

Het ontwerp, de realisatie en de beproeving van een hoogspanningspulsbron met piezo-kristallen

Citation for published version (APA):

Pisters, F., & van Heesch, B. (1991). *Het ontwerp, de realisatie en de beproeving van een hoogspanningspulsbron met piezo-kristallen*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1991

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Het ontwerp, de realisatie
en de beproeving van een
Hoogspanningspulsbron met
piezo-kristallen

door: Frank Pisters
 EH.91.A.116 HBO

*De faculteit Elektrotechniek van de
Technische Universiteit Eindhoven
aanvaardt geen verantwoordelijkheid
voor de inhoud van stage- en
afstudeerverslagen.*

Afstudeeropdracht verricht o.l.v.:

dr.ir. E.J.M. van Heesch

Summary

'Piezo electricity' is a fundamental process of electromechanical interaction. The piezo-electric effect finds wide application in the electrical and mechanical engineering fields.

At the TU-Eindhoven, Faculty of Electrical Technology, High-Voltage Group, a method to use PXE-crystals as a triggersource for a GIS (Gas Insulated Swithgear) is being worked out.

By means of PXE-crystals a high voltage is generated to create a small discharge which starts up the main discharge in the GIS setup.

In this report the design of a high-voltage puls source using PXE41-crystals can be found. One of the main reasons to design such a new puls source was to improve generating the driving force and to make it possible to describe the behaviour of the system by formulas. For the mechanical force we use a spring-mass system.

In this report we give a complete theoretical description of the mechanical system, important formulas, an easy way to measure the velocity and a reasoned choice of materials.

With respect to the use of this high-voltage pulse source in other applications, it should be known how the pulse source reacts on resistive and capacitive loads.

Finally in the description of the electrical system, reactions on loads and forces of the PXE41-crystals can be found.

Samenvatting

'Piezoelektriciteit' vormt een belangrijke schakel tussen het mechanische en elektrische gebied. Ze vindt daarom ook veel toepassing op het gebied van de elektromechanica. Op de TU-Eindhoven, faculteit der Elektrotechniek, vakgroep Hoogspanningstechniek gebruikt men een dergelijke PXE-stack voor het triggeren van een Gis (Gas Insulated Switchgear).

Met behulp van de PXE-kristallen wordt een hoogspanning gegenereerd die via een lokale triggerontlading zorgt voor het opgang komen van de hoofdstroom.

In dit verslag zal een nieuw ontwerp worden gegeven voor deze hoogspannings-triggerbron die gebruikt wordt voor de ontsteking van de Gis-Installatie.

Een vereiste is dat de pulsbron gemakkelijk in te stellen is en dat het gedrag van het systeem eenvoudiger te beschrijven moet zijn dan bij de oorspronkelijke versie.

Daarom gebruiken we als krachtbron een massaveer-systeem.

Als spanningsbron gebruiken we de PXE41 kristallen van Philips.

In dit verslag vindt men een complete beschrijving van het mechanische gedeelte met de bijbehorende relevante formules, een eenvoudige manier om de snelheid te meten en een beargumenteerde keuze van de gebruikte materialen.

Omdat de generator ook voor andere doeleinden gebruikt moet kunnen worden, is er onderzoek gedaan naar het gedrag van de gegenereerde spanning voor verschillende capacatieve en resatieve belastingen. In de beschrijving van het elektrische gedeelte zal hieraan een belangrijk gedeelte gewijd zijn, alsmede over het getoonde gedrag van de kristallen voor verschillende uitgeoefende krachten.

Uit het onderzoek is gebleken dat het door ons ontworpen massaveersysteem prima voldoet aan de vooraf gestelde eisen en het systeem inderdaad eenvoudig met formules te beschrijven is.

Voorwoord

In de periode van augustus 1990 tot en met mei 1991 ben ik bezig geweest met de afstudeeropdracht bij de vakgroep EHO van de technische universiteit Eindhoven. In deze periode heb ik me bezig gehouden met onderzoek , ontwerp en de realisatie van een Hoogspannings-pulsbron.

Langs deze weg wil ik alle medewerkers van de vakgroep EHO bedanken voor hun medewerking en adviezen.

Woorden van dank vooral aan: dhr. Prosselle, werkzaam aan de faculteit der Werktuigbouw, dhr. van Gompel en van Heesch voor de vruchtbare discussies en de hulp bij het ontwerp, dhr. Colson, werkzaam bij Philips Eindhoven, voor de excursie en het beantwoorden van de vele vragen op het gebied van de fabricage van de PXE-kristallen. Verder wil ik dhr van Venroij hartelijk danken voor de begeleiding en het mogelijk maken van deze afstudeerperiode aan de TUE.

Inhoud

Summary

Samenvatting

Voorwoord

| | | |
|----------------|---|-----------|
| 1 | Inleiding | 1 |
| 2 | Piezoxyde | 2 |
| 2.1 | De polarisatie van de PXE-kristallen | 2 |
| 2.2 | Depolarisatie van de kristallen | 5 |
| 2.2.1 | Mechanische depolarisatie | 5 |
| 2.2.2 | Thermische depolarisatie van het kristal | 6 |
| 2.2.3 | Elektrische depolarisatie van het kristal | 6 |
| 2.3 | De spanningsconstante | 7 |
| 3 | Het ontwerp | 9 |
| 3.1 | De aan het ontwerp gestelde eisen | 9 |
| 3.2 | Theoretisch ontwerp | 10 |
| 3.2.1 | Het botsen van twee lichamen | 10 |
| 3.2.2 | De minimale pulstijd | 13 |
| 3.2.3 | De snelheid en versnelling van de hamer | 15 |
| 3.2.3.1 | Het hamerveersysteem | 15 |
| 3.2.3.2 | Het aambeeldveersysteem | 18 |
| 3.2.4 | De maximale optredende kracht op de kristallen | 20 |
| 3.2.5 | De bepaling van de veerconstante van het aambeeldveersysteem | 22 |
| 3.2.6 | Maximale toelaatbare indrukking van het hamerveersysteem | 22 |
| 4 | De meetresultaten | 24 |
| 4.1 | De bepaling van de polariteit van de kristallen | 24 |
| 4.2 | Het meten van de snelheid | 25 |
| 4.3 | De meting van de gegenereerde elektrische spanning | 28 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 4.4 | Verschillende veren bij een massagelijkheid | 32 |
| 4.4.1 | De snelheid van de hamer als functie van de indrukking van de bronzen veer | 32 |
| 4.4.2 | De elektrische spanning als functie van de indrukking van de bronzen veer | 34 |
| 4.5 | De grijze veer met massagelijkheid en een kristaldoorsnede van 10 mm | 39 |
| 4.5.1 | De snelheid van de hamer als functie van de indrukking van het hamerveersysteem | 39 |
| 4.5.2 | De elektrische spanning als functie van de indrukking van het hamerveersysteem | 40 |
| 4.6 | De bronzen veer met massagelijkheid en een kristaldoorsnede van 16 mm | 42 |
| 4.6.1 | De snelheid van de hamer als functie van de indrukking van het hamerveersysteem | 42 |
| 4.6.2 | De elektrische spanning als functie van de indrukking van het hamerveersysteem | 43 |
| 4.7 | De bronzen veer met een kristaldoorsnede van 10 mm en een massa-ongelijkheid | 45 |
| 4.7.1 | De snelheid van de hamer als functie van de indrukking van het hamerveersysteem | 45 |
| 4.7.2 | De elektrische spanning als functie van de indrukking van het hamerveersysteem | 47 |
| 4.8 | Het belasten van de kristallen | 48 |
| 4.9 | Het stapelen van de kristallen | 53 |
| 5 | Conclusies | |
| 6 | Literatuurlijst | |
| | bijlagen | |

Aantal bijlagen: 4

Mijn afstudeerperiode van de Hogeschool Heerlen, sector techniek, afstudeerrichting energietechniek, vond plaats aan de TU-Eindhoven, faculteit der Elektrotechniek, vakgroep Hoogspanningstechniek en bestond uit het ontwerpen, realiseren en beproeven van een hoogspanningspulsbron, die een spanning opwekt doordat er druk uitgeoefend wordt op piezokristallen.

De piezo-kristallen genereren bij een mechanische belasting een elektrische ladingsverschuiving, die evenredig is met de mechanische druk. De ontdekkers van dit effect waren (in het jaar 1880) Jacques en Pierre Curie.

In de vakgroep was al onderzoek gedaan naar een inrichting om de mechanische druk die op de kristallen moet worden uitgeoefend, op te wekken met een hefboom.

Deze hefboom leverde echter een statische druk op.

Uit dat onderzoek bleek dat de opgewekte lading, mogelijk als gevolg van de kleine RC-tijd van de kristallen, weglekte voordat men de topwaarde van de mechanische druk bereikte.

De gemeten elektrische spanningswaarden waren dan ook vrij klein.

Men ontdekte dat het beter was een dynamische mechanische druk op de kristallen uit te oefenen. Voor het uitoefenen van de dynamische mechanische druk gebruikte men een luchtdruk-cilinder. Nadeel hiervan was dat de maximale toelaatbare mechanische druk niet gehaald kon worden omdat de opgewekte hamersnelheid niet groot genoeg was. Verdere nadelen waren de moeilijke beschrijving van het systeem met formules en de moeilijke instelling van de hamersnelheid.

Op dit punt was dus al vast komen te staan dat het nieuw te ontwikkelen systeem makkelijk moest zijn te beschrijven, een dynamische druk moest uitoefenen en de maximale toelaatbare dynamische mechanische druk moest kunnen uitoefenen.

Overleg met de faculteit der werktuigbouw leverde een massaveersysteem op.

Nu vast was komen te staan welk systeem werd gebruikt kon worden begonnen met de bestudering van de verschillende aspecten die komen kijken bij het ontwerp van dit systeem zoals: botsingen, materialen, responsies van massaveersystemen en natuurlijk niet te vergeten het gedrag van de kristallen onder dynamische mechanische druk.

Piezo-elektrische materialen, kortweg PXE genoemd, vormen de interactie tussen het mechanische en elektrische werkgebied. We treffen de PXE-kristallen aan op de vreemdste plaatsen, zoals bijvoorbeeld in de DTF (Dynamic tracking Following) van een videorecorder of gasaanstekers voor huishouden en bedrijf, maar ook PXE pompen en motoren behoren tot de toepassingsmogelijkheden. De nieuwste ontwikkeling is een microscoop, die door middel van een zeer dunne naald het te onderzoeken voorwerp aftast en via PXE-kristallen de variaties in de oppervlakte omzet in elektrische signalen.

De toepassingsmogelijkheden zijn nog lang niet uitgeput.

De grote voordelen van de PXE-kristallen zijn de atmosferische en chemische inertie en de grote hardheid van de kristallen. Verder is de opgewekte lading van deze kristallen, bij gelijke mechanische druk op het kristal, vele malen grootter dan de opgewekte lading bij quartz-kristallen.

Voorwaarde voor het verkrijgen van de piezo-elektrische eigenschappen is de asymmetrische kristal opbouw (er is geen symmetriepunt aan te wijzen in het kristal).

Wie de kristalstructuur en natuurkundige kant van het materiaal iets dieper wil bestuderen, wordt naar de vele lectuur die op dit gebied is verschenen verwezen.

Voor het maken van de kristallen wordt als grondstof voornamelijk de oxyden van lood en titaan gebruikt. Door toevoeging van andere stoffen, kan men een zo optimaal mogelijk PXE-materiaal verkrijgen. Het meest toegepaste PXE-materiaal (op dit moment) is het bariumtitanaat. Dit ruwe materiaal wordt in een rubberen mal, in elke gewenste vorm, hydrostatisch geperst. De zo verkregen vormen bezitten nog niet de piezoelektrische eigenschappen.

2.1 De polarisatie van de PXE-kristallen

Om het kristal de piezo-elektrische eigenschappen te geven, moeten we de geperste en gedroogde cilinders (of andere vormen), verwarmen tot boven de curietemperatuur en daarna in een sterk elektrisch veld brengen. Na ongeveer 3 minuten, laat men de kristallen weer afkoelen tot de gewone omgevingstemperatuur. We noemen dit traject het polariseren van de kristallen. In figuur 1 is het gehele traject nog eens grafisch uitgezet.

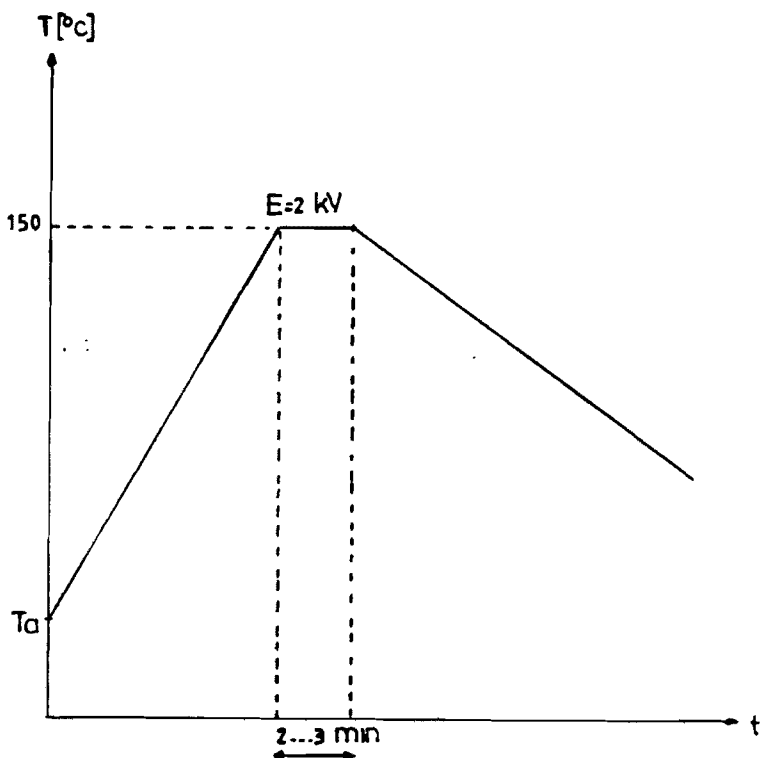


fig. 1 : Polarisatieproces van de kristallen

Het ongepolariseerde kristal bezit dipolen die willekeurig gericht zijn. De totale som van de dipoolmomenten van een ongepolariseert kristal zal nul zijn. Gaat men het kristal polariseren, dan zullen, als gevolg van de temperatuursverhoging en de inwerking van het sterke elektrische veld (boven de curietemperatuur), de dipolen een bepaalde richting aannemen. Hierbij zijn de dipolen zo gericht dat de positieve zijde van de dipolen naar de negatieve zijde van het elektrisch veld wijzen. Gaan we het kristal weer afkoelen, dan zal het kristal in een permanente toestand terecht komen, waarbij de dipolen iets verdraaien, maar de som van de verschillende dipoolmomenten toch in een richting positief is. In de literatuur wordt deze toestand aangeduid met 'remanente toestand'.

In figuur 2 is getracht dit nog eens te verduidelijken.

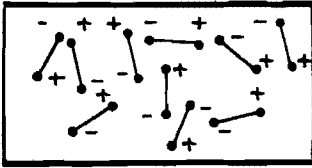


fig 2a: Dipolenbeeld voor polarisatie van het kristal.

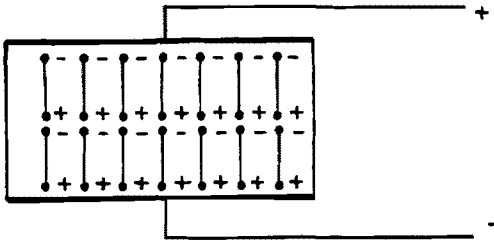


fig 2b: Door het aanbrengen van een extern veld, richten de dipolen zich in een bepaalde richting.

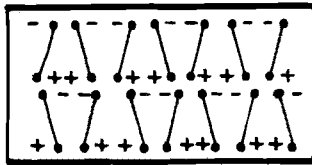


fig 2c: Na afkoeling komt het kristal in een permanente toestand terecht.

fig. 2 Het dipolenbeeld voor, tijdens en na het polariseren.

2.2

Depolarisatie van de kristallen

Polarisatie van de kristallen kan teniet gedaan worden door depolarisatie.

Depolarisatie kan diverse oorzaken hebben en is meestal een ongewenst verschijnsel.

Bij depolarisatie verliezen de dipoolmomenten in het kristal de door ons gegeven richting en zal het totale dipoolmoment afnemen of zelfs nul worden.

Wil men depolarisatie voorkomen dan zal men enige grenzen moeten stellen aan het werkgebied waarbinnen de kristallen mogen worden gebruikt.

De grootheden waaraan we de grenzen moeten toekennen zijn:

- De maximale mechanische druk op het kristal .
- De werktemperatuur.
- Het maximale elektrische veld door de kristallen.

2.2.1

Mechanische depolarisatie

Depolarisatie maakt zich kenbaar als bij het uitoefenen van een kracht op het kristal, geen of ongekend kleine spanningen en ladingen optreden.

Kijken we nu naar het dipoolplaatje dan zal dit het beeld van figuur 2a vertonen.

In sommige gevallen is het de bedoeling om eenmalig alle lading en dus ook de maximale spanning uit het kristal te halen.

In figuur 3 zijn de maximale toelaatbare waarden opgegeven van de mechanische druk die op het kristal mag worden uitgeoefend.

Omdat wij gebruik gaan maken van een schietinrichting hebben we dus te maken met de dynamische maximale toelaatbare mechanische druk.

Voor PXE41 kristallen bedraagt deze $125 \text{ MPa} = 125 \text{ N/mm}^2$.

