

28.06.01

Der Piezo-Effekt

Elektrostriktion

PG 268 III

Diana Bednarczyk
Fabian Fleischer
René Könnecke
Matthias Sturm
Ramin Torabi
Heinrich Südmeyer

Tutor: Cornelia Sing

Protokollant:
Heinrich Südmeyer

Abstract:

Bei der Elektrostriktion deformiert sich ein Kristall durch eine angelegte Spannung. In unserem Versuch kalibrierten wir einen Röhren-Piezo.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	2
Theorie	3
Der direkte piezoelektrische Effekt	3
Der reziproke piezoelektrische Effekt	5
Der Röhren-Piezo	5
Der Versuchsaufbau	6
Die Durchführung	7
Auswertung	7
Resümee	10

Einleitung

Piezoelektrizität ist die Eigenschaft von bestimmten Materialien, auf Deformation mit einer inneren Polarisation zu reagieren. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld, dessen Spannung man an ihrer Oberfläche messen kann. Hierbei spricht man vom direktem piezoelektrischen Effekt.

Die Umkehrung dieses Piezoeffektes heißt reziproker piezoelektrischer Effekt oder einfacher Elektrostriktion. Hier deformiert sich ein Material in einem elektrischen Feld.

Materialien die oben genannten Eigenschaften aufweisen, werden Piezomaterialien genannt. Sie sind Isolatoren und meistens Kristalle.

Theorie

Der Piezoelektrische Effekt

Bei Kristallen mit mindestens einer polaren Achse tritt durch mechanischen Druck zwischen vorderem und hinterem Ende der polaren Achse eine elektrische Spannung auf. Dies bezeichnet man als piezoelektrischen Effekt oder kurz als Piezoeffekt. Dieser wurde 1880 von den Brüdern Jacques und Pierre Curie entdeckt.

Dieser Effekt tritt nur bei Kristallen auf, die keine Symmetriezentren und somit mindestens eine polare Achse besitzen. Eine polare Achse eines Kristalls zeichnet sich dadurch aus, dass deren hinteres und vorderes Ende nicht gleichwertig, also nicht miteinander vertauschbar sind. Mit anderen Worten, eine 180° -Drehung um eine zur polaren senkrechte Symmetrieachse bringt den Kristall nicht mit der Ausgangstellung zur Deckung.

Zur Veranschaulichung der Quarz als Beispiel: siehe Abb.(a)

Dieser dem trigonalem System angehörende Quarzkristall hat drei polare Achsen, die mit X_1 , X_2 , X_3 , bezeichnet sind. Diese Achsen verbinden jeweils zwei nicht gleichwertige Kanten des Kristalls. Dies ist daran zu erkennen, dass die kleinen mit a und b bezeichneten Flächen sich nur an jeweils einem Ende einer der polaren Achsen befinden. Die zu den polaren Achsen senkrecht verlaufende, mit Z bezeichnete Achse wird kristallographische Hauptachse, oder auch optische Achse genannt, da der Kristall, dreht man ihn um eine zu ihr Senkrechten, symmetrisch ist. Wird ein solcher Piezokristall mechanisch verformt, so tritt an den Enden der polaren Achsen bzw. an den zu ihnen senkrechten Flächen eine elektrische Ladung auf. Stellt man sich den Querschnitt durch den obigen Quarzkristall vor, so erhält man ein Sechseck. Entsprechend der chemischen Zusammensetzung des Quarzes SiO_2 befinden sich an den Ecken abwechselnd Silizium- und Sauerstoffatome. Wobei die Siliziumatome eine positive, die Sauerstoffatome eine negative Ladung haben.

