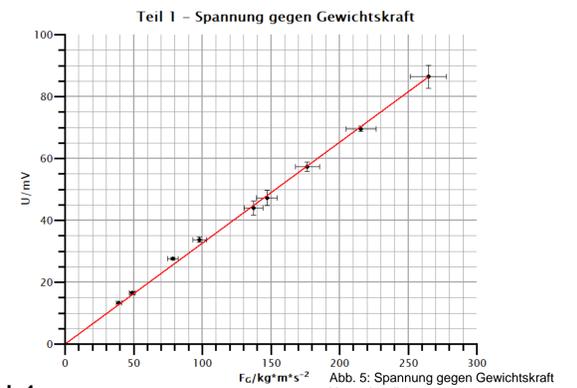
$$\rightarrow d \approx 7,8 * 10^{-11} \frac{\text{C}}{\text{N}}$$

mit $q = 4e$ der Ladung eines Ti/Zr-Ions, V dem Volumen einer Elementarzelle und Δl der Auslenkung des Ti/Zr-Ion aus der Ausgangsposition

d wird in der Größenordnung $10^{-10} - 10^{-11} \frac{\text{C}}{\text{N}}$ erwartet.

Laut Herstellerangaben haben unsere dotierten Kristalle ein d von $4 * 10^{-10} \frac{\text{C}}{\text{N}}$ [3]

Ergebnisse



Versuch 1

Die Steigung A der Ausgleichsgerade entspricht dem Quotienten U/F. Daher berechnet sich mit

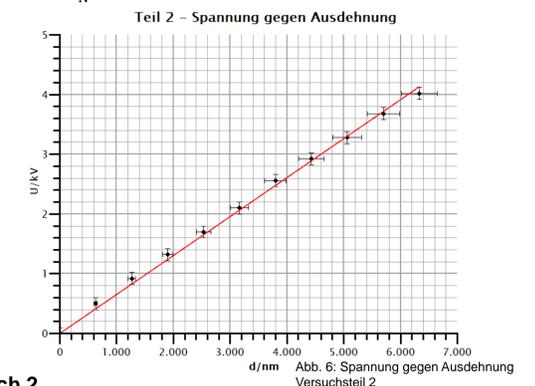
$$A = (3,262 \pm 0,007) * 10^{-4} \frac{\text{V}}{\text{N}}$$

mit $C = 1 \mu\text{F}$

$$d = C * A = (3,26 \pm 0,16) * 10^{-10} \frac{\text{C}}{\text{N}}$$

Die Messung zeigt, dass, wie erwartet, ein linearer Zusammenhang zwischen Gewichtskraft und erzeugter Spannung besteht.

Das Ergebnis liegt zudem in der erwarteten Größenordnung und ist ca. 19% geringer als der vom Hersteller angegebene Wert ($d = 4 * 10^{-10} \frac{\text{C}}{\text{N}}$).



Versuch 2

Die berechnete Steigung der Ausgleichsgeraden ist:

$$A = (6,35 \pm 0,06) * 10^8 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$d = 1/A = (1,576 \pm 0,014) * 10^{-9} \frac{\text{C}}{\text{N}}$$

Auch in diesem Versuch besteht zwischen Ausdehnung und angelegter Spannung ein linearer Zusammenhang. Dies deckt sich mit der Theorie.

Jedoch sollte das Ergebnis mit dem aus dem ersten Versuch übereinstimmen. Der berechnete Wert ist ca. 4-mal so groß wie der angegebene Wert.

Fazit

Das Ergebnis des ersten Versuches weicht zwar von der theoretischen Voraussage ab, liegt aber in der geschätzten Größenordnung. Somit wurde die Hypothese der **gleichen Proportionalitätskonstante bestätigt**.

Ein systematischer Fehler zur Messung des direkten Effektes kann die fehlerhafte Abschätzung des Höhepunkts der Spannungskurve sein. Dies vergrößert den gemessenen Wert um geschätzt höchstens 20%. **Entgegen unserer Erwartungen** ist der direkte Effekt **nicht statisch** beobachtbar (siehe Abb. 2).

Eine mögliche Erklärung ist, dass der Kristall sich durch sein selbst erzeugtes E-Feld direkt wieder verformt.

Der indirekte Effekt ist, wie erwartet, **proportional und statisch** beobachtet worden.

Zitierte Werke

- [1] Anika Beer, Sebastian Kunze, Dirk Meyer: Physikalisches Praktikum für Studierende der Physik Teil 2, 2016, S. 35 ff.
- [2] IEEE Standard on Piezoelectricity, 1988, S. 10
- [3] <https://www.piceramic.de/de/produkte/piezoelektrische-materialien/#c15162> (Stand 18.06.2017)