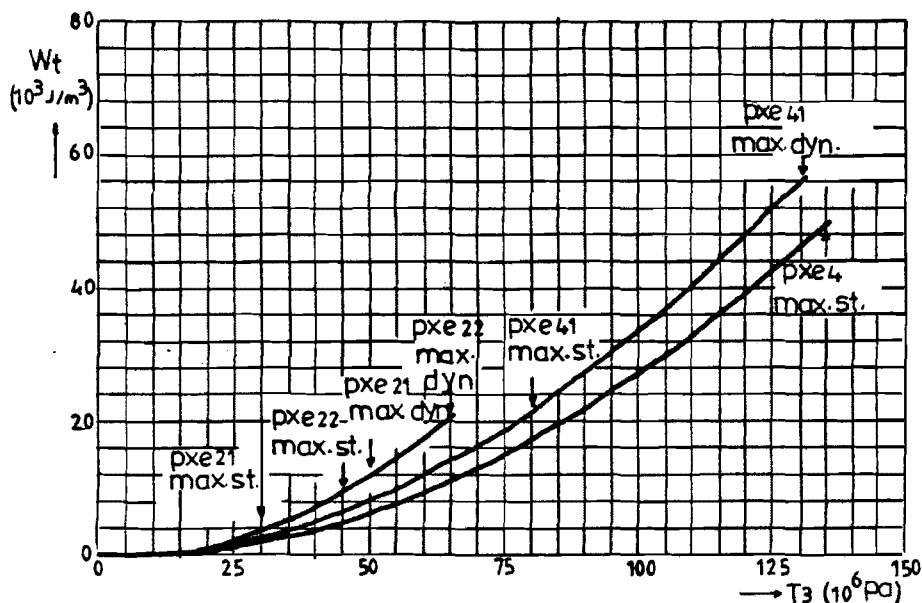


Fig. 3 Grafiek waarin de maximale toelaatbare mechanische druk staat aangegeven voor diverse kristallen, met W_t = elektrische energiedichtheid in het kristal en T_3 is de mechanische druk op het kristal in richting 3 (zie bladzijde 7)

2.2.2 Thermische depolarisatie van het kristal

Verhogen we de temperatuur tot boven de curietemperatuur, dan zal het kristal spontaan depolariseren. Het zal de permanente toestand waarin het kristal verkeerde verlaten. Het temperatuursgebied waarbinnen gewerkt mag worden is:

$$0^\circ \text{ C} < T < T_{\text{curie}}.$$

Volgens de fabrikant kan het kristal veilig worden gebruikt midden tussen de twee uitersten in.

2.2.3 Elektrische depolarisatie van het kristal

Legt men een te sterk elektrisch veld aan over het kristal, tegengesteld aan de polarisatie-richting, dan zal het kristal de permanente toestand eveneens verlaten.

De grootte die het aangelegde elektrische veld daarvoor moet hebben, hangt af van de tijd, temperatuur en het soort elektrisch veld (wisselend of gelijkgericht).

Voor een statisch veld ligt deze waarde in het algemeen tussen de 500 en 1000 V/mm.

2.4

De spanningsconstante van het kristal

De spanningsconstante is de verhouding tussen de veldsterkte en de mechanische spanning. Met de spanningsconstante kan de opgewekte elektrische spanning over het kristal berekend worden.

Voor de absolute veldsterkte geldt:

$$E = g * P$$

met g = spanningsconstante [kVmm/N]
 P = mechanische druk [Pa= n/mm^2]
 E = veldsterkte [kV/mm]

Om de opgewekte spanning te bepalen, moeten we dus de veldsterkte vermenigvuldigen met de lengte:

$$U = E * l$$

met U = elektrische spanning [kV]
 l = lengte van het kristal [mm]

Voeren we de mechanische druk dus lineair op, dan zal de opgewekte elektrische spanning ook lineair toenemen.

Voor een PXE41-kristal geldt een spanningsconstante van : $g_{33} \approx 25,2 * 10^{-3} \text{ Vm/N}$.

De index 33 geeft de richting aan waarin de veldsterkte wordt opgewekt en de mechanische druk wordt aangelgd.

Voor de vastgelegde richtingen moeten we figuur 4 bekijken.

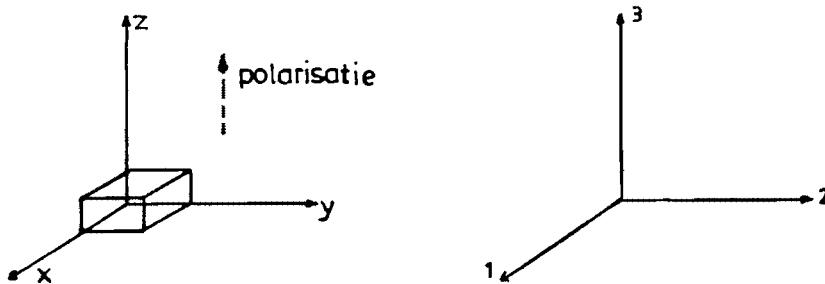


fig. 4 Assenstelsel dat aangeeft welke index de verschillende constanten dragen.

**g31 zou bijvoorbeeld betekenen: Aangelegde mechanische spanning heeft de richting 1
Opgewekt veldsterkte heeft de richting 3**

**g33 betekend dan: Aangelegde mechanische spanning heeft richting 3
Opgewekte veldsterkte heeft ook de richting 3**

3 Het ontwerp

3.1 De aan het ontwerp gestelde eisen

Om een ontwerp te maken voor de pulsbron, moeten we een aantal eisen stellen aan het ontwerp. De eisen volgen uit de theorie en uit eerder gemaakte ontwerpen. Vervolgens zullen we een constructie moeten zoeken die het best voldoet aan alle door ons gestelde eisen.

De eisen waaraan het ontwerp moet voldoen zijn:

- Eenvoudig te bedienen
- Compact van opbouw en toch robuust
- Meerdere malen te gebruiken
- Goede instelling van de botskracht moet mogelijk zijn

We kunnen nu een constructie zoeken die het best voldoet aan de eisen.

Een mogelijkheid is een slinger met gewicht. Hij is eenvoudig te bedienen, meerdere keren te gebruiken, maar om de gewenste kracht te bereiken is er een te grote slinger nodig. De instelling van de botskracht vergt veel rekenwerk.

Een massaveer-systeem gebruik makend van een spiraalveer (stempelveer), kan gemakkelijk bediend worden, is compact van opbouw en toch robuust te maken, kan meerdere malen gebruikt worden en de instelling van de botskracht is gemakkelijk.

Er zijn nog meerdere mogelijkheden onderzocht, waaronder:

- Luchtdrukgeweer, waarbij een loden prop met een zeer hoge opgebouwde luchtdruk op het kristal wordt geschoten.
- Bladveren die met behulp van een nokkenas worden gespannen en dan op de kristallen slaan.

Het massaveersysteem met een spiraalveer voldoet het beste aan de gestelde eisen.

We hebben dus een systeem gevonden, waaraan we nog enige aanvullende eisen moeten stellen, te weten:

- Snelheid die de massa moet kunnen bereiken moet minimaal instelbaar zijn tot 14 m/s.
- Snelheid moet eenvoudig te bepalen zijn, liefst vooraf.

Om een definitief ontwerp te kunnen maken moeten we de verschillende onderdelen theoretisch uitdiepen.

3.2 Theoretisch ontwerp

Voordat we overgaan op een definitief ontwerp van het massaveersysteem, zullen we nog enige aspecten van het systeem moeten uitdiepen.

3.2.1 Het botsen van twee lichamen

Tijdens de botsing zullen krachten optreden die afhankelijk zijn van een aantal door ons te kiezen gegevens en parameters, te weten:

- Materiaal.
 - Vorm van de botsende lichamen.
 - Botsingssnelheid.
 - Massa van de botsende lichamen.
 - Hoe raken de lichamen elkaar op het moment van botsen.
- } elasticiteit

Ter vereenvoudiging zullen we aannemen dat we te maken hebben met een centrale botsing. Alle formules die hier gepresenteerd worden zullen dan ook betrekking hebben op een dergelijke botsing. Hoe we dit in de praktijk zullen realiseren, komt later aan de orde. Verder moeten we een onderverdeling maken naar vorm van de botsing.

We onderscheiden de volgende vormen:

- Volkomen onveerkrachtige botsing ---> volkomen onelastische botsing :

Er zal steeds vervorming optreden, die volledig blijft bestaan na de botsing. De kinetische energie die in de massa is gestopt, zal volledig gebruikt worden als vervormings-energie. Een voorbeeld is het gooien van een kluit klei tegen een muur.

- Gedeelteilijk veerkrachtige botsing :

Na de botsing zal een gedeelte van de veroorzaakte vervorming blijven bestaan. Er zal dus maar een gedeelte van de kinetische energie gebruikt worden als vervormings-energie.

- Volkomen veerkrachtige botsing $\equiv \equiv \equiv$ > vol elastische botsing :

Alle kinetische energie die opgeslagen is in de massa wordt teruggegeven.

Er zal dus geen energie verloren gaan ten behoeve van de vervorming. Een voorbeeld van een dergelijke botsing is een botsing van twee hard stalen bollen.

Omdat dit soort botsing zeer geschikt is voor het ontwerp van ons massaveer-systeem, zullen we deze iets dieper uitsplitten.

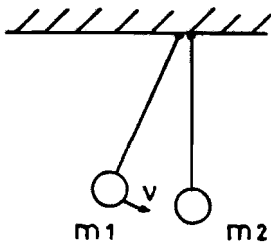


fig. 5 Rechte centrale botsing van twee hard stalen bollen met massa's m_1 en m_2 .

Stelt men de energievergelijking op van het systeem dan geldt hier:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 \{v_1'\}^2 + \frac{1}{2} m_2 \{v_2'\}^2 \quad (1)$$

Hierbij zijn v_1' en v_2' de snelheden van de massa's na het botsen.

Hoe groot moeten we de massa's m_1 en m_2 maken ?

Het antwoordt op deze vraag is wederom een vraag, deze luidt: ' Wat willen we ?'.

Het antwoordt op die vraag is beduidend eenvoudiger, immers we hoeven maar naar de specificaties te kijken.

Volgens de specificaties wil men een zo hoog mogelijke spanning opwekken met een zo klein mogelijke stijgtijd.

Om op de eerste vraag terug te komen, kiezen we de massa's $m_1=m_2=m$ en onderzoeken theoretisch wat er gebeurt met de bollen.

Om de energievergelijking op te kunnen lossen heeft men nog een tweede vergelijking nodig.

De tweede vergelijking vinden we in de wet van behoud van impuls.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (2)$$

Gaan we uit van massagelijkheid en dat bol 2 stilhangt voor het botsen dan volgt dat:

$$v_1^2 = v_1'^2 + v_2'^2 \quad (1')$$

$$v_1 = v_1' + v_2' \quad (2')$$

Uit deze twee vergelijkingen volgt na enig rekenwerk dat: $v_1' = 0$ en $v_2' = v_1$

Resumerend kan men dus zeggen dat bij gelijke massa's, in ons geval dus de hamer en de kristallen, maximale energie-overdracht plaatsvindt. Dit zal dus resulteren in een maximale spanning bij een zo klein mogelijke pulsduur.

Gebruiken we een rechte cilinder als hamer met $m_{\text{hamer}} = m_{\text{kristal}}$, en botst de hamer schuin op de kristallen, dan zal een kant van de kristallen sterk onderhevig zijn aan mechanische spanningen terwijl de andere zijde bijna niet belast wordt. Wordt de mechanische druk op de rand van het kristal te groot, zal deze kant afbrok-, kelen, wat natuurlijk niet de bedoeling kan zijn. We willen een maximale elektrische spanning en een minimale stijgtijd van de elektrische spanning hebben, wat bij een niet centrale schuine botsing een probleem is.

Een oplossing voor het onevenredig belasten van het kristal is het aanbrengen van een aambeeld aan de hamerkant van het kristal. Hiermee is aan het verkrijgen van een centrale botsing nog niet voldaan. Ten gevolge van speling tussen de hamer en geleiders zal de hamer eerder bij toeval als bij regel recht op het kristal slaan. Een oplossing voor dit probleem is het verkleinen van het raakvlak van de hamer, net zoals bij de twee kogels, we maken het hameroppervlak bol. Men moet de hamer dan wel zeer sterk harden, omdat alle druk op een klein oppervlak wordt uitgeoefend. Omdat de hamer niet alleen hard maar tevens taal moet blijven, is gekozen voor een oppervlakte harding met behulp van zwavel of koolstof (4%) van het C15-staal.

3.2.2 De minimale pulstijd

De minimaal mogelijke pulstijd van de elektrische spanning wordt gegeven door de voortplantingstijd van de mechanische drukgolf door het kristal.

Op het moment van botsen wordt het kristal in elkaar gedrukt. Er gaat zich op dit moment een verdikkingsdruk golf door het kristal voortbewegen. Aan het einde van het kristal reflecteerd de verdikkingsgolf en loopt terug in de vorm van een verdunningsdruk golf. Aan de voorkant van het kristal aangekomen reflecteerd de verdunningsdruk golf weer en het proces herhaalt zich weer totdat de drukgolven zijn uitgedempt.

Hieronder is in figuur 6 getracht het proces van reflecties toe te lichten.

Hoe dichter de gradatie van het lijnenpatroon, hoe groter de mechanische druk op die plaats is.

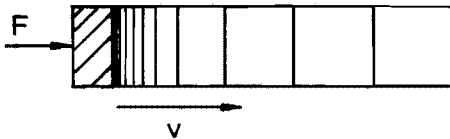


Fig. 6a Op het moment van botsen ontstaat een verdikkingsgolf, die zich naar het einde van het kristal voortplant.

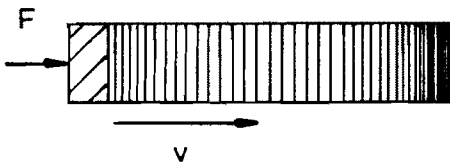


Fig. 6B De verdikkingsgolf reflecteerd aan het einde van het kristal. De golf loopt nu terug in de vorm van een verdunningsgolf

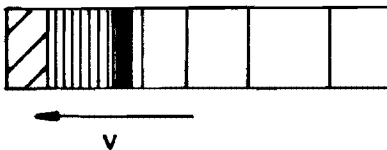


Fig. 6C Het proces van reflectie zal zich nog enige malen herhalen.

De minimale mogelijke stijgtijd (0-100%) van de elektrische spanning kunnen we bepalen met de door de fabrikant opgegeven parameters.

We gebruiken daarbij de volgende formule:

$$t_{\text{stijg}} = \frac{l}{C}$$

met: C = akoestische voortplantings-
snelheid [m/s]

l = lengte kristal-stack [m]

Voor de PXE41-kristallen (C=3400 m/s) met een stacklengte van 80 mm, geldt dan een minimale stijgtijd van 24 μ s.

Wil men naar kortere stijgtijden, dan zal men moeten kiezen voor een lagere elektrische spanning (minder kristallen stapelen) of dezelfde elektrische spanning waarbij de kristallen niet meer gestapeld worden, maar mechanisch parallel worden geschakeld.

Deze laatste oplossing draagt uiteraard bij tot een zeer complexe mechanische inrichting van het hamerveersysteem en de PXE-houder.

Bij de constructie van de PXE-houder moet men er rekening mee houden dat de kristallen langer en korter worden. We moeten ervoor zorgen dat de kristallen enige bewegingsvrijheid hebben. Hier dient zich echter weer een nieuw probleem aan. De kristallen kunnen gaan zweven in de PXE-houder, waardoor er vonken tussen de kristallen onderling en tussen de kristallen en de elektroden kunnen ontstaan. Daarom vindt men in ons ontwerp ook een spiraalveer terug die de kristallen aandrukt.

Deze drukveer heeft verder de gunstige eigenschap dat hij de levensduur van de kristallen vergroot.

3.2.3 De snelheid en versnelling van de hamer

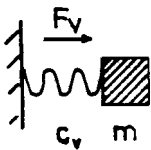
Om na te gaan hoe de verschillende veren, de fictieve veer in het aambeeld en de reele veer achter de hamer, zich gedragen voor en tijdens de botsing zullen we een afleiding moeten maken voor de snelheid en de versnelling van de hamer.

We stellen daarom een krachtenbalans op, eerst voor het hamer-veersysteem en daarna voor het aambeeld-veersysteem'.

3.2.3.1 Het hamerveersysteem

Voordat we de responsie bepalen van het hamerveersysteem, moeten we weten waar- door dit systeem wordt gevormt.

De veer van dit systeem wordt gevormd door een spiraalveer met een veerconstante C_h [N/mm]. De massa m_h [kg] wordt gevormt door verschillende onderdelen en is de som van de massa's m_h van de veerschotel, de hamer en de veer.



We houden in ons model geen rekening met de wrijvingsverliezen, omdat ze zeer klein zijn en voor een goed begrip van het systeem op het moment van botsen niet nodig zijn.

fig. 7 Masaveersysteem

Voordat we een krachtenbalans kunnen opstellen, moeten we eerst in een assen- stelsel vastleggen wat een positieve en wat negatieve beweging is.



x_{0h} is de begin-indrukking van de veer op $t=0$ en is dus negatief volgens onze definitie.

fig. 8 Polariteit van de bewegingen

De krachtenbalans van het systeem luidt nu: $F_{\text{versnelling}_h} = -F_{\text{veer}_h}$

$$m_h \ddot{x}_h = -C_h x_h$$

De index h geeft aan dat we het over het hamerveersysteem hebben.

Staat er dus x_h in de tekst dan is dit de verplaatsing van de massa van het hamerveersysteem.

