

DE BIJZONDERE EIGENSCHAPPEN VAN

PIEZO-ELEKTRISCHE KRISTALLEN

W. WESTERA

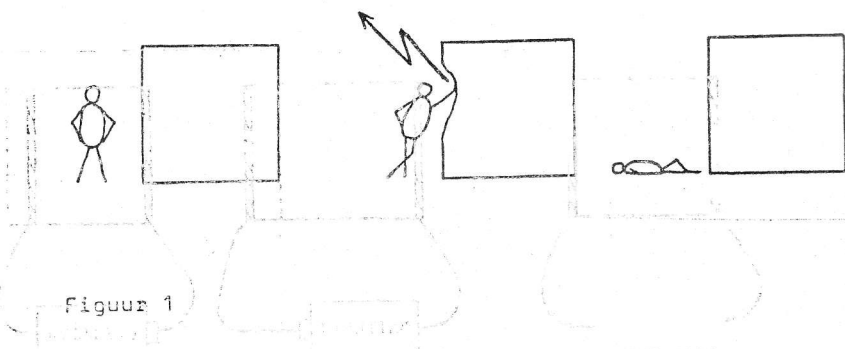
DECEMBER 1981

1. Inleiding

Piëzo-elektrische kristallen worden steeds meer gebruikt in de techniek: in het dagelijks leven vinden we ze bijvoorbeeld terug in sommige gasaanstokers en pick-ups. In dit artikel zullen we bekijken, wat een piëzo-elektrisch kristal is en waar je zo'n kristal voor kunt gebruiken. Tot slot zullen we een heel bijzonder effect bespreken, dat optreedt in een bepaald soort piëzo-elektrische kristallen.

2. Wat zijn piëzo-elektrische kristallen?

Op het eerste gezicht valt er niets bijzonders te ontdekken aan een piëzo-elektrisch kristal.



figuur 1

Maar als we een beetje tegen zo'n piëzo-elektrisch kristal aan duwen, blijkt, dat er een elektrische spanning kan ontstaan. Hoe harder we duwen, des te hoger wordt die elektrische spanning. De grootte van de kristallen is in figuur 1 een tikkeltje overdreven.

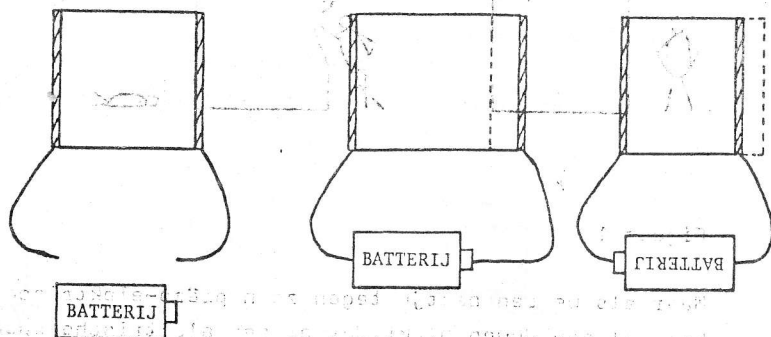
In de praktijk zijn de gebruikte piëzo-elektrische kristallen niet veel groter dan pakweg 1 cm³. De elektrische spanningen, die dan kunnen ontstaan, zijn zo klein, dat ze ongevaarlijk zijn.

We weten dus: in een piëzo-elektrisch kristal heeft een mechanische vervorming een elektrische spanning tot gevolg.

Dit effect wordt dan ook wel het "piëzo-elektrisch effect" genoemd, een naam, die we zelf wel hadden kunnen bedenken.

Enkele voorbeelden van piëzo-elektrische kristallen zijn kwarts en cadmiumsulfide.

In piëzo-elektrische kristallen blijkt ook het omgekeerde proces mogelijk te zijn: door een elektrische spanning kan het kristal vervormd worden. In figuur 2 zien we een piëzo-elektrisch kristal, waarop 2 metalen kontaktjes zijn aangebracht. Door de 2 draadjes te verbinden met een batterij kunnen we een elektrische spanning over het kristal zetten.