Abb2

Im undeformierten Zustand (a) neutralisieren die Ladungen sich. Wird ein mechanischer Druck in Richtung einer der polaren Achsen auf den Kristall ausgeübt (b), so findet eine Ladungsverschiebung statt, welche eine Polarisierung zur Folge hat oder anders ausgedrückt: positiver und negativer Ladungsschwerpunkt sind nicht mehr deckungsgleich. Wirkt der Druck längs einer polaren Achse spricht man vom longitudinalen Piezoeffekt. Dabei treten durch Kontraktion in Richtung der polaren Achse an der Seite A negative, an der Seite B positive Ladungen auf. Tritt bei einer Kontraktion senkrecht zu einer der polaren Achse (c) eine Spannung auf, dann wird dies transversaler Piezoeffekt genannt. Eine Kontraktion senkrecht zur polaren Achse entspricht einer Dilatation in Richtung der polaren Achse. Obwohl der Druck von den Seiten C und D ausgeübt wird, treten die Ladungen im Fall (c) wie im Fall (b) ebenfalls an den Seiten A und B auf, allerdings mit vertauschten Vorzeichen. D.h. eine Kontraktion und Dilatation polarisieren den Kristall in entgegengesetzter Weise. Druck oder Drehung in Richtung der kristallographischen Hauptachse (in Abb.1 mit Z bezeichnet) ergibt keinen piezoelektrischen Effekt. Da hierbei nur eine symmetrische und keine relative Ladungsverschiebung stattfindet. Es tritt also keine Polarisierung auf. Das entstehende elektrische Feld, das Piezofeld E ist proportional zur relativen Deformation. Die Zwischen den Flächen A und B erzeugte Spannung U ist proportional zu Δx . Der piezoelektrische Koeffizient δ ist der Proportionalitätsfaktor:

$$\text{Piezofeld: } E = \delta \cdot \frac{\Delta x}{x}$$

Spannung: $U = \delta \cdot \Delta x$, da hier die gültige Formel für den Kondensator gilt: $U = E \cdot x$

$$\text{Daraus folgt für Elektrostriktion: } \Delta x = \frac{U}{\delta}$$

Die auftretende Spannung U ist also unabhängig von den Abmessungen des Kristalls, nur von der Deformation Δx abhängig. Während das Piezofeld E, abhängig von der relativen

Deformation $\frac{\Delta x}{x}$, abhängig von der Abmessung des Kristalls ist. Die genannten Verhältnisse

gelten für die Deformation in longitudinaler Richtung. Bei Deformation in transversaler Richtung ist der piezoelektrische Koeffizient abhängig von den Abmessungen.

Der reziproke piezoelektrische Effekt

Der reziproke piezoelektrische Effekt oder Elektrostriktion ist die Umkehrung des Piezoelektrischen Effektes. Dieser wurde von O.Lippmann auf Grund thermodynamischer Überlegungen vorausgesagt und kurz darauf ebenfalls von Jacques und Pierre Curie, 1881 entdeckt.

Dabei wird eine Gleichspannung entlang einer polaren Achse angelegt, wodurch sich der Piezokristall verformt. Bei entgegengesetzter Polung verformt sich der Kristall in die entgegengesetzte Richtung.

Man spricht vom longitudinalen reziproken piezoelektrischen Effekt bei einer Deformation in Richtung einer polaren Achse. Und vom transversalen reziproken piezoelektrischen Effekt bei einer Deformation senkrecht zu einer polaren Achse.

Der Röhren-Piezo

Dabei handelt es sich um einen Piezo der Röhrenförmig ist und deswegen in drei verschiedene Richtungen ausgelenkt werden kann. Dies geschieht folgendermaßen: der Piezo ist von Außen durch vier an ihm längs entlanglaufende und von einander getrennten Leiterschichten bedeckt welche als X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 benannt sind. X_1 liegt auf der gegenüber liegenden Seite von X_2 . Legt man eine entgegengesetzte Spannung an die Beiden X Leiterschichten verschiebt sich der Piezo in X -Richtung.

Ein Beispiel

Wir legen $75V$ an die X_1 und $-75V$ an die X_2 Leiterschicht dadurch dehnt sich die X_1 Seite des Piezo aus während sich die X_2 Seite im gleichen Maß zusammenzieht was zur X -Auslenkung führt. Die Y -Auslenkung funktioniert analog dazu.

Um eine Z -Auslenkung zu bekommen wird der Piezo in der im inneren der Röhre angesteuert, dort werden gleichzeitig alle X und Y Teile des Piezo unter eine gleiche Spannung gesetzt was zu einer Gleichmäßigen Ausdehnung des gesamten Piezo führt.

