

E - Natuurkunde van piëzo-elektriciteit (20 pts)

Sommige kristallijne, elektrisch isolerende materialen, zoals kwarts en loodzirkonaattitanaat, vertonen een elektrische respons wanneer er mechanische druk wordt uitgeoefend. Kortom, mechanische spanning polariseert de kristallen, wat het piëzo-elektrisch effect wordt genoemd. Dit fenomeen kan worden verklaard door de speciale structuur van hun moleculen: door de vervorming krijgt elk molecuul een elektrisch dipoolmoment.

Omgekeerd wordt mechanische spanning opgewekt in aanwezigheid van een elektrisch veld, een fenomeen dat bekend staat als het omgekeerde piëzo-elektrisch effect. In dit probleem zullen we het omgekeerde piëzo-elektrisch effect echter verwaarlozen.

Dit probleem gaat over een eenvoudige opstelling die gebaseerd is op piëzo-elektriciteit, het piëzo-elektrisch element. Het bestaat uit piëzo-elektrisch materiaal dat tussen twee ronde metalen platen wordt geplaatst.

Als een kracht loodrecht op de metalen platen wordt uitgeoefend op het element, ontstaat er een krachtafhankelijke spanning tussen de platen.

Apparatuur (zie ook Fig. 1)

- A Piëzo-element met elektrische aansluitdraden, bevestigd op een houten grondplaat en een afdekplaat met een klein gat. Het gaatje gaat door de hele afdekplaat heen, zodat een klein deel van de bovenste elektrode van het piëzo-element er doorheen zichtbaar is. Deze elektrode is dun en flexibel.
- B Multimeter (inwendige weerstanden worden gegeven, zie de belangrijke opmerkingen op de volgende pagina).
- C 1.5 V AA batterij inclusief aansluiting.
- D Condensator met onbekende capaciteit, met een diode aan één poot gesoldeerd (als een voorwaartse stroom door de diode stroomt, is de spanningsval erover 0.56 V).
- E 4 elektrische drukknopschakelaars (verbonden wanneer ingedrukt) gemonteerd op draden.
- F 6 krokodillenklemmen.
- G Digitale weegschaal (max 10 kg).
- H Digitale stopwatch.
- I Twee verschillende rubber ballen.
- J Houten standaard met verstelbaar ontgrenselmechanisme.
- K Liniaal van 50 cm.
- L Kleine, houten stokjes (diameter van 2 mm), in twee verschillende lengtes.
- M Grote metalen bout.
- N Houten wasknijper.
- O Potlood, pen and puntenslijper.

Opdracht E.1 – Elasticiteit van de bal (2.0 pts)

Van de twee rubberen ballen die je krijgt, is de ene elastischer dan de andere.

Bepaal voor de meer elastische rubberen bal het deel van de kinetische energie dat verloren gaat tijdens een botsing met een vast oppervlak. Bepaal dit deel voor drie verschillende waarden van de initiële kinetische energie.

Opdracht E.2 - Piëzo-elektrische eigenschappen (10.0 pts)

- a Bepaal de capaciteit C van de condensator (Fig. 3b). (2.0 pts)
- b De metalen platen aan de zijkanten van het piëzo-element werken ook als een condensator. Bepaal de capaciteit C_p of van het piëzo-element. (2.5 pts)
- c Meet en plot hoe de spanning tussen de platen van het piëzo-element afhangt van de totale loodrechte kracht, die gelijkmatig over het oppervlak van de piëzo wordt verdeeld via de houten afdekplaat. Voor kleine krachten is de afhankelijkheid lineair; bepaal de helling β in dit gedeelte. (4.0 pts)
- d De moleculen van de kristallen kunnen alleen polarisaties hebben die lager zijn dan een bepaalde kritische waarde. Bereken de maximale (verzadigings)spanning van de piëzo, de druk p_{sat} bij verzadiging en de maximale oppervlaktedichtheid σ_{max} van de lading op het oppervlak van het piëzo-element. (1.5 pts)

Opdracht E.3 - Gedrag in kleine gebieden (1.0 pts)

Als er kracht wordt uitgeoefend op een klein gebied van het piëzokristal, zal het kristal als gevolg van de elektromechanische koppeling proberen te buigen. De houten platen voorkomen dit echter, waardoor ook in andere delen van het kristal mechanische spanning optreedt.