Figuur 2

Het kristal wordt dan wat langer (vervorming) of, als

we de spanning ómpolen, korter. In figuur 2 hebben we wel weer een beetje overdreven: in de praktijk worden de kristallen maar een heel klein beetje, langer of korter (dat zou op de tekening niet te zien zijn).

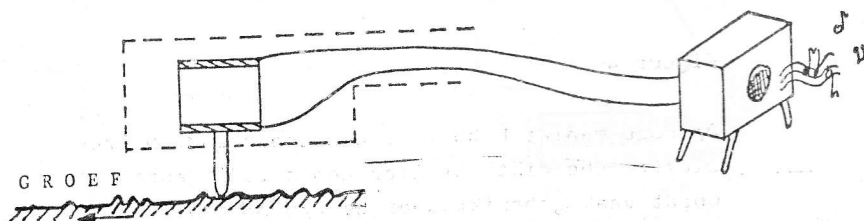
De naam voor dit omgekeerde piëzo-elektrisch effect hadden we wel zelf kunnen bedenken: het wordt het "omgekeerde piëzo-elektrisch effect" genoemd.

3. Waar kunnen we piëzo-elektrische kristallen voor gebruiken?

Tegenwoordig wordt er in de techniek steeds meer gebruik gemaakt van piëzo-elektrische kristallen. Hier volgen een paar voorbeelden.

Bekend uit het dagelijks leven is de piëzo-elektrische gasaansteker. Door te knijpen wordt een piëzo-elektrisch kristal vervormd; de ontstane elektrische spanning wordt gebruikt om een vonk te maken (door kortsluiting), die er voor zorgt, dat het gas gaat branden. In zo'n gasaansteker zijn vuursteentjes overbodig.

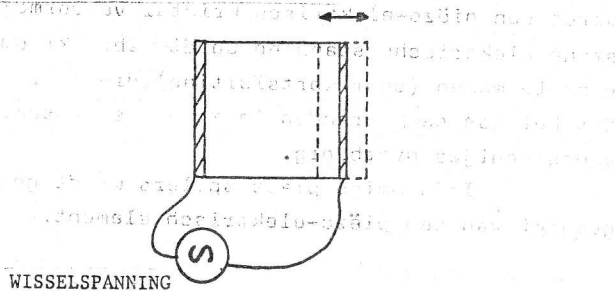
In sommige platenspelers wordt gebruik gemaakt van een piëzo-elektrisch element.



Figuur 3

Een naald geeft de trillingen, die hij in de groef van een grammofoonplaat voelt, door aan een piëzo-elektrisch kristal. Het kristal zal de mechanische trillingen omzetten in elektrische signalen, die vervolgens via een versterker naar een luidspreker kunnen worden geleid.

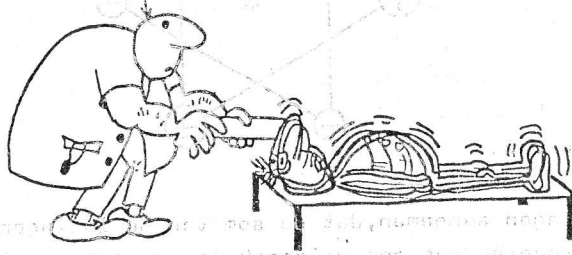
Voor het volgende voorbeeld gaan we nog even terug naar figuur 2. We hebben gezien, dat we met een batterij een piëzo-elektrisch kristal langer kunnen maken. Door de batterij vervolgens om te keren kunnen we het kristal ook korter maken. Dat ompolen van de spanning gaat automatisch, als we wisselspanning gebruiken in plaats van een batterij. Het piëzo-elektrisch kristal zal dan gaan trillen met dezelfde frequentie (= aantal trillingen per tijdseenheid) als de wisselspanning. Dus als we de wisselspanning sneller laten wisselen, dan zal het kristal ook sneller gaan trillen.



Figuur 4

Op deze manier hebben we een zogenaamde piëzo-elektrische dikte-triller gemaakt. Dit apparaat wordt vaak gebruikt door de fysiotherapeut bij de behandeling van letsel aan pezen, spieren en banden. De dikte-triller wordt dan tegen het gekwetste

lichaamsdeel gedrukt en geeft zijn trillingen door aan het weefsel. De trillingen zorgen voor een verbetering van de bloedcirculatie, waardoor de genezing versneld wordt.