Versuchsaufbau

Zur Kalibrierung des Röhren-Piezo benutzen wir das Michelson-Interferometer. Dies geschieht dadurch, dass anhand der Interferenzringe kleinste Verformungen des Piezo-Kristalls gemessen werden können, indem er einen Gangunterschied herstellt. (Es ist sehr ratsam sich noch mal mit Michelson-Interferometer genauer anzusehen, dazu möchte ich auf unser Protokoll zu diesem Thema verweisen)

Am einem Ende des Kristalls wird dazu ein Spiegel befestigt, das andere Ende mit Hupoxid-Harz an einem Winkel. Dieses Gebilde wird erneut auf einen Plexiglaswinkel befestigt, womit dann der bewegliche Spiegel des Interferometers ersetzt wird. Der Plexiglaswinkel dient erstens zur Isolierung, da das Interferometer leitend ist und zweitens zur Montage am Michelson-Interferometer.

Als Lichtquelle für das justierte Interferometer dient ein grüner Laser der Wellenlänge 543,5nm. Bei Verkleinerung des Strahlenganges um eine halbe Wellenlänge verschiebt sich das Interferenzbild um einen Ring nach außen. Ein Ring kommt somit einer Ausdehnung des Piezokristalls um eine halbe Wellenlänge gleich.

Der Röhren-Piezo kann durch ein spezielles Gerät, mit integriertem Voltmeter in X, Y und Z-Richtung direkt angesteuert werden.

Das Interferenzbild wird auf einen Schirm abgebildet, so dass beim Bedienen der Piezoansteuerung nur die anliegende Spannung bei auftretenden Minima abgelesen werden muss.

Geräteliste:

Gerät	PL-Nummer
Grüner Laser 543,7nm	732b
Michelson-Interferometer	713b
Linse	737a
Piezo-Ansteuergerät	Piezosystem Jena NV 40/35
Optische Bank	
Schirm	

Durchführung

Zu Beginn mussten Drähte an die Kontaktsellen des Röhren-Piezo gelötet werden: Dabei ist Lötwasser zu benutzen, und es darf nur mit maximal 250°C gelötet werden, da sonst die Polarisation des Piezo verloren gehen kann. Auch sonst ist der Piezo mit äußerster Vorsicht zu behandeln da er sehr spröde ist und zum Brechen neigt.

Das Befestigen des Piezo stellte uns vor neue Probleme, da er nur sehr gering deformiert, kann er nur auf sehr wenige Arten befestigt werden. Viele Halterungen absorbieren die Ausdehnungen, deswegen entschlossen wir uns auf Hupoxid-Harz zurück zu greifen.

Achtung: Hupoxid-Harz braucht sehr lange zum trocknen.

Nachdem der Piezo uns all seine Tücken hat kennen lernen lassen, befestigten wir Laser, Aufweitungsoptik und Michelson-Interferometer auf einer optischen Bank. (Guter Tipp das Michelson-Interferometer hat zwei Gewinde womit man es auf einer optischen Bank befestigen kann) Bei der Kalibrierung des Interferometers ist darauf zu achten, dass die Strahlengänge genau ineinander laufen da sonst keine Interferenz-Ringe entstehen.

Den Röhren-Piezo konnten wir mit einem speziell dafür geeignetem Gerät direkt in X, Y und Z-Richtung ansteuern.

Die Idee den Gangunterschied mit Photodiode und Oszilloskop aufzunehmen, verwarfen wir da genügt den Gangunterschied auf einem Schirm abzulesen. Dabei fiel auf, dass sich das Zentrum des Interferenzbildes auch verschob, was auf die Auslenkung des Spiegels durch den piezo zurückzuführen ist. Den Versuch über diese Daten die X bzw. Y Auslenkung des Piezo zu errechnen verwarfen wir da es sich um eine 3 Dimensionale Fourieranalyse handelt.

Auswertung

Leider konnten wir nur die Z-Auslenkung des Piezo bestimmen dafür aber auch zeigen inwiefern der Piezo schon depolarisiert ist.

