



Eindverslag Bacheloropdracht Industrieel Ontwerpen

Het winnen van energie uit wind met behulp van een piëzo-systeem

In opdracht van Tauw BV en de Universiteit Twente

Maurits Korse

Mei 2012

Bachelor Eindopdracht Industrieel Ontwerpen

Het winnen van energie uit wind met behulp van een piëzo-systeem

Student

Maurits Korse

s0141801

Student Industrieel Ontwerpen

In opdracht van

Tauw BV

Handelskade 11

Deventer

www.tauw.nl

Examencommissie

Dr. Ir. M.C. van der Voort

Ing. P. van Passel

Bedrijfsbegeiders

Dhr. R. Hendriks

Dhr. S. Jansma

Datum tentamen

10 juli 2012

UNIVERSITEIT TWENTE.

www.utwente.nl



Voorwoord

Dit verslag is geschreven in het kader van de bachelor eindopdracht van de opleiding Industriële Ontwerpen op de Universiteit Twente alsook vanwege een onderzoeks en ontwerp vraag die bij Tauw BV ligt. Dit verslag dat voor u ligt is het resultaat van vervolgonderzoek naar het gebruik van piezo elementen in een product om windenergie om te zetten in elektrische energie.

Tijdens het onderzoek heb ik veel plezier ondervonden van het verdiepen in de stof, en ondanks dat de afronding wat vertraging heeft opgelopen is het een onderwerp dat me nog erg enthousiast maakt en waar ik graag mee verder zou willen. Vooral omdat ik wel een toekomst zie weggelegd voor dergelijke energiebronnen en er tijdens de opdracht een aantal vragen nog onbeantwoord zijn gebleven. Vragen die door middel van leuk en interessant experimenteel onderzoek beantwoord kunnen worden.

Ik wil bij deze ook graag mijn begeleiders bij Tauw bedanken voor de mogelijkheid en de ondersteuning. Rob en Sybren, hartelijk bedankt, ook voor de ideeën en de fijne werkomgeving bij Tauw.

Verder wil ik Pepijn bedanken voor zijn ondersteuning en advies als universitair begeleider. Ik kom de boekjes zo snel mogelijk terug brengen! Tot slot wil ik Mascha van der Voort bedanken als examiner van mijn opdracht.

Ik hoop dat jullie allen het verslag met plezier hebben gelezen, en anders wens ik jullie dat bij dezen!

Maurits Korse

Mei 2012

Inhoudsopgave

Voorwoord	4
Inhoudsopgave	5
Samenvatting	6
Abstract	6
1. Inleiding	8
1.1. Context	8
1.2. Vraagstelling	9
1.3. Project opzet	9
2. Energy Harvesting	10
2.1. Trillingsenergie	10
2.2. Piëzo	11
2.3. Piëzo energie harvester	15
2.4. Windenergie	17
3. Inkadering	22
3.1. Beginpunt opdracht	22
3.2. Mogelijke toepassingsmogelijkheden	22
3.3. Alternatieve energiebronnen	24
3.4. Directe concurrenten	25
3.5. Duurzame productie	27
4. Vergroten efficiëntie	28
4.1. Van wind naar trillingsenergie	28
4.2. Van trillingsenergie naar elektrische energie	35
4.3. Aanpassingen	37
5. Prototype	38
5.1. Ontwerp	38
5.2. Experimenten	39
5.3. Resultaten	40
6. Product	45
6.1. Toepassing	45
6.2. Ontwerp	46
6.3. Productie	48
6.4. Duurzaamheid	49
7. Conclusie	50
7.1. Haalbaarheid	50
7.2. Product	50
7.3. Aanbevelingen	51
8. Bibliografie	52
9. Appendices	54
A. Specificatie Piezoharvester	54
B. Werktekening Solid Works model.	55
C. Overzichtstabel resultaten windtunnel experimenten	56

Samenvatting

Het doel van dit verslag is de ontwerpvraag beantwoorden met betrekking tot het omzetten van windenergie in elektrisch energie door middel van energie harvester gebaseerd op piëzomaterialen. De ontwerpvraag kwam voort uit een eerder onderzoek dat plaats heeft gevonden bij ingenieursbureau Tauw. Deze opdracht is dan ook daar uitgevoerd.

De ontwerp vragen die open lagen hebben vooral betrekking op verdere implementatie van de energie harvester. Er is om deze reden gekeken naar de praktische kant van de harvester. Hoe kan de harvester worden toegepast en in wat voor producten of situaties is de harvester een goede optie. Om deze vraag te kunnen beantwoorden is gekeken naar de mogelijke energie opbrengst en de daarbij passende toepassingen. Ook alternatieve energiebronnen zijn geëvalueerd en vergeleken, net als concurrerende energie harvesters.

De energie harvester heeft een relatief lage energieopbrengst. Maar door de robuustheid en de simpele opzet kan de harvester goed toegepast worden op afgelegen plaatsen waar weinig energie nodig is voor bijvoorbeeld datavergaring, verlichting of signalering.

Naast de praktische kant is ook de theoretische kant uitgelicht. Er is vooral met efficiëntie en de duurzaamheid van de harvester rekening gehouden. Met betrekking tot de efficiëntie van de harvester is deze in zijn fysische principes uitgesplitst en uitgelicht. Zo is eerst de achtergrond van deze fysische principes is onderzocht en de theoretische mogelijkheden. Daarna is per onderdeel, (aerodynamisch, mechanisch en elektronisch) gekeken wat praktisch de mogelijke verbeteringen zouden kunnen zijn om de efficiëntie van de harvester te vergroten.

Nadat er een aantal voorstellen zijn gedaan om de harvester aan te passen is een deel daarvan experimenteel onderzocht. Om die reden zijn een aantal prototypes gemaakt van de verschillende onderdelen van de harvester. Deze zijn daarna getest in een windtunnel. De resultaten van de experimenten zijn gebruikt om conclusies te kunnen trekken over de toepassingsmogelijkheden van de harvester.

Tot slot zijn de resultaten van de theoretisch en praktische kant van de opdracht gebruikt om conclusies te trekken over de toepassing, productie, duurzaamheid en haalbaarheid van een piëzoharvester. Ook zijn er een aantal aanbevelingen gedaan voor een vervolg aan dit onderzoek.

Abstract

The goal of this report is to answer the design problem regarding an energy harvester. This energy harvester is based on translating wind energy into electrical energy with the help of piëzo materials. The design problem was put forward by previous research that was executed at Tauw, an engineering company. The research preceding this report has also been executed at Tauw.

The design questions that were asked to be solved related especially to the further implementation of the harvester. Therefore both the theoretical and the practical angles have been studied. In what way can the harvester be applied and in which products or situations is the harvester a feasible option. To be able to answer those questions the theoretical power generation has been investigated. Alternative energy sources have been evaluated and compared also, just like competitive energy harvesters.

The energy harvester has a relatively low energy yield. However, due to robustness and the simple structure the harvester is well fit for remote locations that require little energy. For instance data collection, lighting or signage are possible applications.

Besides the practical side, the theoretical has been studied as well. The focus has been especially on the efficiency and sustainability of the harvester. Considering the efficiency the different physical principles have been explored. At first the background theory of those principles have been studied and the possible theoretical opportunities. After that for each of the physical parts of the harvester (aerodynamic, mechanic and electronic) practical and possible improvements have been designed to increase the efficiency of the harvester.

After a couple of proposals were made to improve the harvester, some of those proposals have been investigated in experiments. For that reason prototypes have been created of the different parts of the energy harvester after which they were tested in a wind tunnel. De results of the experiments have been the basis to draw conclusions regarding the possible applications of the harvester.

To finalize the results of the practical and theoretical angles of the research have been used to draw conclusions considering the application, production, sustainability and feasibility of the piëzo harvester. Also, a couple of recommendations have been made for a possible continuation of this research.

1. *Inleiding*

In dit eerste hoofdstuk zal de context en de vraagstelling van dit verslag worden aangehaald. Verder zal er kort het proces van het verslag worden besproken, ter inleiding van het verslag.

1.1. *Context*

De opdracht vloeit voort uit een eerdere afstudeeropdracht waarbij verschillen energiebronnen onderzocht zijn die omgevingsenergie omzetten naar elektrische energie. Deze worden ook wel energieharvesters genoemd. Deze opdracht, die bij het civiel ingenieursbureau Tauw BV in Deventer werd uitgevoerd, eindigde met een energieharvester die windenergie via trillingsenergie omzet naar elektrische energie.

1.1.1. *Tauw*

Tauw is een Ingenieurs en adviesbureau waarbij duurzaamheid een belangrijk leidraad is bij het uitvoeren van projecten. Het bedrijf wil hierbij een innovatieve houding aannemen door zich te ontwikkelen in nieuwe technieken en kennis. Tauw houdt zich bezig met consultancy met betrekking tot het milieu, ruimtelijke ontwikkeling, civiele techniek en het monitoren van omgevingskwaliteit. Deze onderwerpen vallen onder de volgende zes vakgebieden: ruimte, milieu, bodem, civiel, water en waterbouw. Voor opdrachtgevers uit het bedrijfsleven en de overheid voert Tauw projecten uit en brengt hen advies uit. Met betrekking tot omgevingsontwikkeling geeft het bedrijf ook juridisch en financieel advies.

Tauw investeert in vernieuwende manieren van denken om te komen tot een mooie, schone, veilige en duurzame leefomgeving. Hierbij kan gedacht worden om verloren omgevingsenergie om te zetten in een nuttige bron. Binnen afdeling Civiel van Tauw Deventer is al eerder onderzoek gedaan naar manieren om deze omgevingsenergie in de vorm van trillingen nuttig te maken. Onder andere in het onderzoek van Sybren Jansma: “The feasibility and design of a piezoelectric energy harvester for civil applications”. Het doel van Tauw is hierbij om nieuwe en open vraagstukken met betrekking tot de trillingsenergie verder uit te werken en op te lossen om zo tot flexibeler en rendabeler systeem te komen.

1.1.2. *Energie harvester*

De energie harvester is gebaseerd op het fenomeen dat objecten gaan trillen als de wind er langs waait. De meest bekende voorbeelden van dit principe zijn de Tacoma Narrows Bridge in Washington, of simpelweg de scheerlijnen van de tent die gaan trillen in de wind.

Dit fenomeen ontstaat doordat er wervels ontstaan achter het lichaam, net zoals het zog bij een boot in het water. Bij objecten die in de wind hangen ontstaat er tijdelijke lift. Indien de het lichaam los hangt of minimaal één vrijheidsgraden heeft dan zal deze gaan trillen. In de harvester wordt deze trilling dan opgevangen door een arm die aan één kant aan het lichaam vast zit en aan het andere eind ingeklemd zit. Deze arm zal de trillingen gaan opvangen door de licht door te buigen. Dit proces gaat alsmaar door waardoor een continue oscillatie in het lichaam en de arm ontstaat. Door gebruik te maken van materialen met specifieke elektrische eigenschappen kan deze doorbuiging worden opgevangen en worden omgezet naar elektrische energie.

1.1.3. Probleemomschrijving

Tauw heeft inmiddels een werkend prototype van deze harvester. Echter willen ze de mogelijkheid kunnen hebben om deze hernieuwbare energiebron ook in te gaan zetten. En dan voornamelijk op locaties waar Tauw als civiel ingenieurbureau wat aan heeft. Dus op plaatsen waar bodem of luchtmetingen moeten plaats vinden of bijvoorbeeld tijdelijke lichtmarkering.

Momenteel zijn daar nog geen goede energiebronnen voor beschikbaar. Het lichtnet is vaak niet aanwezig en kost veel om aan te leggen. Lokale energiebronnen zoals wind en zonne-energie kosten vaak veel onderhoud of zijn diefstalgevoelig. Accu's moeten weer regelmatig worden vervangen.

Er is dus een vraag voor een simpele, goedkope en duurzame energiebron die aan kleine energiebehoeftes kan voldoen.

1.2. Vraagstelling

De doelstelling die is opgesteld is als volgt:

Het toepassen van een piëzo-elektrisch principe gebaseerd op trillingsenergie uit wind in een te ontwerpen product waarbij energieopbrengst, kosten, en duurzaamheid in acht worden genomen.

Deze doelstelling kan worden omgevormd tot een aantal vragen:

- Hoe kan het piëzo-elektrisch principe toegepast worden?
Met als deelvragen:
 - Hoe werkt piëzo?
 - Wat zijn de mogelijk toepassingen?
- Hoe ontstaat trillingsenergie uit wind?
 - Hoe kan windenergie efficiënt worden omgezet naar trillingsenergie?
- Wat zijn de mogelijke producten die aan de energiebehoefte voldoen?
 - Hoe kunnen deze producten zo worden ontworpen en geproduceerd dat de energieopbrengst, de kosten en de duurzaamheid belangrijke maatstaven zijn?

1.3. Project opzet

Het project is opgedeeld in een aantal onderdelen. In deze wijze zal grotendeels het verslag ook gestructureerd zijn. Eerst zal algemene achtergrond informatie over de verschillende onderwerpen van het project worden gegeven. Daarna zal dieper ingegaan worden op de inkadering van het project. Wat is het begin, en waar moet het naar toe?

Daarna komen de praktischere delen van de opdracht. Nieuwe ontwerpen zullen worden gemaakt om de verschillende problemen op te lossen. Deze oplossingen zullen daarna door middel van een prototype worden getest. Uit de resultaten kunnen een aantal conclusies worden getrokken en zullen gebruikt worden voor het ontwerp van een product waarbij de harvester in de praktijk wordt toegepast.

2. *Energy Harvesting*

Energie is er in alle vormen in het dagelijks leven: van elektrische ontlading tijdens onweersbuien tot het bewegen van de blaadjes in de wind, en van warme autobanden tot trillende machines. Al deze omgevingsenergie is theoretisch op te vangen en bruikbaar te maken voor andere toepassingen. Het voordeel van het winnen van energie uit de omgeving ten opzichte van het gebruik van een batterij (met beperkte energievoorziening) of het transporteren van energie vanaf een andere locatie, is dat er geen transport meer is waarbij veel energie verloren gaat. Daarbij komt de benodigde energie direct uit de omgeving en is onuitputtelijk, of hernieuwbaar, zolang de omgeving in essentie niet verandert.

Bekende energiebronnen uit de omgeving zijn bijvoorbeeld licht en wind. Er zijn echter ook verschillende andere energiebronnen te vinden zoals warmte gradiënten in bijvoorbeeld het wegdek of het trillen van objecten en structuren.

Het grote verschil met conventionele energiebronnen zoals olie en kolen is dat omgevingsenergie een lagere energiedichtheid heeft maar wel wijdverspreid aanwezig is. Daarbij laat het zich over het algemeen niet concentreren op één locatie om daar de energie op efficiënte wijze om te zetten. Waterkracht daar gelaten. Dit heeft tot gevolg dat omgevingsenergie goed toe te passen is voor kleinere energiebehoefte op lokale schaal. Daardoor zijn veel deze bronnen goed toe te passen in de micro-elektronica, zoals voor sensoren, het verzenden van data, data manipulatie en actuatoren.

Kleine consumentenproducten maken al enige tijd gebruik van omgevingsenergie. Tegenwoordig misschien het meest bekende is het de zakrekenmachine die zijn energie uit een klein fotovoltaïsch paneeltje haalt. Een van de eerste werden eind jaren tachtig van de vorige eeuw gemaakt. Het eerste zelf opwindbare horloge, de zogenaamde automaat, bestaat al veel langer. In 1778 werd de eerste variant gemaakt die door beweging van het lichaam de veer gespannen kan houden.

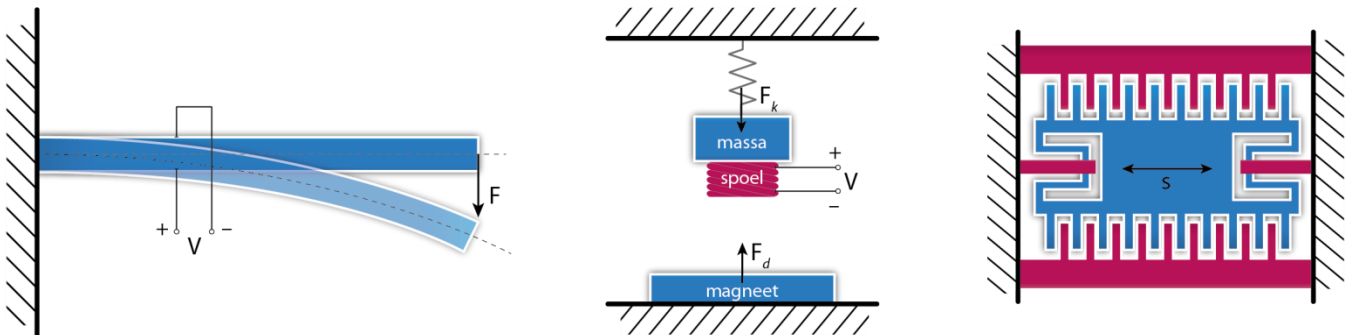


figuur 1 De eerste vormen van energy harvesting uit de omgeving.
Links het eerste moderne automatische horloge van Schweiz.
Rechts een van de eerste zon-gevoede rekenmachines, de Royal Solar 1

2.1. *Trillingsenergie*

Trillingen zijn een interessante bron van energie omdat deze in vele varianten aanwezig zijn: van hoge tot lage frequentie, grote en kleine amplitudes, maar vooral omdat ze overal voorkomen. Deze eigenschappen ontstaan omdat trillingen altijd het resultaat zijn van een andere energiebron zoals wind, water, mens en machine.

Om trillingen om te zetten in energie zijn er verschillende fysische principes die soelaas kunnen bieden: piëzo-elektrisch, elektromagnetisch en elektrostatisch. figuur 2 laat schematisch zien hoe deze principes werken.



figuur 2 Trillingsenergie winnen door verschillende fysische principes.
(a) Piëzo-elektrisch, (b) elektromagnetisch en (c) elektrostatisch.

De elektrostatische variant is vooral toepasbaar op zeer kleine schaal en kan gemakkelijk geïntegreerd worden op een printplaat. Voor de piëzo en elektromagnetische principes is dat ook mogelijk maar die zijn toch al snel een maat groter, daarbij zijn deze juist op grotere schaal ook goed toepasbaar.

De elektrostatische module werkt door middel van het principe van een condensator. Door trillingen verandert de capaciteit waardoor de opgeslagen energie verandert. Deze kan met geavanceerde elektronica worden omgezet in elektriciteit.

Elektromagnetisch energie opwekken uit trillingen gebeurt doordat een magneet een inductiestroom bij een spoel doet opwekken. De spoel en de magneet kunnen onafhankelijk van elkaar bewegen. Deze beweging wordt in gang gezet door trillingen uit de omgeving.

Piëzo-elektrische energie wordt opgewekt doordat een materiaal mechanisch wordt gedeformeerd. Deze deformatie zorgt voor een elektronenstroom als het materiaal in een elektrisch circuit geschakeld wordt.

Naast de schaalbaarheid heeft piëzo ook nog een aantal voordelen ten opzichte van de andere twee. Piëzo is qua mechaniek vele malen simpeler en robuuster. Het is slechts gebaseerd op een enkele deformatie en niet afhankelijk van verschillende onderdelen. Verder heeft piëzo over het algemeen een hogere conversie efficiëntie en valt een dergelijk systeem gemakkelijker te beheersen.

2.2. Piëzo

Materialen die drukveranderingen ondergaan gaan ook vaak van andere fysische eigenschappen veranderen. Ze worden hoog geleidend, bros, stralen warmte uit of polariseren. Piëzomaterialen hebben de eigenschap dat ze worden gepolariseerd zodra er drukverandering optreedt. Hierdoor ontstaat een elektrisch veld of potentiaal verschil. Het bijzondere is dat het fenomeen ook tegengesteld werkt. Zodra er een elektrisch veld op het materiaal wordt toegepast treedt er druk verandering en uiteindelijk deformatie plaats in het materiaal.