Om tot een oplossing te komen proberen we: $x_h = a \cos \omega_h t + b \sin \omega_h t$

$$\dot{x}_h = -a \omega_h \sin \omega_h t + b \omega_h \cos \omega_h t$$

$$\ddot{x}_h = -a \omega_h^2 \cos \omega_h t - b \omega_h^2 \sin \omega_h t$$

Vullen we deze uitdrukkingen in, dan volgt: $\frac{\omega_h^2 m_h}{C_h} = 1$ oftewel: $\omega_h = \sqrt{\frac{C_h}{m_h}}$

Op het moment $t=0$ is de veer X_{0h} in negatieve zin ingedrukt, vullen we dit in dan vinden we:

$$-X_{0h} = a$$

Uit de eerste afgeleide van de x_h kunnen we b oplossen, er geldt namelijk dat de snelheid $v_h(t=0) = 0$ m/s.

Vullen we dit in dan geldt:

$$0 = -b \omega_h \rightarrow b = 0$$

De oplossing is dus:

$$x_h(t) = -X_{0h} \cos \omega_h t \quad \text{met } \omega_h = \sqrt{\frac{C_h}{m_h}}$$

$$v_h(t) = X_{0h} \omega_h \sin \omega_h t$$

$$a_h(t) = X_{0h} \omega_h^2 \cos \omega_h t$$

In figuur 8 zijn de responsies grafisch weergegeven.

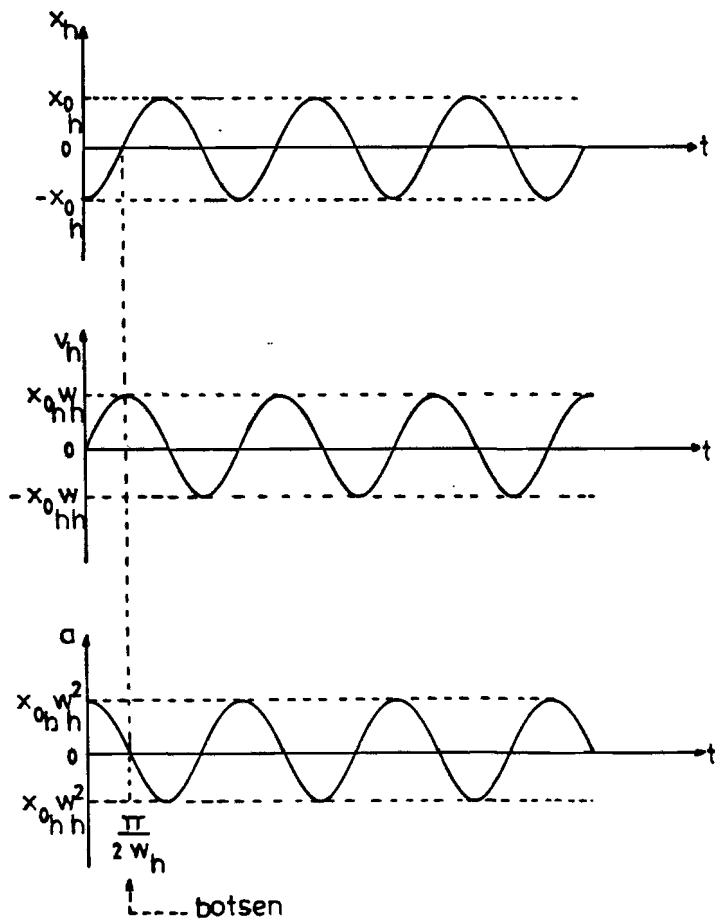


Fig. 9 Responsies van het hamerveersysteem

Ontwerpen we ons toestel zodanig dat we op het moment van botsen de maximale snelheid hebben ($\hat{v} = \omega X_0$), dan zal de tijd die nodig is van $-X_0$ (per definitie de beginindrukking van de veer) tot $x=0$ (het moment van botsen), $t = \pi/2\omega_h$ bedragen.

3.2.3.2 Het aambeeldveersysteem

Het veersysteem bestaat hier uit het aambeeld en de kristallen, waarbij de massa eveneens wordt gevormd door het aambeeld en de kristallen. Als we uitgaan van de centrale volkomen elastische botsing, waarbij geen energie verloren gaat ten gevolge van de deformatie van het materiaal, kunnen we dezelfde benaderingswijze toepassen als voor het hamerveersysteem. Omdat echter de randvoorwaarden verschillen leiden we de formules nogeens beknopt af.

Als we uitgaan van een centrale vol elastische botsing, waarbij we weer voldoen aan de massagelijkheid wat betreft het aambeeldveersysteem en het hamerveersysteem, dan zal de kinetische energie die in het hamerveersysteem opgeslagen is, op het moment van botsen worden doorgegeven aan het aambeeldveersysteem.

Dan geldt dus eveneens dat de snelheid op het moment van botsen wordt doorgegeven.

Het aambeeldveersysteem bevindt zich voor het botsen altijd in de nulstand.

Wat betreft het teken van de beweging, nemen we aan dat

wanneer dit systeem wordt ingedrukt, dit een positieve beweging is.

De krachtenbalans luidt dan:

$$F_{\text{versnelling } a} = - F_{\text{veer } a}$$

$$m_a \ddot{x}_a = - C_a x_a$$

De index a geeft hier aan dat we te maken hebben met het aambeeldveersysteem.

Zo is C_a de veerconstante van het aambeeldveersysteem.

De algemene oplossing van deze vergelijking luidt:

$$x_a = d \cos \omega t + e \sin \omega t \quad \text{met: } \omega = \sqrt{\frac{C_a}{m_a}}$$

Op $t=0$ (het moment van botsen) geldt dat $x_a(t=0)=0$ meter, invullen levert $d=0$

Differentiëren we de afstand naar de tijd dan vinden we de snelheid:

$$\dot{x}_a(t) = e \sqrt{\frac{C_a}{m_a}} \cos \omega t$$

Omdat op $t=0$ (het moment van botsen) geldt dat de snelheid wordt doorgegeven (bij gelijke massa's) vinden we:

$$V_h^* = e \sqrt{\frac{C_a}{m_a}} \quad \rightarrow \quad e = V_h^* \sqrt{\frac{m_a}{C_a}}$$

Vullen we dit in dan vindt men als oplossing:

$$\begin{aligned} x_a(t) &= V_h^* \sqrt{\frac{m_a}{C_a}} \sin \omega_a t & \text{met } \omega_a &= \sqrt{\frac{C_a}{m_a}} \\ v_a(t) &= V_h^* \cos \omega_a t \\ a_a(t) &= -V_h^* \sqrt{\frac{C_a}{m_a}} \sin \omega_a t \end{aligned}$$

V_h^* is de snelheid die het hamerveersysteem bezit op het moment van botsen.

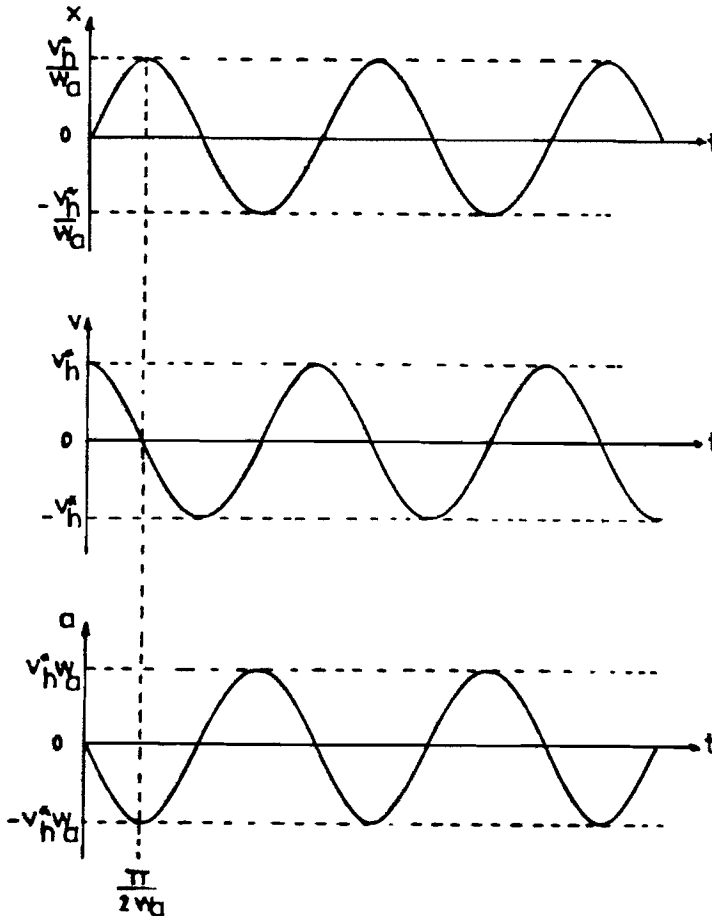


Fig. 10 Responsies van het aambeeldveersysteem.

Gaat men weer uit van de randvoorwaarden waarbij gelijke massa's aanwezig zijn, dan zal het hamerveersysteem op het moment van botsen zijn snelheid en kinetische energie doorgeven aan het aambeeldveersysteem. Het hamerveersysteem zal theoretisch op het moment van botsen ophouden met bewegen. In de praktijk zal het hamerveersysteem echter nog enige tijd blijven natrillen.

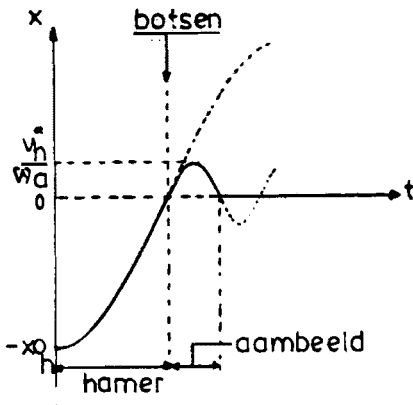


fig.11 Het wisselen van de responsies bij het botsen

De eigenfrequentie ω_a van het aambeeldsysteem zal veel groter zijn en de verplaatsing veel kleiner dan die van het hamerveersysteem, immers het aambeeldveersysteem bezit een veel grotere veerconstante dan het hamerveersysteem (zie figuur 10).

3.2.4 De maximale optredende kracht op de kristallen

Het is van groot belang om vooraf iets te kunnen zeggen over de maximaal toelaatbare snelheid of de maximaal toelaatbare indrukking van de veer. Een te grote kracht op de kristallen zal immers een gedeeltelijke of gehele depolarisatie van het kristal tot gevolg hebben. Daarom volgt hier een afleiding van een formule waarmee we deze maximale kracht kunnen berekenen. We gaan uit van de gevonden responsies van het aambeeldveersysteem en het hamerveersysteem.

We bekijken als eerste de versnellingsgrafiek van het aambeeldveer-systeem.

Als de absolute versnelling maximaal is wordt de grootste kracht op de kristallen uitgeoefend. Verder weten we dat geldt:

$$\hat{F}_a = m_a * \hat{a}_a$$

Vullen we de absolute topwaarde in van de versnelling van het aambeeldveersysteem, dan geldt:

$$\hat{F}_a = v_h * \sqrt{m_a c_a}$$

Uit de responsie van het hamerveersysteem kunnen we nu de uitdrukking voor v_h halen. Deze v_h is de snelheid van de hamer op het moment van botsen en zal dus in ons geval gelijk zijn aan de topwaarde \hat{v}_h van die snelheid. Nu geldt:

$$\hat{F}_a = X_{o_h} \omega_h \sqrt{m_a c_a}$$

of

$$\hat{F}_a = \hat{v}_h \sqrt{m_a c_a}$$

formule 1:

De maximale toelaatbare mechanische druk die op de PXE41-kristallen mag worden uitgeoefend kan uit de grafiek op bladzijde 6 worden afgelezen.

Deze bedraagt voor een dynamische uitgeoefende mechanische druk: 125 Mpa = 125 N /mm².

Men kan nu de maximale kracht berekenen met de formule:

$$\hat{F} = \hat{P} * A$$

Voor PXE41-kristallen met een doorsnede van 10 mm bedraagt de maximale toelaatbare kracht dan:

$$\hat{F}_{mt} = 9817,5 \text{ N}$$

en voor kristallen met een doorsnede van 16 mm :

$$\hat{F}_{mt} = 25132,74 \text{ N}$$

Omdat we nu de maximale toelaatbare kracht op kristallen weten, dus eigenlijk de maximale toelaatbare kracht die mag optreden in het aambeeldveersysteem, kunnen we aan de hand van de afgeleide responsies en formules de maximale toelaatbare indrukking afleiden. Daarvoor moeten we eerst de veerconstante van het aambeeldveersysteem bepalen, de afleiding is te vinden in paragraaf 3.2.6 op bladzijde 24.

3.2.5 De bepaling van de veerconstante van het aambeeldveersysteem

De bepaling van de veerconstante doen we indirect, aan de hand van de meting van de periodetijd van de spanning. Uitgangspunt is een ongedempt tweede orde systeem, waarvoor geldt dat de eigenfrequentie $\omega_0 = 2\pi/T$.

Om de periode T te bepalen, meten we de uitgangsspanning van de kristallen na het aanstoten van de kristallen door de hamer.

Zorg hierbij dat de uitgeoefende mechanische druk op de kristallen niet de maximale toelaatbare mechanische druk overschrijdt.

We nemen als voorbeeld de bronzen veer met $C_h = 110,3 \text{ N/mm}$ met een hamermassa van $m_h = 30 \text{ gr}$ en een aambeeldkristal-massa $m_a = 30 \text{ gr}$.

De gemeten periodetijd van het aambeeldveersysteem T_a bedroeg gemiddeld $105,6 \text{ } \mu\text{s}$.

Nu geldt: $\omega_a = 2\pi \cdot (1/105,6 \text{ } \mu\text{s}) = 59,5 \cdot 10^3 \text{ rad/sec}$

Uit de afgeleide responsie volgt dat $\omega_a = \sqrt{C_a / m_a} \rightarrow C_a = 106,2 \cdot 10^6 \text{ N/mm}$

3.2.6 Maximale toelaatbare indrukking van het hamerveersysteem

We kunnen nu ook de maximale toelaatbare indrukking van de spiraalveer berekenen, die aanwezig is in het hamerveersysteem. De rekenvolgorde is al genoemd in paragraaf 3.1.4. We zullen de berekening van de maximale toelaatbare indrukking in zijn geheel uitwerken voor de kristallen met een doorsnede van 10 mm.

We maken weer gebruik van de massagelijkheid van het hamerveersysteem en het aambeeldveersysteem. De spiraalveer die we in de berekening gebruiken, is de bronzen veer met een veerconstante van $C_h = 110,3 \text{ N/mm}$.

We weten dat de maximale toelaatbare kracht in het aambeeldveersysteem voor deze kristal-doorsnede $\hat{F}_{mt} = 9817,5 \text{ N}$ bedraagt.

We kunnen nu de maximale toelaatbare snelheid van de hamer op het moment van botsen berekenen.

$$\hat{F}_{mt} = \hat{v}_h \sqrt{m_a C_a}$$

Voor de gegeven waarden voor m_a en C_a geldt dan: $\hat{v}_h = 5,5 \text{ m/s}$

Voor de maximale toelaatbare snelheid van de hamer op het moment van botsen geldt dan:

$$\hat{v}_h = \hat{X}_o \omega_h \quad \text{met:} \quad \omega_h = \sqrt{\frac{C_h}{m_h}} \quad \text{---->} \quad \hat{X}_o = 2,868 \text{ mm}$$

We kunnen dezelfde rekenwijze volgen voor andere spiraalveren in het hamerveer-systeem en voor grotere doorsneden van kristallen. In tabel zijn de verschillende waarden van de maximale toelaatbare kracht, snelheid en indrukkingen gegeven.

| Kristal doorsnede [mm] | C_h [N/mm] | \hat{F}_{mta} [kN] | \hat{v}_{mth} [m/s] | \hat{X}_o_{mth} [mm] |
|--------------------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 10 | 110,3 | 9.8 | 5,5 | 2,9 |
| 10 | 189,1 | 9.8 | 5,5 | 2,2 |
| 16 | 110,3 | 25.1 | 14,1 | 7,3 |
| 16 | 189,1 | 25.1 | 14,1 | 5,6 |

tabel 1 De maximale toelaatbare waarden

De index mth betekend: Maximale Toelaatbare grootheid van het Hamerveersysteem

4 De meetresultaten

Eerst zullen we, alvorens de resultaten te laten zien, een korte opsomming maken van wat er gemeten is.

- Snelheid als functie van de tijd voor diverse veren en gewichten.
- Elektrische spanning over de kristallen voor diverse veren en gewichten, elektrisch onbelast.
- Elektrische spanning over de kristallen voor een ohmse en capacitieve belasting.
- Elektrische spanning over een toenemend aantal kristallen voor dezelfde mechanische belasting van de kristallen.

We maken bij iedere meting, op de laatste na, gebruik van een stack van 4 PXE-kristallen zonder tussenliggende plaatjes koper. We zullen nu eerst de verschillende meetsystemen behandelen.

4.1 De bepaling van de polariteit van de kristallen

Omdat we gebruik maken van een stapel (stack) kristallen, moeten we de polariteit van de verschillende kristallen vaststellen.

Uit metingen is gebleken dat het niet uitmaakt of de negatieve zijde of de positieve zijde zich vooraan bevindt. De kristallen moeten wel allemaal met dezelfde polariteit in een bepaalde richting gestapeld worden.

Met een multimeter meten we de elektrische spanning over het kristal.

Aan de onderzijde van het kristal bevindt zich een messing blokje, waaraan de eerste meetklem van de multimeter is bevestigd. Met de andere meetpen oefenen we aan de bovenkant druk uit en kijken of de uitslag negatief of positief is.