Wir erinnern uns: zur Kalibrierung eines Piezo müssen wir δ mit folgender Formel

bestimmen $\delta = \frac{U}{\Delta x}$ daraus folgt für unsere drei Richtungen:

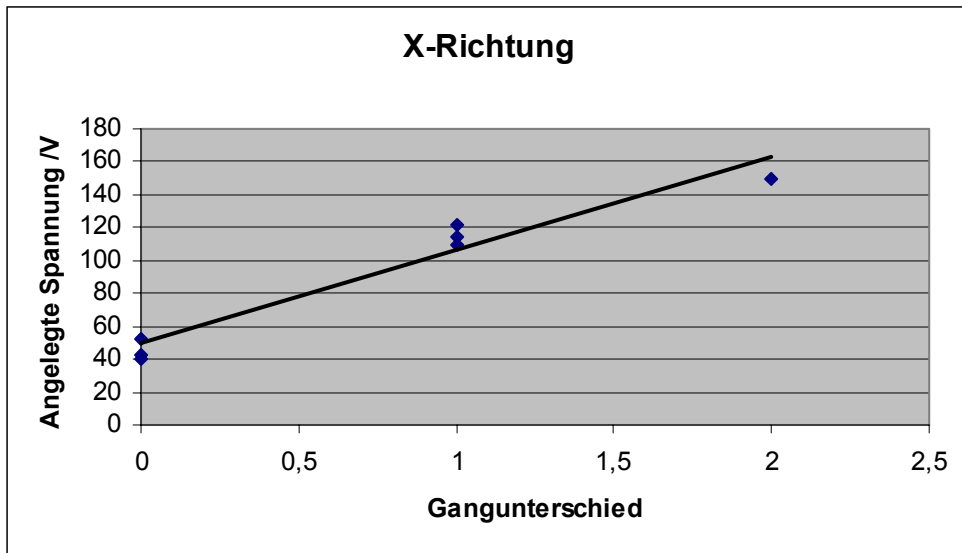
Zur Auswertung bestimmt man erst den Mittelwert der einzelnen Richtungen mit der

$$\text{Formel: } \delta_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \delta_i$$

Die Standardabweichung wird nach Folgender Methode ermittelt:

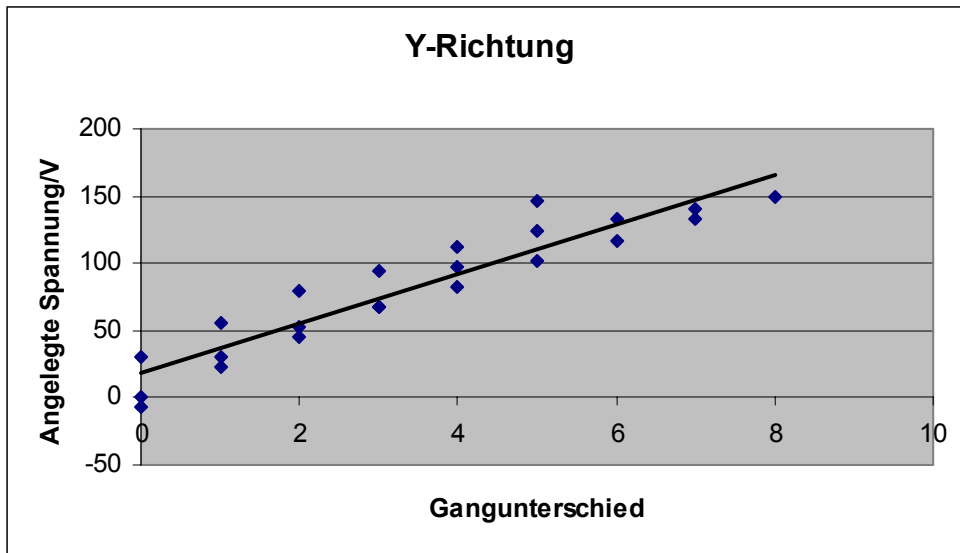
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\delta_i - \delta_m)^2}$$

Bei der statistischen Fehlerbetrachtung fehlt noch der Systematische, der bei uns nur an der Befestigung des Piezo liegen kann oder im Piezoansteuerungsgerät dieser Fehler wird geschätzt und beträgt etwa 5%