Hoeveel zal de elektrische respons veranderen als de kracht wordt uitgeoefend op een klein gebied van het kristal? Beschouw alleen het lineaire bereik van de respons.

Opdracht E.4 - Vervorming van de bal (4.5 pts)

In dit onderdeel laat je de meer elastische rubberen bal op het piëzo-element vallen. Tijdens de botsing tussen de bal en de piëzo ondergaat de bal vervormingen. Je kunt aannemen dat de kracht F die op de bal werkt, als een machtswet afhangt van de elastische vervorming x van de bal:

$$F = kx^\alpha . \quad (1)$$

Bepaal de exponent α en de materiaal constante k .

Opdracht E.5 - Interactie tijd (2.5 pts)

Met het resultaat van de vorige opdracht zou het mogelijk zijn om de interactietijd τ van de meer elastische bal met het houten oppervlak te bepalen. Voor de minder elastische bal is er echter geen eenvoudige beschrijving zoals vergelijking 1. Als alternatief kunnen we de volgende aanname doen.

Als voor een bepaalde botssnelheid v_0 de kracht die de kogel ondervindt als functie van de tijd kan worden beschreven als $F_0(t) = f(t)$, dan neemt voor elke andere snelheid v_1 de tijdsafhankelijkheid een vergelijkbare vorm aan en kunnen we de kracht uitdrukken als:

$$F_1(t) = a_1 f(b_1 t) . \quad (2)$$

Benader en plot hoe de interactietijd τ schaalt met de botsingsnelheid v voor botsingen van de minder elastische rubberen bal met een vast oppervlak.

Belangrijke praktische opmerkingen

- Er wordt verwacht dat je schakelschema's aangeeft bij alle elektrische metingen die je doet. Gebruik hierbij de symbolen die zijn weergegeven in Fig. 2.
- Pas op dat je de multimeter niet kortsluit! De opgegeven interne weerstanden gelden alleen voor DC-spanningsmetingen.
- De totale belasting van het piëzo-element mag niet groter zijn dan 100 N
- Om twee draden met elkaar te verbinden, is het aan te raden om ze om elkaar heen te wikkelen en de krokodillenklemmen te gebruiken om de verbinding vast te zetten, zie Fig. 3a.
- De polariteit van de diode is zichtbaar in Fig. 3b.
- Je kunt de hoogte van het ontgrendelmechanisme instellen met de twee schroeven aan de achterkant, zie Fig. 4. Je kan ook de horizontale positie aanpassen door de verticale moer op het ontgrendelmechanisme los te draaien.
- Zorg ervoor dat de stuiterbal niet wegrolt. Je kunt de kans dat de bal je tafel wegrolt minimaliseren door de standaard met het ontgrendelmechanisme tegen een van de muren of in een hoek van je bureau te plaatsen en de liniaal te gebruiken als een andere, transparante muur die is vastgezet met de wasknijper. Als je de bal toch verliest, vraag dan om hulp, **verlaat je plaats niet**.
- Na een bepaalde tijd van inactiviteit begint de multimeter te piepen en na nog een paar minuten schakelt de multimeter uit. Je kunt uitschakeling voorkomen door op een willekeurige knop te drukken.
- Wees je ervan bewust dat sommige delen van je tafel kunnen terugveren onder belasting. Het is verstandig om stabiele delen van je tafel te gebruiken voor het stuiterexperiment.
- Voor de verwerking van een reeks metingen wordt van je verwacht dat je de gegevens plot.
- Alleen die metingen en evaluatiemethoden die de hoogste precisie en nauwkeurigheid leveren, krijgen de volle score. Kies je aanpak dienovereenkomstig en houd daarbij rekening met de precisie van je apparatuur. Er worden echter geen punten toegekend voor het schatten van fouten.
- Bij het meten van gelijkspanningen met de multimeter in een bereik met de kleinste cijferresolutie van δU , kan de onzekerheid δU van de gemeten waarde U worden geschat via:

$$\Delta U = 0.7\% \cdot U + 3 \cdot \delta U . \quad (3)$$

- De interne weerstand van je multimeter in de DC voltmeterstand is afhankelijk van het meetbereik en het modelnummer. In Fig. 5, kan je zien waar je het modelnummer van je voltmeter kan vinden. De volgende tabel geeft de interne weerstanden voor twee meetbereiken en alle modellen.