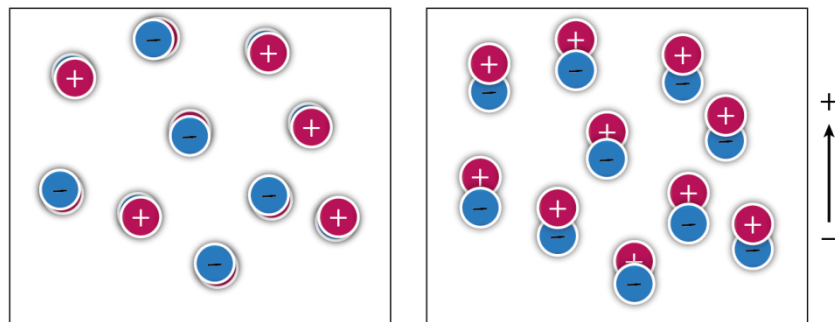
Piëzo wordt veel toegepast in sensoren, actuatoren en transducenten. De meest bekende vormen van piëzo elektriciteit is de vonk van de aansteker voor het gasfornuis of de in vorm van kleine speakers. Maar ook in frequentie gerelateerde producten zoals radar en radio wordt piëzo veel toegepast.

De eerste toepassing van het piëzo-elektrisch effect was in radiozenders in 1924, ruim veertig jaar na de ontdekking van het fenomeen door Pierre en Jacques Currie.

2.2.1. Principe

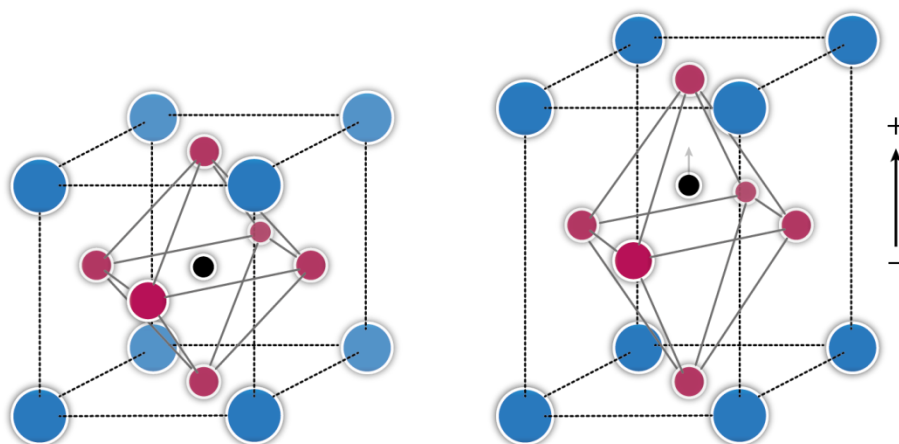
Kort gezegd ontstaat piëzo-elektriciteit door drukverandering van bepaalde materialen. Elastische energie wordt dan omgezet in elektrische energie omdat door de deformatie het materiaal polariseert.

In piëzomaterialen zoals kwarts zijn de molecuulstructuren a-centrosymmetrisch. Hierdoor kunnen dipolen ontstaan die zonder externe druk elkaar opheffen zoals in de volgende figuren is weergegeven. Zodra er een kracht op het materiaal wordt uitgeoefend worden gepolariseerde moleculen gecreëerd. Hierdoor ontstaan dipolen welke op hun beurt weer een polarisatierichting in het materiaal veroorzaken en dus een elektrisch potentiaal.



figuur 3 Polarisatie van de dipool moleculen

In het volgende figuur wordt een gedetailleerd model op moleculair niveau voor PZT (Loodzirkonaat-titanaat) weergegeven. Tijdens de deformatie (in verticale richting) verplaatst het titanium atoom uit het midden waardoor de negatieve en positieve atomen elkaar niet meer uitbalanceren. Hierdoor ontstaat een geladen molecuul.



figuur 4 Een deformatie in de kristallijne structuur van PZT waardoor een lading onbalans ontstaat.

2.2.2. Types

Van nature zijn een aantal materialen al piëzo-elektrisch zoals kwarts en kristalsuiker. Vanaf rond 1950 kwamen er echter ook kunstmatige piëzomaterialen op de markt. In eerste instantie waren dit keramische materialen zoals BaTiO₃ (Bariumtitanaat) en PZT. Later, rond 1970, kwamen de eerste polymeren die piëzo-elektrische eigenschappen hebben. Ceramische materialen worden echter nog het meest gebruikt vanwege hun gunstige eigenschappen zoals een hoge elektrische capaciteit en een hoge stijfheid.

Materiaal	Diëlektrische constante / ϵ_r	Kosten €/kg	Opmerking
<i>Kristallen</i>			
Kwarts [SiO ₂]	4	8	Natuurlijk, niet hernieuwbaar
Berliniet [AlPO ₄]	5	onbekend	Natuurlijk, niet hernieuwbaar
Gallium orthofosfaat [GaPO ₄]	11	onbekend	Synthetisch
Tourmaline	3	2000+	Natuurlijk, niet hernieuwbaar
<i>Keramiek</i>			
Bariumtitanaat [BaTiO ₃]	1250 – 10.000	10 – 50	Synthetisch, recyclebaar
Loodzirkonaat- titanaat [PZT]	300 – 3800	370	Synthetisch, lood component
<i>Overige</i>			
Zinkoxide [ZnO]	2	8	Synthetisch, recyclebaar
Aluminum nitride [AlN]	9	75 – 120	Niet hernieuwbaar
Polyvinylidene fluoride [PVDF]	10	11 – 13	Synthetisch, recyclebaar

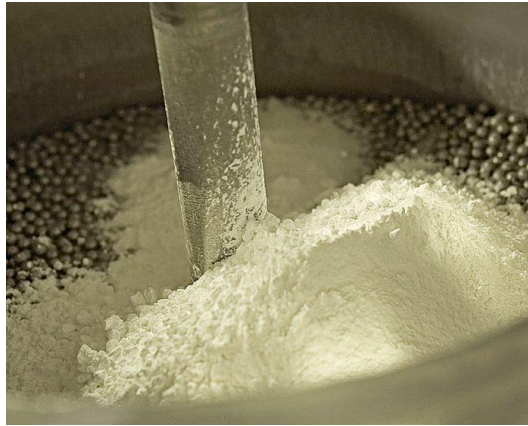
tabel 1 beknopt overzicht van een paar verschillende piezo materialen

Zoals in tabel 1 te zien is zijn de er vele verschillende piëzomaterialen in verschillende prijscategorieën en elektrische eigenschappen. Welke piëzomateriaal gekozen dient te worden is geheel afhankelijk van de toepassing. Een hoge diëlektrische constante geeft bijvoorbeeld aan dat dit materiaal goed geschikt is als condensator. Ook voor het omzetten van mechanische deformatie naar een elektrisch potentiaal is deze factor van belang.

De kosten per kilogram geven enigszins een verdraaid beeld omdat de verschillende materialen uiteraard een andere dichtheid hebben. Het geeft echter wel aan dat er wel (en zelfs binnen dezelfde materiaalcategorieën) grote verschillen zijn.

Hetzelfde geldt voor de duurzaamheid. Sommige materialen komen van nature voor, andere worden synthetisch vervaardigd. Het probleem zit 'm echter in de energie die benodigd is en het afval die de materialen met zich mee brengen. PZT wordt vanwege zijn optimale materiaal en piëzo-elektrische eigenschappen veel toegepast. Het bevat echter een schadelijk lood component. Er is inmiddels een

onderzoek van YTC America¹ die ernaar streeft om lood vrije alternatieven te ontwikkelen, want zoals uit een onderzoek van Zhang et al (2007) is gebleken zijn goede alternatieven nog niet voor handen.



figuur 5 Poeder en granulen waarvan PZT wordt vervaardigd

Momenteel in ontwikkeling zijn composiet vormen van piëzomaterialen waarbij bijvoorbeeld de keramische varianten worden in spuitgiet producten worden verwerkt of als vezels worden vervaardigd in polymeren. Dit verhoogt de flexibiliteit van de materialen en vermindert de broosheid, zonder dat dit ten koste gaat van energieconversie.

Het verwerken van de standaard piëzomaterialen tot composieten lijkt daarom nog een grote potentie te hebben dan het toepassen van de pure materialen.

2.2.3. Toepassingen

Van nature zijn verschillende, vooral kristallijne piëzomaterialen alledaagse gebruiksmaterialen of goederen. Bijvoorbeeld kristalsuiker of zout. Maar ook in het duurdere segment komen materialen met piëzo eigenschappen voor, zoals Tourmaline dat in sieraden wordt gebruikt.



figuur 6 (a) Kristalsuiker en (b) Tourmaline kristallen

¹ YTC America is een bedrijf is een onderzoek en ontwikkelcentrum dat zich richt op nieuwe materialen en software.

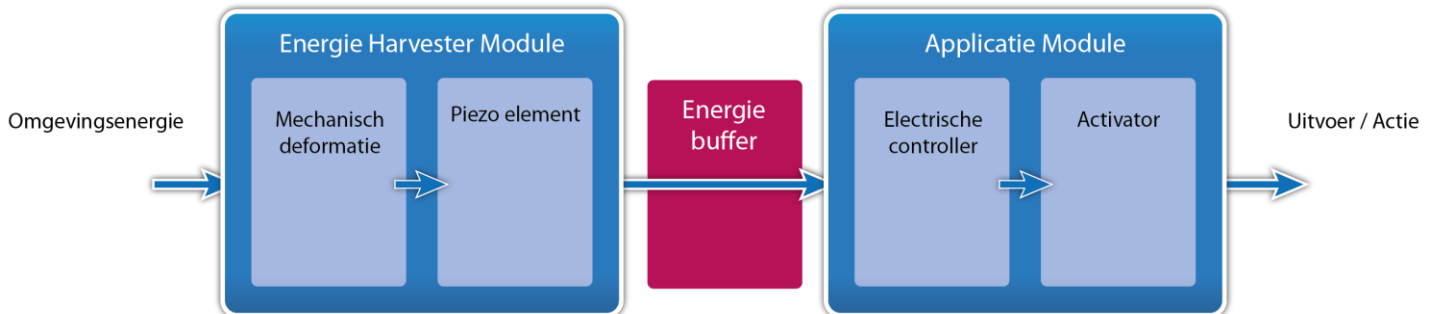
Piëzomaterialen worden voornamelijk gebruikt als transducenten om de ene energievorm om te zetten in de ander, vaak om informatie over te dragen. Hierbij kan gedacht worden aan sensoren en actuatoren en ze komen dan ook veelvuldig voor in communicatiesystemen zoals radar en sonar in de vorm van ontvangers of zenders. Naast informatieoverdracht worden ze ook veel gebruikt voor elektrische, elektronische en mechanische toepassingen zoals als ontstekers, filters, oscillatoren, motoren en pompen. In de laatste gebruiksvorm valt ook de energie harvester.



figuur 7 Toepassingen piëzomaterialen in (a) een ontsteker en (b) een luidspreker.

2.3. Piëzo energie harvester

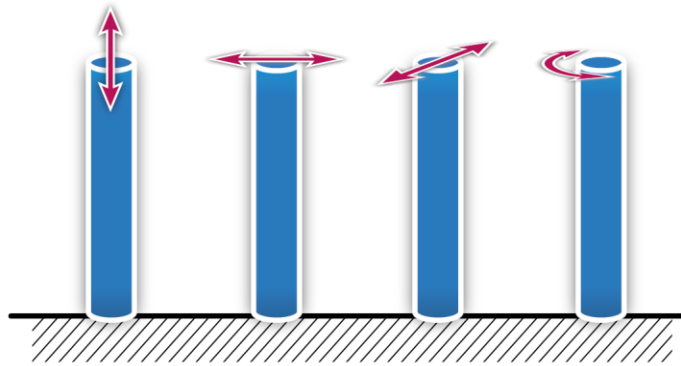
Energie harvesters gebaseerd op piëzomaterialen zijn in verschillende uitwerkingen mogelijk. Er is echter wel een standaard schema voor te hanteren. In figuur 8 is schematisch weergegeven hoe de energie van vorm tot vorm veranderd per deel in de harvester en daarna waar de energie wordt toegepast.



figuur 8 Schema voor een energie harvesting system gebaseerd op het piëzo principe.

De energie komt in eerste instantie binnen als omgevingsenergie bij de harvester module. Dit kan bijvoorbeeld de wind zijn, maar ook water bewegingen of machinale trillingen. Binnen deze module wordt deze omgevingsenergie omgezet in een bruikbare en gecontroleerde mechanische deformatie. Door een piëzoelement toe te passen op de plek waar de mechanische deformatie ontstaat, zal ook het piëzomateriaal deze deformatie ondergaan en een elektrisch potentiaal opwekken.

De deformatie van het piëzomateriaal kan in verschillende richtingen ten opzichte van het materiaal plaats vinden. Omdat de meeste piëzomaterialen anisotroop zijn, is het van belang dat bij de juiste belasting ook het juiste materiaal in de juiste richting wordt gebruikt. De vormen van belasting zijn in het volgende schema te zien.



figuur 9 De verschillende deformaties die piëzo-elektrische effecten teweeg brengen

Na de mechanische deformatie ontstaat er een potentiaalverschil over het materiaal. Om dit ook te kunnen gebruiken dient er een schakelweerstand in de schakeling te worden opgenomen. In het onderzoek van Zhu et al. (2009) wordt aangetoond dat de keuze van deze weerstand van invloed is op onder andere de uitwijking van de deformatie van het piezomateriaal, de resonantie frequentie van het systeem en de energieopbrengst.

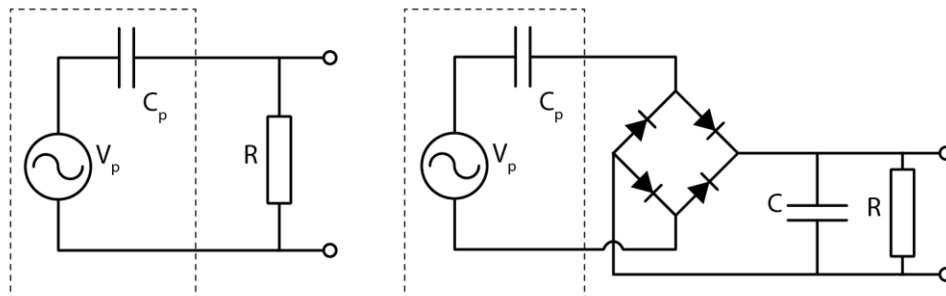
De keuze van de schakelweerstand is afhankelijk van de frequentie en de capaciteit van het piezomateriaal zoals beschreven in de volgende formule:

$$R_{opt} = \frac{1}{\sqrt{\omega \cdot C}} \text{ met } \omega = 2\pi \cdot f$$

vergelijking 1 Optimale schakelweerstand voor piëzoelement.

Gekeken naar figuur 8 bestaat het energieopwekkende deel uit de hierboven beschreven onderdelen: de mechanische deformatie en de transformatie hiervan naar elektrische energie.

Omdat de deformatie een oscillerende beweging beschrijft heeft deze ook een bepaalde frequentie. Deze frequentie wordt door het piëzomateriaal één op één omgezet naar wisselstroom. Een ander karakter van de stroom die opgewekt zal worden is dat deze van lage stroomsterktes zal zijn maar daarentegen hoge voltagepieken kan vertonen.



figuur 10 Elektrische schakelingen. Het piëzomateriaal is met een stippellijn aangegeven. In (a) kan de energieopbrengst direct worden gebruikt. In (b) wordt de stroom gelijk gericht door een viertal diodes.

Om de elektrische energie dan ook goed te kunnen gebruiken is het van belang dat de toepassing op deze eigenschappen is afgesteld en dat er eventueel nog een energiebuffer tussen de harvester en de toepassing wordt geplaatst. Aangezien de voorspelde energieopbrengst niet voldoende zal zijn om de energie aan het lichtnet te leveren is het handig om de wisselstroom gelijk te richten. Voor energiebuffers is dat van belang, voor de meeste elektronica ook. In figuur 10b wordt een voorbeeld gegeven hoe dat bereikt kan worden.

2.4. Windenergie

In deze bacheloropdracht gaat het om het transformeren van windenergie naar elektrische energie doormiddel van een op piëzo gebaseerde harvester. Het piëzo-onderdeel is in de paragrafen hiervoor beschreven. In de volgende zal de windenergie beschreven worden en hoe deze gebruikt kan worden om mechanische deformatie te veroorzaken.

Windenergie wordt inmiddels op grote schaal door windturbines geharvest. De opbrengst wordt meestal direct aan het net geleverd en daarna als groene stroom aan bedrijven en particulieren verkocht. Deze manier van energie opwekken en leveren is helaas niet in elke situatie geschikt ondanks dat de wind op die locatie wel een vanzelfsprekende energiebron kan zijn. Bijvoorbeeld midden in natuurgebieden, boven op torens of op andere afgelegen locaties. Op deze locaties is vaak geen lichtnet aanwezig, en het aanleggen daarvan kost veel geld en kan afbreuk doen aan natuur of omgeving. Daarbij wekt een standaard windmolen² tegenwoordig het equivalent op van tientallen tot wel honderden huishoudens. Voor de energievoorziening van bepaalde metingen, draadloze communicatiemodules of bijvoorbeeld verlichting is de stroomtoevoer van een turbine of het lichtnet dan zeer overgedimensioneerd.

Kleinere windmolens (tot 15m hoog) komen meer in deze richting, maar leveren ook al snel te veel energie en zijn in verhouding minder efficiënt. Een bijkomend nadeel van windturbines is dat door de roterende onderdelen en de generator er relatief veel onderhoud vereist is ten opzichte van andere energiebronnen.



figuur 11 Kleine windmolens voor onderzoek opgesteld in Zeeland.

² Windmolens met een masthoogte van meer dan 50m en een rotordiameter van minimaal 40m.

2.4.1. Potentie

De hoeveelheid energie die zich in de wind bevindt is potentieel om te zetten naar elektrische energie doormiddel van de harvester. De kinetische energie kan volgens de wet van Betz maar voor maximaal 60% worden omgezet door windturbines. Uit deze wet kan ook geconcludeerd worden dat de harvester slechts een deel kan omzetten.

De volgende formule geeft aan wat het vermogen van de kinetische energie is die de harvester zal passeren. Uit deze formule volgt dat het oppervlak en de verplaatste lucht hier van belang zijn. Dit kan later gebruikt worden om de efficiëntie van de harvester te berekenen.

$$P = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v^3$$

vergelijking 2 Het vermogen van de wind (of andere vloeistof) dat met een bepaalde snelheid een oppervlakte passeert.

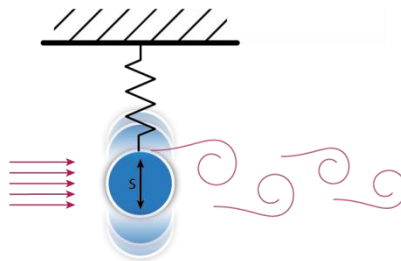
2.4.2. Principes

Naast wind turbines zijn er verschillende mogelijkheden om de wind om te zetten naar trillingen of bewegen die op te vangen zijn door energie harvesters. Deze berusten voornamelijk op twee verschillende principes: vortex induced vibrations (VIV) en flutter. In beide gevallen moet het lichaam waar de wind langs blaast minimaal één vrijheidsgraad hebben.