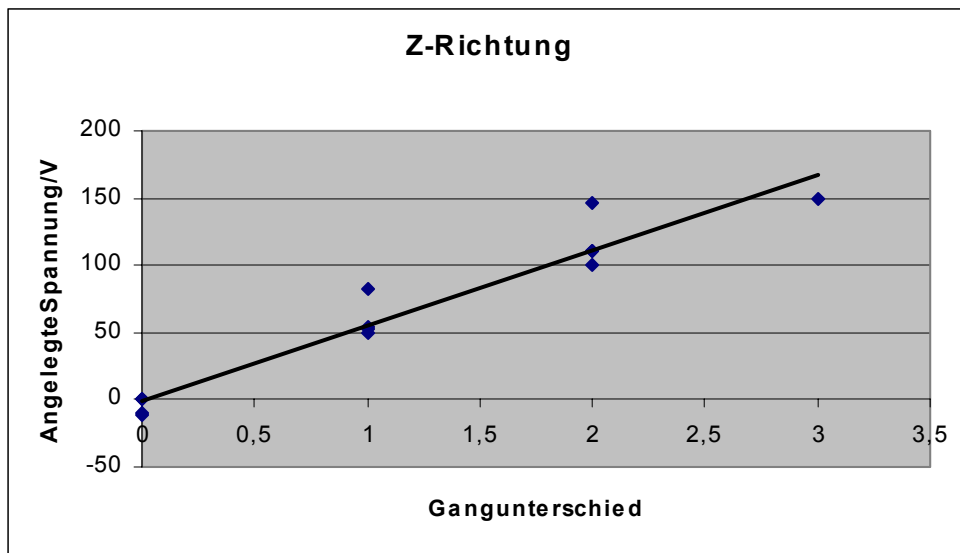
Gangunterschied	Anliegende Spannung/V	δ
0	40	0,00
1	110	0,40
2	149	0,27
0	52	0,00
1	122	0,45
0	43	0,00
1	114	0,42
	Mittelwert	0,39

Messung in X-Richtung: $\delta = (0,39 \pm 0,08) \frac{V}{nm} \pm 5\%$



Gangunterschied	Anliegende Spannung/V	δ
0	0	0,00
1	30	0,11
2	45	0,08
3	68	0,08
4	97	0,09
5	146	0,11
0	-7	0,00
1	23	0,08
2	52	0,10
3	67	0,08
4	83	0,08
5	102	0,08
6	117	0,07
7	133	0,07
8	149	0,07
0	31	0,00
1	56	0,21
2	79	0,15
3	95	0,12
4	112	0,10
5	124	0,09
6	133	0,08
7	141	0,07
	Mittelwert	0,09

Messung in Y-Richtung: $\delta = (0,09 \pm 0,03) \frac{V}{nm} \pm 5\%$



Gangunterschied	Anliegende Spannung/V	δ
0	0	0,00
1	82	0,30
2	146	0,27
0	-10	0,00
1	49	0,18
2	100	0,18
3	149	0,18
0	0	0,00
1	54	0,20
2	111	0,20
0	-11	0,00
1	52	0,19
2	110	0,20
	Mittelwert	0,19

Auswertung in Z-Richtung: $\delta = (0,19 \pm 0,05) \frac{V}{nm} \pm 5\%$

Resümee

Ich würde den Versuch als Erfolg werten, auch wenn der Fehler mir sehr hoch vorkommt. Man sollte auf keinen Fall vergessen wie viel Zeit das Kleben und die Herstellung der Halterung benötigen. Leider ist es uns nicht gelungen der Piezo so zu kalibrieren, dass es uns bei unserem großen Semesterprojekt (Raster-Tunnel-Mikroskop) von großen Nutzen ist, doch für die Erfahrung im Umgang mit einem Piezoeffekt hat es sich auf jeden Fall gelohnt. Das Problem bei der Kalibrierung war hauptsächlich, wie die Seitenauslenkung des Piezos zu bestimmen ist. Da wir den Piezo und den Spiegel mit Epoxid-Harz befestigen mussten, konnten wir nur die z-Ausrichtung beobachten. Es war ohne größere Umbauten nicht möglich die x,y-Auslenkung zu bestimmen. Wenn nur die x oder y Richtung angesteuert wurde konnte man zwar ein wandern des Interferenz-Ursprungs beobachten, um diesen aber auszuwerten ist eine dreidimensionale Fourier-Analyse notwendig, da man Kugelwellen betrachtet.