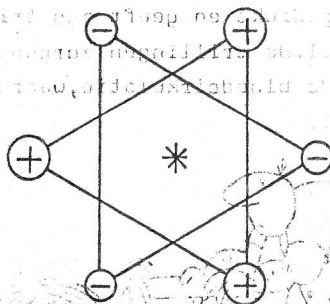


Figuur 5

De frequentie van de gebruikte wisselspanning is meestal zó hoog (800.000 trillingen per seconde (Hertz)), dat we deze geluidstrillingen niet met ons oor kunnen waarnemen. Ons oor kan slechts trillingen waarnemen tot een frequentie van maximaal 20.000 Hertz. De fysiotherapeut spreekt daarom niet over geluidstrillingen, maar over ultra-geluidstrillingen (of ultrasone trillingen). De piëzo-elektrische dikte-triller is een voorbeeld van het omgekeerde piëzo-elektrische effect.

4. Waar komt het piëzo-elektrisch effect vandaan?

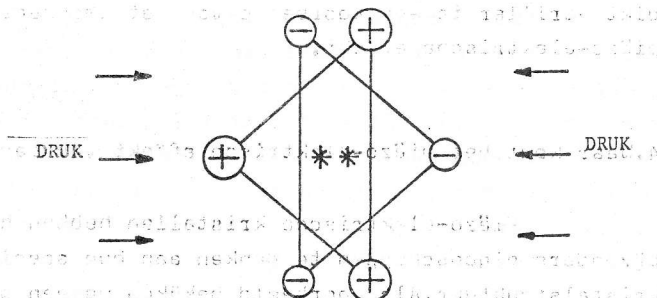
Piëzo-elektrische kristallen hebben hun bijzondere eigenschappen te danken aan hun speciale kristalstructuur. Als voorbeeld bekijken we een piëzo-elektrisch kristal, dat is opgebouwd uit twee elementen (bijvoorbeeld cadmiumsulfide). Het kristal bestaat uit een rooster van positief geladen deeltjes (cadmium-ionen) en een rooster van negatief geladen deeltjes (zwavel-ionen). In figuur 6 staat zo'n kristal-rooster schematisch afgebeeld.



Figuur 6

We mogen aannemen, dat de som van de ladingen in de hoekpunten van een driehoek in het zwaartepunt gekoncentreerd is. Als er geen druk op het kristal wordt uitgeoefend, vallen de zwaartepunten van de twee driehoeken precies samen (aangegeven met een sterretje). In dit geval zal er geen elektrische spanning zijn, omdat de positieve en negatieve ladingen elkaar opheffen.

Als er nu, van opzij, druk wordt uitgeoefend op het kristal, dan verandert het kristalrooster zódanig van vorm, dat de zwaartepunten van beide driehoeken niet meer precies samenvallen.



Figuur 7

De positieve en negatieve ladingen heffen elkaar nu niet meer op. Tussen het ene zwaartepunt en het andere is nu een elektrisch veld ontstaan, dat een elektrische spanning tot gevolg heeft. We zien dus, dat in dit kris-

tal een mechanische vervorming een elektrische spanning tot gevolg heeft. Dit kristal is dus piëzo-elektrisch.

5. Wat is temperatuur?

Om te begrijpen, wat er in een piëzo-elektrisch kristal kan gebeuren, is het nodig, dat we het begrip temperatuur eens wat nauwkeuriger bekijken.

Bij een temperatuur van 0 Kelvin (-273° Celsius) staan alle molekulen stil. Dit is één van de eerste dingen, die we op school leren over natuurkunde. Bij temperaturen groter dan 0 Kelvin staan de molekulen in een kristal een beetje te trillen: bij een hoge temperatuur trillen ze harder dan bij een lage temperatuur. Het begrip temperatuur is dus eigenlijk niets anders dan een maat voor de gemiddelde trillingsenergie van de molekulen. De trillingen zijn in het algemeen tamelijk willekeurig en onafhankelijk.

