



FACULTEIT WETENSCHAPPEN: FYSICA EN STERRENKUNDE

Academiejaar 2020–2021

IONOCRAFTS

Arthur ADRIAENS & Marco VANDERPOORTEN

Begeleider: Iryna Kuchakova

Verantwoordelijke: Christophe Leys

Scriptie voorgedragen tot het behalen van de graad van
BACHELOR IN DE FYSICA EN STERRENKUNDE

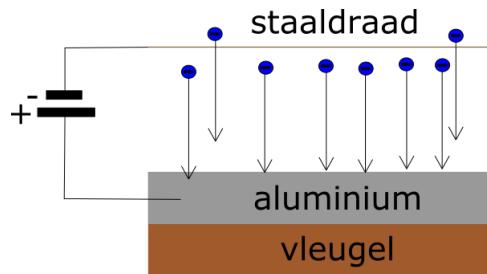
1 Abstract

In deze bachelorproef beschrijven wij de werking, opbouw en het testen van een ionocraft. Een ionocraft is een soort voertuig dat zich voortbeweegt door het vormen en verplaatsen van ionen. Eerst en vooral hebben we het principe achter de voortbeweging uitgetest, waarna we een testvaartuig hebben gecreëerd. Vervolgens hebben we onze tijd gestoken in het optimaliseren van de design en een finale versie gemaakt waarop we snelheidsmetingen hebben gedaan. Door de beweging van het vaartuig op een correcte manier te modelleren kon met deze gemeten waarden dan de aard van de ionenstroom achterhaald worden. Er werd tenslotte ook een schlierensetup gebouwd dewelke gebruikt werd om de beweging van de geproduceerde wind te visualiseren.

2 Fenomenologie en principes

2.1 Ionen wind

We zullen analoog te werk gaan aan de methode gebruikt door Xu Haofeng et al. [8] en aldus het Biefeld–Brown effect gebruiken om voortstuwing te genereren. Dit is het fenomeen waarbij, zij er een zeer negatieve anode waar ionisatie van de luchtmoleculen plaatsvindt (zichtbaar als een zogenaamde 'corona ontlasting', zie figuur 12) en een positieve kathode waar de ionen naar vloeien, er botsingen van deze ionen tegen luchtmoleculen optreden (zie figuur 1). Dit resulteert in een zogenaamde 'ionenwind'



Figuur 1: Schets van het fenomeen

wat dus voor stuwwerkt zorgt. Aangezien dit fenomeen voortstuwing genereert door elektriciteit en lucht hebben de auteurs van [8] het de term 'elektroaerodynamische propulsie' gegeven. Lucht bestaat uit stikstof (78%), zuurstof (21 %), argon (0.93 %), koolstofdioxide (0.03 %), waterdamp en deeltjes als stof, pollen, etc. De negatieve ionisaties die zich voornamelijk voordoen in lucht zijn $O_2 \rightarrow O_2^-$ (dewelke ozon produceert bij hercombinatie) en $N_2 \rightarrow N_2^-$. We kunnen kijken naar de wetten van Maxwell om in te zien welke kracht er op deze ionen inwerkt, hier leiden we ze af voor een puntlading [1]:

$$\nabla \cdot d\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \implies \int_V \nabla \cdot d\vec{E} = \int_V \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{dq}{\epsilon} \implies \oint \mathbf{dE} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS = \frac{dq}{\epsilon} \quad (1)$$

Waarbij dan, voor een bal rond de puntlading de oppervlakte-integraal wordt gegeven door:

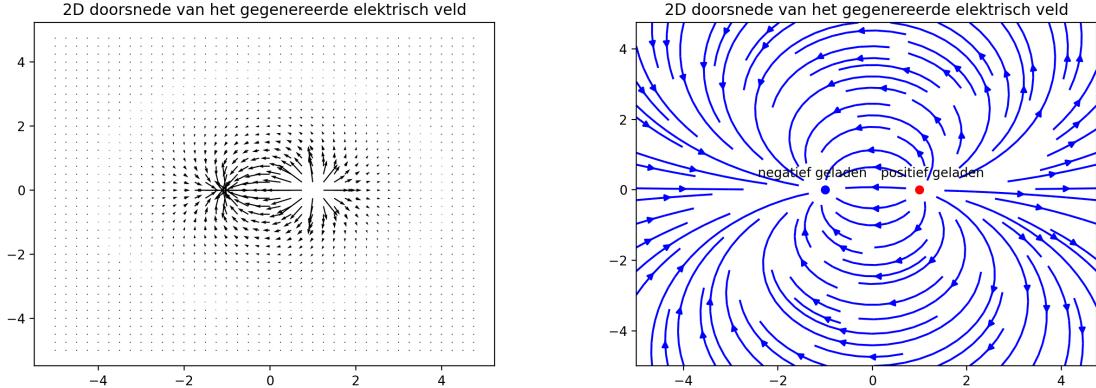
$$\oint \mathbf{dE} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS = dE \cdot A = dE(4\pi r^2) = \frac{dq}{\epsilon} \implies dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2)$$

Hiermee kunnen we dan het elektrisch veld berekenen in het midden van een draad van lengte $2d$. Hiervoor beschouwen we dat deze een lijnladingsverdeling heeft met dichtheid $\lambda = \frac{q}{l}$, wat dus afhankelijk is van hoeveel elektronen er zich op elk moment in de draad bevinden en dus van de spanning, stroom en het soort materiaal. We zullen het elektrisch veld bekijken op een afstand R van de draad en r van het te integreren lijnelement:

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} \implies E\hat{\mathbf{n}} = \hat{\mathbf{n}} \cdot \int dE_x = \hat{\mathbf{n}} \cdot \int dE \cos\alpha = \frac{R}{4\pi\epsilon} \int_{-d}^d \frac{\lambda dy}{(R^2 + y^2)^{3/2}} \cdot \hat{\mathbf{n}} = \frac{2d\lambda}{4\pi\epsilon R\sqrt{R^2 + d^2}} \hat{\mathbf{n}} \quad (3)$$

Waar we gebruik gemaakt hebben van de symmetrie van het probleem door de draad in de y -richting te kiezen en dus $\hat{\mathbf{n}}$ in een richting in het xz -vlak gelegen, ook werd gebruik gemaakt van $\cos\alpha = \frac{R}{r}$ en $r = \sqrt{R^2 + y^2}$.

Als we deze draad dan symmetriseren en de lading omdraaien, i.e naast een andere draad leggen waar de ionen naar zullen vloeien (zoals in onze ionocrafts het geval zal zijn) dan krijgen we als 2D-doorsnede veldlijnen die er als volgt zullen uitzien (zie A.1 voor de broncode):



Figuur 2: elektrische veldlijnen

Nu zal echter bij onze ionocrafts er geen positieve maar een neutrale 2de draad zijn, waardoor de ionen enkel invloed ondervinden van de eerste draad, door de invloed van dit elektrisch veld krijgt een ion met lading $-e$ en massa m een versnelling van (Lorentzkracht):

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} = m\ddot{\mathbf{r}} \implies \ddot{\mathbf{r}} = \frac{2d|\lambda|e}{4\pi\epsilon Rm\sqrt{R^2 + d^2}}\hat{\mathbf{n}} \quad (4)$$

Dit was puur om inzicht te krijgen in het bewegen van de ionen ten gevolge van de ontstane krachten, er is echter veel meer werk in berekeningen gedaan naar de veroorzaakte stuwwerkt van dit elektro-hydrodynamisch (EHD) probleem (in lucht zoals eerder vermeld ook elektroaerodynamisch genoemd). O.a kan hierbij de stuwwerkt bepaald worden door een aangepast gebruik van de Child-Langmuir [7] vergelijking waarbij een veralgemeende eendimensionale behandeling de volgende vergelijking voor de stuwwerkt geeft:

$$F_s = \frac{Id}{\mu} \quad (5)$$

Met μ het ionen mobiliteitscoëfficiënt van het medium, met degene voor lucht $2 \times 10^{-4} \frac{m^2}{Vs}$ [6], d de afstand tussen de geleiders en I de stroom van de ionen (afhankelijk van de opgelegde spanning). Als de uitgeoefende kracht dus gemeten wordt bij een bepaalde aangelegde spanning kan hieruit de ionenstroom I berekend worden. Nu is de stroomsterkte I gedefinieerd als de elektrische lading die per tijdseenheid door een doorsnede van het gebied waar de elektrische stroom loopt (hier de ionen), passeert. Als we nu N geladen deeltjes hebben, elk met een lading q dan wordt de stroomsterkte dus gegeven door:

$$I = \frac{Nq}{t} \quad (6)$$

Als wij nu een uitdrukking voor de stuwwerkt F_s weten te bepalen in functie van de aangelegde spanning, kunnen wij dit ook direct via vergelijking 5 in verband brengen met de ionenstroom I veroorzaakt door het materiaal (roestvrij staal). En kan, na het meten van de lengte en breedte van de draad waar luchtonderhoud plaatsvindt, de ionenstroom (en dus ook ionenvorming) in lucht in functie van de aangelegde spanning per eenheid oppervlakte en tijd bepaald worden voor een bepaald materiaal.

2.2 Doorslag van lucht

De doorslag van lucht is relatief complex maar het bij ons optredend geval kan als volgt uitgelegd worden: Ionen (in ons geval gevormd door contact met de draad) worden versneld ten gevolge van een elektrisch veld (bij ons veroorzaakt door de draad), deze ionen botsen tegen moleculen en gas waarbij ze die ioniseren. Dit gas-ionisatieproces veroorzaakt naast de negatieve ionen ook vrije elektronen bij de-ionisatie die op hun beurt weer worden versneld dewelke dit proces opnieuw doen. Als het elektrisch veld groot genoeg is wordt zo een lawine-effect veroorzaakt. De formule die de spanning geeft waar lucht aan doorslaat (elektriciteit geleidt) is Paschen's wet [5]:

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln \left[\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}} \right) \right]} \quad (7)$$

Met d de onderlinge afstand, p de druk in pascal (hier 1 atmosfeer), A en B constanten afhankelijk van het gebruikte gas (voor lucht is $A = 112.50(kPa \cdot cm)^{-1}$ en $B = 2737.50V/(kPa \cdot cm)$ [4]) en γ_{se} het 2de elektron-emissie coëfficiënt afhankelijk van het aangelegd elektrisch veld. Aangezien onze boot zijn spanning zal krijgen via doorslag aan een antenne (gebaseerd op botsauto's) wensen we de maximumafstand om doorslag te krijgen te bepalen, maar om berekeningen te verrichten met de voordien vermelde formule dienen we dus het gegenereerd elektrisch veld te weten. Aangezien we toch maar een ruwe schatting dienen te maken zullen we de benadering 3 kV/mm gebruiken die zijn toepassingen vindt in het aanleggen van hoogspanningskabels.