Vortexen ontstaan in het zog van een lichaam. Doordat de wind in een laminaire of turbulente toestand komt ontstaan er wervels achter het lichaam. Deze wervels hebben tot gevolg dat er over en onderdruk gebieden achter het lichaam welke resulteren in een beweging van het lichaam in die richting.



figuur 12 Wind in laminaire of turbulente toestand achter het lichaam (zonder vrijheidsgraden)



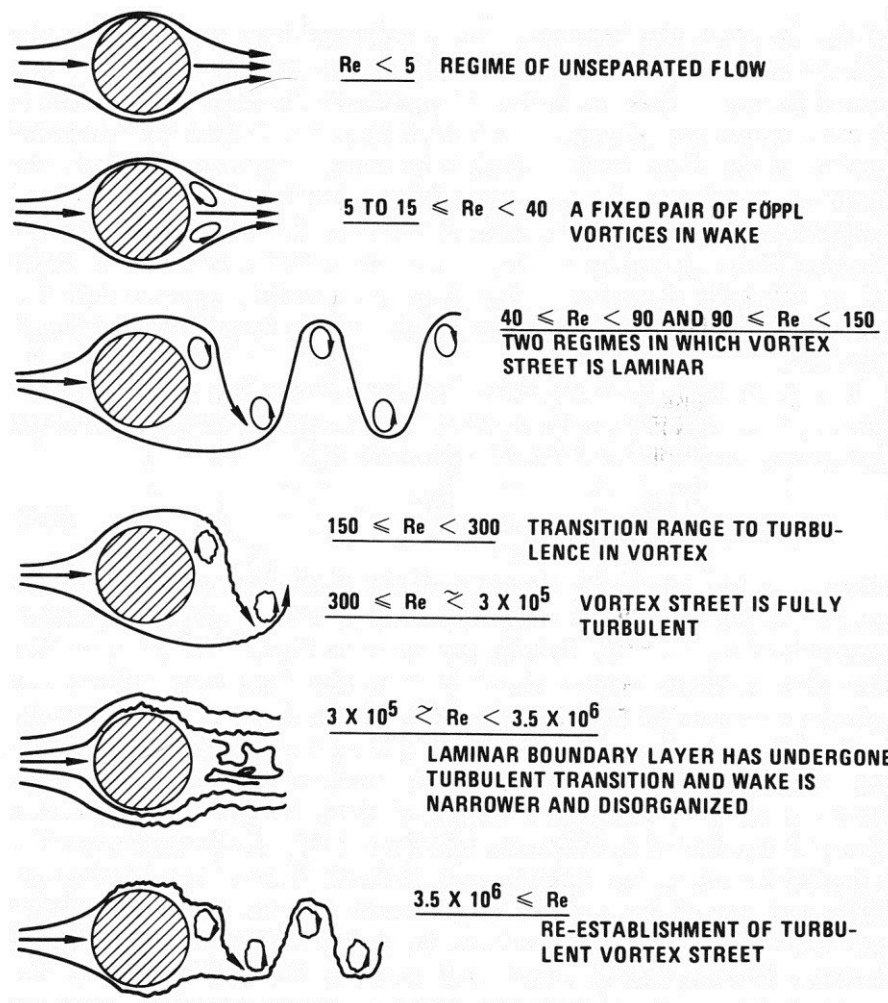
figuur 13 Lichaam gaat oscilleren door de het 1 DOF heeft gekregen.

De condities waarin dit fenomeen plaats vindt luistert nauw. Het Reynoldsgetal (Re), dat een indicatie geeft van het type zog die achter het lichaam ontstaat, kent een optimaal gebied waarin de vortexen ontstaan. In figuur 14 is een overzicht van de verschillende typen zog. Het Reynoldsgetal is afhankelijk van

een aantal factoren. Namelijk de snelheid en viscositeit van de vloeistof, in dit geval de wind. En van de diameter van het lichaam. In de volgende formule is deze relatie te zien.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\mu}$$

vergelijking 3 Reynoldsgetal, met v is de windsnelheid, d de diameter van de cilinder en μ de viscositeit van de lucht.



figuur 14 Beschrijving van het zog bij verschillende Reynoldsgetalen voor cilinders.

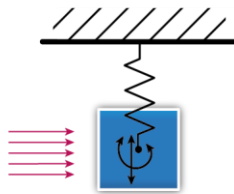
De oscillatie die het lichaam beschrijft kan ook worden benaderd. Deze wordt gegeven door het Strouhalgetal. Dit getal legt de relatie tussen de afschudfrequentie, de frequentie waarmee de vortexen ontstaan, de diameter van het lichaam en de snelheid van de wind.

$$St = \frac{f_v \cdot d}{v}$$

vergelijking 4 Het Strouhalgetal, met v is de windsnelheid, d de diameter van de cilinder en f de afschud frequentie.

Vortex induced vibrations zijn zeer goed te beschrijven omdat dit voorspelbare bewegingen zijn. Een andere manier om een lichaam in trilling te brengen door de wind is doormiddel van Flutter. Bij dit fenomeen is de beweging van het lichaam onvoorspelbaar en heeft geen continue oscillatie. Bij flutter zijn namelijk de torsie en zijdelings vibraties nagenoeg aan elkaar gelijk en wisselen elkaar onvoorspelbaar af.

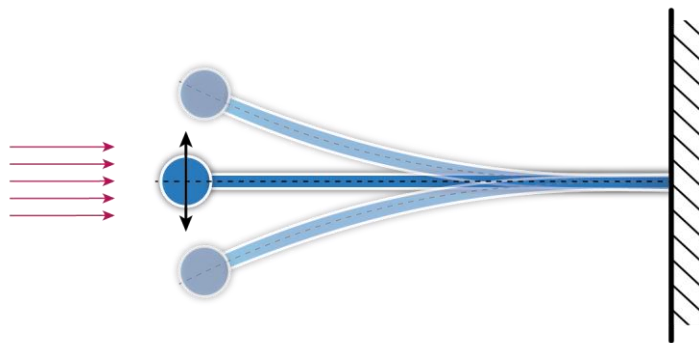
Flutter ontstaat zodra het zog instabiel is en is van lage frequentie. Het nadeel ten opzichte van VIV is dat flutter niet zelf beheersend is.



figuur 15 Flutter. Het lichaam beweegt gecombineerd zijdelings en draaiend.

2.4.3. Van Vortex Induced Vibrations naar Mechanische deformatie

Om van de vortex induced vibrations naar mechanische deformatie te gaan zoals deze beschreven is in paragraaf 2.3 moet het ronde lichaam dat gaat trillen deze trilling overbrengen in het piëzomateriaal door deze te laten verbuigen. Het volgende figuur geeft aan hoe dit mogelijk is.



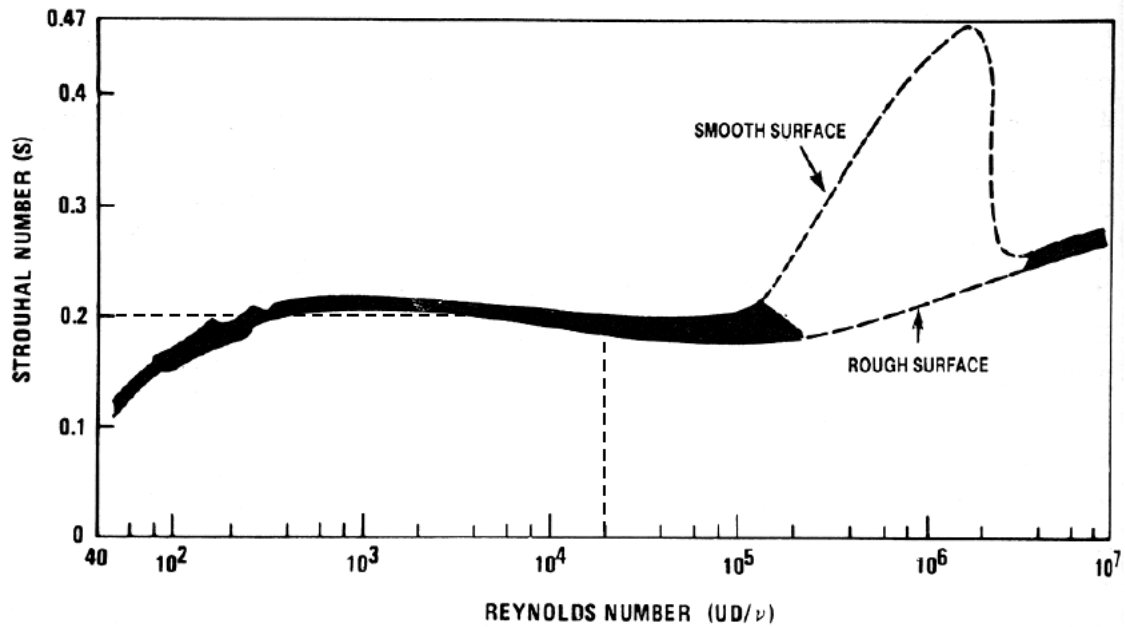
figuur 16 Een cilinder die oscilleert door VIV bevestigd aan een arm die daardoor deformeert.

Om de krachten die op de cilinder ontstaan door de vortexen goed over te brengen op de arm die de cilinder vast houdt is het gewenst om de eigenfrequentie van het systeem, ω_v , gelijk te laten zijn aan de afschudfrequentie van de vortexen. Dit fenomeen heet lock-in. De relatie tussen het Strouhalgetal en het Reynoldsgetal is in figuur 17 weergegeven, deze is van belang om de afschudfrequentie te bepalen met behulp van vergelijking 4. Voor het merendeel van de laminaire en turbulente gebied van het Reynoldsgetal, tussen $40 < Re < 3.5 \cdot 10^6$ is het Strouhalgetal ongeveer 0.2. Met vergelijking 5 kan de

gewenste eigenfrequentie van het systeem bepaald worden. Hieruit kunnen weer verschillende eisen komen met betrekking tot de dimensionering en het materiaal keuze van de gehele harvester.

$$\omega_v = 2\pi \cdot f_v$$

vergelijking 5 De optimale frequentie is bij lock-in, daar is de afschudfrequentie gelijk aan de eigenfrequentie.



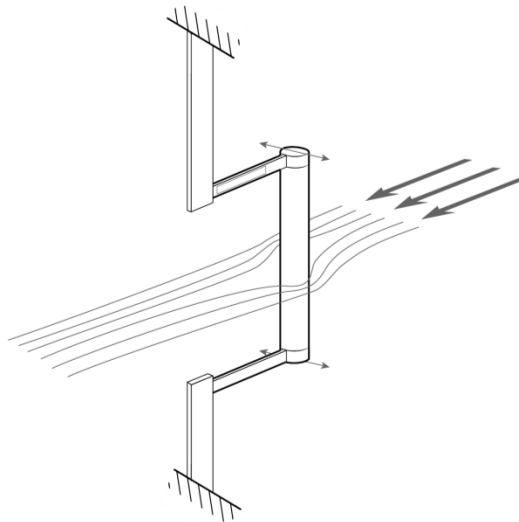
figuur 17 Relatie tussen Reynoldsgetal en het Strouhalgetal voor cilinders

3. Inkadering

De mogelijkheid om energie op te wekken uit de wind door middel van trillingen is een techniek die nog maar kort in ontwikkeling is. In deze bacheloropdracht gaat het om het gebruik van piëzomaterialen: het vervolg op het resultaat van eerder onderzoek van Jansma, 2011. In dit hoofdstuk zal dit begin punt kort uiteengezet worden waarna wordt gekeken naar de mogelijke toepassingen. Tot slot zal de huidige markt van energiebronnen worden bekeken. Hierbij een aantal aspecten in acht genomen zoals opbrengst, duurzaamheid en mobiliteit. Deze kunnen gezien worden als de eisen en wensen voor het product.

3.1. *Beginpunt opdracht*

Het ontworpen product waarop deze opdracht een vervolg is, is een simpel systeem van een PVC cilinder die aan twee stalen armen is opgehangen. Deze buis gaat doormiddel van vortex induced vibration trillen in de wind waarna de armen deformer en de bevestigde piëzomaterialen een elektrisch potentiaal opwekken. Dit systeem is in een windtunnel getest en een positief resultaat was gevonden.



figuur 18 Schematisch diagram van de piëzo harvester ontwikkeld door Jansma.

Na dit onderzoek bleven echter nog verschillende vragen over, vooral met betrekking tot de toepassing van de harvester. Hoe zit het met verschillende weersinvloeden, en de harvester bijvoorbeeld geïntegreerd worden in een ander product?

3.2. *Mogelijke toepassingsmogelijkheden*

De mogelijke toepassingen van de harvester zijn grotendeels afhankelijk van zijn eigenschappen. Het formaat van de harvester in het onderzoek van Jansma was ongeveer 350mm bij 230mm. De uitwijking van de cilinder was enkele centimeters. Dit leverde ongeveer maximaal $0.4 \mu\text{W}$ op en gemiddeld 0.2 per PVDF strip. Met maximaal vier PVDF strips op de harvester kan dat dus verviervoudigd worden, oftewel $2,880 \cdot 10^{-3}$ Watt uur.

Het voordeel verder van deze harvester is dat deze een van een robuuste constructie is. Door de relatief kleine uitwijking van de oscillatie vindt er in de arm geen metaalmoeheid plaats. Ook zijn er geen andere

onderdelen die snel slijten. De grootste slijtage vindt waarschijnlijk plaats bij de PVC buis onder invloed van verschillende weersinvloeden. Maar ook dat moet een ruime twintig jaar vol kunnen houden.

Qua productie zit het systeem ook relatief simpel in elkaar. Het zijn standaard onderdelen dan wel simpele onderdelen om te produceren. Het grootste probleem is het waarborgen van de stijfheid van de armen, en vooral de inklemming daarvan.

Met ongeveer 0.3kg aan staal, 0.150kg aan PVC, de PVDF stripjes en nog wat losse boutjes en lijm komt de prijs ruim onder de €5,- per stuk uit (afhankelijk van de productieaantallen). Hierbij moet dan nog wel de manuren en extra benodigde elektronica worden gerekend.

Het systeem is dus goedkoop maar levert ook relatief weinig energie. Wel heeft de harvester een dergelijk formaat dat de energie niet op té kleine schaal ingezet kan worden. Een aantal mogelijke toepassingen die in deze bacheloropdracht zijn bekeken zijn staan vermeld in tabel 2. Op verwarming van brugdekken na, zijn deze toepassingen haalbaar bij het gebruik van een of een paar harvesters.

Toepassing	Energieverbruik Watt	Opmerkingen
<i>Verlichting</i>		
Paden en wegen	5 – 15	Minimale verlichting / slimme verlichting
Wachtruimtes	15	
<i>Communicatie</i>		
Advertenties	<1 – 20	Vooral afhankelijk van refreshrate
SOS palen / praatpalen	4	Mobiele verbinding
Informatie voorziening (bv Bushalte)	5 – 20	Standard LCD (per m ²)
	<1 – 5	ChLCD - e-paper (per m ²)
<i>Signalering</i>		
Tijdelijke markeringen	5 – 20	Mogelijk lastig om stijfheid te garanderen
Lichtkronen schoorstenen	20	Meerdere felle LEDS
Schrikafrastering	4 – 20	Afhankelijk van intensiteit en frequentie
Gevaarmarkeringen	5 – 20	Meerdere felle LEDS met controller
<i>Metingen</i>		
Distributed datacollection	10 – 20	Metten en verzenden gegevens
Sensoren	5 – 10	Piëzoelementen
<i>Overige</i>		
Verwarming brugdek	200	Minimaal (per m ²)
Kunst	< 1 – x	Zeer variabel

tabel 2 Mogelijke toepassingen piëzo harvester.

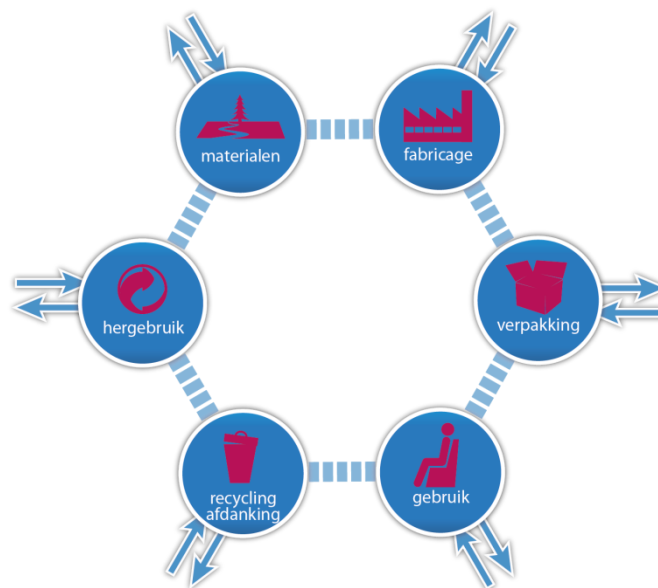
Omdat het systeem zeer simpel in elkaar zit en van een beperkt aantal materialen gebruik maakt zijn is de harvester ook weer gemakkelijk en zonder veel arbeid te demonteren en te recyclen.

3.3. *Alternatieve energiebronnen*

De harvester is een nieuwe bron om producten te voorzien van energie. De vraag is echter of het ontwikkelen van een nieuwe energiebron efficiënt, kostenbesparend en concurrerend is. Waarvan de laatste vooral met de vraag te maken heeft: zijn de huidige energiebronnen qua energieproductie genoeg beter of gelijk aan de piëzoharvester voor de mogelijke toepassingen. Hierbij komen een aantal aspecten kijken.

De mobiliteit van de meester energiebronnen is zeer beperkt. In de meeste gevallen zal de energie via het lichtnet aangeboden worden aan de toepassing. Indien je toepassing mobiel is, zoals tijdelijke wegmarkering, kan het lastig zijn om een aansluiting op het lichtnet te vinden. Ook het gebruik van energie op afgelegen locaties kan problematisch zijn. Denk hierbij aan metingen aan de lucht bodem, of het verlichten van obstakels zoals hoge schoorstenen of masten. Het aanleggen van een aansluiting naar het lichtnet is een dure en soms lastige operatie.

Natuurlijk zou ook gebruik kunnen worden gemaakt van energie die op locatie wordt geproduceerd zoals windturbine of met behulp van PV-modules. Hier zitten echter ook een aantal haken en ogen aan. De productie en installatie van deze energiebronnen is relatief duur, ze zijn onderhoudsgevoelig (bewegende onderdelen in de windmolens, of vogelpoep en stof op de PV-modules), ze zijn al snel overgedimensioneerd qua formaat en energieproductie. Tot slot zijn PV-modules ook nog steel-gevoelig. Accu's zijn ook nog een mogelijkheid maar vereisen regelmatig opladen en zijn ook tegen diefstal niet even veilig.



figuur 19 Stages van de levenscyclus van een product

Met betrekking tot de mobiliteit van energiebronnen is er dus nog een gat in de markt waar een piëzoharvester een vulling aan kan geven. Namelijk een relatief lage productie van energie, goedkope productie en installatie, en niet onderhoudsgevoelig.

Een ander belangrijk aspect is of de harvester een duurzamere energiebron is dan de gangbare energiebronnen. Om verschillende energiebronnen met elkaar te vergelijken is het belangrijk om de volledige productie cyclus van de energie bron te bekijken. Dat houdt in van het delven van de grondstoffen, de plaats waar de energie geproduceerd wordt en de afvalproducten die ontstaan.

In figuur 19 is een versimpeld overzicht te zien van hoe de levenscyclus van producten en ook de energiebronnen beoordeeld kan worden. In tabel 3 staat een beknopt overzicht van de impact dan wel de eisen van verschillende energiebronnen.

Aspect	Centraal (Lichtnet)					Lokaal/Decentraal	
	Kolen	Olie	Gas	Nucleair	Hydro	PV	Windturbine
Algemeen	Fossiel	Fossiel	Fossiel	Nucleair	Hernieuwbaar	Hernieuwbaar	Hernieuwbaar
Kosten per €/MWh	85-110		105-120	100-130	30-130	280-400	30-150
Gezondheidsrisico's per TWh	3-50	10-78	1-11	0-1	0-1		0-3
Uitstoot – energie productie	780-1000	600-700	350-400	0	0	0	0
Uitstoot – transport brandstof		160-220	120-250	0	0	0	0
Uitstoot – overige	10-50	80-100	50-100	0-50	5-90	10-100	5-20
Landtransformatie m ² /GWh	200-400		300	150	4100	100-550	1000-3200
Netto Energieopbrengst (EROI)	80 : 1	5-305 : 1	10 : 1	5-15 : 1	>100 : 1	6.8 : 1	18 : 1
Afhankelijk van omgeving	nee	nee	nee	nee	Ja	ja	ja
Afhankelijk van weersinvloeden	nee	nee	nee	nee	deels	ja	ja

tabel 3 Beoordeling alternatieve energiebronnen. De gezondheidsrisico's zijn gemeten als doden per TWh in de EU. De uitstoot is gemeten in tonnen CO₂ equivalenten per GWh, behalve voor het transport welke in grams CO₂eq per km is weergegeven.