Als een molekuul staat te trillen betekent dit, dat het kristal op die plaats voortdurend een klein beetje vervormd wordt. Deze trillingen kunnen zich door het kristal voortplanten en vormen dan een soort geluidsgolven. De frequenties van die golven zijn meestal veel te hoog om door ons oor waargenomen te kunnen worden. Een zich voortplantende trilling door het kristal kunnen we vergelijken met de verstoring van bijvoorbeeld een wateroppervlak: als we een steen in het water gooien ontstaat er ter plaatse een verstoring van het evenwicht, die zich zal voortplanten in de vorm van een watergolf.

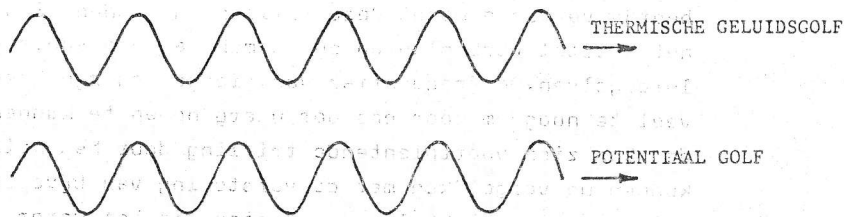
In een kristal zullen dus altijd (tenzij de temperatuur toevallig precies 0 Kelvin is) geluidsgolven aanwezig zijn. Omdat deze geluidsgolven met de temperatuur te maken hebben, noemen we ze thermische geluidsgolven. De voortplantingssnelheid is gelijk aan de geluidssnelheid.

Wanneer de temperatuur van een kristal, groter is dan 0 Kelvin, trillen de molekulen voortdurend. Deze trillingen planten zich voort met de geluidssnelheid.

Wat heeft dit verhaal over het begrip temperatuur nu met piëzo-elektrische kristallen te maken?

We hebben al gezien, dat thermische geluidsgolven er voor zorgen, dat een kristal voortdurend een beetje vervormd wordt. Als het kristal piëzo-elektrisch is, dan zullen die vervormingen elektrische spanningkjes in het kristal tot gevolg hebben. We hebben ook al gezien, dat die vervormingen zich voortplanten met de geluidssnelheid. Dat betekent, dat de elektrische spanningen zich ook met de geluidssnelheid voortplanten. Iedere thermische geluidsgolf heeft dus een elektrische spanningsgolf tot gevolg. Zo'n elektrische spanningsgolf noemen we een potentiaal-golf.

We weten dus: in een piëzo-elektrisch kristal ontstaan potentiaalgolven, die veroorzaakt worden door thermische geluidsgolven.



Figuur 8: Relatie tussen thermische geluidsgolven en elektrische spanningen in een piëzo-elektrisch kristal.

Helaas zullen we, in het algemeen niet zoveel van dit bijzondere effect merken, omdat de opgewekte elektrische spanningen erg klein zijn. In één van de volgende hoofdstukken zullen we zien, dat dit kleine effect grote gevolgen heeft voor een bepaald soort piëzo-elektrische kristallen: de piëzo-elektrische halfgeleiders.

6. Isolatoren, geleiders en halfgeleiders

Als de elektronen in een kristal vast zitten aan de molekulen, spreken we van een elektrische isolator; in een elektrische isolator kan geen elektrische stroom lopen. Plastic is een goede isolator en wordt vaak gebruikt bij elektriciteitskabel. Kwarts is een voorbeeld van een isolator, die bovendien piezo-elektrisch is.

In sommige materialen kunnen de elektronen vrij tussen de molekulen door bewegen. Deze vrije elektronen zorgen ervoor, dat elektrische stroom heel goed geleid wordt. Deze materialen worden dan ook elektrische geleiders genoemd. Alle metalen (koper, zilver, ijzer enzovoorts) horen tot de geleiders. Ter vergelijking: koper geleidt 10^{20} keer zo goed als kwarts (10^{20} = honderdmiljardmiljard). Het is heel moeilijk om een elektrische spanning over een geleider te zetten, omdat die spanning onmiddellijk verdwijnt door kortsluiting. Geleiders zijn daarom in het algemeen niet piezo-elektrisch.