3 Modellering

3.1 Kinematica

In sectie 2.1 hebben we de vorming van de ionenwind besproken. Zoals daar vermeld is het zeer moeilijk om een kwantitatieve uitdrukking te bekomen voor de gegenereerde stuwwracht door enkel naar de ionen zelf te kijken. Wanneer we echter naar de kinematica van heel het systeem kijken, zullen we zien dat de informatie hieruit gelinkt kan worden aan de opgewekte stuwwracht door de ionenwind zonder dat we inzicht nodig hebben over de precieze beweging van de ionen zelf.

Het vaartuig in kwestie zal twee verschillende soorten krachten ondervinden. Enerzijds de stuwwracht, opgewekt door de ionenwind, en anderzijds verscheidene weerstandskrachten. Deze weerstandskrachten komen voort uit het contact met het oppervlak van het water en de lucht. Beide krachten kunnen voor lage snelheden (overeenkomen met een zogenaamd laag "Reynolds getal") benaderd worden door er vanuit te gaan dat ze recht evenredig zijn met de snelheid van het vaartuig [2]. Voor het gemak veronderstellen we dus elke vorm van weerstand als één kracht met een overkoepelende evenredigheidsconstante:

$$\mathbf{F}_d = -bv \quad (8)$$

Op deze manier kunnen we het krachtendiagram interpreteren en zo een differentiaalvergelijking opstellen door de wetten van Newton toe te passen. Hierbij maken we gebruik van het feit dat de stuwwracht constant in de tijd is.

$$\mathbf{F}_{tot} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_d \implies m\dot{\mathbf{v}} = m\mathbf{a}_s - bv \quad (9)$$

De oplossing van deze differentiaalvergelijking voor de snelheid van het vaartuig staat hieronder gegeven. Aangezien we veronderstellen dat het vaartuig een rechtlijnige beweging uitvoert, beschouwen we nu enkel de component van de snelheid en versnelling in de richting waarin het vaartuig beweegt. De keuze voor x, y of z is arbitrair.

$$v = Ce^{-\frac{b}{m}t} + \frac{ma_s}{b} \quad (10)$$

Hierin is C een constante die bepaald kan worden door de randvoorwaarden. Een van de randvoorwaarden is dat het vaartuig uit rust vertrekt, ofwel $v(t = 0s) = 0m/s$. Hieruit volgt dat $C = -\frac{ma_s}{b}$. De uitdrukking voor de snelheid vereenvoudigt zich dan tot:

$$v = \frac{ma_s}{b}(1 - e^{-\frac{b}{m}t}) \quad (11)$$

Een verdere randvoorwaarde is dat na enige tijd het vaartuig naar een maximum snelheid gaat, ofwel $\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = v_{max}$. Deze laatste randvoorwaarde is in het bijzonder voor ons enorm belangrijk. Enerzijds laat ze ons toe om de weerstandscoëfficiënt te bepalen door enkel snelheidsmetingen te doen. Maar anderzijds geeft deze randvoorwaarde ons ook een verband tussen de maximumsnelheid en de stuwwracht zonder dat we hier de effectieve oorsprong van hoeven te weten:

$$v_{max} = \frac{ma_s}{b} = \frac{F_s}{b} \quad (12)$$

3.2 Windsnelheid

Kwalitatief verwachten we dat er een optimale afstand tussen de ionenbron en collector bestaat waar een maximale snelheid bereikt wordt. De redenering gaat als volgt: naarmate de afstand groter wordt hebben de ionen eerst meer tijd om versneld te worden en wordt er dus een grotere windsterkte geproduceerd, echter ondervinden deze ionen ook wrijving en mogen de bron en collector niet een te grote afstand van elkaar verwijderd zijn aangezien deze term dan overwint.

Een analoge redenering als in het vorige kan gemaakt worden voor de windsnelheid gevormd door de ionen, waardoor we dit kwantitatief kunnen aantonen:

We bekijken het systeem in 1D en benaderen formule 4 als:

$$\ddot{x}_s = \frac{s}{x} \quad (13)$$

verder gaan we ervan uit dat, als in het vorige, de wrijving 1^e-orde afhankelijk is van de snelheid:

$$\ddot{x}_w = -w\dot{x} \quad (14)$$

Hierdoor krijgen we de vergelijking:

$$\ddot{x} = \frac{s}{x} - w\dot{v} \quad (15)$$

Met als initiële condities:

$$x(0) = 0.125 \text{ en } \dot{x}(0) = 0$$

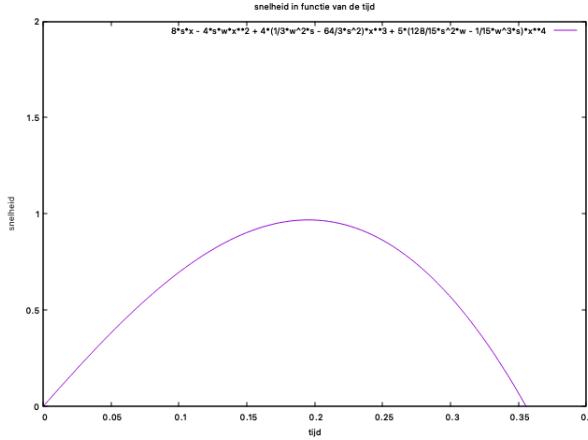
Met 0.125 ongeveer de straal van de gebruikte draad. Deze differentiaalvergelijking valt niet mooi op te lossen, maple geeft als oplossing:

$$x(t) = \text{RootOf} \left(we^{-\frac{384s \ln(2)+w^2}{128s}} \sqrt{\pi} \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{-\frac{2}{s}} \sqrt{2} \sqrt{768s \ln(2) + 2w^2 + 256 \ln(Z e^{wt}) s}}{32} \right) + e^{wt} s \sqrt{-\frac{2}{s}} \right. \\ \left. + we^{-\frac{384s \ln(2)+w^2}{128s}} \sqrt{\pi} \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{-\frac{2}{s}} w}{16} \right) - s \sqrt{-\frac{2}{s}} \right) \quad (16)$$