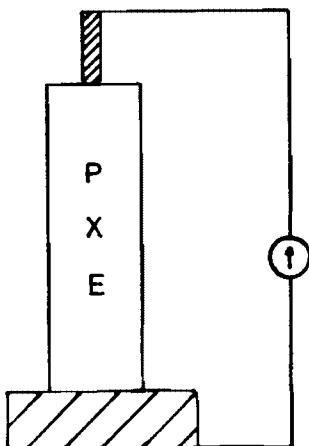


fig.12 Meting van de polariteit

4.2 Het meten van de snelheid

Er zijn verschillende mogelijkheden om de snelheid te meten. Een zeer fraaie en eenvoudige manier is om optisch de verplaatsing per tijdseenheid te meten.

De fotosensor straalt, via een glasvezel, een hoeveelheid licht op het te meten voorwerp. Het licht zal voor een gedeelte gereflecteerd worden (zie figuur 13).

Een fractie van het gereflecteerde licht zal weer via de glasvezel terugkeren naar het meetinstrument. Door nu de verhouding te bepalen tussen het uitgestraalde licht (input) en het weer opgenomen licht (reflectie), kan men een uitspraak doen over de afstand tussen de probe en het voorwerp.

De fotosensor genereert een uitgangsspanning, die afhankelijk is van de verhouding tussen het gereflecteerde licht (dat via de glasvezel weer wordt opgenomen) en het uitgestraalde licht.

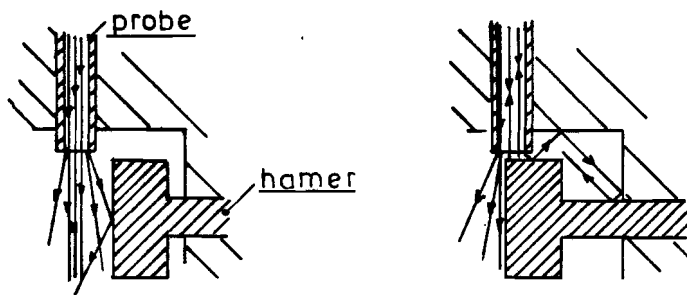


fig. 13 Principe van de fotosensor-meter

De montage van de probe vindt plaats aan de bovenzijde van het 'schiettoestel' in de passchroef. Door de passchroef aan te draaien, wordt de probe vastgeklemd.

De probe moet zodanig ingesteld worden (in de nulstand van het hamerveersysteem), dat het meetinstrument een maximale uitslag geeft.

De fotosensor moet voor iedere veer en ieder extra aangebracht gewicht opnieuw geijkt worden daar de reflectie zal toenemen of afnemen. Achter op de trekker hebben we een micrometer gemonteerd, waarmee we de indrukking van de veer kunnen bepalen. We kunnen nu de fotosensor via een BNC-plug op een oscilloscoop aansluiten.

De fotosensor genereert een uitgangsspanning die afhankelijk is van de afstand (ΔX) tussen de probe en de hamer. Door nu deze spanning via de BNC-plug op de oscilloscoop aan te sluiten, kunnen we de spanning (ΔU) als functie van de tijd (Δt) weergeven.

Omdat de spanning (ΔU) een functie is van de verplaatsing van de hamer (ΔX), kunnen we via deze spanning een uitspraak doen over de snelheid (Δv) van de hamer, immers $\Delta v = \Delta X / \Delta t$.

We moeten dus de gegenereerde uitgangsspanning van de fotosensorijken op de positie van de hamer.

4.2.1 De lijk van de fotosensor voor de bronzen veer met massagelijkheid

Massagelijkheid wil zeggen dat de massa van het hamerveersysteem (verenschotel+hamer+veer) gelijk is aan de massa van het aambeeldveersysteem (aambeeld+kristallen).

Bronzen veer met $C_h = 110,3 \text{ N/mm}$, en $m = m_{\text{hamer}}$

| aanwijzing fotosensor | Uitslag [mm] | aanwijzing oscilloscoop [V] |
|--------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| 100 | 0 | 5 |
| 90 | 0,97 | 4,5 |
| 80 | 1,25 | 4 |
| 70 | 1,41 | 3,5 |
| 60 | 1,60 | 3 |
| 50 | 1,75 | 2,5 |
| 40 | 1,93 | 2 |
| 30 | 2,16 | 1,5 |
| 20 | 2,41 | 1 |
| 10 | 2,70 | 0,5 |

tabel 2

We kunnen die waarden weergeven in een grafiek (zie figuur 14). Voor de gewichten en veerconstanten van de diverse onderdelen verwijs ik naar de lijst van gebruikte apparatuur.

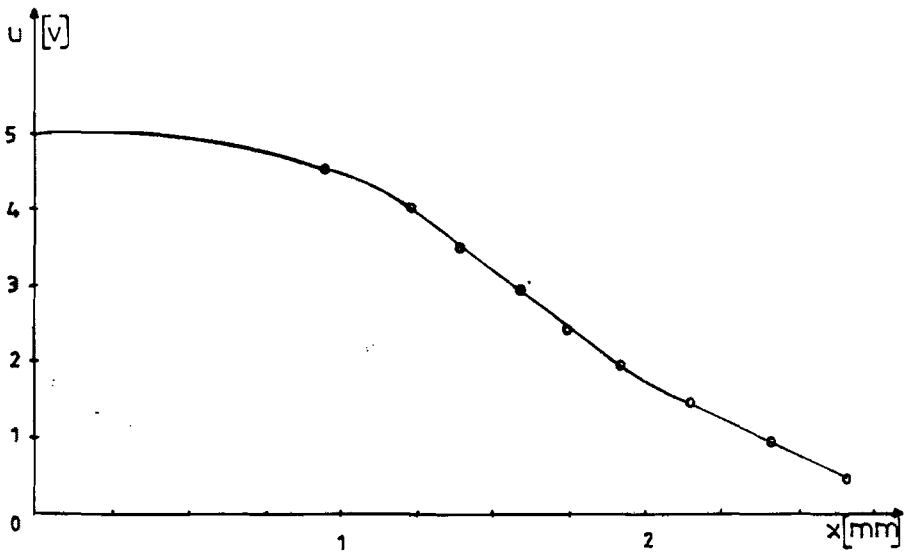


fig. 14 Ijking van de outputspanning van de fotosensor bij een bepaalde positie van de hamer.

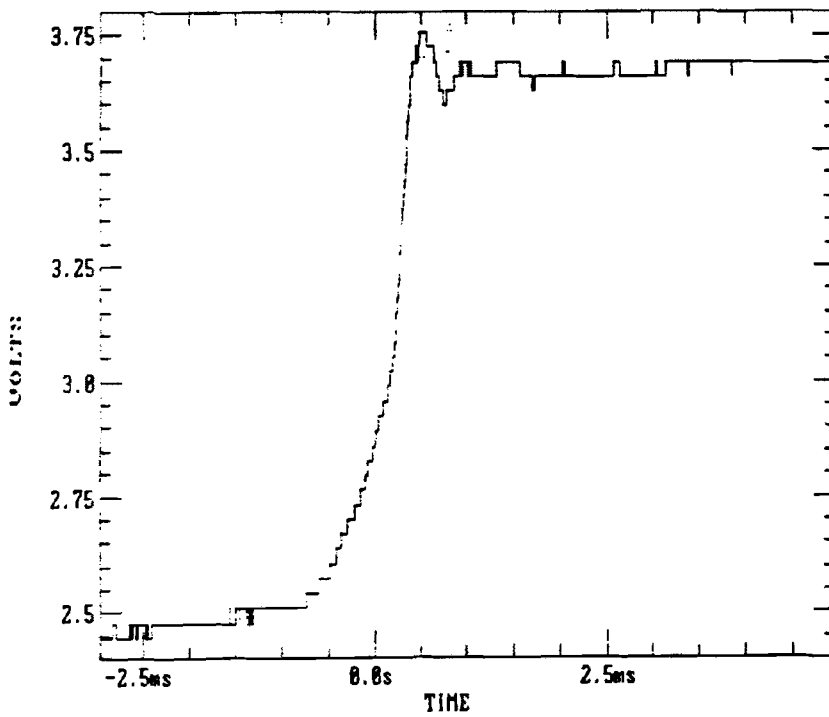


fig. 15 Oscilloscoopbeeld van de output van de fotosensor $u=f(\text{tijd})$

4.3 Meting van de gegenereerde elektrische spanning

Omdat we te maken hebben met een hoge spanning, kunnen we de spanning niet rechtstreeks op de oscilloscoop zichtbaar maken. We maken daarom gebruik van een spanningsdeler, waarbij we aan twee mogelijkheden kunnen denken, te weten:

- Weerstandsdeler
- Capacitieve deler

Omdat de kristallen niet of nauwelijks belast mogen worden, valt de weerstandsdeler af. Men kan een weerstandsdeler gebruiken indien men astronomisch grote waarden voor de weerstanden kiest, daarom hebben we gekozen voor een capacitieve deler.

De deler wordt gevormd door een 'schijf' achter op de PXE-houder en een tweede plaat, die op een toch wel behoorlijke afstand van de eerste plaat is opgesteld.

Om een indicatie te geven van de afstand tussen de platen, moet men weten dat de overslagspanning per cm ongeveer 30 kV bedraagt in lucht.

In de praktijk is die 30 kV overdreven groot omdat we niet te maken hebben met een homogeen veld tussen de platen en omdat de vochtigheidsgraad nogal verschilt per dag.

We nemen derhalve ongeveer 20 kV per cm aan.

Gaan we uit van maximaal 120 kV, dan bedraagt de afstand ongeveer 6 cm.

Om veilig te gaan, stellen we de afstand tussen de platen in op minimaal 10cm.

Nu kan men de waarde van de condensator theoretisch bepalen met de ons alle bekende formule:

$$C = \frac{\epsilon_0 * A}{l} \quad \text{met: } \epsilon_0 = 8,854 * 10^{-12} \text{ F/m}$$
$$A = 1,26 * 10^{-3} \text{ m}^2$$
$$l = 0,108 \text{ m}$$

Rekenen we de waarde van de luchtcondensator uit dan vinden we: $C = 0,10 \text{ pF}$

In figuur 15 is het schema van de capacitieve deler getekend, met de waarden van de verschillende componenten erbij aangegeven en schematisch de ijkmethode.

Om de exacte waarde van de deling te bepalen, zetten we aan de ingang van de deler een sinusvormige spanning. Aan de ingang van de deler meten we de spanning met een weerstandsdeler waarvan de deilverhouding 1/3 bedraagt. Beide signalen, input en output, worden op de oscilloscoop weergegeven. Door de signalen op elkaar te delen verkrijgt men de exacte deilverhouding. Omdat de deling niet in het gehele gebied constant is doorlopen we een gebied van 20kHz....100kHz, waarvan de waarden op de volgende bladzijde zijn gegeven in tabel 3.

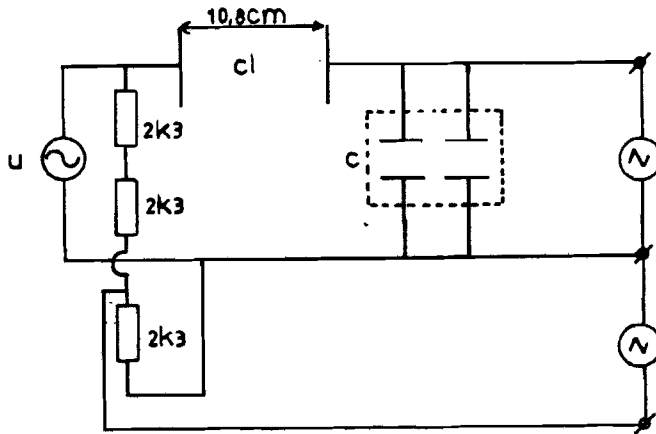


fig. 15 De Ijkmethode en meetopstelling.

| f [kHz] | U _{in} [V] 1 ^o meting | U _{in} [V] 2 ^o meting | U _{uit} [mV] 1 ^o meting | U _{uit} [mV] 2 ^o meting | A · 10 ⁴ 1 ^o meting | A · 10 ⁴ 2 ^o meting |
|---------|--|--|--|--|--|--|
| 20 | 283,8 | 289,8 | 12 | 12 | 2.37 | 2.42 |
| 30 | 259,6 | 265,7 | 11 | 12 | 2.36 | 2.21 |
| 40 | 241,5 | 241,5 | 10 | 11 | 2.42 | 2.20 |
| 50 | 223,4 | 229,5 | 10 | 11 | 2.23 | 2.09 |
| 60 | 217,4 | 217,4 | 10 | 10 | 2.17 | 1.98 |
| 70 | 205,5 | 205,3 | 10 | 11 | 2.05 | 1.87 |
| 80 | 205,5 | 193,2 | 10 | 10 | 2.05 | 1.93 |
| 90 | 181,2 | 181,2 | 10 | 10 | 1.81 | 1.81 |
| 100 | 169,1 | 169,1 | 10 | 10 | 1.69 | 1.69 |

Tabel 3 De gemeten waarden van de spanningsdeling=f(frequentie)

Om enige houvast te krijgen gebruiken we de gemiddelde waarde van alle meetresultaten. Voor de ijkfactor geldt dan: $A=20.7 \cdot 10^3$

Wilt men de exacte waarde van de deling hebben, dan zal men de resitieve spanningsdeler ook over het gehele frequentiegebied moeten nameten. Omdat deze echter zo weinig afwijking vertoont over het gemeten gebied, is deze constant veronderstelt.

Het verdient aanbeveling de condensatorplaatranden niet rechthoekig te maken, omdat op die punten makkelijk coronaverschijnselen kunnen optreden. In ons ontwerp zijn ze daarom ook rond gemaakt.

We kunnen ook theoretisch de deelfactor van het capacitieve netwerk bepalen.

De bepaling verloopt dan als volgt:

$$\frac{U_{\text{uit}}}{U_{\text{in}}} = \frac{C_1}{C_1 + C} = \frac{0,108 \cdot 10^{-12}}{0,108 \cdot 10^{-12} + 18,2 \cdot 10^{-9}} = 6,11 \cdot 10^{-6}$$

Voor de ijkfactor geldt nu dus: $A = 1,63 \cdot 10^5$

We zien dat er een aardig verschil optreedt tussen de gemeten ijkfactor en de berekende ijkfactor. Deze afwijking wordt op de eerste plaats veroorzaakt door de berekening van de luchtcondensator. We maken gebruik van de formule voor twee platen opgesteld op een afstand l . Vanwege de grote afstand tussen de platen met een kleine oppervlakte, kunnen we niet meer spreken van twee platen en moeten we de formule gebruiken voor 2 punten. De condensator zal dus in werkelijkheid veel groter zijn dan de door ons berekende waarde. Om te kijken of dit inderdaad waar is, meten we de condensators na met een RLC-brug.

We meten dan de volgende waarden: $C_1 = 0,53 \text{ pF}$; $C = 16,6 \text{ nF}$

Rekenen we nu opnieuw de ijkfactor uit met de gemeten waarden, dan geeft dit:

$$\text{Ijkfactor } A = 31 \cdot 10^3$$

We komen dan toch aardig in de buurt van de gemeten ijkfactor.

Kijken we naar de periodetijd T van de over de kristallen gemeten elektrische spanning, dan zal die minimaal $96 \mu\text{s}$ kunnen bedragen (zie paragraaf 3.2.2).

Voor de maximale signaalfrequentie f_{max} geldt dan: $f_{\text{max}} = (1/T) = 10,5 \text{ kHz}$

We zitten dus altijd onder het door ons gemeten frequentiegebied.

Vanwege problemen met de door ons gebruikte spanningsversterker kon echter niet gemeten worden in het frequentiegebied onder de 20 kHz .

Omdat de capacitieve deler belast wordt met een weerstand van $1 \text{ M}\Omega$ (ingangsweerstand van de oscilloscoop), zal de ijkfactor niet in het gehele frequentiegebied constant zijn

Aan de overdrachtsfunctie is te zien dat de ijkfactor, voor frequenties die ruim boven de kantelfrequentie liggen (> 10 Hz), constant verondersteld kan worden.

We zetten nu de gemeten waarden uit in een grafiek (zie figuur 16).