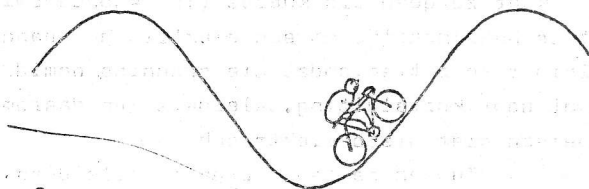
Tussen de isolatoren en geleiders bevindt zich een tussengroep, de halfgeleiders (men had ze ook half-isolatoren kunnen noemen). We spreken van een halfgeleider, als er een beperkt aantal vrije elektronen aanwezig is: genoeg vrije elektronen om elektrische stroom te geleiden en te weinig vrije elektronen om elektrische spanningen kort te sluiten. Deze definitie van halfgeleider is eigenlijk nog niet volledig, maar een nauwkeuriger definitie hebben we voor dit verhaal niet nodig.

We weten dus: in een halfgeleider kan elektrische spanning bestaan én kan elektrische stroom lopen.

Halfgeleidende materialen worden gebruikt in transistors, zonnecellen en chips. Een voorbeeld van een halfgeleidend materiaal is silicium, dat van zand gemaakt wordt. Cadmiumsulfide is een halfgeleider, die bovendien piezo-elektrisch is.

7. Piëzo-elektrische halfgeleiders

Zoals we al eerder zagen, zijn in een piëzo-elektrisch kristal altijd potentiaalgolven aanwezig ten gevolge van thermische geluidsgolven. Als het kristal bovendien halfgeleidend is, is er een beperkt aantal vrije elektronen aanwezig. De vrije elektronen zien de potentiaalgolven en zullen daarop reageren: zij zullen bij voorkeur in de potentiaalminima gaan zitten (we zien even af van het teken van de potentiaal). Iedereen, die wel eens in een heuvelachtig landschap heeft gefietst, weet, dat een fiets, evenals een elektron, geneigd is in een potentiaalminimum (een dal) te gaan zitten. Het gaat dan niet om elektrische potentiaal, maar om "zwaartekrachten" potentiaal.



Figuur 9

Gelukkig voor de vrije elektronen zijn de potentiaaldalen van thermische geluidsgolven niet zo erg diep, zodat de elektronen gemakkelijk uit zo'n potentiaaldal kunnen ontsnappen. We zullen daarom niet zoveel merken van de wisselwerking tussen de thermische geluidsgolven en de vrije elektronen. Anders wordt dat, als we een elektrisch veld aanleggen. De snelheid van de elektronen blijkt ongeveer evenredig te zijn met de grootte van het aangelegde elektrische veld. Dus, bij een klein elektrisch veld hebben de vrije elektronen een kleine snelheid, bij een groot elektrisch veld is de snelheid groot. Als we er nou voor zorgen, dat de snelheid van de elektronen groter is dan de geluidssnelheid, dan worden de thermische golven steeds ingehaald door elektronen. Door de wisselwerking krijgen de thermische geluidsgolven steeds een duwtje van de elektronen.

("Wisselwerking" betekent eigenlijk hetzelfde als "botsing").

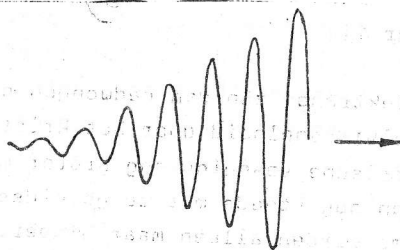
Als je wisselwerking met een lantarenpaal hebt gehad, betekent het, dat je er tegen op bent gebotst!)

Al die duwtjes van al die elektronen zorgen ervoor, dat de geluidsgolf steeds meer energie krijgt. Dat betekent niet, dat de geluidsgolf steeds harder gaat; dat kan niet, omdat een geluidsgolf zich per definitie met de geluidssnelheid voortplant. Wat wél gebeurt, is, dat de trillingsuitwijking steeds groter wordt. Anders gezegd: de thermische geluidsgolf wordt versterkt.