Met erf() de errorfunctie, maple kan hier echter een reeksontwikkeling van maken waardoor we krijgen dat:

$$x(t) \approx \frac{1}{8} + 4st^2 - \frac{4}{3}s w t^3 + \left(\frac{1}{3}w^2 s - \frac{64}{3}s^2 \right) t^4 + \left(\frac{128}{15}s^2 w - \frac{1}{15}w^3 s \right) t^5 + O(t^6) \quad (17)$$

Als we deze nu afleiden om zo de snelheid te verkrijgen en bepaalde waarden van s en w invullen (niet relevant welke aangezien dit ter illustratie is) wordt een functie van de verwachte vorm verkregen:



Figuur 3: Snelheid van de ionen in functie van de tijd (en dus afstand)

Waarbij enkel wordt gekeken naar de positieve waarden aangezien de wrijvingsterm iets enkel kan doen vertragen en niet in de tegengestelde richting kan doen bewegen.

4 Experimentele methode

4.1 Foutenrekening

Aangezien er in wat volgt tijden zullen gemeten worden die niet-reproduceerbaar zijn zal hier uitgelegd worden hoe de fout op deze waarden wordt berekend.

Eerst en vooral dienen we het aritmetisch gemiddelde van N elementen te definiëren als:

$$\bar{x} := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (18)$$

En de variantie als:

$$V(x) := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (19)$$

Nu wordt de standaardafwijking σ gegeven door de positieve vierkantswortel van de variantie $V(x)$:

$$\sigma = \sqrt{V(x)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (20)$$

Nu is een goede schatting voor kleine waarden hiervan gegeven door (dit wordt ook wel de correctie van Bessel genoemd):

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (21)$$

Nu is er ook een fout op de afstand waar rekening mee gehouden dient te worden om de fout op de snelheid te weten. Om de fout op een functie te berekenen kunnen we gebruik maken van de

Wet van foutenpropagatie [3] (Theorema 4.3.1):

Een **algemene functie** $f(\vec{X})$ van m **onafhankelijke** toevallige variabelen met respectievelijke fout σ_i heeft als variantie (of fout):

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{df}{dx_1} \right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{df}{dx_2} \right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{df}{dx_m} \right)^2 \sigma_m^2 \quad (22)$$

Het is echter bij vele toepassingen simpeler om te werken met de relatieve fout, dit is hoeveel percent de fout bedraagt van de totale grootheid. De relatieve fout heeft als eigenschap dat een product of een quotiënt van grootheden steeds de som van de relatieve fouten op de individuele grootheden is. Als voorbeeld kunnen we kijken naar de formule voor snelheid. Stel dat de afstand een relatieve fout RF_d heeft, de tijd een relatieve fout RF_t en dat de absolute fout op de snelheid gegeven wordt door AF_v . De snelheid wordt dan gegeven door:

$$v \pm AF_v = \frac{d \pm d * RF_d}{t \pm t * RF_t} = \frac{d}{t} [1 \pm (RF_d + RF_t)] \quad (23)$$

Nu zullen zo meerdere snelheden bekomen worden met elk hun respectievelijke fout. Uit de statistiek weten we dan we voor N metingen van dezelfde grootheid, elk met fout σ_i , we dienen gebruik te maken van het gewogen gemiddelde dat als volgt is gedefinieerd:

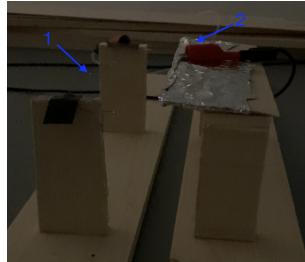
$$\bar{x} := \frac{\sum_i^N \frac{x_i}{\sigma_i^2}}{\sum_i^N \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (24)$$

En met als resolutie gewoonweg de noemer ervan en dus de standaardfout:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{V(\bar{x})} = \frac{1}{\sqrt{\sum_i^N \sigma^{-2}}} \quad (25)$$