Uit de analyse van deze bestaande energiebronnen kan worden gesteld dat de opkomende hernieuwbare energiebronnen een groter verschil in prijs laten zien en of relatief goedkoop of zeer duur. Echter hebben de goedkopere varianten (water en windturbines) een veel grotere invloed op het landschap. Een andere conclusie die getrokken kan is dat PV en windturbines alleen onderdoen voor waterkracht en kolen. Waarbij waterkracht niet altijd een alternatief kan zijn vanwege de afhankelijkheid van de omgeving. Kolencentrales daarentegen niet, maar deze worden vanwege de groeiende maatregelen om uitstoot van broeikasgassen tegen te gaan minder aantrekkelijk.

Naast de conventionele energiebronnen zijn er ook een aantal andere recente initiatieven om energie harvesters te gebruiken om windenergie om te zetten naar elektrische energie.

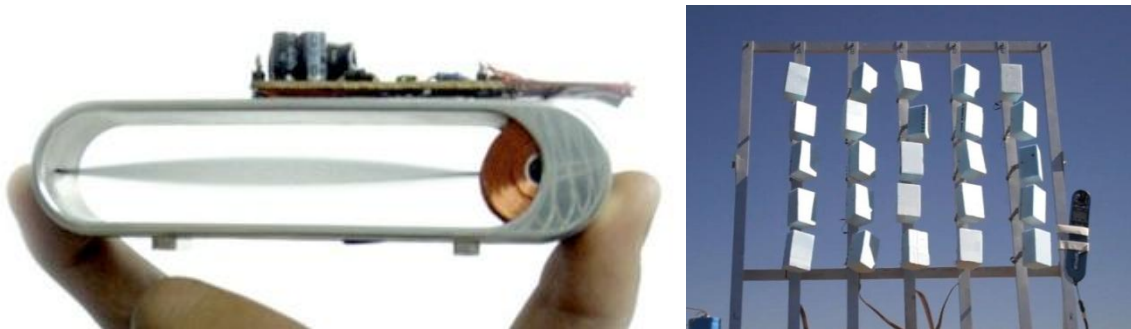
3.4. Directe concurrenten

Deze directe energie harvesters springen op sommige onderdelen in hetzelfde gat waar het product van deze bachelor opdracht zich plaatst. Relatief kleine opstellingen, van centimeters tot enkele meters, en

relatief kleine opbrengst waardoor een decentrale opwekking voordeliger is ten opzichte van de huidige centrale energie voorzieningen.

De eerste is een product dat gebruik maakt van elektromagnetische energie opwekking zoals in figuur 2b te zien is. De *Humdinger Windbelt* (figuur 20a), maakt gebruik van het flutter effect dat een koord, de belt, laten trillen in de wind. Dit koord zorgt op zijn beurt voor een verplaatsing van een magnetisch veld ten opzichte van een spoel die zich aan het uiteinde van het koord bevindt. Een elektrische stroom wordt dan opgewekt door inductie. De kleine variant van de Wind Belt levert ongeveer 100 – 200 Watt uur op, de grote variant 7,2 kWh, en kost zo'n \$0,05 per kWh.

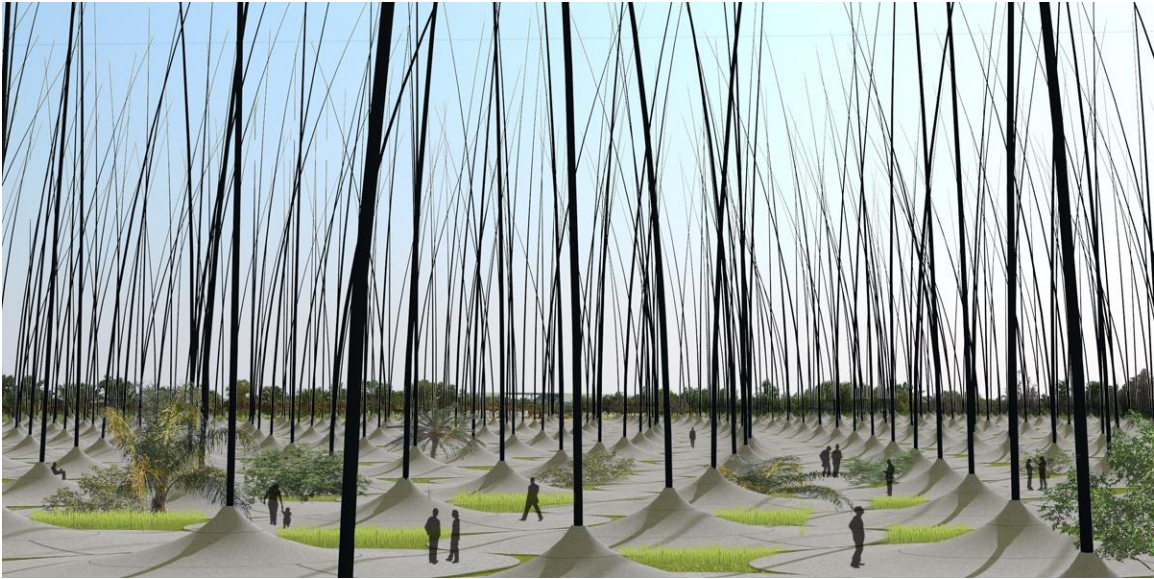
Het *Vibro-wind* project van de Cornell University is nog niet zo ver gevorderd als de *Humdinger Windbelt* welke wacht op bedrijven om een productie licentie te kopen zodat de belt op de markt komt. De *Vibro-wind* is een array van schuimblokken die aan een arm bevestigd zijn. Deze schuimblokken bewegen door middel van het Flutter principe waardoor de armen deformeren. Net als bij de harvester van deze bacheloropdracht zitten er op de armen PVDF piëzoelementen die de deformatie omzetten naar een elektrische stroom.



figuur 20 (a) de 'Humdinger Windbelt' maakt gebruik van elektromagnetisch principe en (b) het op flutter en piezo gebaseerde 'Vibro-wind' project.

De *Vibro-wind* is zover bekend nog steeds in ontwikkeling en helaas worden weinig specificaties en gegevens van vrijgegeven zodat een vergelijking moeilijk te maken is. Ze verwachten echter een opbrengst in de orde van grote van 0,15- 0,20μW. Opgemerkt kan wel worden dat een array uit ruim twintig blokken bestaat. Hierdoor is er een groter oppervlakte beschikbaar om de piëzomaterialen op te bevestigen dan bij het huidige aan energie opbrengt dan de harvester van deze opdracht. Dat de *Vibro-wind* uit een groot aantal blokken bestaat maakt hem qua ontwerp en integratie ook dynamisch. Het is geen vereiste om er een vierkant vlak mee te bedekken, maar ze kunnen ook in een horizontale of verticale lijn geplaatst worden.

In versie twee van het ontwerp gebruiken ze stijvere armen waardoor de oscillatie van een hogere frequentie is, en zoals geclaimd wordt, de efficiëntie ook groter is. In deze tweede variant bewegen de schuimblokken ook veel gecontroleerder en met een kleinere uitwijking waardoor waarschijnlijk minder snel materiaalmoetheid ontstaat.



figuur 21 De 'Windstalk' maakt gebruik van piëzoelementen.

Een derde product dat ook geen turbines gebruikt om wind om te zetten maar piëzomaterialen en een torque-generator is het ontwerp van Atelier DNA, de *Windstalk*. De *Windstalk* is nog een conceptueel ontwerp, ontworpen na aanleiding van de 'Land Art Generator' wedstrijd, dat zich niet richt op de kleinschalige productie van energie zoals de Wind Belt en de Vibro-wind, maar een alternatief wil zijn voor de standaard windturbines. Het zijn enorm uitvergrote grassprietten die langzaam bewegen, en dus buigen, in de wind. Hiermee wil het atelier vooral een esthetisch verantwoorde energie harvester neer zetten, die ten opzichte van windturbines, pas goed tot zijn recht komt als ze in groepen worden geplaatst.

Omdat het nog een zeer conceptueel ontwerp is zijn er geen verdere specifieke gegevens van bekend zoals de mogelijke opbrengst of de kosten.

3.5. *Duurzame productie*

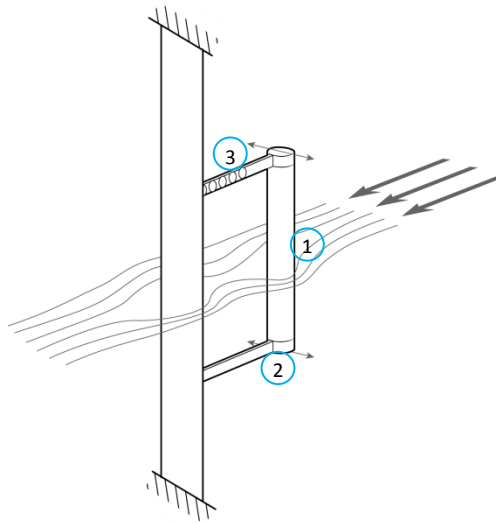
Omdat de harvester in deze opdracht onder andere ten doel heeft om een duurzaam alternatief te zijn voor huidige energiebronnen is het van belang om de harvester niet alleen een hernieuwbare energiebron te laten gebruiken (de wind). Van net zo groot belang is om deze duurzaam te produceren met in acht nemen van de gehele levenscyclus zoals in figuur 19 is geïllustreerd. Belangrijke aspecten en ontwerpprincipes die hieruit voortkomen en die later in het ontwerp proces gebruikt zijn, zijn:

- Klein aantal materialen, liefst licht,
- Recyclebare materialen,
- Standaard onderdelen,
- Gemakkelijke montage en demontage,
- Scheiding van natuurlijke en technische cyclus,
- Hoge EROI ratio (netto energie opbrengst).

4. *Vergroten van de efficiëntie*

Het beginpunt van de opdracht zoals in paragraaf 3.1 is omschreven is een product waarbij nog maar enkele variabelen waren getest om de haalbaarheid aan te tonen. In deze opdracht gaat het erom om de harvester zo te ontwerpen dat deze in de praktijk toegepast kan worden door verschillende weersinvloeden te bekijken, maar ook om de energieopbrengst te verhogen.

In dit hoofdstuk zullen deze aspecten worden benaderd vanuit het perspectief van het vergroten van de efficiëntie van de harvester. Hierbij zullen de verschillende fysische onderdelen (aerodynamica, mechanica en elektronica) worden behandeld. Daarbij zal ook rekening gehouden worden met de eisen en wensen verder in hoofdstuk 3 naar voren zijn gekomen.



figuur 22 De harvester bestaande uit een (1) aerodynamisch deel, (2) een mechanisch deel en (3) een elektronisch deel.

Een eerste aanpassing aan het model van Jansma is het gebruik van buis over de gehele hoogte van de harvester als ophanging. Hier is voor gekozen omdat dit in de praktijk ook vaak het geval zal zijn. Buisstructuren komen overal voor en zijn daarom in theorie een ideale plek om de harvester aan op te hangen. Dit heeft wel tot gevolg dat als de wind 180 graden draait dat de cilinder van de harvester dan in het zog van de ophanging zit. De effecten hiervan zijn niet verwaarloosbaar en de resultaten van de windtunnel test staan in hoofdstuk 5 vermeld.

4.1. *Van wind naar trillingsenergie*

Het doel van deze stap is het omzetten van wind naar een trilling in een materiaal, de aerodynamische kant van de harvester. De wens hierbij is dat de veroorzaakte trilling van een bepaalde frequentie en amplitude is.

De gewenste frequentie is afhankelijk van de toepassing waarvoor de harvester gebruikt zal worden. Bijvoorbeeld om een LED lamp voor het menselijk oog “continue” te kunnen laten branden is een frequentie van 16Hz het minimum. Een hogere frequentie zal voor het menselijk oog vooral resulteren in

een feller lichtpunt. Een oplossing voor een te lage frequentie is het gelijk richten van de stroom en deze al dan niet via een energie buffer zoals een batterij te gebruiken. Dit laatste is voor de meeste elektronica een vereiste.

Wel is de eis van de frequentie van de armen dat deze niet te laag komt. Bij een lagere frequentie krijgt namelijk de piëzoelement de tijd om de opgebouwde capaciteit terug te laten vallen, hierdoor zullen schommelingen in het opgewekte elektrisch veld ontstaan.

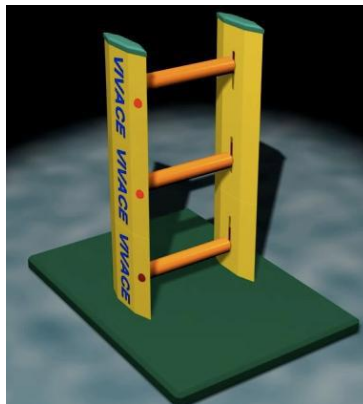
De gewenste trillingen in de cilinder van de harvester worden door middel van vortex induced vibrations, aangewakkerd. Hierbij zijn twee componenten belangrijk zoals uit vergelijking 4 blijkt, namelijk de wind en de diameter van de cilinder. Verder wordt er bij dit fenomeen aangenomen dat de vrijheidsgraden waarin de buis zich kan bewegen haaks op de windrichting staan.

Om efficiënter de wind om te zetten in de trillingen zijn dus de volgende aspecten van belang:

- Windsnelheid
- Wind invalshoek
- Diameter buis

Verder dient de lucht ook een turbulent zog aan te nemen nadat het de cilinder passeert. Dit wordt door het Reynoldsgetal aangegeven. De variabelen hiervoor zijn ook de windsnelheid en de diameter van de buis, maar daarnaast ook de viscositeit van de lucht.

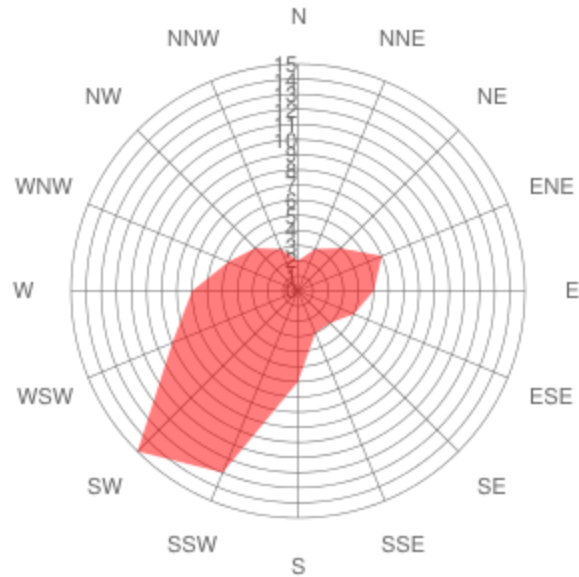
Verder komen er uit de literatuur nog een aantal voorwaarden om het fenomeen te kunnen garanderen. De diameter lengte verhouding van de cilinder dient minimaal 1 op 7 te zijn, ook de afstand tot het middelpunt van de cilinder tot een statisch oppervlak gedeeld door de diameter van de cilinder dient minimaal één te zijn om de effecten van het oppervlak te kunnen verwaarlozen.



figuur 23 Drie-bandige vivace harvester voor in stromend water.

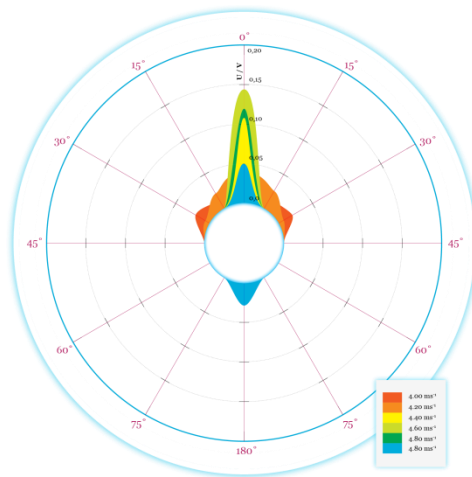
4.1.1. Windrichting

De harvester die eerder ontwikkeld was is getest op één windrichting. Echter in de meeste situaties zal de harvester worden toegepast waar de wind van verschillende richtingen komt. En dan komt de wind Enschede, tot wel vijftien procent van de tijd uit het zuidwesten, het merendeel van de tijd komt ze dus uit andere richtingen. Een overzicht van de verschillende windrichtingen is te vinden in het volgende diagram, figuur 24.



figuur 24 Gemiddelde percentage wind uit aangegeven windrichting gedurende een jaar voor Enschede over de afgelopen 10 jaar (Windfinder - Wind & weather statistic Twenthe, 2012).

Om de wind uit de andere windrichtingen op te kunnen vangen moet in eerste instantie de vraag opgelost worden hoe de harvester zich gedraagt en wat zijn rendement is bij andere wind invalshoeken dan de loodrecht. Bij het testen van het prototypen is hier ook naar gekeken. De resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur 25. In hoofdstuk 5 zal hier uitgebreider op ingegaan worden, maar er zou kunnen worden geconcludeerd dat de piekvoltages en dus de opbrengst snel terugnemen wanneer de invalshoek wordt vergroot.



figuur 25 De gemiddelde piekvoltagte van een piëzoelement uitgezet tegen de windsnelheid en de windrichting.

Uit deze resultaten kan worden gesteld dat het verstandig is om andere oplossingen te zoeken om de verschillende windrichtingen te kunnen omzetten naar trillingsenergie. De volgende drie zijn als meest potentiële opties naar voren gekomen:

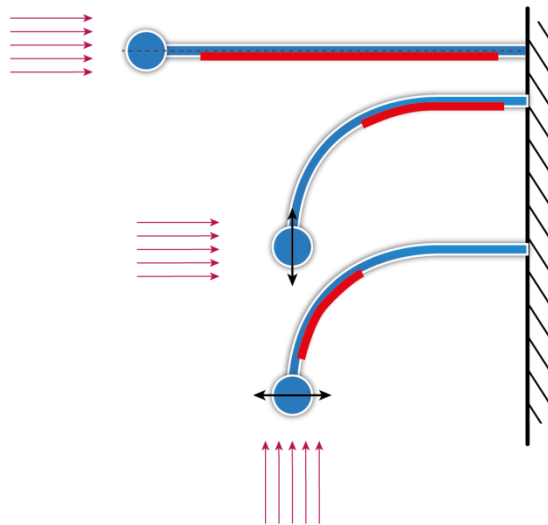
- Dupliceren van het aantal harvesters

- Buigen van de arm
- Ophanging van buiten naar binnen verplaatsen

De mogelijkheid om de harvester mee te laten draaien met de wind zorgt voor een aantal complicaties die het ontwerp dusdanig ingewikkeld maken dat het de uitgangspunten van de harvester teniet doen. In dat geval moet namelijk gekeken worden hoe de stijfheid van de inklemming van de arm gewaarborgd kan blijven en dat de in plaats van dat de armen deformerende harvester in zijn geheel niet om de ophanging heen gaat draaien. Een tweede punt is de overbrenging van de opgewekte elektrische energie die dan niet meer simpel met draden zou kunnen.

Het dupliceren van de harvesters is een simpel gegeven. Ze kunnen bijvoorbeeld onder verschillende hoeken rond de ophanging worden geplaatst. Het is echter zonde van de capaciteit. Een groot deel van de harvesters zal tot maximaal 15 - 20% van de tijd in werking zijn.