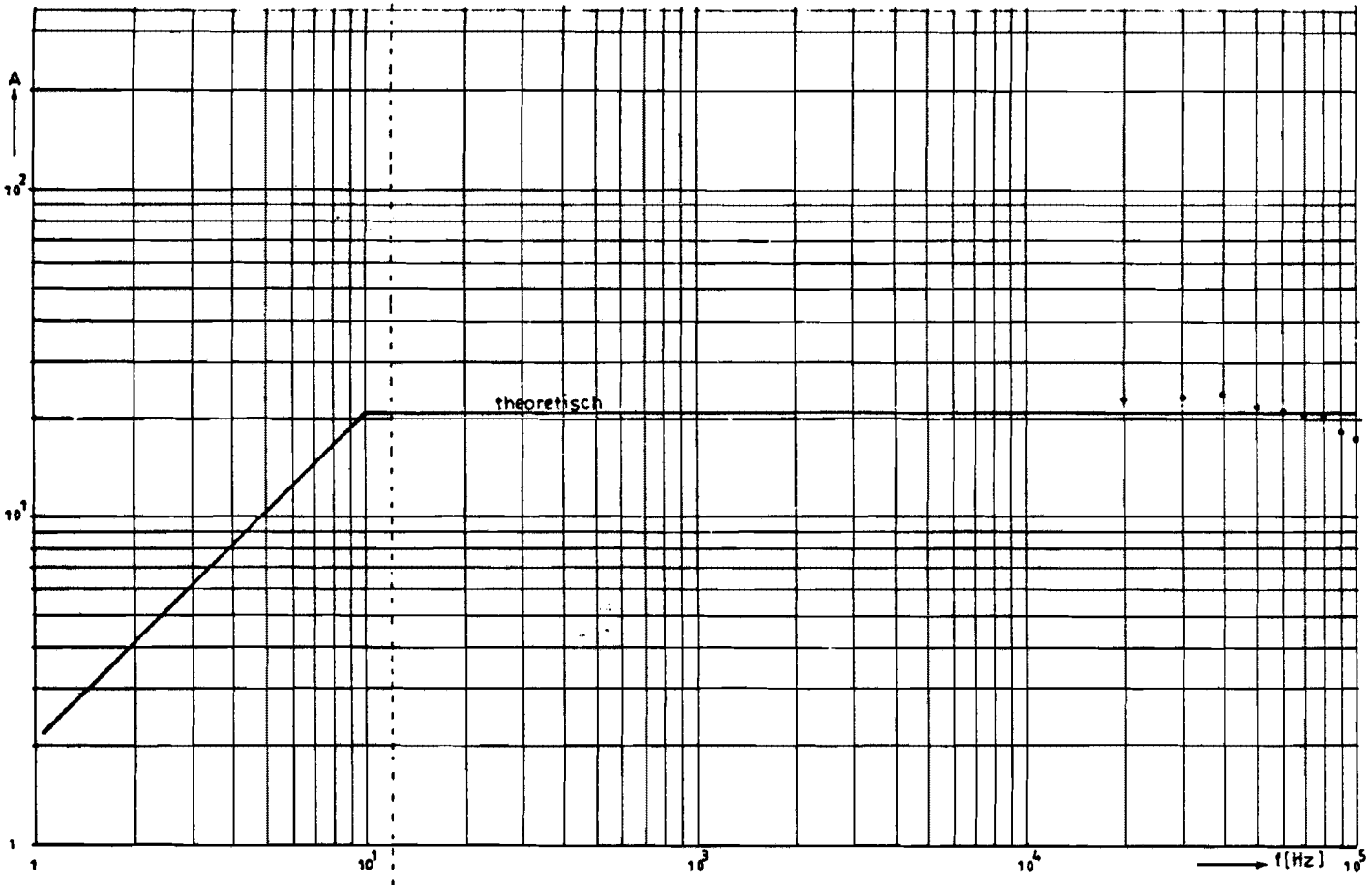


fig. 16 De ijkfactor als functie van de frequentie

De gemiddelde ijkfactor is $21 \cdot 10^3$.

Voor frequenties beneden die waarvoor geijkt is, maar nog ruim boven het kantelpunt nemen we dezelfde ijkfactor aan.

4.4 Verschillende veren bij een massagelijkheid

We bepalen nu eerst de snelheid van de hamer en de opgewekte elektrische spanning van het kristal voor het geval de massa's gelijk zijn.

We gaan meten met twee verschillende veren, te weten : - Bronzen veer, $Ch = 110,3 \text{ N/mm}$
- Grijs veer, $Ch = 189,1 \text{ N/mm}$

In de nu volgende metingen gaan we uit van kristallen met een doorsnede van 10 mm. Meten we bij de grotere kristallen, met een doorsnede van 16 mm, dan wordt dit apart vermeld.

De massa van de twee systemen (aambeeld-veer en hamer-veer) bedraagt bij benadering 30 gram.

4.4.1 De snelheid van de hamer als functie van de indrukking van de bronzen veer

De kristallen worden vervangen door een stalen pen.

| Indrukking [mm] | Δt [μs] | Δx [mm] | Δv [m/s] |
|--------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| 1,31 | 294 | 0,28 | 0,95 |
| 1,50 | 146,6 | 0,28 | 1,91 |
| 1,80 | 76,8 | 0,28 | 3,65 |
| 2,10 | 62,8 | 0,28 | 5,10 |
| 2,20 | 50 | 0,28 | 5,60 |
| 2,30 | 38,2 | 0,28 | 7,32 |

Tabel 4

Voor kleine indrukkingen van de veer, kunnen we geen redelijke uitspraak doen over de snelheid aan de hand van het oscilloscoopbeeld.

(Om een indruk te krijgen van het oscilloscoopbeeld, moet men naar figuur 15 kijken op badzijde 23, tussen de uitgangsspanning 2.4 en 2.5V.)

In figuur 17 is de ontwikkelde snelheid van de hamer als functie van de indrukking van de veer getekend.

In het lage gebied van de indrukking is volgens figuur 17 de ontwikkelde snelheid niet lineair. Volgens de theorie verwacht men een lineair verloop.

Daarvoor kijken we naar de responsie van het hamerveersysteem.

Op het moment van botsen geldt dat de snelheid v_h^* gelijk is aan de topsnelheid \hat{v}_h van de hamer.

Voor deze topsnelheid geldt: $\hat{v}_h = X_{o_h} \sqrt{(C_h / m_h)}$

Het product van de veerconstante C_h en de massa van het veersysteem m_h is constant, waaruit volgt dat de snelheid \hat{v}_h lineair verloopt met de begin-indrukking van de spiraalveer X_{o_h} .

De oorzaak van het niet lineaire verloop, ligt vermoedelijk aan het feit dat de massa (hamer) wrijving ondervindt, die vooral in voor kleinere indrukkingen merkbaar is. Is de wrijving eenmaal overwonnen, is de grafiek inderdaad (bij benadering) lineair. Het is eventueel mogelijk uit deze grafiek de wrijvingskrachten te berekenen.

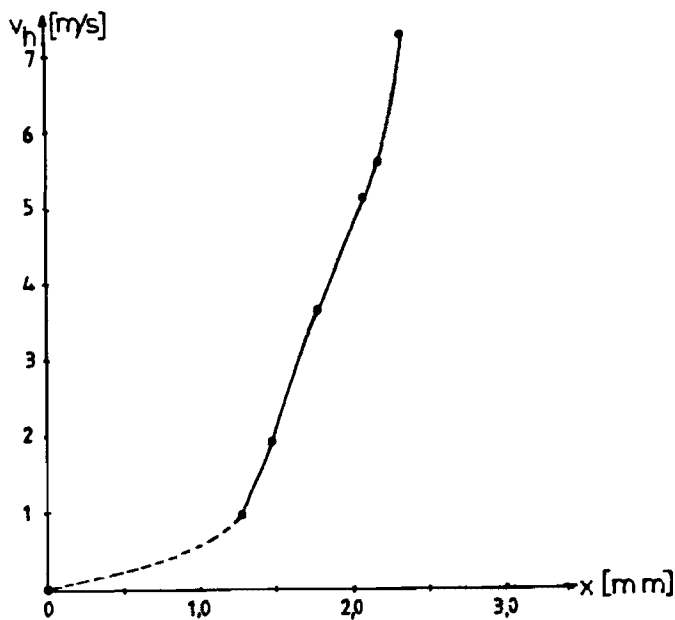


Fig.17 Grafiek van de ontwikkelde snelheid als functie van de indrukking van de veer. ($m = m_{\text{hamer}}$)

4.4.2 De elektrische spanning als functie van de indrukking van de bronzen veer

We vervangen nu de stalen pen in de PXE-houder, weer door de PXE-kristallen. Voordat we kunnen gaan meten, moeten we de maximale kracht, die op de kristallen mag worden uitgeoefend, berekenen. Daar we dit al hebben gedaan onder het hoofdstuk 'maximale druk', volstaan we met het geven van de resultaten.

$$\hat{F}_{mta} = 9817,5 \text{ N} \quad (\text{Maximale Toelaatbare kracht in Aambeeldveersysteem})$$

$$\hat{v}_{mth} = 5,50 \text{ m/s} \quad (\text{Maximale Toelaatbare snelheid van de Hamer})$$

Uit de figuur 17 volgt:

Maximale gemeten toelaatbare indrukking $\approx 2,10$ mm

Maximale berekende toelaatbare indrukking $\approx 2,87$ mm

Hieronder zijn in tabel 5 de meetresultaten gegeven voor deze bronzen veer.

| indruk [mm] | \hat{u} [kV] | tstijg [μ s] | tpuls [μ s] |
|----------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| 0,1 | 1,1 | -- | -- |
| 0,2 | 3,2 | 42,3 | 70,4 |
| 0,3 | 7,3 | 33,7 | 65,45 |
| 0,4 | 8,9 | 28,3 | 58,9 |
| 0,5 | 16,1 | 28,3 | 57,8 |
| 1,0 | 30,3 | 28,2 | 56,45 |
| 1,5 | 66,7 | 28,1 | 55,0 |
| 1,8 | 86,8 | 26,1 | 54,7 |
| 2,1 | 102,3 | 25,2 | 54,2 |

Tabel 5 Gemeten spanningen en tijden

Met de stijgtijd wordt bedoeld die tijd die nodig is om de spanning te doen toenemen van 0% tot en met 100%. Met de pulstijd wordt die tijd bedoeld die nodig is voor een halve spanningsperiode en zal dus bij benadering tweemaal de stijgtijd moeten bedragen. Op de volgende bladzijde zijn de meetresultaten weergegeven in een grafiek. We proberen nu een relatie af te leiden die bij benadering het verband weergeeft tussen de piekwaarde van de opgewekte elektrische spanning en de indrukking van de veer.

Hieronder is in figuur 18 de opgewekte elektrische spanning als functie van de indrukking getekend. De stippellijn vertegenwoordigt de door ons gezochte relatie, die het verband weergeeft tussen de opgewekte elektrische spanning en de indrukking van de veer.

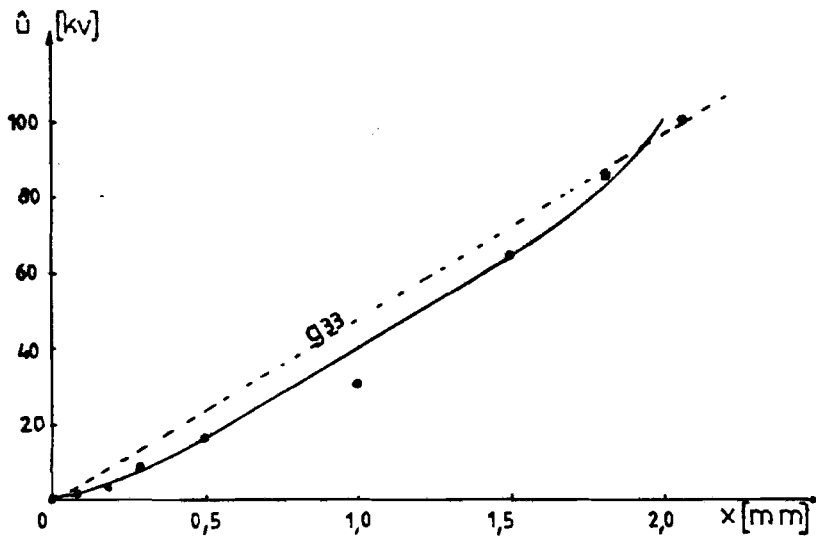


fig. 18 Grafiek die het verband weergeeft tussen de indrukking van de veer en de opgewekte elektrische spanning. (m = mhamer en bronzen veer)

Voor een ideale veer geldt dat de ontwikkelde kracht gelijk is aan de veerconstante vermenigvuldigt met de indrukking van de veer. Voor een ideaal kristal geldt dat de opgewekte spanning gelijk is aan de spanningsconstante vermenigvuldigt met de mechanische druk op het kristal uitgeoefend (zie paragraaf 2.4).

Gebruiken we de gegeven formules voor de spanningsconstante en de maximale optredende kracht in het aambeeldveersysteem (=maximaal optredende kracht op de kristallen), dan kan de volgende formule afgeleid worden:

$$g_{33} = \frac{\hat{u}_3 * A}{X_{0h} \omega_h \sqrt{m_a C_a}}$$

met: g_{33} = spanningsconstante [kVmm/N]
 u_3 = piekspanning [kV]
 A = oppervlakte kristal [mm²]

Voor de elektrische spanning U geldt:

$$U = E * l \quad \text{met: } l = \text{lengte van het kristal}$$

Substitueren we de twee laatste formules, dan vinden we:

$$U = \frac{g_{33} * l * cv * X}{A}$$

Omdat de spanningsconstante de enige onbekende is in deze formule, kunnen we deze uit bovengenoemde formule oplossen.

| Indruk [mm] | $\hat{u} = U$ [kV] | g_{33} [$\cdot 10^{-3}$ kVmm/N] |
|----------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 0,1 | 1,13 | 0,10 |
| 0,2 | 3,23 | 0,145 |
| 0,3 | 7,31 | 0,22 |
| 0,4 | 8,89 | 0,20 |
| 0,5 | 16,11 | 0,29 |
| 1,0 | 30,33 | 0,275 |
| 1,5 | 66,67 | 0,40 |
| 1,8 | 86,83 | 0,44 |
| 2,2 | 102,34 | 0,42 |

Tabel 6 Berekende waarden van de spanningsconstante, waarbij gebruik gemaakt is van de gemeten elektrische spanningspleken.

Uit tabel 6 volgt dat voor de kleinere waarden van de indrukking een kleine spanningsconstante optreedt. Dit is te wijten aan het niet lineaire gedrag van de veer in dit gebied ten gevolge van de wrijving. Om een uitspraak te doen over de spanning gebruiken we nu een gemiddelde waarde voor de spanningsconstante, waarbij we de berekende spanningsconstanten voor kleine indrukking (0,1 ... 1,0) niet meenemen in deze berekening.

$$\text{De gemiddelde spanningsconstante} = \overline{g_{33}} = 4,21 * 10^{-4} \text{ kV mm/N}$$

Vergelijken we de berekende gemiddelde spanningsconstante met de door de fabrikant opgegeven spanningsconstante, dan valt op dat de berekende g_{33} een factor 60 kleiner is dan de opgegeven waarde. Gebruiken we de opgegeven waarde van $g_{33} = 25,2 \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$, dan komen we bij dezelfde stacklengte en doorsnede aan een spanning van:

$$\hat{u} = 6112,06 \text{ kV bij een } X_{o_h} = 2,2 \text{ mm}$$

Deze absurd grote spanningspiek is natuurlijk geen reële waarde.

Er valt dus geen vergelijking te maken, omdat volgens mij de opgegeven spanningsconstante alleen geldt voor kristallen uit een stuk en niet voor stapels, of alleen maar geldt tot een bepaalde lengte van de kristallen.

Volgens de afgeleide responsie van het aambeeldveer-systeem moet de opgewekte elektrische spanning een sinusvorm bezitten, omdat voor de kristallen geldt:

$$V_{\text{elektrisch}} = f(X_{\text{aambeeld}})$$

Kijken we naar figuur 19 dan zien we inderdaad een sinusvorm terug in de opgewekte elektrische spanning. Verder is te zien dat er op die sinusvorm nog een tweede hogere frequente sinusvorm aanwezig is.

Deze hogere frequente sinusvorm is te wijten aan drukgolven die zich met de akoestische voorplantingsnelheid van het kristal, door het kristal voortplanten.

Mede oorzaak hiervan is de in werkelijkheid verdeelde massa-veer van het materiaal.

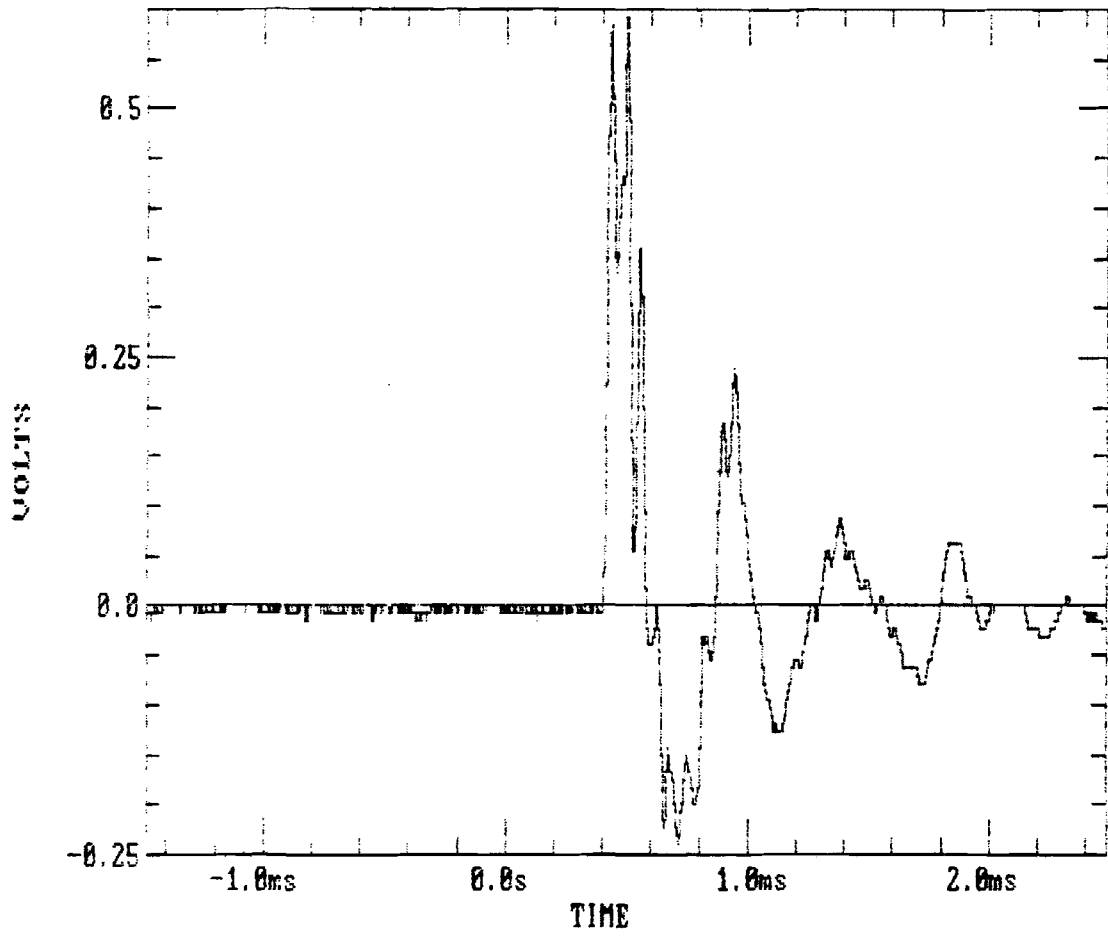


fig. 19 Oscilloscoopbeeld van de gemeten elektrische spanning. Bovenop de de eigenlijke spanningsvorm (sinus) bevindt zich nog een hoger frequent signaal.