4.2 Test principe

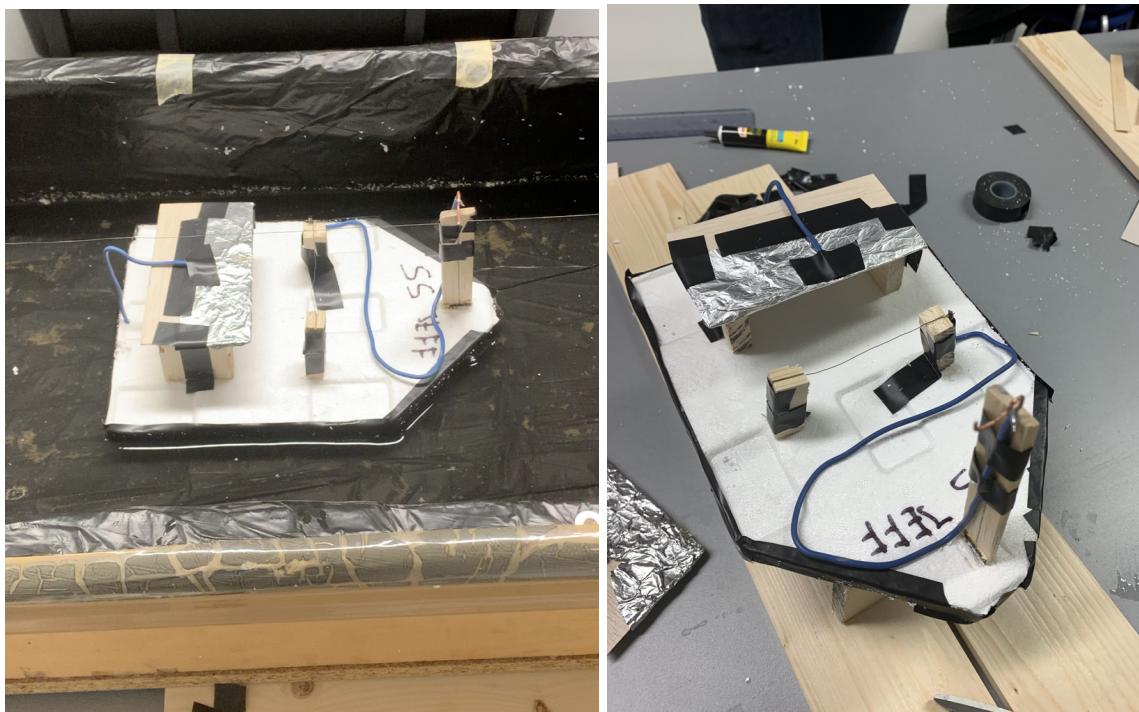
We hebben eerst een test uitgevoerd van het principe op de 2de sessie (25/02/21). Hierbij schakelden we een roestvrij stalen draad (diameter gelijk aan 0.25mm) aan een vaste hoog-spanningsbron (Brandenburg model 800, serienummer 390c) en de ground aan een stuk aluminiumfolie rond een stuk hout, elk gemonteerd op een statief (zie figuur 4) waarbij 1 de kathode (roestvrij stalen draad) is en 2 de anode (aluminiumfolie). Hierbij meten we met behulp van een anemometer een windsnelheid van 0.8m/s verkregen bij 27kV.



Figuur 4: Opstelling dienend tot het testen van het onderliggend principe

4.3 Opstelling

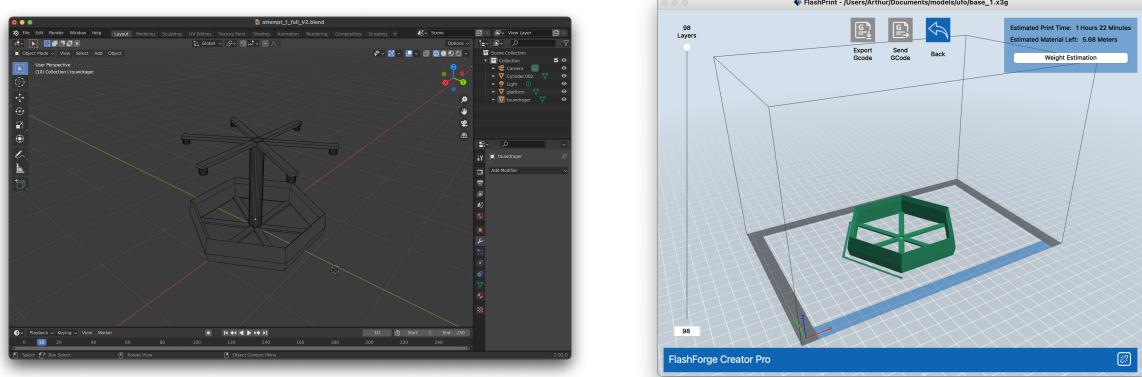
Hierna hebben we het vorig vermeld systeem bevestigd op een stuk Polystyreen in bootvorm (zie figuur 5), dit hebben we dan de naam "testvaartuig" gegeven aangezien we er later een betere versie van gemaakt hebben (zie verder). We laten deze bewegen in een bad gevuld met water waar een hoogspanningskabel over hangt. Het testvaartuig maakt 'contact' (zie sectie 2.2: Doorslag van lucht) via de overhangende stroomkabel met de spanningsbron door middel van een komvormige antenne (zichtbaar vooraan aan de boot). Om de maximale diepte te weten werd de minimumspanning van 20kV waar we metingen aan wensen te doen ingevuld in de formule vermeld op het einde van sectie 2.2 wat een waarde geeft van $\approx 6.67\text{mm}$, dus iets minder dan een centimeter. De opgespannen ionen-collecterende aluminiumfolie is verbonden met de ground via het water.



Figuur 5: Testvaartuig: SS Jeff

Deze testsetup gebruikende maten we indirect de snelheden i.f.v aangelegde spanningen, dit deden we door de tijd waarbij de boot elk van de plakkers passeerde te noteren waarbij er voor elke aangelegde spanning 3 metingen werden gedaan. Elk van de 2 auteurs deed dit met hun eigen chronometer op zijn smartphone waardoor er foutenrekening op de tijd mogelijk is, aangezien we hier niet-reproduceerbare fouten werken zal als fout de vorig besproken (zie 4.1) standaardfout genomen worden. Nu bevindt het vaartuig zich in een waterbad met stickers als maatstaven (zie figuur 5 links) waarvan de eerste maatstaaf zich op een afstand van 21.1cm bevindt en de 2de op 20.5cm van deze eerste, elk met een absolute fout van $\pm 0.1\text{cm}$ (gemeten met een lat waarbij 0.05cm fout zit op de gemeten waarde en op het nulpunt). De verkregen metingen kunnen gevonden worden in sectie 5.1.