De tweede mogelijkheid is het buigen van de arm. Door dit te doen krijgt de arm in meerdere vrijheidsgraden enige bewegingsvrijheid om de trillingen op te vangen. Dit is geïllustreerd in figuur 26. Te zien is dat bij een rechte arm de wind dus slechts van een kant de cilinder in trilling kan krijgen. De deformatie kan zich dan over de gehele arm verspreiden (in het rood aangegeven). Bij het buigen van de arm zullen de delen van de arm gaan deformereren waar deze parallel aan de winrichting is (en dus loodrecht op de trilling van de cilinder). Het nadeel hiervan is echter dat een kleiner deel van de arm zal deformereren en er dus minder piëzomateriaal geactiveerd wordt om de deformatie om te zetten in elektrische energie. Een ander probleem is het uitrekenen van de mechanische eigenschappen van een dergelijke arm.

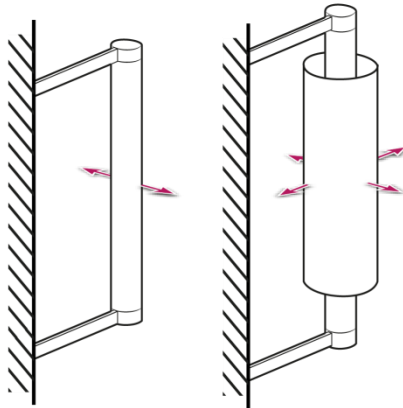


figuur 26 Voorbeeld van het buigen van de arm om meer windrichtingen op te kunnen vangen.

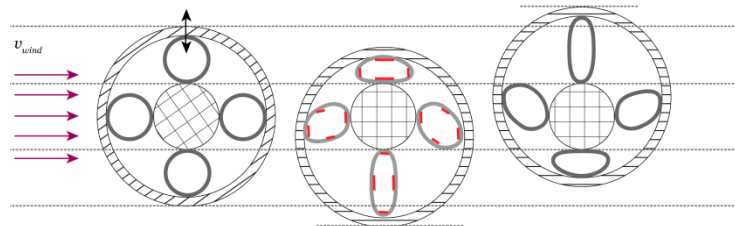
Het derde idee om de windenergie mogelijk efficiënter om te zetten naar trillingsenergie met betrekking tot de windrichting is geïllustreerd in figuur 27. De cilinder die door de wervels gaat trillen is om een dünnere cilinder geplaatst welke vast ingeklemd is. De ophanging tussen de twee cilinders in heeft verschillende horizontale vrijheidsgraden zoals in figuur 28 en figuur 29 zijn weergegeven.

Het voordeel van dit systeem is dat het uit elke windrichting geactiveerd kan worden. Hierbij beperkend is de kant waar de ophanging van de harvester zich bevindt. Een tweede voordeel is dat het een optimaal

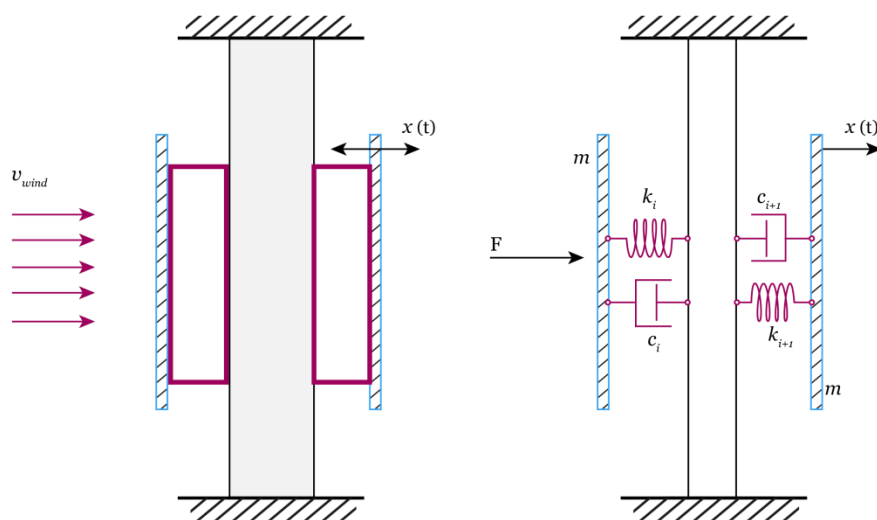
systeem kan zijn om alle trillingen te concentreren op de aanwezige piëzoelementen en niet grotendeels te laten dempen door het materiaal van de armen.



figuur 27 Twee verschillende uitvoeringen van de harvester. Bij (a) deformeren de armen waaraan de cilinder hangt bij (b) oscilleert alleen de buitenste cilinder, piëzo ophangingen zijn bevestigd tussen de twee cilinders welke deformeren. De armen bewegen niet.



figuur 28 De deformatie van de ophanging bij het concept vindt plaats in de ophanging tussen twee cilinders in.



figuur 29 (a) zij-doorsnede van een concept idee. (b) Massa, veer, demper- diagram van hetzelfde idee.

Het grootste probleem van het idee dat hierboven geïllustreerd is, is dat het technisch lastiger in elkaar zit dan de huidige harvester. Ook om goede berekeningen te doen aan een dergelijk systeem is lastig. Hierbij zal dus vooral door middel van experimenten gekeken moeten worden of dit een haalbaar concept is.

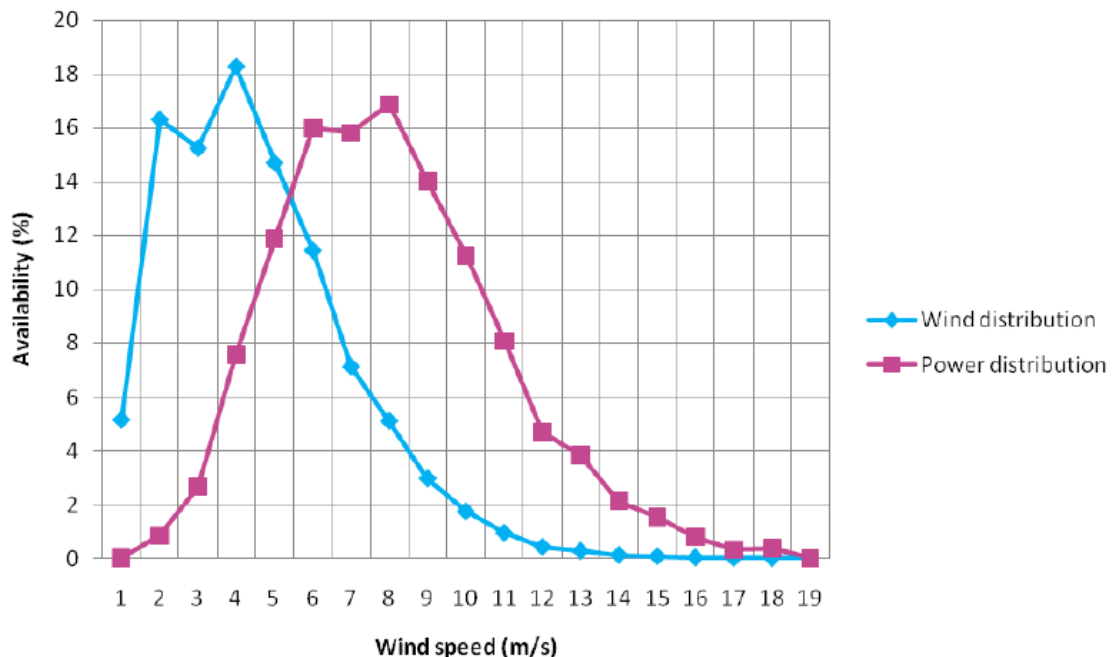
4.1.2. Windsnelheden

Naast de windrichtingen verschilt de wind ook vaak in snelheid. Afgeleid uit de formules voor het Reynoldsgetal en het Strouhalgetal komt vergelijking 6 naar voren. Uit deze vergelijking kan opgemaakt worden dat de windsnelheid direct in relatie staat tot de diameter van de cilinder. Deze twee aspecten kunnen dan ook samen genomen worden.

$$d = 2\pi \cdot \frac{St \cdot v}{\sqrt{\frac{k_a}{m_{bc}}}}$$

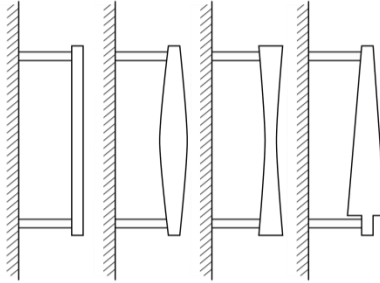
vergelijking 6 Bereken de buisdiameter aan de hand van de verschillende variabelen van de harvester bij een situatie waar lock-in plaats vindt.

Oftewel als er voor een cilinder met bepaalde diameter is gekozen om de harvester mee uit te rusten is de harvester afhankelijk van de juiste windsnelheid om een optimale energieopbrengst te kunnen leveren. Om dit aan te pakken zou gesteld kunnen worden dat afhankelijk van de windsnelheid de veerconstante van de arm of de massa van de harvester aan te passen. Dit zijn geen voor de hand liggende oplossingen. Een betere benadering is hoe de diameter van de buis geoptimaliseerd kan worden voor de meest voorkomende of voor verschillende windsnelheden.



figuur 30 Beschikbaarheid van de wind en de potentiële energie daarin (Jansma, 2011)

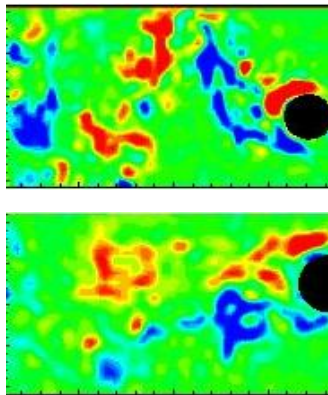
Om een keuze te kunnen maken welke windsnelheden de meeste potentie hebben geeft de grafiek van figuur 30 uitsluitsel. De beschikbaarheid van de wind en de energie-inhoud bij verschillende windsnelheden is hier gegeven. Hieruit kan opgemaakt worden dat ondanks de grote beschikbaarheid van windsnelheden van 1 tot 4 ms^{-1} dat pas vanaf 3 á 4 ms^{-1} er pas voldoende energie in de wind zit om er ook wat uit te kunnen halen. Andersom geldt het voor de bovengrens. Er zit nog een redelijke hoeveelheid energie in de wind bij windsnelheden boven de 10 ms^{-1} maar de beschikbaarheid van de windsnelheden neemt dan snel af tot onder de 2%. Vanuit de grafiek kan dan geconcludeerd worden dat het goed zou zijn om de harvester te ontwikkelen voor een windsnelheid range van 4 ms^{-1} tot 10 ms^{-1} .



figuur 31 Verschillende cilindervormen om de harvester een breder scala aan windsnelheden te kunnen opvangen.

Uit de literatuur blijkt dat een taps toelopende cilinder resultaat geeft bij de verschillende windsnelheden waar de diameters van de cilinder mee overeen komen. Echter om berekeningen uit te voeren kan ook gebruik worden gemaakt van de gemiddelde diameter in de formule voor het Strouhalgetal:

$$St = \frac{f_v \cdot \bar{d}}{v}$$



figuur 32 Wervelmodussen voor een taps toelopende cilinder (Techet, 2004).

In bovenstaande afbeelding zijn de verschillende wervel modussen weergegeven voor de boven- en onderkant van een conische cilinder.

Uit bovenstaande gegevens kan geconcludeerd worden dat er potentie zit conische cilinders zodat er een breder scala aan windsnelheden geharvest kan worden. Onduidelijk is echter of de cilinder taps moet lopen of ook een symmetrie in het horizontale vlak moet hebben door de cilinder bolvorming of holvorming te laten zijn. Dit zouden experiment moeten uitwijzen. Daarbij kon ook niet worden getest of deze opstelling efficiënt genoeg zal zijn om een aantal harvesters vervangen die voor slechts één windsnelheid zijn geoptimaliseerd. Helaas is er bij het testen van het prototype niet genoeg tijd geweest om deze variabele ook te kunnen testen. En het zal dan ook een aanbeveling blijven voor een volgend onderzoek. Een valkuil kan zijn dat er bij een taps toelopende cilinder verschillende frequenties ontstaan die elkaar uitdoven.

4.2. *Van trillingsenergie naar elektrische energie*

Om de trillingsenergie zo efficiënt mogelijk om te zetten naar energie met behulp van piëzo materialen zijn er twee factoren van belang. De mate van *vervorming* van het piëzomateriaal en de *continuïteit* waarmee die vervorming plaats vindt.

De mate van vervorming zorgt voor de grootte in het potentiaal verschil dat optreedt. De continuïteit van de vervorming is hier niet gelijk aan de frequentie. Met de continuïteit wordt hier bedoeld dat het materiaal zich voortdurend in een staat van vervorming plaats vindt waardoor de elektronen niet in een staat van rust kunnen komen. Hierdoor zal er altijd een potentiaal verschil over het materiaal aanwezig zijn.

Het voordeel van een continue vervorming is dat er minder grote potentiaal verschillen optreden waardoor de elektronica minder belast zal worden.

4.2.1. *Stijfheid en Damping*

De continuïteit van de vervorming kan beter gegarandeerd worden als de damping in de harvester zoveel mogelijk wordt geconcentreerd in het piëzomateriaal. Dit zou ook de optimale situatie zijn om de efficiënte te vergoten: dat alle deformatie in het piëzomateriaal plaats vindt.

Daarbij is het gewenst dat de dampingratio, ζ , van alle materialen, eventueel behalve van het piëzoelement zo dicht mogelijk nul nadert. Dat geeft aan dat het systeem onder gedempt is en de oscillatie langzaam zal uitdoven of helemaal niet als dit gelijk is aan nul. Dit geeft het eerste grote probleem. Er is nog maar weinig onderzoek in dit veld gedaan, dan wel praktijk ervaring mee. Dit komt omdat voor de meeste producten trillingen een ongewenst neveneffect zijn en dus proberen worden uitgedoofd. Oftewel een dampingratio die één nadert.

Naast dit damping probleem zijn er ook problemen met betrekking tot de stijfheid en damping samen.

Ten eerste dient de arm zeer stevig te worden ingeklemd aan de ophanging. Zo kan er in die bevestiging geen damping plaats vinden, en wordt alles in de arm geconcentreerd. Hierbij is het probleem echter dat als er niet genoeg damping in de arm zit het product of ophanging waar de harvester aan bevestigd is mee gaat trillen. Dat dit kan voor komen bleek tijdens de experimenten toen losse onderdelen die op de windtunnel lagen mee gingen trillen. Dit kunnen zeer ongewenste effecten zijn.

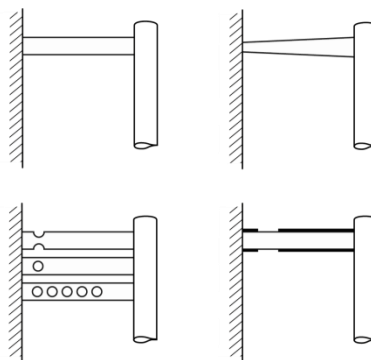
Materiaal	E-modulus / GPa
PVDF	2
PVC	2.5
PZT	63
Koper	122
Staal	200

tabel 4 Overzicht van Youngs Modulus van de verschillende materialen, welke de stijfheid representeert.

Een hogere stijfheid van de arm heeft aan de andere kant wel weer een positieve zijde. De stijver de arm de kleiner de uitwijkingen van de trillingen zullen zijn en de hoger de frequenties. Dit geeft het voordeel van een continue stroom en een lagere kans op materiaalmoetheid in de arm.

In tabel 4 staat een overzicht van de stijfheid van de verschillende materialen. Opvalt is dat PVDF en PZT een stuk minder stijf zijn dan de materialen waar ze op gemonteerd zijn. Dit hoeft niet een heel groot probleem te zijn zolang er maar genoeg damping blijft in het systeem, en die damping vooral in de piëzo materialen plaats vindt. Helaas zijn er geen eenduidige gegevens bekend met betrekking tot de interne damping van deze materialen.

Om de arm toch stijf in geklemd te houden en stijf genoeg om een hoge frequentie te bereiken maar wel de damping te concentreren op de piëzomaterialen kunnen er fysieke zwakke plekken in de armen worden aangebracht die weer worden “verstevigd” met de piëzoelementen. Op deze manier worden de krachten in de arm groot op het verzwakte deel, deze krachten worden echter ondervangen door de piëzoelement die ze omzetten naar elektrische energie.



tabel 5 Verzwakkingen van de arm die worden opgevangen door piëzoelementen.

4.2.2. Piëzo materiaal

Er zijn verschillende piëzomaterialen die gebruikt kunnen worden om de energie om te zetten van de deformatie naar elektrische energie. De meest gangbare en goedkope opties zijn op dit moment PVDF en PZT. PVDF is een polymeer en is zeer flexibel, maar heeft een lage capaciteit. PZT heeft daarentegen een hoge capaciteit maar is weer bros en bevat lood. Zolang de deformatie niet te groot is en recycling goed

kan worden georganiseerd dan moet dat geen groot probleem zijn. Al bestaat wel de mogelijkheid dat looddeeltjes vrij kunnen komen.

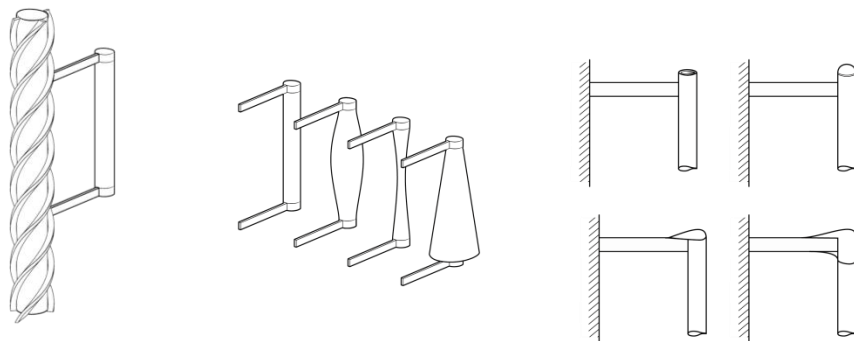
4.3. *Aanpassingen*

De aanpassingen die worden voorgesteld en in de windtunnel getest zijn, zijn de volgende:

- Aanpassen van de vorm van de buis om een groter bereik aan windsnelheden te kunnen gebruiken. Helaas door tijd gebrek heeft dit niet tot resultaten geleid.
- Aanpassing van de arm om de deformatie van de arm te concentreren bij de piëzo-elementen.
- Het gebruik van PZT als piëzo element.

Overige aanpassingen die niet direct voortkomen uit de bovengenoemde delen zijn:

- Het vergroten van het oppervlak waarop de piëzo-elementen gemonteerd kunnen worden (hierbij dient wel op de stijfheid gelet te worden)
- Aerodynamischer maken van de bevestigingspunten en de ophanging zodat als de wind van vreemde hoeken komt er geen wervels ontstaan die de trillingen in de harvester teniet doen. Met betrekking tot de ophanging een helixstructuur als geïllustreerd in figuur 33a kan voldoende zijn om, indien de wind 180 graden gedraaid is, dit geen obstakel is.