4.5 De grijze veer met massa-elektrische eenheid en een kristaldoorsnede 10 mm

4.5.1 De snelheid van de hamer als functie van de indrukking van het hamerveersysteem

De maximale toegestane snelheid blijft natuurlijk hetzelfde als bij de bronzen veer.

$$\hat{F}_{mta} = 9817,5 \text{ N} \quad (\text{maximale toelaatbare kracht in het aanbeeld-veersysteem.})$$
$$\hat{v}_{mth} = 5,5 \text{ m/s} \quad (\text{maximale toelaatbare hamersnelheid})$$

| Indrukking [mm] | Δt [μ s] | Δx [mm] | Δv [m/s] |
|--------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|
| 1,5 | 81,2 | 0,21 | 2,58 |
| 1,8 | 58,2 | 0,21 | 3,61 |
| 2,0 | 38,2 | 0,21 | 5,49 |
| 2,2 | 33,6 | 0,21 | 6,25 |

tabel 7 snelheid hamer = f(indrukking hamerveersysteem)

Bij een kleinere indrukking van de veer zal een grotere snelheid behaald worden met de grijze veer (een grotere veerconstante) dan met de bronzen veer. Zouden de gewichten van beide veren hetzelfde zijn dan zal hetzelfde spanningsverloop moeten optreden, waarbij de indrukking van de bronzen veer natuurlijk een stuk groter moet zijn dan die van de grijze om dezelfde elektrische spanningpiek te bereiken. Dit kan natuurlijk als nadeel beschouwd worden omdat het regelbereik van de grijze veer vrij klein is. Maar omdat voor de grotere kristallen een hamersnelheid nodig is van 14 m/s, is deze veer voor die kristallen veel beter dan de bronzen veer.

4.5.2 De elektrische spanning als functie van de indrukking van het hamerveersysteem

Maximale gemeten toelaatbare indrukking $\approx 2,00$ mm

Maximale berekende toelaatbare indrukking $\approx 2,19$ mm

| Indrukking [mm] | \hat{u} [kV] | tstijg [μ s] | tpuls [μ s] |
|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| 0,1 | 0,323 | -- | -- |
| 0,2 | 3,59 | 41,70 | 72,20 |
| 0,3 | 6,04 | 38,45 | 68,90 |
| 0,5 | 17,95 | 32,15 | 62,70 |
| 0,7 | 25,59 | 33,90 | 66,00 |
| 0,8 | 48,02 | 35,33 | 64,35 |
| 1,0 | 53,36 | 34,35 | 64,15 |
| 1,2 | 91,36 | 29,85 | 63,30 |
| 1,5 | 95,80 | 27,12 | 55,34 |
| 1,8 | 114,34 | 26,23 | 54,12 |

tabel 8 Opgeweekte plekspanning=f(indrukking)

We zetten nu de gemeten spanningspieken en snelheden van de hamer uit tegen de indrukking van de grijze veer (zie figuur 20)

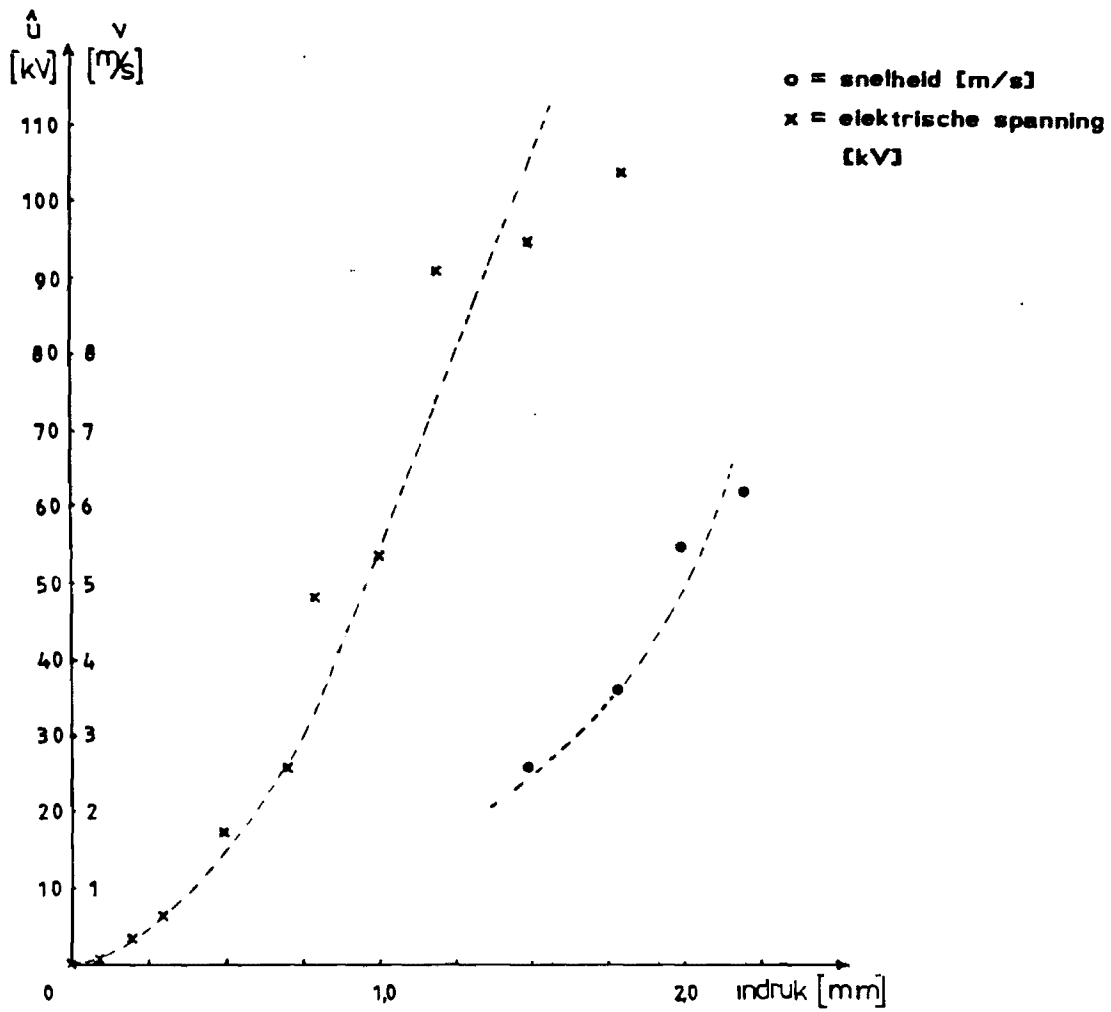


fig. 20 Elektrische spanning=f(indrukking hamerveersysteem) en de snelheid van de hamer=f(indrukking hamerveersysteem) voor de grijze veer.

4.6 De bronzen veer met massagelijkheid en een kristaldoorsnede van 16 mm

We zullen nu voor de kristallen van Φ 16 mm en de bronzen veer de spanning gaan meten. Omdat de kristallen na enige malen te zijn gebruikt scheuren vertoonden, is niet tot de maximale toelaatbare snelheid gemeten.

4.6.1 De snelheid van de hamer als functie van de indrukking van het hamerveersysteem

De kristallen kunnen weer het beste vervangen worden door een stalen pen. We moeten de fotosensor weer opnieuw ijken. De meetwaarden van de ijking zijn hier niet meer vermeldt.

| Indrukking [mm] | Δt [μ s] | Δx [mm] | Δv [$\frac{m}{s}$] |
|--------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------------|
| 1,31 | 294 | 0,28 | 0,95 |
| 1,50 | 146,6 | 0,28 | 1,91 |
| 1,80 | 76,8 | 0,28 | 3,65 |
| 2,10 | 62,8 | 0,28 | 5,10 |
| 2,20 | 50,0 | 0,28 | 5,60 |
| 2,30 | 38,2 | 0,28 | 7,32 |

Tabel 9 Hamersnelheid = f(Indrukking)

Alvorens weer de spanning te gaan meten, moeten we weer de maximale snelheid, kracht en indrukking bepalen.

$$\hat{F}_{mta} = 125 * 0.25 * \pi * \{ 16 \}^2 = 25.1 \text{ kN} \quad (\text{Maximale toelaatbare kracht in aambeeld-veersysteem})$$

$$\hat{v}_{mth} = 14,1 \text{ m/s} \quad (\text{Maximale toelaatbare hamersnelheid})$$

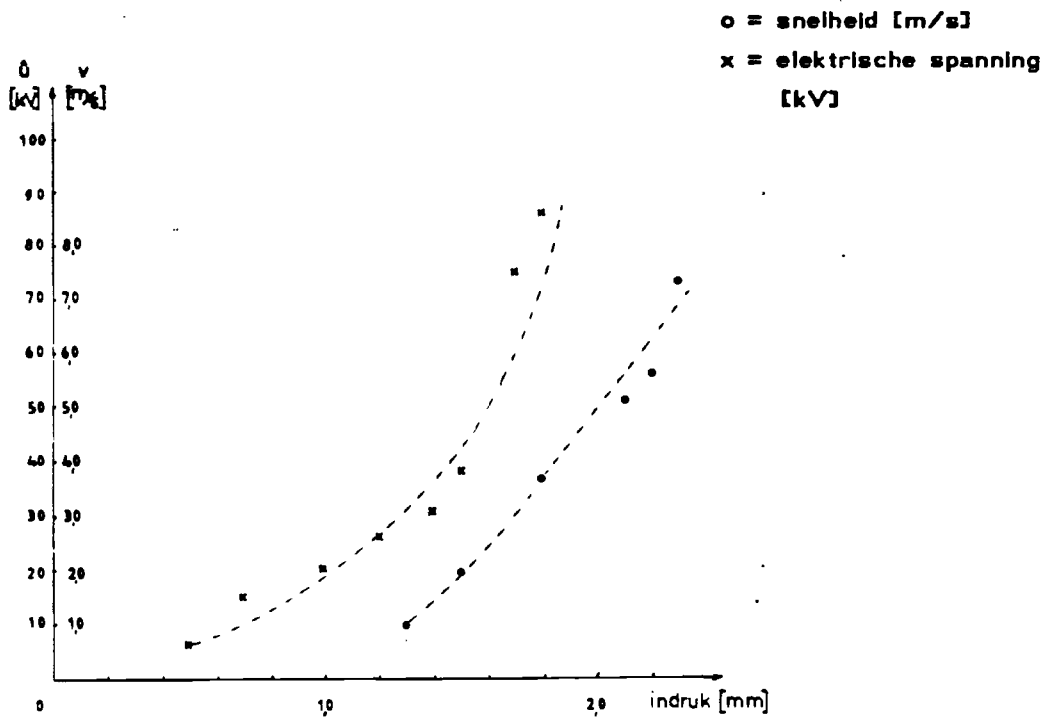
We vervangen de stalen pen weer door de vier PXE-kristallen van Ø16mm en gaan de opgewekte elektrische spanning als functie van de indrukking van het hamerveersysteem bepalen.

4.6.2 De elektrische spanning als functie van de indrukking van het hamerveersysteem

| Indruk [mm] | \hat{u} [kV] | tstljg [μs] | tpuls [μs] |
|----------------|-------------------|----------------|---------------|
| 0,3 | 2,41 | 56,98 | 84,58 |
| 0,5 | 6,63 | 43,60 | 69,24 |
| 0,7 | 15,28 | 34,10 | 55,20 |
| 1,0 | 20,04 | 23,17 | 44,30 |
| 1,2 | 26,36 | 23,83 | 45,14 |
| 1,4 | 31,37 | 23,99 | 45,61 |
| 1,5 | 33,93 | 21,29 | 36,64 |
| 1,7 | 75,67 | 21,21 | 36,45 |
| 1,8 | 86,11 | 20,49 | 33,95 |

tabel 10

De grafieken van de snelheid en de opgewekte elektrische spanning, beide als functie van de indruk van het hamerveersysteem, zijn weergegeven op volgende bladzijde.



**Fig. 21 Snelheid van de hamer = f(indrukking van hamerveersysteem)
Elektrische spanning = f(indrukking van hamerveersysteem),
beide voor de bronzen veer en kristaldoorsnede van 16 mm**

4.7 De bronzen veer voor een kristaldoorsnede 10 mm en een massa-ongelijkheid

Bij het ontwerp van de hamer, hebben we schroefdraad aangebracht aan de buitenkant van de hamer zodat we eenvoudig een extra massa kunnen aanbrengen op de hamer. De afgeleide formules en theorie hebben geen geldigheid meer in dit gebied. De kinetische energie en de impuls die de hamer bezit zullen niet meer volledig worden overgedragen. Omdat de massa van het hamerveersysteem groter is dan die van het aambeeldveersysteem, zal na de botsing nog een gedeelte kinetische energie in de hamer achter blijven. (denk aan de twee hard stalen bollen) De massa van het hamerveersysteem zal als het ware meebewegen met de massa van het aambeeldveersysteem, in plaats van op het moment van botsen de snelheid te wisselen.

4.7.1 De snelheid van de hamer als functie van de indrukking van het hamerveersysteem

De kristallen worden weer vervangen door een stalen pen. De ijking van de optische verplaatsingsmeter verloopt identiek als bij de bronzen veer zonder extra massa en zal hier niet vermeld worden.

| Indrukking [mm] | Δt [μs] | Δx [mm] | Δv [m/s] |
|--------------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|
| 1,50 | 179,2 | 0,2 | 1,12 |
| 1,80 | 117,4 | 0,25 | 2,13 |
| 2,00 | 93,5 | 0,25 | 2,67 |
| 2,20 | 72,5 | 0,25 | 3,45 |
| 2,50 | 61,6 | 0,25 | 4,06 |
| 2,80 | 53,0 | 0,25 | 4,70 |

Tabel 11 Snelheid = f(Indrukking)

In figuur 22 op de volgende bladzijde zijn de grafieken getekend van de snelheid van de hamer voor de bronzen veer met massagelijkheid en massa-ongelijkheid.

Uit de gegevens is te halen dat de snelheid waarmee de massa botst kleiner wordt bij een toenemend gewicht.

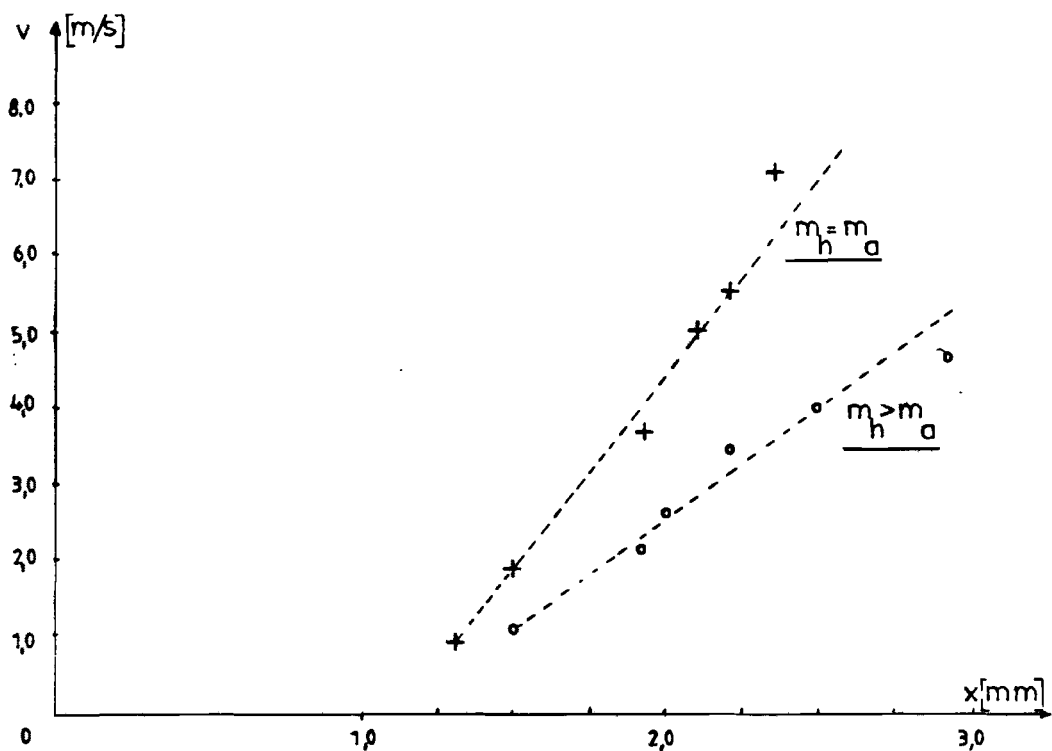


Fig. 22 De snelheid van de hamer als functie van de indrukking van het hamerveer-systeem voor massagelijkheid en massa-ongelijkheid beide voor de bronzen veer.