4.4 motor



Figuur 6: maken en printen van de motor

De motor werd ontworpen met het in acht nemen van maximale ionenvorming en richting van de stuwwerkracht. Hoewel een cirkel de maximale omtrek heeft voor een gegeven straal is het niet doenbaar om een draad zodanig te monteren, daarom kozen we voor een 6-hoek waarvan we na een snelle berekening kunnen zien dat de efficiëntie $\approx 0.989\%$ van dat van een cirkel is (6.21 als omtrek van een eenheidszeshoek in vergelijking met 6.28 voor een eenheidscirkel) wat uiterst goed is. Na dit ontwerp werd ze in het programma 'blender' gemodelleerd waarna ze vervolgens werd opgesplitst volgens de mast en onderkant om goed te kunnen printen met de 3D-printer (zie figuur 6) er loopt een gat doorheen het ontwerp om deze vervolgens verhoogd te kunnen monteren (te zien op figuur 7). Deze 2 delen werden vervolgens aan elkaar gelijmd en van achter gemonteerd (ook te zien op figuur 7) wat het vaartuig ook een soort 'hovercraftlook' gaf waar het design ook op geïnspireerd was. Rond de zeshoek wordt er aluminiumfolie gehangen (anode) en de roestvrij stalen draad (kathode) wordt gewikkeld rond de 'uitsteeksels' van het andere onderdeel.¹

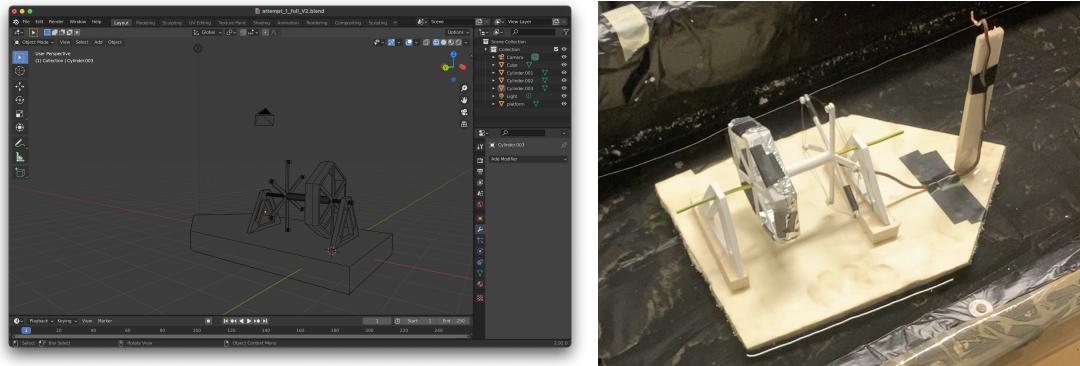
4.5 Vaartuig

Vervolgens hebben we een vaartuig geconstrueerd met de motor besproken in sectie 4.4 (zie figuur 7). Hierna werden er video's gemaakt van de boot voor verscheidene aangelegde spanningen en zo met een gegeven afstandsmaat (een lat van 50cm gelegen naast de opstelling) en het programma 'tracker: video analysis and modeling tool' van Douglas Brown positiemetingen in functie van de tijd verricht. De zo verkregen waarden geven we weer en bespreken we in sectie 5.3.

4.6 Windsnelheden

Het testvaartuig heeft de ideale constructie om te spelen met de afstand tussen de draad waar de ionen gevormd worden en het aluminium (ground) waar de ionen opgevangen worden. We varieerden deze afstand bij een constante spanning van 27kV en legden de windsnelheden vast met een anemometer (een apparaat dat windsnelheden meet). Deze anemometer kan windsnelheden vanaf 0.7m/s meten. De bekomen meetwaarden kunnen gevonden worden in sectie 5.2.

¹De gebruikte modellen kunnen teruggevonden worden op Github



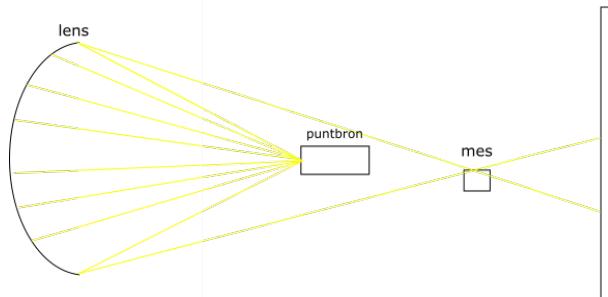
Figuur 7: Ontwerp en finale vorm van het vaartuig

4.7 Schlieren imaging

Zoals eerder vermeld, willen we ook de opgewekte ionenstroom visualiseren. Om de stroming in beeld te brengen gebruiken we een methode genaamd Schlieren imaging. Deze steunt op de verschillen in brekingsindices van de lucht, veroorzaakt door variaties in de dichtheid van lucht. Specifiek maken we gebruik van een parabolische lens, een mes, een licht (ideaal een puntbron) en een camera (zie figuur 8). De lichtstralen gaan door het medium en kaatsen op de parabolische spiegel, aangezien deze parabolisch is focus die bij normale omstandigheden alle lichtstralen in 1 enkel punt. Nu zal een verstoring (zoals een dichtheidsfluctuatie) echter bepaalde lichtstralen afbuigen, dit is doordat het hier gaat van één bepaald medium (lucht op atmosferische druk) naar een ander medium (de dichtheidsfluctuatie, e.g warme lucht) en terug. Hierbij zal de lichtstraal voldoen aan de wet van Snellius:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (26)$$

als we nu een mes net onder het focaal punt plaatsen om deze afgebogen fotonen tegen te houden dan zijn deze zichtbaar in de figuur als plekken die minder licht hebben gekregen.