model nummer(s)	bereik	interne weerstand
alle modellen	2V	11.1 MΩ
UT33B+	200 mV	9.65 MΩ
UT33C+	200 mV	9.91 MΩ
UT33D+	200 mV	9.70 MΩ

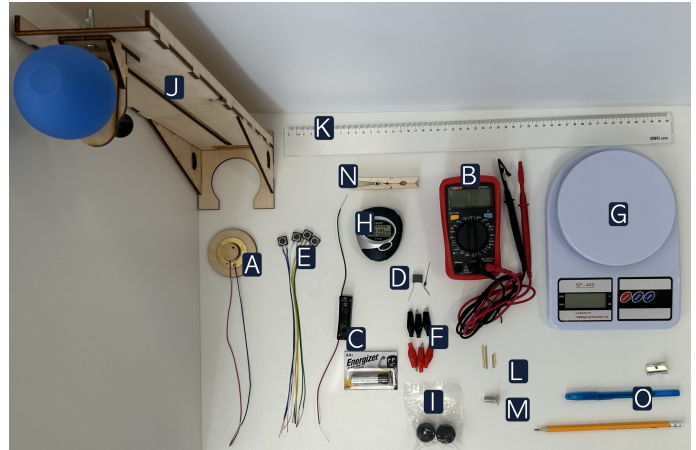


Figure 1: Overzicht van alle materialen die in dit experiment zijn gebruikt.

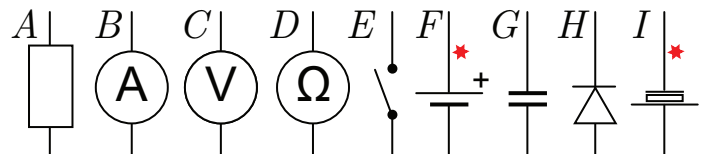
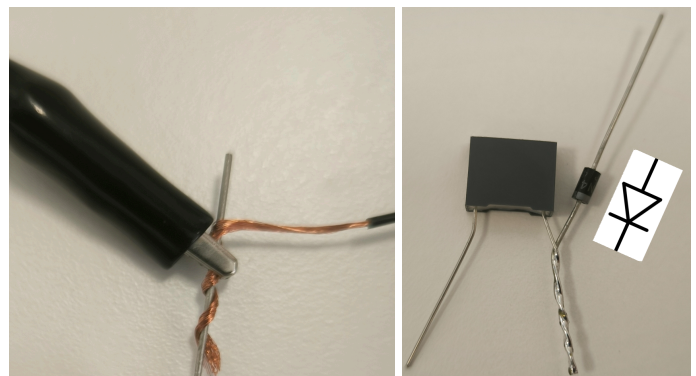


Figure 2: De meest voorkomende circuitsymbolen: **A** - weerstand, **B** - stroommeter, **C** - voltmeter, **D** - ohmmeter, **E** - schakelaar, **F** - batterij, **G** - condensator, **H** - diode, **I** - piezo element. Draden gemarkeerd met een rode ster hebben een rode coating.



(a) Aanbevolen elektrische verbinding met draden die om aan de condensator elkaar heen worden gewikkeld met het schakelsymen worden vastgezet met een bol in de juiste oriëntatie naast de diode geplaatst.

Figure 3: Nuttige opmerkingen over de elektrische componenten.

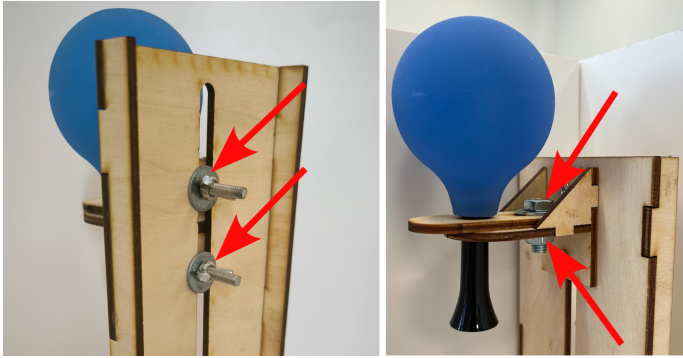


Figure 4: De twee vleugelmoeren aan de achterkant kunnen gemakkelijk worden losgedraaid om het ontgrendelmechanisme verticaal te laten glijden. De verticale moer kan ook worden gebruikt om horizontaal te verstellen.



Figure 5: De rode pijl wijst naar het modelnummer van de multimeter.