Om dit te controleren, kijken we weer naar de formules die zijn afgeleidt in paragraaf 3.2.3.1 op bladzijde 16.

Voor de snelheid op het moment van botsen v_h^* geldt, dat deze gelijk is aan de topsnelheid van het hamerveersysteem \hat{v}_h .

$$\text{Voor } \hat{v}_h \text{ geldt: } \hat{v}_h = X_{o_h} \sqrt{C_h / m_h}$$

$$\text{Verder geldt: } F_a = \hat{v}_h \sqrt{m_a C_a}$$

Het product van de aambeeld-massa en de veerconstante van het aambeeldveersysteem is constant.

Omdat de massa van het hamerveersysteem groter wordt, zal de snelheid afnemen.

De afname van de hamersnelheid zal echter niet lineair verlopen met de toename van

de massa (immers de massa van het hamerveersysteem staat onder een wortelfunctie).

We bevinden ons dus altijd in het veilige gebied als we de begin-indrukking van het hamerveersysteem dezelfde laten als voor het systeem met massagelijtheid.

4.7.2 De elektrische spanning als functie van de indrukking van het hamerveersysteem

De stalen pen wordt weer vervangen door de kristallen met een doorsnede van 10 mm.

De maximale toelaatbare indrukking zal hetzelfde blijven omdat de massavergroting een snelheidsvermindering tot gevolg heeft.

Maximale toelaatbare gemeten indrukking $\approx 2,10$ mm

| indruk [mm] | \hat{u} [kV] | tstijg [μ s] | tpuls [μ s] |
|----------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| 1,0 | 20,78 | 34,24 | 60,78 |
| 1,5 | 25,26 | 32,15 | 59,20 |
| 1,8 | 38,25 | 32,04 | 59,08 |
| 2,0 | 66,30 | 32,70 | 59,51 |

Tabel 12 Elektrische spanning = f(indrukking)

De grafiek is getekend in bijlage 3, waarin tevens de grafiek van deze veer zonder extra massa te vinden is.

4.8 Het belasten van de kristallen

Een belangrijk gegeven voor het gebruik van de hoogspanningspulsbron is de invloed van de belasting op de spanning.

We maken gebruik van de bronzen veer en massagelijkheid van het hamerveersysteem en het aambeeldveersysteem.

We meten daarbij zowel de grote als de kleine kristallen. In het theoretisch gedeelte dat vooraf ging aan de meetresultaten, is getracht in formulevorm de invloed van de belasting op de spanning te berekenen.

Hieronder (tabel 13) staan de gemeten spanningen voor diverse belastingen

kristallen \varnothing 16mm

| indrak [mm] | \hat{u} [kV] | tstijg [μ s] | tpuls [μ s] | \hat{u} [kV] | tstijg [μ s] | tpuls [μ s] |
|----------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| | Cbelasting=500pF | | | Cbelasting=2000pF | | |
| 0,5 | 0,6 | 27,2 | 72,6 | 0,43 | 22,8 | 26,3 |
| 0,7 | 1,2 | 24,75 | 63,2 | 0,88 | 22,4 | 28,5 |
| 0,8 | 1,8 | 21,8 | 60,25 | 1,11 | 21,92 | 30,1 |
| 1,0 | 2,4 | 21,8 | 57,65 | 1,6 | 20,5 | 32,4 |
| 1,2 | 2,9 | 21,8 | 57,0 | 1,54 | 23,05 | 34,9 |
| 1,5 | 3,7 | 21,1 | 54,0 | 2,33 | 21,75 | 39,7 |
| 1,7 | 3,97 | 20,4 | 53,65 | 2,39 | 21,1 | 37,7 |
| 1,8 | 4,5 | 17,2 | 51,0 | 2,81 | 19,8 | 36,4 |
| 2,0 | 4,65 | 15,1 | 49,8 | 2,89 | 20,4 | 36,4 |

Tabel 13 Opgewekte elektrische spanning bij diverse belastingen

Op de volgende bladzijde is dezelfde tabel gemaakt voor de kleinere kristallen en voor een ohmse belasting. (tabel 14)

kristallen \varnothing 10 mm

| Indruk [mm] | \hat{u} | tstljg | tpuls | \hat{u} | tstljg | tpuls | \hat{u} | tstljg | tpuls |
|----------------|------------------|------------|------------|-------------------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|
| | [kV] | [μ s] | [μ s] | [kV] | [μ s] | [μ s] | [kV] | [μ s] | [μ s] |
| | Cbelasting=500pF | | | Cbelasting=2000pF | | | Rbelasting=500M Ω | | |
| 1,0 | 2,7 | 24,2 | 53,4 | 1,6 | 17,65 | 44,15 | 35,7 | 29,05 | 63,6 |
| 1,3 | 3,5 | 24,6 | 53,4 | 1,4 | 19,6 | 43,95 | 89,6 | 28,5 | 63,6 |
| 1,5 | 3,3 | 25,6 | 53,9 | 2,2 | 22,35 | 44,85 | 92,3 | 24,2 | 63,6 |
| 1,8 | 4,4 | 25,6 | 56,5 | 2,6 | 22,4 | 48,85 | 108 | 31,1 | 62,7 |

Tabel 14 Opgewekte elektrische spanning bij diverse belastingen

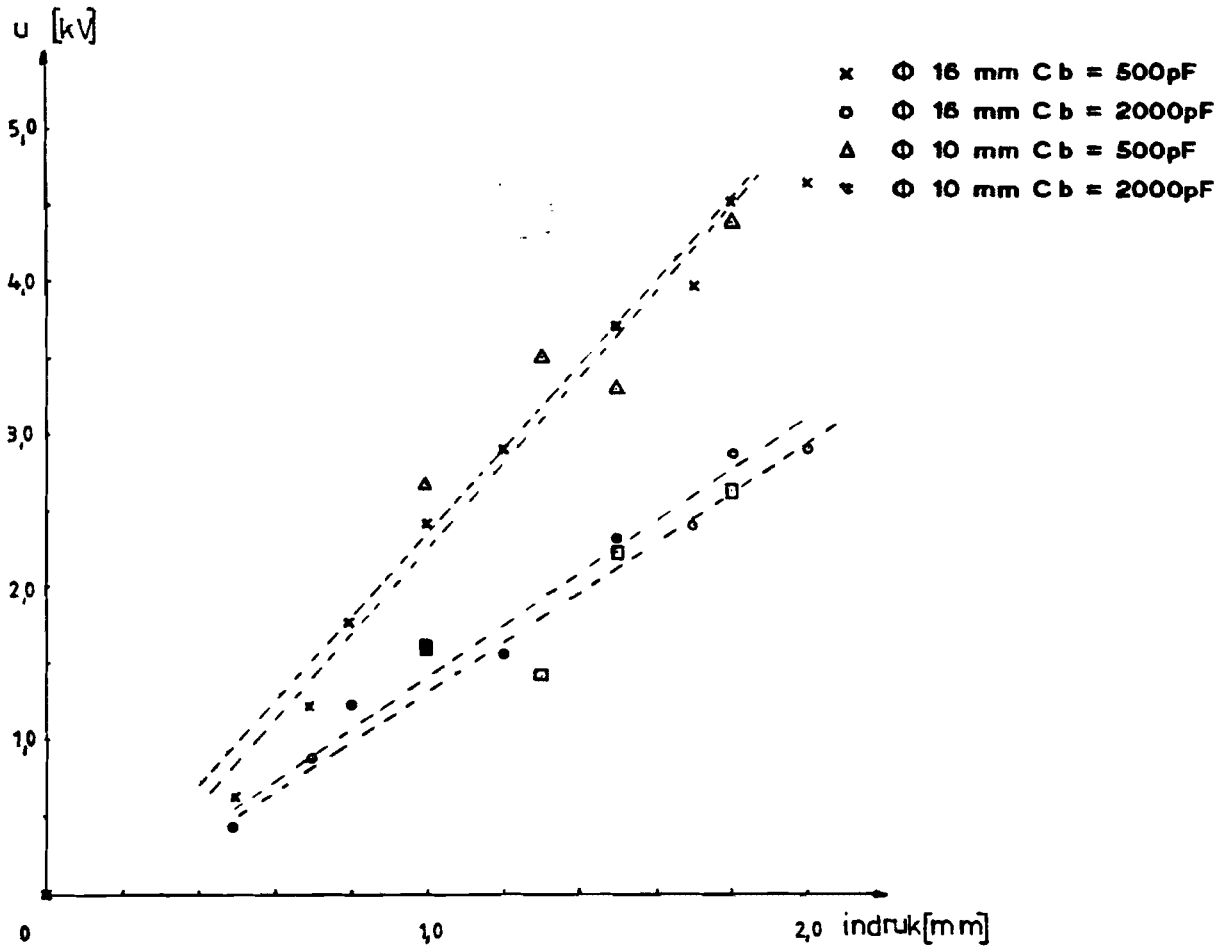


Fig 23 Elektrische spanning = f(Indrukking van het hamerveersysteem) voor diverse belastingen.

Conclusie: Uit de twee metingen volgt dat bij eenzelfde capacatieve belasting de opgewekte spanningen van de piezostack van $\Phi 10$ en $\Phi 16$ mm nagenoeg gelijk worden.

Om de invloed van de belasting theoretisch te onderzoeken, gaan we uit van onderstaand eenvoudig vervangingschema.

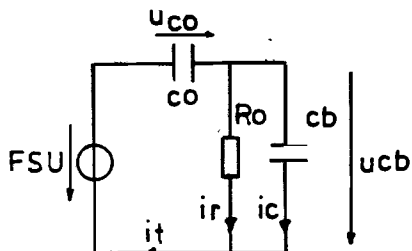


Fig 24 : Eenvoudig vervangingschema van de kristallen met inwendige weerstand R_o en capaciteit C_o .

- U_{cb} = uitgangsspanning over de belasting C_b [V]
- FSU = ingangsspanning = spanning gemeten over de kristallen bij geen belasting [V]
- U_{co} = spanning over de inwendige capaciteit C_o [V]
- C_o = inwendige capaciteit van de totale stack kristallen [F]
- R_o = inwendige weerstand van de totale stack kristallen [Ω]
- C_b = belastings-capaciteit [F]

Passen we de maasvergelijking toe in het schema dan geldt:

$$- FSU + U_{co} + U_{cb} = 0$$

$$U_{co} = \frac{1}{C_o} \int_0^t i_t dt$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \frac{C_b}{C_o} U_{cb} + \frac{1}{R_o C_o} \int_0^t U_{cb} dt + U_{cb} = FSU$$

$$i_t = i_r + i_{cb} = \frac{U_{cb}}{R_o} + C_b \frac{dU_{cb}}{dt}$$

Voor de FSU gebruiken we een signaal dat de werkelijkheid goed benadert.
 We proberen een rampfunctie: $FSU = \hat{u} / (24 \cdot 10^{-6})t = 4,167 \cdot 10^4 \hat{u} t$.

Men kan nu met de laplace-transformatie de responsie bepalen op een dergelijk ingangssignaal.

$$\mathcal{L} \left\{ \frac{C_b}{C_o} U_{cb} + \frac{1}{R_o C_o} \int_0^t U_{cb} dt + U_{cb} \right\} = \mathcal{L} \{ FSU \}$$

$$U_{cb}(s) \left\{ \frac{C_b}{C_o} + \frac{1}{R_o C_o} + 1 \right\} = \frac{4,167 \cdot 10^4 \hat{u}}{s^2}$$

Rekenen we dit uit dan volgt dat : $U_{cb}(s) = \frac{4,167 \cdot 10^4 \hat{u}}{s^2 \left\{ \frac{C_b}{C_o} + \frac{1}{R_o C_o} + 1 \right\}}$

Terugtransformatie levert op: $U_{cb}(t) = 4,167 \cdot 10^4 \hat{u} R_o C_o \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{R_o C_o + R_o C_b}} \right\}$

Hierbij is \hat{u} de opgewekte spanning in onbelaste situatie.

Omdat de weerstand nogal grote waarden kan aannemen, is deze niet direct te meten met de RLC-brug, de totale capaciteit van de stack (4 kristallen in serie) kan wel meteen gemeten worden.

De gemeten totale R_{o_t} en C_{o_t} van de stack (van 10mm) bedraagt :

$$R_{o_t} = 62,2 + 64,7 + 63,2 + 64,9 = 255 \text{ M}\Omega$$

$$C_{o_t} = 41,6 \text{ pF}$$

Vergelijken we de gemeten waarden van de elektrische spanningen met de berekende waarden, dan treedt er bij grotere belasting nogal een grote afwijking op tussen deze twee.

| $\hat{u}_{\text{onbelast}}$ [kV] | $\hat{u}_{\text{cb belast}}$ [kV] Cb=500pF | $\hat{u}_{\text{cb belast}}$ [kV] Cb=2000pF | <u>tstijgtijd = 24μs</u> |
|-------------------------------------|--|---|---|
| 0,5 | 0,04 | 0,01 | |
| 1 | 0,08 | 0,02 | |
| 5 | 0,38 | 0,10 | |
| 10 | 0,77 | 0,20 | |
| 20 | 1,53 | 0,41 | |
| 30 | 2,30 | 0,61 | |
| 50 | 3,84 | 1,02 | |
| 80 | 6,14 | 1,63 | |
| 100 | 7,68 | 2,04 | |
| 110 | 8,45 | 2,24 | |

Tabel 15 Berekende waarden van de spanning onder toenemende capacatieve belasting.

Naarmate de capacatieve belastingsgraad toeneemt, zal de spanning verder in elkaar zakken. Het model dat voor de afleiding van de opgewekte spanning bij capacatieve belasting is gebruikt, voldoet uitstekend voor de kleinere belastingsgraden. Men kan dus door gebruik te maken van dit schema een redelijke indicatie krijgen van de opgewekte spanning. Uit de tabel volgt dat U_{cb} (spanning over de belasting) als functie van de onbelaste uitgangsspanning, beide gemeten bij dezelfde Indrukking van het hamerveersysteem, lineair toeneemt.

4.9 Het stapelen van de kristallen

We gaan uit van het zojuist geïntroduceerde (zie figuur 25) model en van een stack van 4 kristallen met een doorsnede van 10 mm. We willen weten hoe de spanning zich gedraagt, bij dezelfde mechanische druk op de kristallen, voor verschillende aantallen kristallen in een stack.

Met andere woorden we willen dus weten of we de volgende formule kunnen toepassen:

$$\hat{u}_{\text{stack}} = n * \hat{u}_{\text{1 kristal}}$$

beide bij dezelfde mechanische druk gemeten en $n \in \mathbb{Z}$.

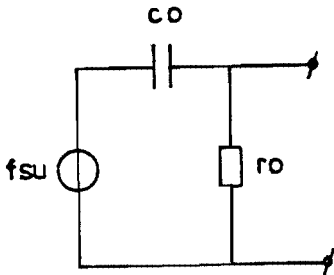


fig. 25 Model voor een kristal

We bepalen eerst theoretisch de verschillende componenten (C_o en R_o) van de losse kristallen. We doen dit met de volgende twee formules:

$$R_o = \frac{\rho l}{A}$$

met: $\rho = 0,1 * 10^{12} \Omega/m$
 $l = 0,019 \text{ m}$
 $A = 7,854 * 10^{-6} \text{ m}^2$

$$C_o = \frac{\epsilon_o \epsilon_r A}{l}$$

met: $\epsilon_r = 2250 \text{ F/m}$
 $\epsilon_o = 8,854 * 10^{-12} \text{ F/m}$
 $A = 7,854 * 10^{-6} \text{ m}^2$
 $l = 0,019 \text{ m}$

Rekenen we de waarden uit voor 1 kristal dan geldt: $C_o = 8,23 \text{ pF}$
 $R_o = 2,4 * 10^{14} \Omega$

Bij het stapelen van de kristallen staan de R_o 's van de verschillende kristallen in serie, hetzelfde geldt voor de C_o 's.

Voor de R_o en de C_o van de stack van 4 kristallen geldt dus: $C_{ot} = 2,06 \text{ pF}$
 $R_{ot} = 9,7 * 10^{14} \Omega$

Vergelijken we de berekende totale capaciteit en weerstand met de totale gemeten capaciteit en weerstand, dan treedt er een verschil op.

Een gedeelte van het verschil tussen de berekende en de gemeten waarde zal bestaan uit strooicapaciteiten. Verder zijn de berekende waarden natuurlijk theoretische grootheden, waarbij uitgegaan is van de door de fabrikant opgegeven parameters die onder bepaalde condities zijn gemeten.

Nu we de verschillende componenten van het model berekend hebben, kunnen we via de overdrachtsfunctie voor de totale stack en 1 kristal kijken wat de verzwakking bedraagt. Voor de totale stack geldt:

$$H(j\omega) = \frac{4 j\omega CoRo}{4 + 4j\omega RoCo} = \frac{j\omega CoRo}{1 + j\omega RoCo}$$

Voor 1 kristal geldt:

$$H(j\omega) = \frac{j\omega CoRo}{1 + j\omega CoRo}$$

We zien dus dat de verzwakking hetzelfde blijft bij meer of minder kristallen in een stack. Gaan we uit van massagelijkheid in alle gevallen (1 ... n kristallen), dan volgt bij de botsing volledige overdracht van de kinetische energie en zal de gemeten opgewekte elektrische spanning dus lineair afnemen bij een afnemend aantal kristallen per stack. We moeten wel opmerken dat we ervan uitgaan dat de kristallen elk eenzelfde gedeelte van de totale elektrische gegenereerde spanning voor hun rekening nemen. Dus geeft een stack van 4 kristallen bij een mechanische druk op het kristal a kV, dan moet gelden dat de kristallen apart 1/4 a kV leveren. Omdat de kristallen van hetzelfde type en van dezelfde doorsnede en lengte zijn, zal deze bewering ook wel kloppen (zal dus ook uit de metingen moeten blijken).

| Indruk | \hat{u} | \hat{u} | \hat{u} | \hat{u} |
|--------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| [mm] | 1 kristal [kV] | 2 kristallen [kV] | 3 kristallen [kV] | 4 kristallen [kV] |
| 1 | 5,72 | 11,27 | 23,60 | 30,33 |
| 1,5 | 9,87 | 20,87 | 40,87 | 66,67 |

tabel 16

We zien dat bij een afnemend aantal kristallen per stack, de waarden gaan afwijken van de ideale lineaire lijn. Oorzaak hiervan is de massa-ongelijkheid van het hamerveersysteem en het aambeeldveersysteem. We vullen de weggehaalde kristallen op met een stalen pen (zilverstaal) die zwaarder is dan de weggehaalde kristallen. In figuur 26 zijn de waarden uitgezet.