Figuur 8: Opstelling

In ons geval gebruikten we een zaklamp waarbij een deel van het licht is tegengehouden door aluminiumpapier als puntbron en een parabolische spiegel met een diameter van $20.0\text{cm} \pm 0.05$. Het beeld dat gevormd werd, is dan gefilmd met de camera van een iphone.

5 Resultaten

5.1 Testvaartuig

We verkregen de volgende metingen voor het testvaartuig (waarbij de notatie $tijd1;tijd2$ slaat op respectievelijk gemeten door auteur 1 en 2):

Aangelegde spanning	Tijd tot positie 1 (s)	Tijd tot positie 2 (s)
20kV	27.84;26.91	46.66;46.96
	22.69;23.21	44.92;45.03
	22.41;20.24	44.93;44.24
25kV	8.48;7.98	19.84;19.81
	7.27;6.72	16.04;15.71
	8.50;7.90	18.42;18.11

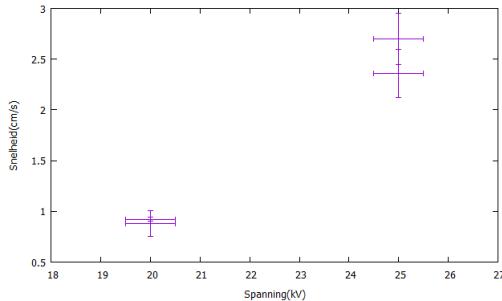
Waarbij duidelijk al direct een zeer grote verbetering wordt gezien in de snelheid bij verhoging van de spanning. We hebben al vermeld dat deze tijdsmetingen niet-reproduceerbaar zijn dus worden de fouten berekend op de tijden voor de verschillende spanningen en afstanden door met het aritmatisch gemiddelde te gebruiken in formule 21. Zo worden de gemiddeldes met fout:

Aangelegde spanning	Tijd tot positie 1 (s)	Tijd tot positie 2 (s)
20kV	23.88 ± 2.90	45.46 ± 1.09
25kV	7.81 ± 0.70	17.99 ± 1.79

Met vergelijking 23 kan men dan de snelheden met hun fouten weergeven:

Aangelegde spanning	Snelheid start tot meetpunt 1 (cm/s)	Snelheid start tot meetpunt 2 (cm/s)
20kV	0.88 ± 0.13	0.92 ± 0.02
25kV	2.70 ± 0.25	2.36 ± 0.24

waarna we de snelheidsmetingen in functie van de aangelegde spanning grafisch kunnen weergeven:



Figuur 9: Snelheid ifv de aangelegde spanning

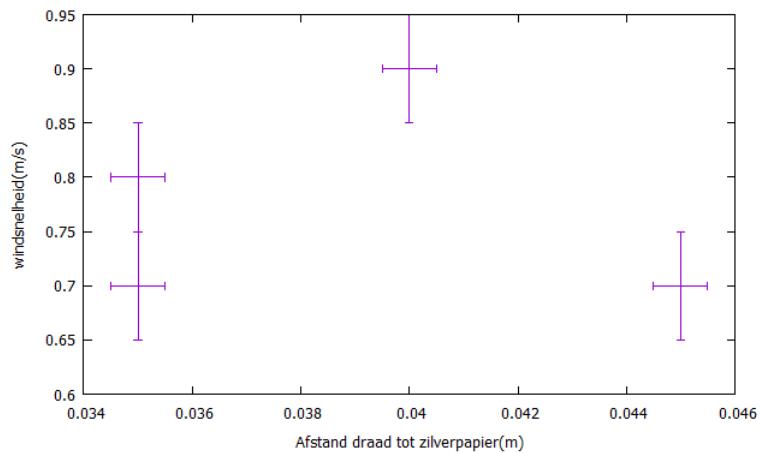
De gemiddelde snelheden voor de aangelegde spanningen zijn gegeven voor 20kV door $0.92 \pm 0.02 \frac{cm}{s}$ en voor 25kV door $2.52 \pm 0.17 \frac{cm}{s}$.

5.2 Windsnelheden

Zoals eerder vermeld, kan de anemometer maar windsnelheden vanaf 0.7m/s meten. Aangezien er doorslag optreedt bij een afstand van ongeveer 3cm en dat de windsnelheid bij afstanden groter dan 4.5cm niet meer te meten waren, is het bereik van de metingen eerder klein. Hierdoor kunnen we enkel kwalitief het verband tussen deze afstand en de windsnelheid bepalen. De gemeten windsnelheden bij verschillende afstanden van het aluminiumfolie tot de stalen draad staan hieronder gegeven:

Aangelegde spanning	afstand bron-collector (cm)	windsnelheid (m/s)
27kV	3.5 ± 0.05	0.8 ± 0.05
	3.5 ± 0.05	0.7 ± 0.05
	4.0 ± 0.05	0.9 ± 0.05
	4.0 ± 0.05	0.9 ± 0.05
	4.5 ± 0.05	$\approx 0.7 \pm 0.05$

Wanneer we deze waarden plotten krijgen we:



Figuur 10: Windsnelheid in functie van de afstand tussen de draad en het zilverpapier met fit

Er is duidelijk eerst een stijging naarmate de afstand toeneemt en dan weer een daling naarmate ze voorbij 4cm beweegt, zoals we voorspeld hadden in sectie 3.2.