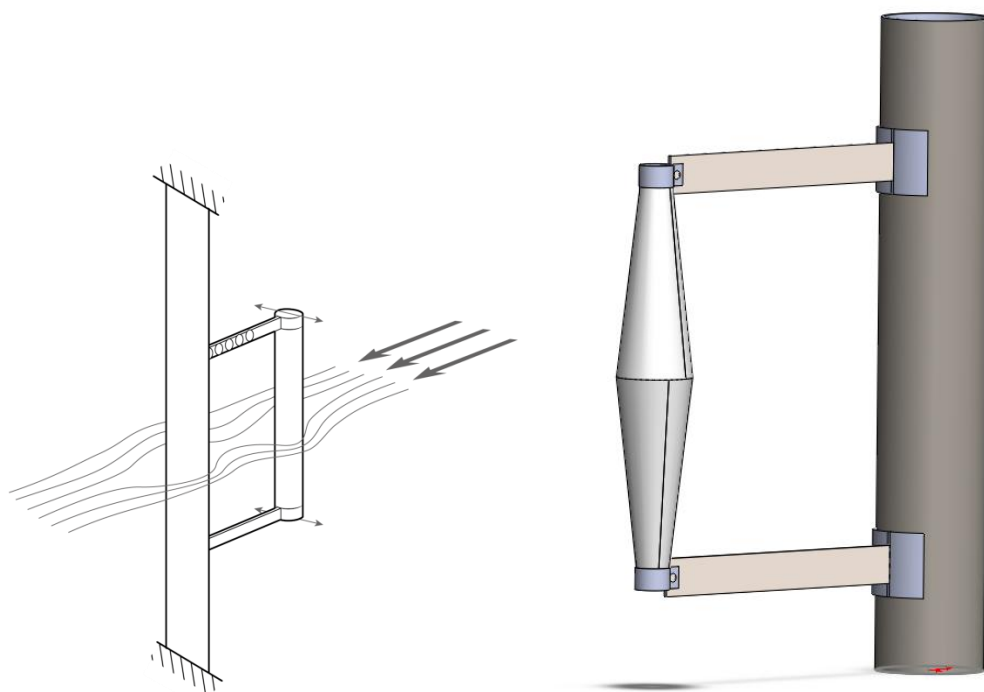
figuur 33 Een aantal van de voorgestelde aanpassingen van de harvester.

5. Prototype

Het prototype dat ontwikkeld is heeft ten doel gehad om de verschillende uitkomsten van de voorgestelde aanpassingen te toetsen. In dit hoofdstuk zal kort het prototype besproken worden waarna de resultaten van de experimenten uiteen zullen worden gezet.

5.1. Ontwerp

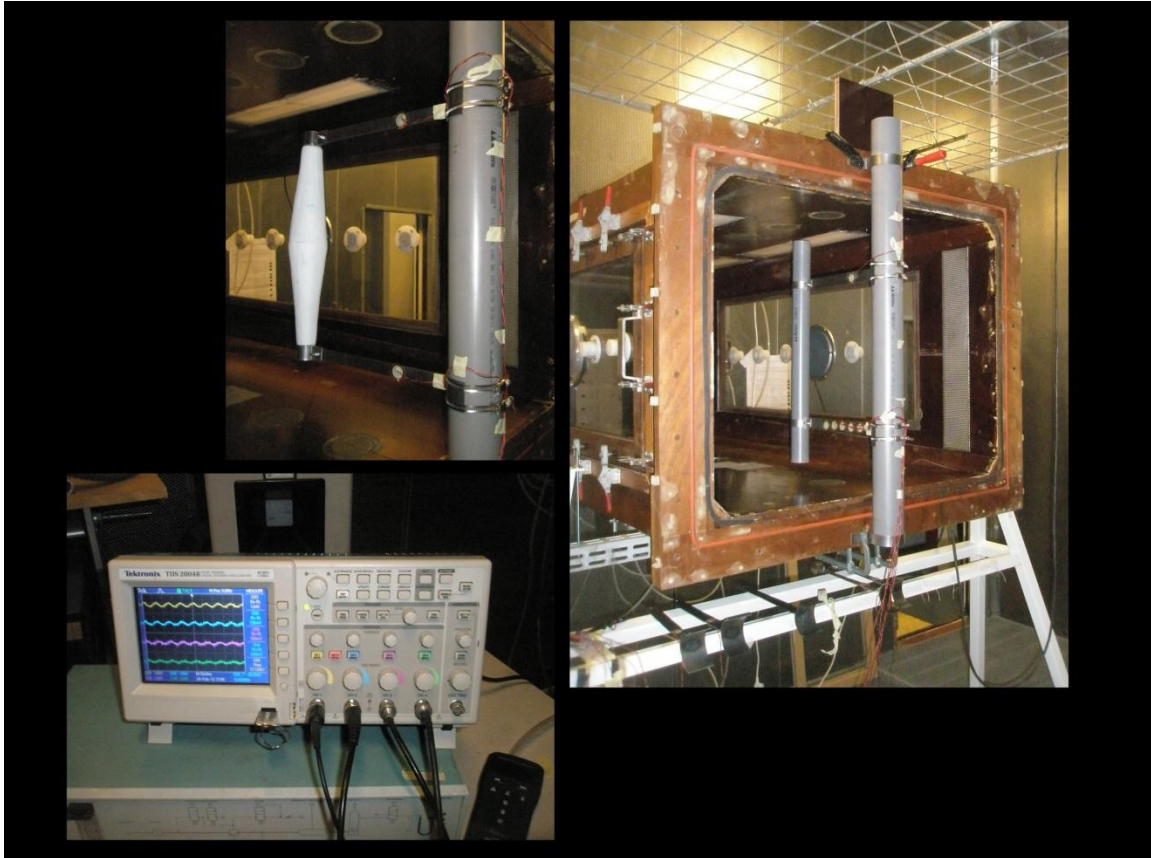
Het ontwerp van het prototype is zeer functioneel geweest voor de experimenten. Zo zijn er verschillende cilinders getest en verschillende armen. Hierdoor was alles demontabel. Een probleem dat, al eerder genoemd is, was het stevig inklemmen van de arm aan de ophanging. Uiteindelijk is ervoor gekozen om de armen te lassen aan halfronde plaatjes. Deze staken boven en onder de arm uit en konden op die manier met slangklemmen strak tegen de ophanging geklemd worden. Een systeem dat uiteindelijk prima werkte en ook kan worden gebruikt bij het uiteindelijke product.



figuur 34 (a) vectortekening prototype en (b) Solid Works model

5.2. Experimenten

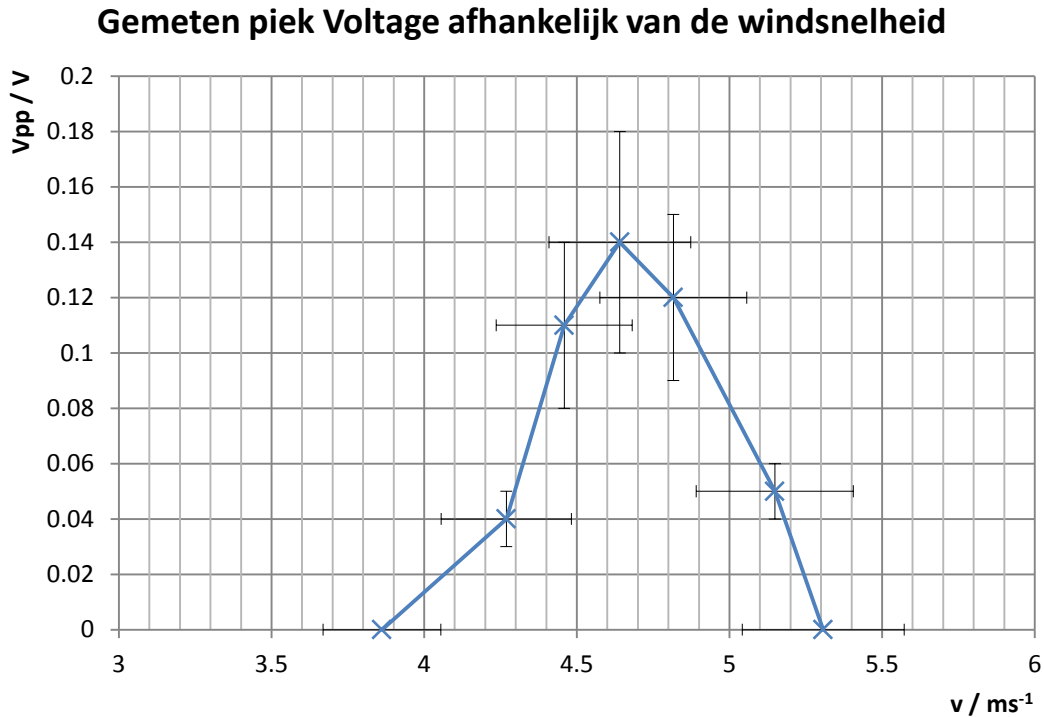
De verschillende onderdelen zijn getest in de anechoïsche windtunnel op de Universiteit Twente. Op deze manier kon gemakkelijk de harvester bij verschillende windsnelheden en invalshoeken getest worden. Verder konden de experimenten meerdere keren herhaald worden om zo een onzekerheidsmarge te kunnen bepalen. In figuur 35 zijn een aantal afbeeldingen van de opstelling te zien.



figuur 35 Opstelling van het prototype in de anechoïsche windtunnel op de Universiteit Twente.

Zoals in figuur 36 te zien is had het prototype de grootste piek voltage bij 4.6 ms^{-1} . Er moet echter wel vermeld worden dat de onzekerheid in de waardes relatief groot zijn. Dit komt omdat de nauwkeurigheid met betrekking tot de orde van grote van de metingen niet heel hoog is. Omdat de experimenten meerdere keren herhaald zijn om tot een gemiddelde te komen en een onzekerheidsfactor zijn deze onzekerheden dus relatief hoog uit gevallen. Dat neemt echter niet weg dat als er een minimale en maximale lijn zouden worden getekend dat het optimum nog steeds rond de $4,5 - 4.6 \text{ ms}^{-1}$ ligt.

Alle resultaten zijn uiteindelijk tot stand gekomen met een parallelle cilinder van 600mm lang.



figuur 36 Grafiek die de gemiddelde piekvoltages weergeeft die per windsnelheid zijn gemeten van 1 PZT element.

5.3. Resultaten

In deze paragraaf zullen de verschillende resultaten van de experimenten verder worden toegelicht.

5.3.1. Opbrengst

Bij een normale opstelling, dat wil zeggen een normale cilinder en armen heeft de onderste arm standaard vier PZT piëzoelementen en de bovenste arm één. Slechts de onderste vier zijn dan met de oscilloscoop verbonden. In de grafieken komt de lijn van serie 1 overeen met de piëzo die het dichtst op de ophanging zit, en waar over het algemeen de meeste deformatie plaats vindt.

De opbrengst kan gemeten berekend worden met de volgende formule waarbij de V_{pp} wordt omgezet naar V_{rms} :

$$P = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{pp}}{2} \right)^2}{R}$$

Waarbij de metingen met een 10X probe hebben plaats gevonden waardoor de V_{pp} waarde met een factor tien moet worden vermenigvuldigd om dezelfde antwoorden te krijgen.

In figuur 37 zijn de vier onderste piëzoelementen gemeten. Te zien valt over alle resultaten dat de piek aan de bovenkant meestal iets groter is dan de piek aan de onderkant. Dit kan het resultaat zijn van het feit dat de piëzoelementen aan één zijde van de armen waren gemonteerd en de piëzoelementen net iets van de middellijn van de arm af liggen.

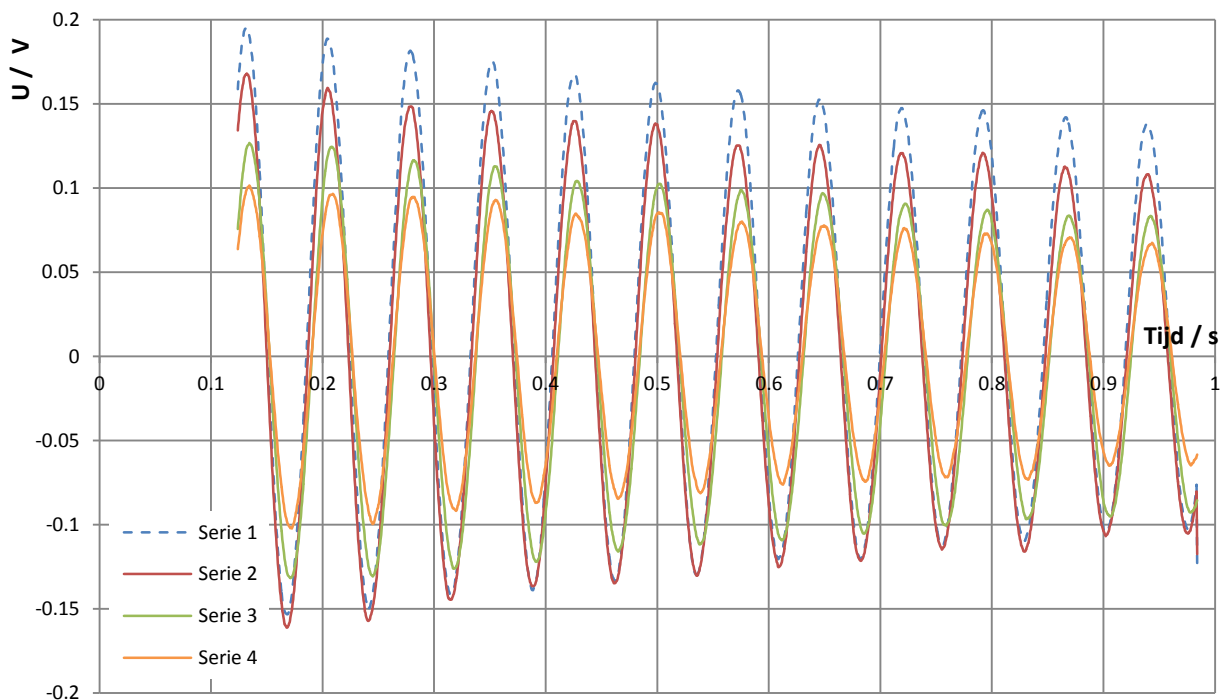
Qua gemiddelde energieopbrengst is geeft deze simpele meting bij een windsnelheid van ongeveer 4 ms^{-1} al van een redelijk niveau: namelijk voor

- piëzo 1 : $\overline{V}_{pp} = 0.30\text{V}$, oftewel 3V met de 10x probe. Dat komt neer op $P = 5.08\text{mW}$
- piëzo 2: $P = 2.74\text{mW}$
- piëzo 3: $P = 1.50\text{mW}$
- piëzo 4: $P = 0.96\text{mW}$

Wat een totaal maakt van 10.28 mW voor vier PZT piëzoelementen.

Als deze uitkomst geëxtrapoleerd wordt met meer piezo's aan een zijkant van de arm (nu zat er ongeveer een centimeter tussen de elementen) en dat aan beide kanten van de arm en in beide armen wordt toegepast, dan zou dat zo'n 80mW op kunnen leveren. Oftewel zo'n 280Watt uur bij een constante wind.

Echter in de praktijk zijn deze specifieke windrichting en windsnelheid niet altijd aanwezig. De meeste optimale combinatie van windsnelheid en windrichting in Twente is een Zuidwestewind van 4ms^{-1} . Deze combinatie komt ongeveer 3% van de tijd voor. Dat betekent dat gemiddeld gezien nog zo'n 8,5 Watt uur over blijft. Over een jaar gezien is dat 73,5 kilowatt uur.

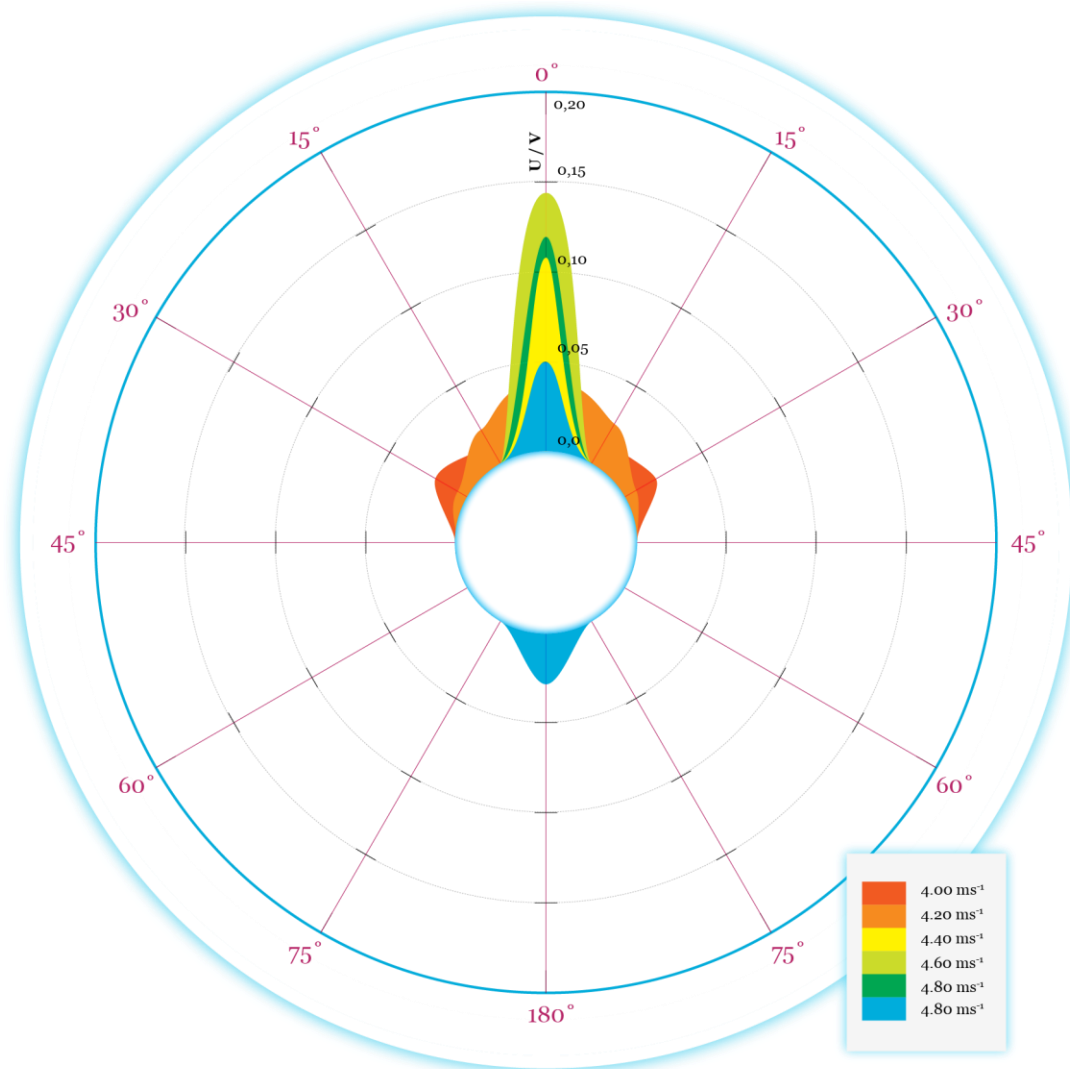


figuur 37 Piekvoltages van de vier piëzoelementen die op één arm bevestigd zijn.
Van serie 1 vlakbij de inklemming, tot serie 4 richting de cilinder.

Zoals al kort in paragraaf 4.1.1 werd aangegeven heeft de windrichting en snelheid een grote invloed op de opbrengst van de harvester. In figuur 38 staat nogmaals de relatie tussen deze variabelen

weergegeven. De grafiek lijkt aan te geven dat als de invalshoek wordt veranderd dat vooral een lagere windsnelheid nog invloed heeft op de harvester, en de optimale lijkt te verschuiven. Zo geeft namelijk bij 30° de 4.00ms^{-1} een grotere uitslag dan de 4.20ms^{-1} , het tegenovergestelde van de waardes bij een invalshoek van 15° .