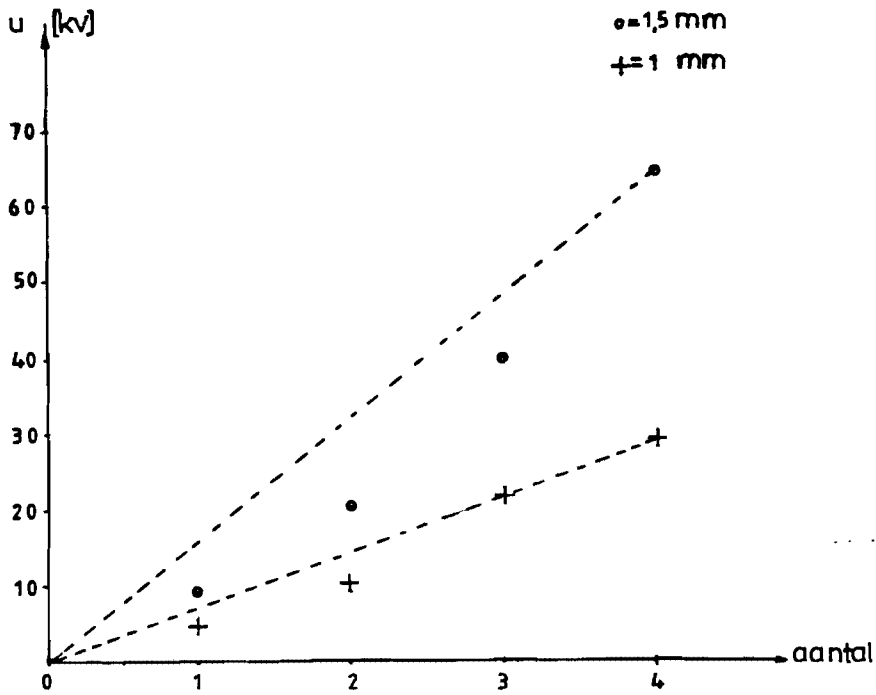


Fig. 26 De Opgewekte elektrische spanning bij toenemende stack.

5 Conclusies

In deze paragraaf zijn de conclusies opgenomen die uit de theorie en de gepleegde metingen naar voren zijn gekomen.

* Zorg ervoor dat het gewicht van de hamer, waarbij ook inbegrepen de verenschotel en trekkerpen, gelijk is aan dat van de kristallen. In dat geval krijgt men de maximale overdracht van de kinetische energie van de hamer op de kristallen.

Hierbij zal dan ook de maximale spanning en de minimale pulstijd voor die indrukking van de veer optreden.

* De keuze van de materialen en de bolling van de hamer (ook de harding) zijn goed geweest omdat na ongeveer 675 keer te zijn gebruikt geen noemenswaardige slijtage is opgetreden.

* Bij het stapelen van de kristallen, kunnen de spanningen gewoon opgeteld worden.

Treedt bij een bepaalde indrukking een spanning u op bij 1 kristal, dan zal bij een stapel van vier kristallen mechanisch en elektrisch in serie $\approx 4 * u$ optreden.

De verkleining van de inwendige capaciteit C_0 en de vergroting van de inwendige weerstand R_0 heeft hier nauwelijks invloed op.

* De opgewekte spanning is sterk afhankelijk van de soort en grootte van de belasting.

* Onderzoek naar de spanningsconstante van een stapel kristallen heeft uitgewezen dat deze veel kleiner is dan de door de fabrikant opgegeven waarden. Mogelijke oorzaak hiervan kan de te kleine ijkfactor zijn. Nemen we de theoretisch bepaalde ijkfactor van $31 \cdot 10^3$ dan zou dit een g_{33} geven van $g_{33} \approx 0,62 \cdot 10^{-3} \text{ Vmm/N}$

* Uit de metingen aan de kristallen van $\Phi 10 \text{ mm}$ en $\Phi 16 \text{ mm}$ is gebleken dat bij het elektrische belasten van de beide kristallen met dezelfde capacitieve waarde, bij dezelfde mechanische druk op de kristallen, de gegenereerde spanningen niet veel meer van elkaar afwijken.

Het zou dus betekenen dat de kristal-diameter niet veel invloed heeft op de gegenereerde spanning bij een capacitieve belasting van de kristallen.

6 Literatuurlijst

- **Piezoxide Eigenschaften und Anwendungen**
Uitgever: Valvo Bauelemente der Philips Gmbh
ISBN 3-7785-1755-4

- **Piezoelektrische Zundelemente**
Stemag-nachrichten 43 april 1970

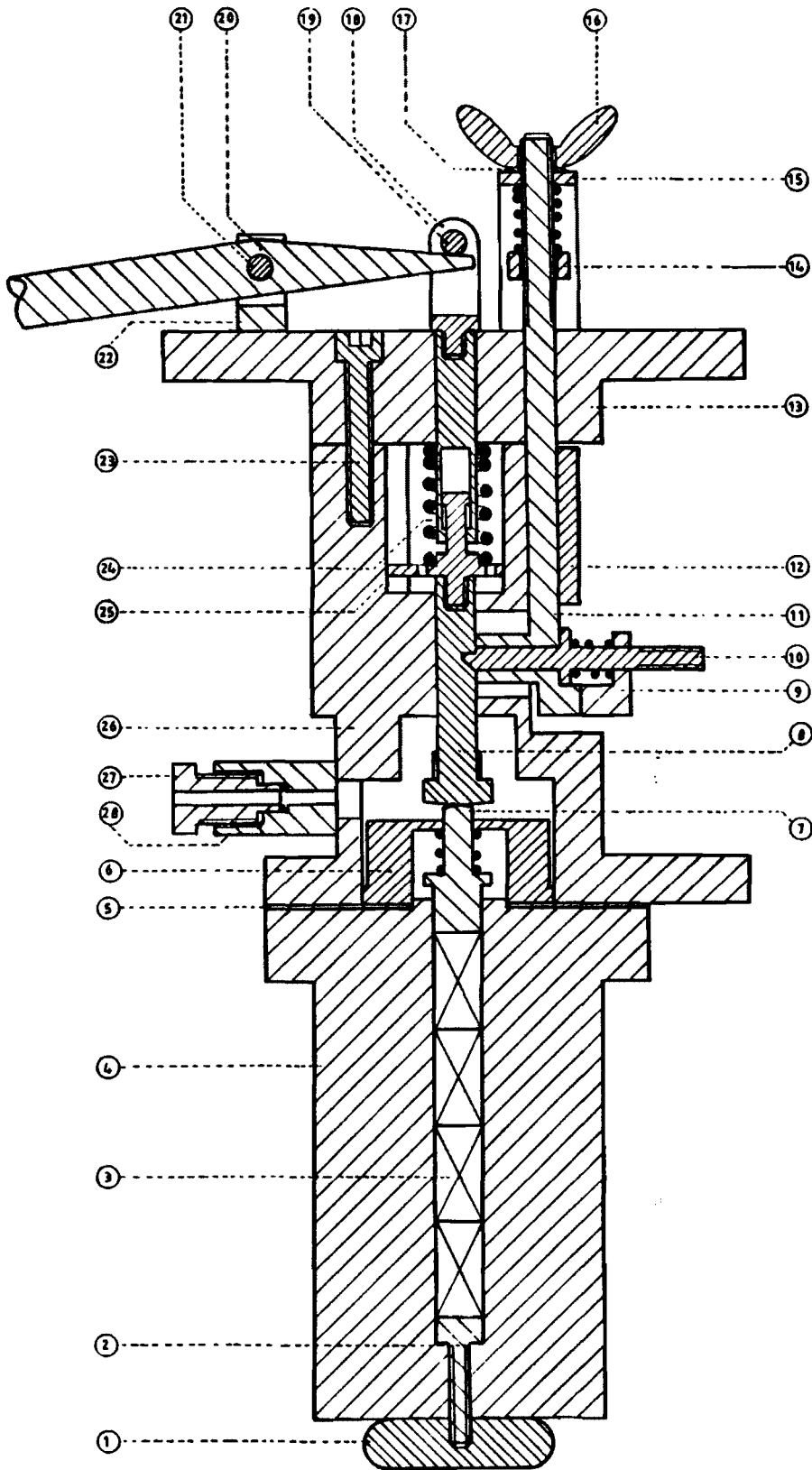
- **Labornotiz KIE 12/87**
Valvo AL
Kfz/Industrie-Elektronik
10 April 1987

- **Energy conversion with PXE5**
Philips Components
B.U. Materials
WW/CK/0194
19-08-1988

- **Tevema SPEC-technische**
veren ult voorraad
Associated Spring Barnes Group

- **Piezoelektrische Zunder**
Feinwerktechnik + Messtechnik
82. 1974. heft 5 blz 223

Bijlage 1



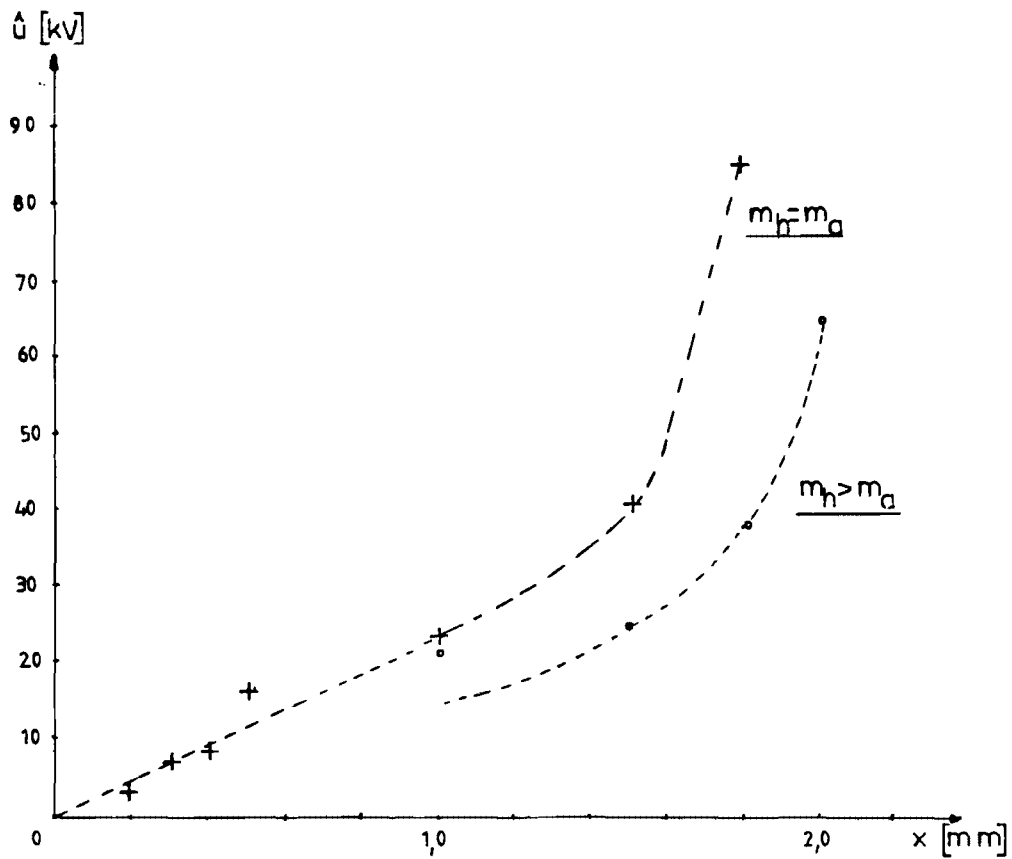
- 1 Elektrode Messing
- 2 Elektrode prop Messing
- 3 PXE-kristallen
- 4 Houder PXE-kristallen Ertalyte
- 5 Aardings-plaatje Koper
- 6 Afsluitstuk Messing
- 7 Aambeeld St c15 Gehard 0,4mm
- 8 Hamer St c15 Gehard 0,4mm
- 9 Klem Messing
- 10 Arrateerpen St c15 Gehard 0,4mm
- 11 Insteelstuk Messing
- 12 Geleidingsblok Messing
- 13 Grondplaat Messing
- 14 Moer Messing M6
- 15 Beugel Staal
- 16 Vleugelmoer Messing M6
- 17 Schijf Messing M6
- 18 Trekkerbeugel Staal
- 19 Trekkeras Staal
- 20 Hefboom Roestvrij staal
- 21 Hefboomas staal
- 22 Beugel Staal
- 23 Imbusbout Staal M6
- 24 Trekker Roestvrij staal
- 25 Verenschotel Roestvrij staal
- 26 Verenhuis Messing
- 27 Passchroef Messing
- 28 Houder snelheidsmeter Messing

Bijlage 2

Gebruikte apparatuur

| <u>Apparaat / onderdeel</u> | <u>Labnr. / opmerkingen</u> |
|-----------------------------|--|
| Oscilloscoop | Nicolet 4180 + 4049C, serie no. 88B03249 XF-44 , serie no. 86C01236 EHO 504 |
| Sinusgenerator | Krohn-Hite model 5400B generator GF 04 |
| Spanningsversterker | Kalmus wideband RF Amplifier, 5 kHz-100 MHz model 155 LCR EHO 529 |
| RLC-brug | Wayne-Kerr LCR-meter 4225 |
| Gewicht | m = 11,00 gram |
| Hamer +verenschotel | m = 29,50 gram |
| Bronzen veer | m = 12,96 gram nr. ST 51000, Cv = 110,3 N/mm |
| Grijze veer | m = 20,76 gram nr. ST 51400, Cv = 189,1 N/mm |
| Fotonic sensor | KD 320 nr. L118A0266 Probe .125R |

Bijlage 3



De elektrische spanning als functie van de indrukking van het hamerveer-systeem, voor de bronzen veer met en zonder extra massa.
De kristaldoorsnede is 10 mm.

Bijlage 4**Datasheet van het PXE41-kristal**

| grootheid | symbool | eenheid | PXE41 |
|--|----------------|----------------------------|--------------|
| dichtheid | ρ | 10^3 kg/m^3 | 7,90 |
| elasticiteitsconstante | S | 10^{-12} Pa^{-1} | 14,6 |
| dielectrische constante | ϵ_r | | 1200 |
| ladingsconstante | d33 | 10^{-12} C/N | 300 |
| spanningsconstante | g33 | 10^{-3} Vm/N | 25,2 |
| mechanische depolarisatie grens | | Mpa | 125 |
| Curie-temperatuur | θ_c | $^{\circ}\text{C}$ | 315 |

Symbolenlijst

| | | |
|-----------------------------|---|-----------|
| a | index a betekend dat de grootheid betrekking heeft op het aambeekveersysteem. | |
| a | Versnelling | (m/s^2) |
| a _a | Versnelling van de massa, aanwezig in het aambeek-systeem | (m/s^2) |
| A | Oppervlakte | (m^2) |
| C | Capaciteit | [F] |
| C | Veerconstante van het aambeekveersysteem | [N/mm] |
| C _b | Belastings-capaciteit | [F] |
| C _o | Inwendige capaciteit van het kristal | [F] |
| C _v | Algemene veerconstante | [N/mm] |
| E | Veldsterkte | [V/m] |
| F | Kracht | [N] |
| FSU | Gemeten spanning over de kristallen in onbelaste toestand bij een bepaalde mechanische druk | [V] |
| g | spanningsconstante | [Vm/N] |
| h | index h betekend dat de grootheid betrekking heeft op het hamerveersysteem | |
| I | elektrische stroom | [A] |
| l | lengte | [m] |
| m | massa | [kg] |
| m _i | index m _i betekend: maximale toelaatbare | |
| P | Mechanische druk | [Pa] |
| R | Weerstand | [Ω] |
| R _o | Inwendige weerstand van het kristal | [Ω] |
| t | Tijd | [s] |
| T | Temperatuur | [°C] |
| T ₃ | Torsie in richting 3 | [Pa] |
| T _a | Omgevingstemperatuur | [°C] |
| U | Elektrische spanning | [V] |
| u | Elektrische topspanning | [V] |
| U _{cb} | Uitgangsspanning over de belastingscapaciteit C _b | [V] |
| U _{co} | Spanning over de inwendige capaciteit C _o van het kristal | [V] |
| v | Snelheid | [m/s] |
| v̇ | Topsnelheid | [m/s] |
| v _h ^o | Snelheid van de massa, aanwezig in het hamerveersysteem, op het moment van botsen | [m/s] |
| V | potentiaal op een punt | [V] |
| w | Eigenfrequentie, resonantiefrequentie | [rad/s] |
| X | Afstand, afgelegde weg | [m] |
| X _o _h | Begin-indrukking van de veer, aanwezig in het hamerveer-systeem | [m] |
| Z | Akoestische materiaaïmpedantie | [μs/mm] |