We weten dus: als het aangelegde elektrische veld in een piezo-elektrische halfgeleider groot genoeg is, om ervoor te zorgen, dat de elektronen harder gaan dan de geluidsgolven, dan kunnen de geluidsgolven versterkt worden.

Een dergelijk soort versterking van thermische geluidsgolven kan alléén maar plaats vinden in piezo-elektrische halfgeleiders. Dit versterkingseffekt wordt het elektro-akoestisch effect genoemd (sommigen zeggen ook wel akoestoelektrisch effect).

In figuur 10 is de versterking van een thermische geluidsgolf schematisch weergegeven: naarmate de golf verder door het kristal loopt, wordt de trillingsuitwijking steeds groter.



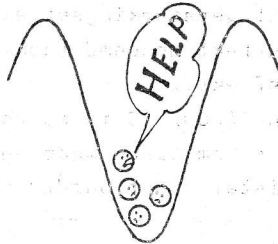
Figuur 10

Het blijkt, dat niet alle thermische geluidsgolven geschikt zijn, om op deze manier versterkt te worden. In de praktijk blijken in het bijzonder de golven met frequenties van 10^9 Hertz (één miljard) of nog iets hoger zeer goed te worden versterkt. Met behulp van dit elektro-akoestisch effect zijn we dus in staat om heel sterke geluidstrillingen te

maken van heel hoge frequenties. Dit is van belang voor het onderzoek van bijvoorbeeld de geluidsvoortplanting bij deze hoge frequenties in allerlei andere stoffen. Gevone piëzo-elektrische dikte-trillers zijn bij deze hoge frequenties onbruikbaar.

8. Gevolgen van het elektro-akoestisch effect

Tot slot gaan we in op enkele gevolgen van het elektro-akoestisch effect. We hebben al gezien, dat elektronen het liefst in de potentiaalminima, behorend bij thermische geluidsgolven, willen gaan zitten. Als de thermische geluidsgolven flink versterkt worden, dan zullen de bijbehorende potentiaalminima óók steeds dieper worden. Op een gegeven moment zijn de potentiaalminima zó diep geworden, dat de elektronen er niet meer uit kunnen.



Figuur 11

De elektronen zijn dan gedwongen om evenals de golven met de geluidssnelheid door het kristal te reizen. Als we de elektrische spanning nog groter maken, dan bewegen de elektronen nog steeds met de geluidssnelheid, want de potentiaalminima worden alleen maar dieper. D.w.z. de elektrische stroom blijft konstant, ook al verhogen we de spanning. Dat is heel bijzonder, want meestal is de elektrische stroom recht evenredig met de elektrische spanning (dat is de wet van Ohm). De wet van Ohm geldt hier dus niet meer; in dit geval spreken we van stroomverzadiging.

Een tweede gevolg is het ontstaan van kleine veranderingen in de elektrische stroom, ofwel "ruis" in de

stroom. We hebben tot nu toe steeds gesproken over één thermische geluidsgolf, die versterkt wordt. In werkelijkheid zijn er een heleboel thermische geluidsgolven, allemaal met verschillende frequenties, voortplantingsrichtingen en trillingsuitwijkingen. Het zal regelmatig voorkomen, dat een potentiaalminimum plotseling verdwijnt, omdat het toevallig wordt opgeheven door een maximum van een andere potentiaal-golf. In dat geval kunnen de gevangen elektronen ontsnappen en zijn weer vrij. Omdat vrije elektronen harder gaan dan het geluid, zal de elektrische stroom een klein beetje toenemen. Een tijdje later zal op een willekeurige andere plaats in het kristal toevallig weer eens een minimum ontstaan. Elektronen zullen daarin gaan zitten, waardoor de stroom weer wat afneemt. Het voortdurend ontstaan en verdwijnen van potentiaalminima zorgt ervoor, dat de stroom voortdurend "ruist".

Door de stroomverzadiging en stroomruis nauwkeurig te onderzoeken, kan meer inzicht worden verkregen in de fysische processen, die met het elektro-akoestisch effect te maken hebben.