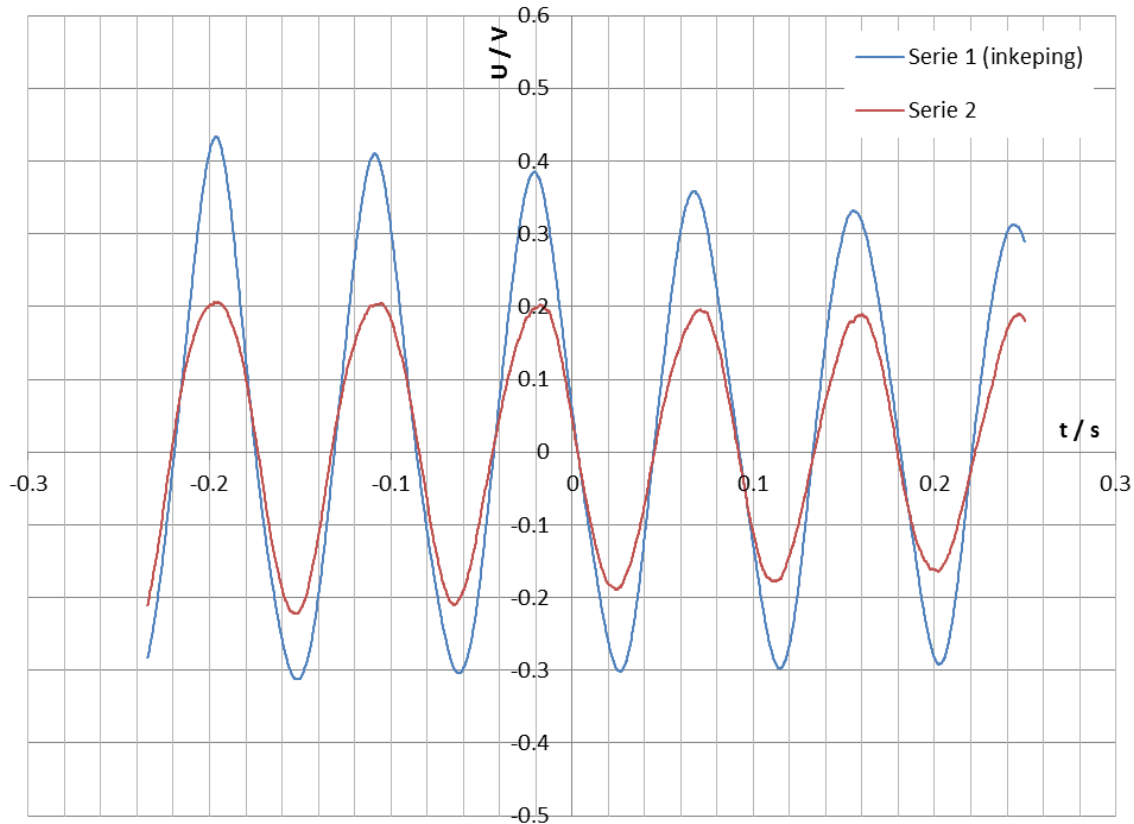
Ook bij deze resultaten moet echter worden meegegeven dat de onzekerheidsfactor aanzienlijk is en dat deze trend niet met alle zekerheid geclaimd kan worden, daarbij gaat het om een piek tot piek voltage van 0.2V wat ongeveer $11\mu\text{W}$ oplevert.



figuur 38 De gemiddelde piekvoltage van een piëzoelement uitgezet tegen de windsnelheid en de windrichting.

De resultaten die in figuur 38 worden weergegeven kunnen verder enigszins misleidend zijn aangezien de hoeken van 60° en 75° graden niet zijn getest. Hier zou dus mogelijk nog een oscillatie kunnen zijn. Ook het resultaat voor 180° is meer een indicatie omdat deze niet ceteris paribus is getest. De harvester stak namelijk niet in de windtunnelbuis maar er buiten. Hierdoor heeft de luchtstroom daar meer ruimte en zal deze snelheid lager zijn geweest dan daadwerkelijk gemeten.

In figuur 39 zijn de resultaten weergegeven van het experiment waarbij de arm verzwakt is om de deformatie te concentreren op de plaats waar het piëzoelement zich bevindt. De arm was aan beide zijanten half rond ingeponst met een radius van 5mm waardoor op het smalste punt nog een derde van de hoogte van de arm is overgebleven.



figuur 39 Het verschil in piekvoltage tussen een gewone arm en een arm met inkeping gemeten bij 4.5 ms^{-1}

Het verschil in opbrengst tussen de twee piëzoelementen is aanzienlijk:

- piëzo 1: $P = 16.88 \text{ mW}$
- piëzo 2: $P = 5.72 \text{ mW}$

Wat de inkepingen echter voor verder effect hebben op de buiging van de arm op rest van de delen moet echter nog onderzocht worden. De mogelijkheid bestaat namelijk dat indien er meerdere piëzoelementen worden geplaatst dat de andere elementen een lagere opbrengst zullen leveren.

5.3.2. Efficiëntie

Met de berekening van de opbrengst van de piëzoelementen kan ook de efficiëntie en een mogelijke terugverdientijd worden berekend.

Om de efficiëntie te berekenen moet de totale energie bekend zijn die in het oppervlak van de wind zit die de harvester in één seconde passeert. Deze is uit te rekenen met de volgende formule:

$$P = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v^3$$

$$A = 0.60 \cdot 0.05 = 0.03 \text{m}^2$$

$$\rho = 1.2041 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$v = 4.50 \text{ms}^{-1}$$

$$P = 1.65 \text{Watt}$$

De hoeveelheid energie die dus de harvester per seconde passeert is 1.65 Watt. De efficiëntie van het prototype met standaard armen en cilinder is ongeveer 0.6%.

$$\eta = P_{out} / P_{in}$$

$$\eta = \frac{10.28 \cdot 10^{-3}}{1.645} = 0.6\%$$

Een kilowattuur aan energie kost ongeveer €0,20 tot €0,25. Bij een opbrengst van 73,5kWh over een heel jaar (dat is voor een harvester in Twente op gericht op een zuidwestenwind van 4ms^{-1}) levert dat €14 op. Dat zou, indien de harvester en masse wordt geproduceerd de productiekosten kunnen dekken. Echter de manuren om de harvester te installeren zullen er in één jaar niet uit te halen zijn.

Bij massa productie en installatie zal de terugverdientijd een stuk lager worden en mogelijk wel rendabel worden.

5.3.3. Observatie

Tijdens de experimenten bleek dat op het moment dat een vlak achter de cilinder werd gehouden dat de cilinder dan een grotere uitwijking kreeg bij dezelfde frequentie. Dit vlak kon ook de cilinder laten oscilleren terwijl de wind theoretisch te hoge snelheid zou hebben.

Omdat erg geen duidelijke lijn werd gevonden in wanneer dit wel en niet gebeurde is er verder geen onderzoek naar gedaan omdat hier de tijd niet voor was. Het is echter wel een interessant gegeven dat mogelijk veel winst kan opleveren.

6. *Product*

Uit de experimenten blijkt dat er een aantal zaken zijn die van belang zijn om in de gaten te houden bij het toepassen van de harvester. Zo moet het object zo stijf mogelijk zijn zodat de demping van de trilling wordt geconcentreerd in de armen van de harvester. Afhankelijk van de toepassing kan er dus voor een stijvere arm gekozen worden. Echter is het wenselijk om de arm zo stijf mogelijk te maken om de frequentie te verhogen en een kleinere uitwijking te krijgen.

Een ander punt waar rekening mee moet worden gehouden is dat in het meest positieve geval de huidige harvester maar 3% van de tijd optimaal energie zal opwekken. En dan nog hooguit een enkele procent waarin de harvester maar een klein percentage van zijn capaciteit gebruikt.

Om dit op te lossen met het huidige prototype en de resultaten die er zijn is het ophangen van meerdere harvesters aan een product of toepassing. Het voordeel hiervan is dat bij eventuele trillingen die niet genoeg gedempt kunnen worden door de harvester in het product door de trilling van een tweede harvester uitgedoofd of in balans kan komen.

In dit hoofdstuk zal verder worden gekeken waar de harvester toegepast kan worden en hoe dat zal moeten.

6.1. *Toepassing*

In hoofdstuk 3 zijn verschillende toepassingen voor de harvester geopperd. Gezien de benodigde stijfheid is het verstandig om de harvester op bestaande structuren toe te passen. Om voor kleine toepassingen de harvester te gebruiken moet er dus een stevige constructie neer gezet worden. Dit kan voor kleine toepassingen zoals metingen aan de bodem een grote investering betekenen, tenzij er al een stevige structuur in de buurt is.

Bestaande structuren die eerder werden besproken in hoofdstuk 3 zijn onder andere een fabrieksschoorsteen of een bushalte. Ook bestaande verkeers telpunten langs de openbare weg, welke nu vaak zijn uitgerust met PV panelen, zijn goed geschikt om uit te rusten met een harvester. Als mogelijke toepassingen zijn daarom gekozen de bushalte en het telpunt.



figuur 40 *Impressie van mogelijke toepassingen van de harvester.*

6.1.1. Bushalte

Met betrekking tot de bushalte zal de energie worden gebruikt voor verlichting en informatievoorziening. Voor 1 Watt kunnen ongeveer acht hyperflux LEDs gebruikt worden voor de verlichting. Voor de informatievoorziening kan een scherm gebruikt worden dat zeer energiezuinig is, zoals de Cholesteric LCDs (ChLCD). Deze gebruiken slechts energie zodra de informatie verandert, dus per refresh. Verder heeft het als voordeel dat zodra de energiebron wegvalt de informatie zichtbaar blijft. Zo kan 1m² aan scherm nog geen 2mW verbruiken, en omdat het per verandering gaat, per uur bijvoorbeeld maar 120mW³. Inclusief een controller en eventueel incidentele communicatie via GSM/SMS verbinding kan het totaal uitkomen op een maximaal verbruik van nog geen 10 Watt.

6.1.2. Verkeerstelpunt

Verkeerstelpunten zoals door Rijkswaterstaat langs wegen worden gezet om het verkeer te monitoren worden op afgelegen plaatsen nu voorzien van zonnepanelen. De telpunten gebruiken een minimale hoeveelheid energie. Maar de PV panelen moeten het gehele jaar genoeg energie opleveren, ook in de winter. Daarom worden panelen gebruikt met een ruime overcapaciteit (Broeke, van de, 2005).

Door het paneel te vervangen voor enkele harvesters worden de kosten in ieder geval gedrukt. Ook het onderhoud en de diefstalgevoeligheid zullen verminderden. Qua investeringen en aanpassingen zal de harvester gemakkelijker op een dergelijk telpunt kunnen worden toegepast dan bijvoorbeeld bij een bushalte.



figuur 41 Telpunt voor verkeer (a) met zonnepaneel, en (b) met piëzoharvesters.

6.2. Ontwerp

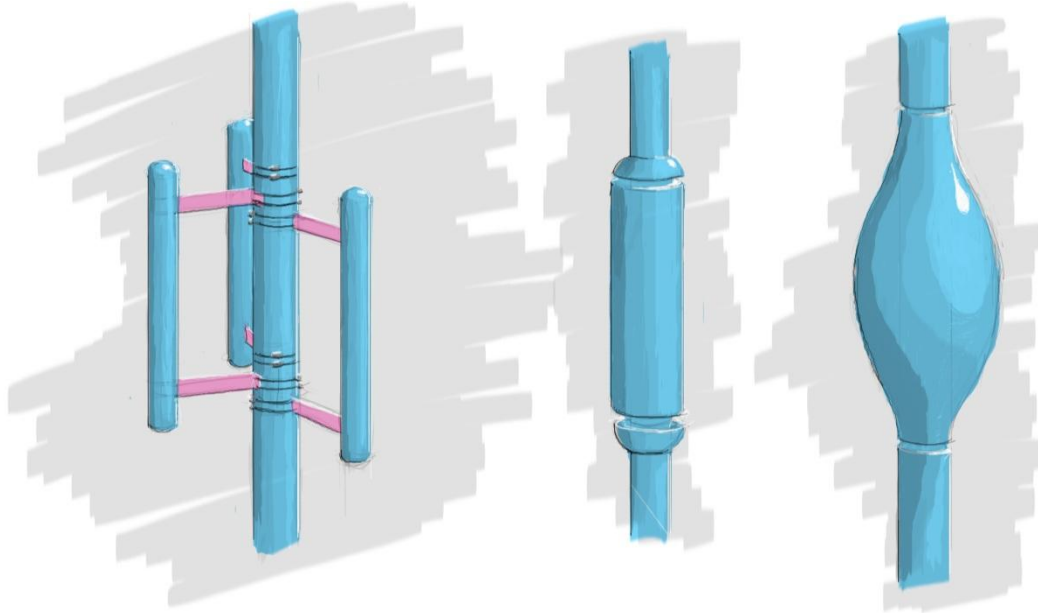
Voor beide toepassingen is gekozen om het huidige prototype toe te passen met een paar kleine aanpassingen. Zo worden er op de cilinders van de harvester kleine doppen geplaatst om vuil buiten te houden en het gewicht van de cilinder constant te kunnen houden. Deze doppen zijn ook afgerond om zoveel mogelijk ongewenste zog tegen te gaan. Een voorbeeld hiervan is geïllustreerd in figuur 42.

Verder zullen er meerdere harvesters worden opgehangen om zo een groter bereik te krijgen waarin windenergie wordt omgezet in elektrische energie.

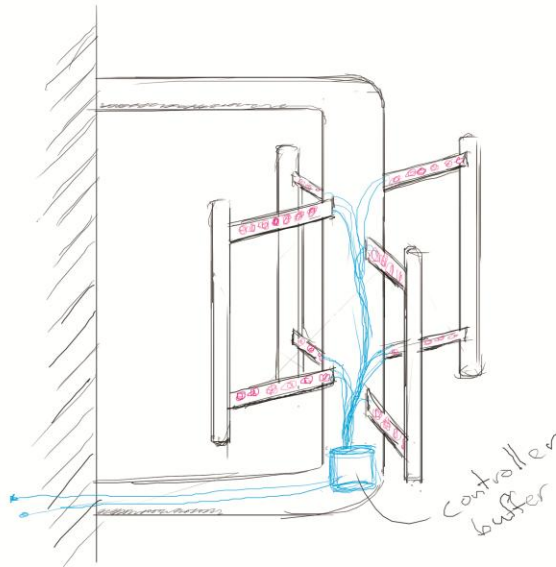
³ Dat is als er elke minuut één aanpassing gedaan wordt.

6.2.1. Energie gebruik

Het gebruik van de opgewekte energie zal voor de meeste toepassingen via een buffer moeten verlopen omdat de energie vaak op andere momenten nodig zal zijn dan dat deze opgewekt wordt. Om de harvester zoveel mogelijk een energiebron te kunnen laten zijn waarbij deze alleen nog aangesloten hoeft te worden op de toepassing is het gewenst om de energiebuffer en de controllers te integreren in het ontwerp. Om dit voor elkaar te krijgen is het idee om de buis waaraan de harvesters opgehangen zijn onderdeel te laten zijn van het product. In deze buis kan dan de elektronica en de accu worden geherbergd. figuur 43 is een schets hiervan.



figuur 42 Mogelijke uitvoeringen van de harvester,
met (a) volgens het huidige prototype gericht op drie windrichtingen en een specifieke windsnelheid.
(b) en (c) zijn een dynamischere uitvoering die elke windrichting kan opvangen.



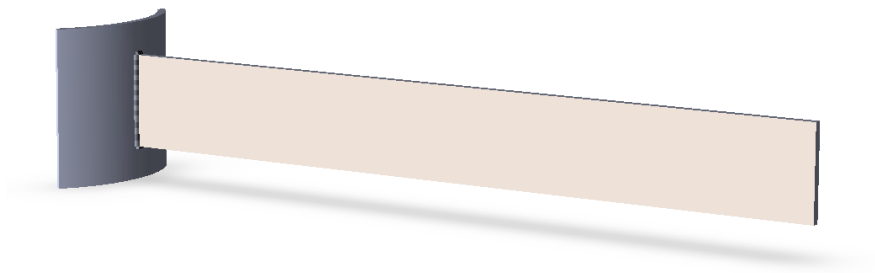
figuur 43 Mogelijke opzet van de harvester waarbij de benodigde elektronica al inbegrepen is in de harvester. Dit zou de harvester en 'plug & play' energiebron maken.

6.3. Productie

De harvester zoals uiteindelijk getest is, is nog steeds een simpel product dat uit een paar standaard materialen bestaat en simpel geassembleerd kan worden. De specifieke onderdelen zijn vooral de arm en de doppen op de cilinder. Daar zullen qua productie dan ook de meeste kosten in kunnen gaan zitten.

De arm zal van gesneden plaatmateriaal gemaakt kunnen worden, met ponsgaten voor verzwakkingen. Het vastlassen aan een tweede plaatje dat gebruikt wordt voor de ophanging zal ook een grote invloed op de productie en de kosten. Voor de doppen op de cilinder zal een mal gemaakt moeten worden om deze te kunnen spuitgieten. Dit wordt dan ook pas rendabel als er veel harvesters geproduceerd worden.

De meeste kosten kunnen zitten in de afwerking en de montage van de harvester omdat dit vooral manuren zal kosten.

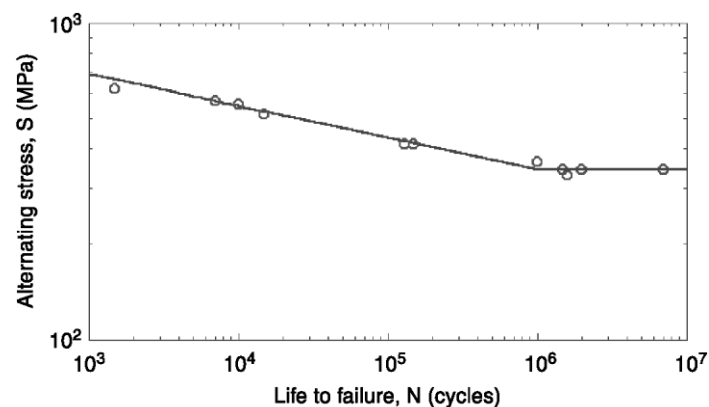


figuur 44 Arm met vastgelast gebogen plaat voor het vastklemmen aan een ronde buis.

6.4. Duurzaamheid

De harvester is qua onderdelen en productie een simpel product waardoor er weinig belasting zal zijn op grondstoffen. Twee onderdelen van het productie proces daargelaten. Namelijk de PZT piëzoelementen die lood bevatten en de twee-componenten lijm die gebruikt wordt om de piëzoelementen op de arm te monteren. Van de overige materialen is het gebruik simpel en hoeven er geen speciale bewerkingen of samenstellingen plaats te vinden die de recycling van het product bemoeilijken.

Voorzien is dat de levensduur van de harvester de tien jaar minimaal moet kunnen halen. De krachten die op de arm komen te staan zijn niet van dusdanige aard dat het materiaal snel verouderd. Voor de meeste staalsoorten treedt namelijk geen veroudering op door stress zolang deze onder de 200MPa blijft. Op de arm komt hooguit enkele tientallen Newtons aan kracht te staan, nog geen 10MPa. Het mogelijke breekpunt zit hier vooral in de lasnaad tussen de arm en het plaatje dat gebruikt wordt voor de ophanging.



figuur 45 Vermoeïngskromme voor staal AISI 1045 (Bannantine, Comer, & Handr, 1990)

Ook de andere materialen zullen niet door stress verouderen. De meeste veroudering van de harvester zal dan ook voornamelijk worden veroorzaakt door weersinvloeden zoals temperatuurschommelingen en vochtigheid.

Indien er een energiebuffer aan de harvester wordt toegevoegd moet gekeken worden wat hiervan de implicaties zijn. Deze energiebuffer moet een lange levensduur hebben als ook veel laadcycli aan kunnen. Echter, om de kosten van de harvester concurrerend te houden is het gewenst om de batterij ook goedkoop te houden. Momenteel zal een op lithium gebaseerde batterij het meest in aanmerking komen.

Batterij type	Levensduur / jaar	Laadcycli	Kosten Wh / €	Opmerking
Lithium-ion	2 – 6	1500 – 10000	2.00 – 4.00	Zeer efficiënt
Lithium-titaan	> 20	> 9000	0.40 – 0.80	Redelijk efficiënt
Lithium ijzer fosfaat	> 10	2000	0.40 – 1.90	Lagere energiedichtheid dan Li-Ion maar veiliger en duurzamer.

figuur 46 Een drietal soorten accu's en hun specificaties.

7. *Conclusie*

In dit hoofdstuk zullen de conclusies en aanbevelingen met betrekking tot de piëzoharvester worden besproken. De uitwerkingen van het product zullen kort worden besproken worden, daarna de haalbaarheid en tot slot zullen een aantal aanbevelingen gedaan worden.

7.1. *Product*

De harvester is een energiebron die een kleine hoeveelheid energie kan opwekken voor kleine toepassingen en vanwege de opzet geen onderhoud vergt. Daarbij zijn de lage kosten een groot voordeel ten opzichte van huidige stroombronnen zoals PV cellen of windturbines.

7.1.1. *Duurzaamheid*

Het voordeel van de harvester is dat deze qua materialen en gewicht een kleine impact op het milieu heeft. De productie is simpel vanwege de standaard materialen en onderdelen waarvan gebruik gemaakt wordt. Ook zijn de verschillende materialen bij afdanking nog goed van elkaar te scheiden, de elektronica daar gelaten. Een ander groot voordeel van de harvester is dat deze waarschijnlijk bijna tot geen onderhoud nodig zal hebben. Dit verminderd transport en arbeidskosten aanzienlijk. Vooral omdat het doel is de harvester op afgelegen plaatsen te kunnen inzetten.

Het is echter wel de verwachting dat bij doorontwikkeling tot een dynamischere harvester, zoals wordt voorgesteld in de paragrafen hieronder, dit de duurzaamheid niet ten goede komt. Vooral omdat de productie lastiger zal worden en er minder standaardmaterialen in verwerkt zullen worden.

7.1.2. *Implementatie*

Met betrekking tot de implementatie van de harvester is er momenteel nog één probleem dat beperkend is. Dit is dat de stijfheid van de ophanging van de harvester van groot belang is. Zodra er teveel demping in de constructie zit waar de harvester aan hangt is de kans groot dat de energie daar wegvloeit. Dat houdt in dat het gewenst is om bestaande stijve structuren te gebruiken als basis voor de harvester. Zo hoeft er geen relatief grote investering gedaan te worden om gebruik te maken van deze energie.

Voorbeelden van bestaande structuren zijn meetpunten zoals de verkeerstelpunten van Rijkswaterstaat, bushokjes, schoorstenen en licht of elektriciteitsmasten.

7.2. *Haalbaarheid*

Gezien de resultaten van de experimenten is het nog wel nodig om een aantal zaken verder uit te werken om de harvester concurrerend te kunnen maken. Dat ligt vooral aan het feit dat de harvester maar tot 3% van de tijd energie zal opwekken vanwege afhankelijkheid van windrichting en snelheid.

7.2.1. *Efficiëntie*

De huidige efficiëntie kan ongeveer op 0.6% uitkomen. Hierbij zijn een aantal optimalisaties nog niet toegepast. Deze optimalisaties, zoals het concentreren van de deformatie in de arm op de plaatsen waar de piëzoelementen bevestigd zijn kunnen de opbrengst zeker verdrievoudigen. Door nieuw ontwikkelde piëzomaterialen te gaan gebruiken is deze efficiëntie nog verder omhoog te krijgen. Hierbij moet dan wel een afweging gemaakt worden tussen de kosten en efficiëntie.

7.2.2. Kosten

Qua kosten is de harvester zeer goedkoop, en kan energie produceren voor enkele centen per kilowatt uur. Goedkoper dan de Humdinger windbelt. Echter bij de huidige uitvoering van de harvester is het belangrijk dat de stijfheid van de ophanging gegarandeerd wordt. Het nadeel hiervan is dat de constructie rond de harvester relatief duur uit kan vallen. Verder is de efficiëntie een stuk lager dan die van de Humdinger windbelt, vooral doordat de windbelt gebruikt maakt van het flutter principe. Daardoor is het minder afhankelijk van specifieke omstandigheden dan de vortex induced vibrations van deze Bachelor opdracht.

7.2.3. Toekomst

Verwacht wordt dat echter relatief kleine aanpassingen de efficiëntie van de harvester een stuk kunnen verhogen. Het effect van deze aanpassingen zijn vooral te toetsen doormiddel van experimenten. De grootste winst valt te behalen in het onafhankelijk maken van de harvester van de windrichting en snelheid.

De harvester is dus zeker een haalbare energiebron maar de Humdinger windbelt is op dit moment nog een goed alternatief.

7.3. Aanbevelingen

Hieronder staan kort samengevat de aanbevelingen die voort komen uit het verslag en de conclusies. Deze komen vooral neer op verder experimenteel onderzoek.

7.3.1. Deformatie optimaal benutten

Concentreren van de deformatie in de arm door middel van plaatselijke verzwakking heeft positieve invloed op de efficiëntie. Hoe deze echter tot elkaar verhouden heeft ook te maken met de totale stijfheid en demping van de arm en piëzoelementen. Hierbij is het gewenst om de zoveel mogelijk demping in het piëzomateriaal te laten plaats vinden. Hiervoor zal vooral de ontwikkeling van de piëzomaterialen, en met name de composieten, in de gaten moeten worden gehouden.

7.3.2. Dynamischer ontwerp

Een dynamischer ontwerp ontwikkelen door bijvoorbeeld de arm te buigen zoals in figuur 26 is geïllustreerd, of door middel van een vernieuwde opzet zoals is geïllustreerd in figuur 27a. Ook het veranderen van de vorm cilinder kan uitkomst bieden zoals in figuur 33b is aangegeven.

8. Bibliografie

- Piezoelectric wind power (Rory)*. (2011, October 13). Opgeroepen op January 16, 2012, van The University of Sheffield uSpace: <http://uspace.shef.ac.uk/docs/DOC-51875>
- Windfinder - Wind & weather statistic Twenthe*. (2012, Maart). Opgeroepen op April 28, 2012, van Windfinder.com: http://www.windfinder.com/windstats/windstatistic_twenthe.htm
- Atelier DNA. (2010, Augustus 5). *Windstalk*. Opgeroepen op december 9, 2011, van Atelier DNA: <http://atelierdna.com/?p=144>
- Bannantine, J. A., Comer, J. J., & Handr, J. L. (1990). *Fundamentals of metal fatigue analysis*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Bernitsas, M. M. (2007). *Marine Renewable Energy Laboratory*. Opgeroepen op december 13, 2011, van Marine Hydrodynamics Laboratories: http://www.engin.umich.edu/dept/name/facilities/mhl/facilities/renewable_energy.html
- British Stainless Steel Association. (sd). *Fatigue properties and endurance limits of stainless steels*. Opgeroepen op Maart 19, 2012, van British Stainless Steel Association: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=104>
- Broeke, van de, J. (2005, September 15). *De zonnepanelen voorzien de telpunten van stroom ID405403*. Opgeroepen op April 15, 2012, van Beeldbank Rijkswaterstaat: https://beeldbank.rws.nl/RuimtevoordeRivier/MediaObject/Details/De_zonnepanelen_voorzien_de_telpunten_van_stroom_405403
- Bull, J. (2010, May 19). *EROEI of electricity generation*. Opgeroepen op March 19, 2012, van Energy Bulletin: <http://www.energybulletin.net/53475>
- Europa Star*. (sd). Opgeroepen op Maart 16, 2012, van Watch Knowledge: http://www.europastar.com/watch-knowledge/1004082403-automatic-watches.html?zoom_highlight=Who+invented+the+automatic+watch
- Fthenakis, V., & Chul Kim, H. (2009). Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1465-1474.
- Granta Design Limited. (2011). CES Edupack.
- Humdinger Wind Energy LLC. (2010). *Windbelt Innovation*. Opgeroepen op December 9, 2011, van Humdinger: <http://www.humdingerwind.com/>
- Jansma, S. (2011). *The feasibility and design of*. Universiteit Twente, ETD.
- Li, S., Yuan, J., & Lipson, H. (2011). Ambient wind energy harvesting using cross-flow fluttering. *Journal of Applied Sciences*, 109.
- MEMSnet. (sd). *MEMSnet*. Opgeroepen op March 13, 2012, van Material: Lead Zirconate Titanate (PZT): <http://www.memsnet.org/material/leadzirconatetitanatepzt/>
- Mertens, S. (2009). *1ste Evaluatie meetresultaten testveld kleine windturbines Zeeland*. Ingrenious.
- Murphy, D. J., & Charles, H. A. (2010). Year in review—EROI or energy return. *Ecological Economics Reviews*, 102–118.

- Raghavan, K. (2007). *Energy Extraction from a Steady Flow Using Vortex Induced Vibration*. University of Michigan.
- Ruffles, P. (2004). *The Cost of Generating*. The Royal Academy of Engineering.
- Starfelt, N., & Wikdahl, C.-E. (2001). Opgeroepen op February 12, 2012, van The Centre of Excellence MANHAZ: http://manhaz.cyf.gov.pl/manhaz/strona_konferencja_EAE-2001/15%20-%20Polenp~1.pdf
- Techet, A. H. (2004, Maart 18). Vortex Induced Vibrations.
- Tout, N. (sd). *Vintage Calculators Web Museum*. Opgeroepen op Maart 12, 2012, van Calculator Photo Library: http://www.vintagecalculators.com/html/lcd_calculator_photo_library.html
- World Energy Council. (2004). *Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment*. London: World Energy Council.
- YTC America Inc. (sd). *YTC America*. Opgeroepen op March 10, 2012, van Lead-free Piezoelectric Ceramics: http://www.ytca.com/lead_free_piezoelectric_ceramics
- Zhang, S., Xia, R., & Shrout, T. R. (2007). Lead-free piezoelectric ceramics vs. PZT. *Electroceram*, 251-257.
- Zhu, M., Worthington, E., & Njuguna, J. (2009). Analyses of Power Output of Piezoelectric. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency*, 56, 1309-1318.

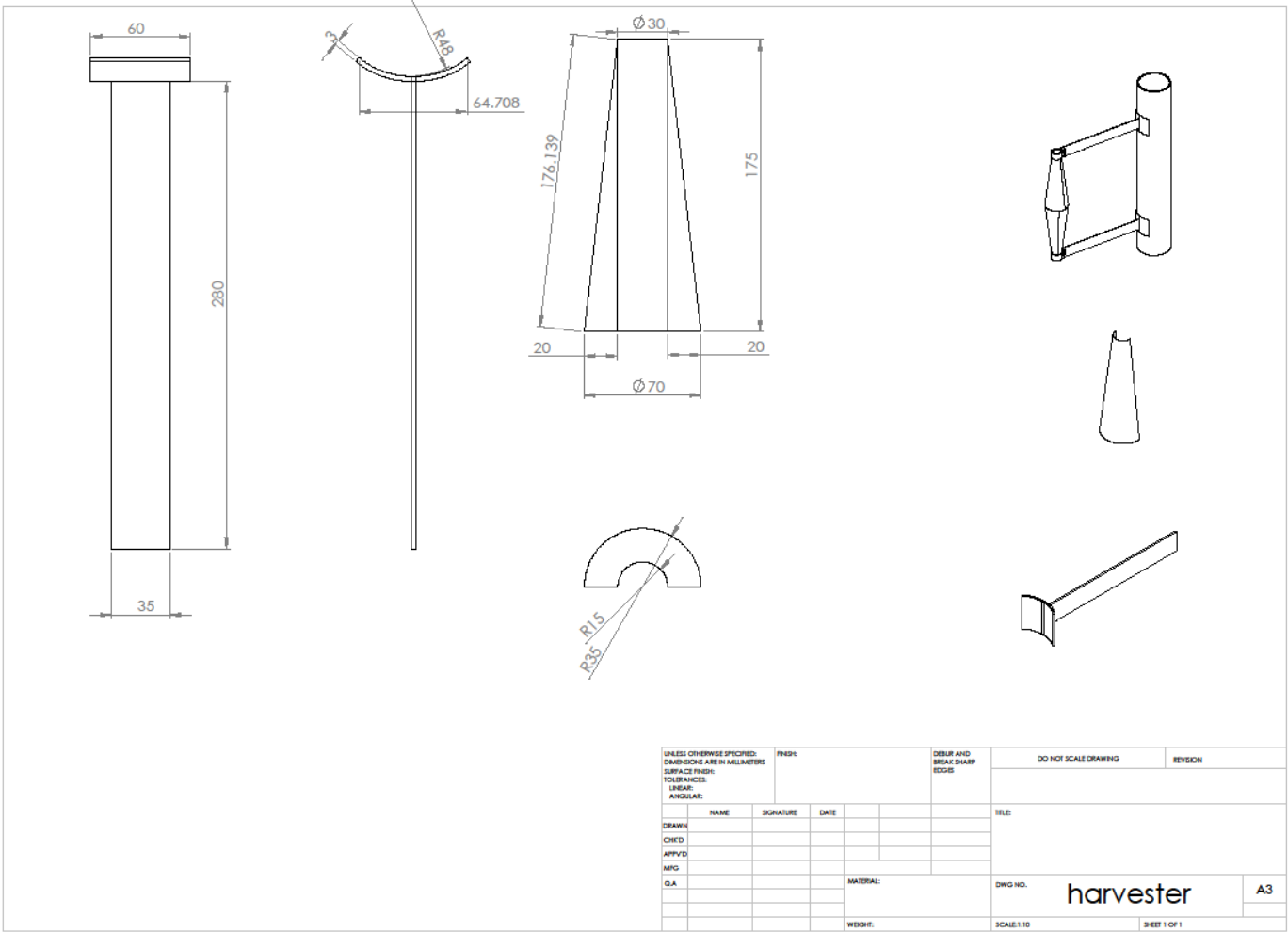
9. Appendices

A. Specificatie Piëzoharvester

arm - lengte	0,280 m
arm - breedte	0,003 m
arm - hoogte	0,030 m
arm - dichtheid staal	7800,00
arm - E staal	$2,10 \cdot 10^{11}$
arm - massa (2 stuks)	0,179 kg
arm - moment (I)	$6,75 \cdot 10^{-11}$
arm - stijfheid k	1937,18
arm - hoekfrequentie w_b	11,53 Hz
arm - eigenfrequentie f_b	1,83 Hz
cilinder - lengte	60,00 m
cilinder - radius	0,025 m
cilinder - interne radius	0,022 m
cilinder - diameter	0,050 m
cilinder - dichtheid PVC	1000,00
cilinder - E PVC	$3,00 \cdot 10^9$
cilinder - massa	29,05 kg
cilinder - lengte/diameter	1200,00
cilinder - moment (I)	
lucht - viscositeit nu	$1,50 \cdot 10^{-5}$
lucht - dichtheid	1,23
lucht - massa	-0,0258 m
lucht - windsnelheid	$4,50 \text{ ms}^{-1}$
Strouhal getal	0,20
Capacitance	$1,80 \cdot 10^{-8}$ F
Impedantie	200,00 Ω
Resonantiefrequentie:	4400 ± 500 Hz
M ratio	246,49
m^*	366,67
L/D ratio	7,00
Added mass coefficient	75,63

Windsnelheid $v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Diameter d / m
1,0	0,0104
2,0	0,0208
3,0	0,0312
4,0	0,0415
5,0	0,0519
6,0	0,0623
7,0	0,0727
8,0	0,0831
9,0	0,0935
10,0	0,1038

B. Werktekening Solid Works model.



C. Overzichtstabel windtunnel experimenten

meting	Temp	kwik druk	rho lucht	dP tunnel	Fq tunnel	v wind	hoek	V _{pp}	Onzekerheid	opmerkingen
<i>Oscillatie natuurlijk ontstaan - per meting voortgebouwt op vorige</i>										
1-3	Eerst drie eigen frequentie metingen geweest bij windsnelheid = 0									
4	21	764.5	1.21	9	5.5	3.86	0	0	0	geen oscillatie
5	21	764.5	1.21	11	5.7	4.27	0	0.04	0.01	lichte oscillatie
6	21	764.5	1.21	12	5.9	4.46	0	0.11	0.03	goed zichtbare oscillatie
7	21	764.5	1.21	13	6.1	4.64	0	0.14	0.04	goed zichtbare oscillatie
8	21	764.5	1.21	14	6.3	4.82	0	0.12	0.03	oscillatie lijkt minder te worden
9	21	764.5	1.21	16	6.5	5.15	0	0.05	0.01	oscillatie is stuk minder extreem
10	21	764.5	1.21	17	6.7	5.31	0	0	0	geen waarneembare oscillatie meer
<i>Herhaling eerste 7 metingen (steeds vanaf windsnelheid 0 beginnen - vorige oscillatie uitgedoofd)</i>										
11	21	764.5	1.21	10	5.5	4.07	0			
12	21	764.5	1.21	12	5.7	4.46	0			
13	21	764.5	1.21	13	5.9	4.64	0			
14	21	764.5	1.21	14	6.1	4.82	0			
15	21	764.5	1.21	15	6.3	4.99	0			
16	21	764.5	1.21	17	6.5	5.31	0			
17	21	764.5	1.21	18	6.7	5.46	0			
<i>- Herhaling eerste 7 metingen (voortbouwend op vorige - zonder printen data)</i>										
-	21	764.5	1.21	9	5.5	3.86	0			geen oscillatie waarneembaar
-	21	764.5	1.21	11	5.7	4.27	0			oscillatie zichtbaar - zeer miniem
-	21	764.5	1.21	12	5.9	4.46	0			
-	21	764.5	1.21	13	6.1	4.64	0			
-	21	764.5	1.21	14	6.3	4.82	0			
-	21	764.5	1.21	15	6.5	4.99	0			
-	21	764.5	1.21	17	6.7	5.31	0			
18 Eigenfrequentie test										
<u>Hoek verandering bij 6,1 Hz (steeds vanaf 0 meten)</u>										
19	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	0			
20	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	0			
21	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	0			
41 Eigen frequentie test										
22	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	15			niets te zien op de oscilloscoop, maar met het oog wel zeer lichte trilling waar te nemen
23	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	15			bijna geen oscillatie

meting	Temp	kwik druk	rho lucht	dP tunnel	Fq tunnel	v wind	hoek	V _{pp}	Onzekerheid	opmerkingen
24	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	15			
25	21	764.5	1.21	10	5.7	4.07	15	0.03	0.02	na wat proberen, lijkt hij wel te gaan oscileren bij lagere winsnelheid
26	21	764.5	1.21	11	5.9	4.27	15	0.03	0.01	meting zonder stop vanaf 0 - duurt lang tot oscillatie bereikt is
27	21	764.5	1.21	11	5.9	4.27	15	0.03	0.01	na wachten tot op maximale oscillatie
28	Eigenfrequentie test						30			
29	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	30			
30	21	764.5	1.21	11	5.9	4.27	30	0.1	0.01	
31	21	764.5	1.21	10	5.7	4.07	30	0.03	0.01	
32	Eigen frequentie test									
33	21	764.5	1.21	11	5.9	4.27	45			
34	21	764.5	1.21	10	5.7	4.07	45			
35	21	764.5	1.21	9	5.5	3.86	45			
Geen resultaten meer. Ook niet op andere frequenties (i.e. windsnelheden)										
36	Eigen frequentie test									
37	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	180			heeft twee frequenties (standaard en een lage - dempt om de paar seconde uit en begint dan weer)
38	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	180			
39	21	764.5	1.21	11	6.1	4.27	180			
40	21	764.5	1.21	14	6.6	4.82	180	0.03	0.01	andere windsnelheid zoeken die optimaal kan zijn (voorbeeld bij 6,6Hz - 16 mmkwik
De metingen voor 180grad zijn niet geheel eerlijk vanwege de ruimte waarin de wind langs de buis komt niet meer beperkt is (bernoulli)										
Inkepingen										
42	Eigen frequentie test									
44	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	0			kleine inkeping onder (1)
45	21	764.5	1.21	13	6.1	4.64	0			kleine inkeping onder (1)
46	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	0			kleine inkeping onder (1)
47	Eigen frequentie test									
48	21	764.5	1.21	12	6.1	4.46	0			Grote inkeping onder (1)
49	21	764.5	1.21	13	6.1	4.64	0			Grote inkeping onder (1)
50	21	764.5	1.21	2	6.1	1.82	0			Grote inkeping onder (1)

Overige observaties:

- Lamp in windtunnel verstoort oscilloscoop enorm.
- Hand achter cilinder houden kan deze goed laten exciteren.