5.3 Stuwkracht en ionenstroom

Zoals eerder vermeld werd de beweging van het vaartuig gefilmd met een iPhone en de beelden, die hierdoor verkregen zijn, werden in data omgezet met het programma "tracker". Deze metingen werden uitgevoerd voor 4 verschillende waarden voor de spanning (20, 23, 25 en 27kV) en voor elke spanning werden er drie filmpjes gemaakt om nauwkeurigere resultaten te verkrijgen. De geplotted data van deze metingen zijn te zien in Appendix B. Merk hierbij op dat de eerste meting bij een spanning van 27kV hier niet bij staat. Dit bestand is bij het verkeerd opslaan van het trackerbestand verloren geraakt.

Wat we als eerste met deze data wensen te doen, is een least squared fit van de snelheden uitvoeren met vergelijking 11. Hieruit kan dan de weerstandscoëfficiënt bepaald worden wat we nodig hebben om de ionenstroom te kunnen kwantificeren. Hiervoor hebben we echter eerst de maximale snelheid van het vaartuig voor elke meting nodig. Deze snelheid werd bepaald door de boot 10 seconden te laten varen en in tracker dan de afgelegde afstand te bepalen. De relatieve fout hierop is dan de som van de relatieve fouten van de tijd en de afgelegde afstand. De filmpjes werden geshoten met 30 frames per seconde. Voor een filmpje van 10 seconden is de relatieve fout dus $1/300$. De absolute fout van de gebruikte meetlat is 0.5cm, omdat hoewel er wel millimeterstrepen op de meetlat aanwezig waren, waren deze niet duidelijk zichtbaar in tracker. De verkregen waarden voor de maximale snelheid staan hieronder:

Spanning	$v_{max}(m/s)$
20kV	0.0155 ± 0.0008
	0.0130 ± 0.0007
	0.0153 ± 0.0008
23kV	0.0352 ± 0.0011
	0.0333 ± 0.0011
	0.0397 ± 0.0012
25kV	0.0538 ± 0.0014
	0.0513 ± 0.0014
	0.0495 ± 0.0013
27kV	0.0661 ± 0.0016
	0.0699 ± 0.0016
	0.0619 ± 0.0015

Nu kan er met deze waarden van de maximale snelheid een fit uitgevoerd worden en hieruit de weerstandscoëfficiënt b bepaald worden. De waarden voor deze coëfficiënt staan hieronder opgelist, waarbij de fout hierbij automatisch gegenereerd werd door gnuplot. Deze fout is de asymptotische standaardfout, maar deze is ongeveer gelijk aan de standaardfout. Verder is de fit samen met de waarden van de snelheid geplot, te zien in appendix B. Voor de eerste meting bij een spanning van 20kV is er geen fit uitgevoerd. De reden hiervoor is dat er hier eerst een kick-start moet gegeven worden van een spanning gelijk aan 27kV. De fit zou dus onbetrouwbaar zijn.

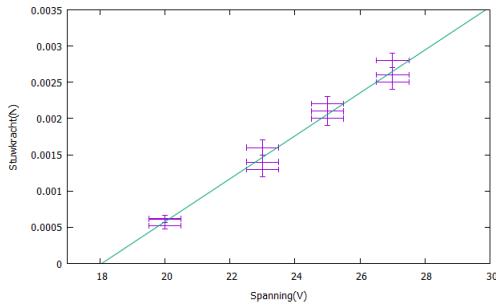
Spanning	fit $b(kg/s)$
20kV	/
	0.084 ± 0.034
	0.029 ± 0.006
23kV	0.053 ± 0.007
	0.047 ± 0.006
	0.029 ± 0.003
25kV	0.033 ± 0.002
	0.050 ± 0.004
	0.035 ± 0.003
27kV	0.076 ± 0.005
	0.046 ± 0.003
	0.055 ± 0.004

De constante b bepalen we nu door het gewogen gemiddelde van deze waarden te nemen zoals in formule 24. De fout hierop wordt dan bepaald door formule 25. Op deze wijze wordt de waarde van de weerstandscoëfficiënt: $b = 0.040 \text{ kg/s} \pm 0.001 \text{ kg/s}$.

Nu kunnen we met deze waarde de exacte waarden van de opgewekte stuwwkracht berekenen en het verband hierbij met de aangelegde spanning. De formule die hiervoor gebruikt wordt is vergelijking 5. De fout op deze kracht is weer te berekenen door de relatieve fouten op te tellen.

Spanning	$F_s(N)$
20kV	$0.62 * 10^{-3} \pm 0.05 * 10^{-3}$
	$0.52 * 10^{-3} \pm 0.04 * 10^{-3}$
	$0.61 * 10^{-3} \pm 0.05 * 10^{-3}$
23kV	$1.4 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3}$
	$1.3 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3}$
	$1.6 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3}$
25kV	$2.2 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3}$
	$2.1 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3}$
	$2.0 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3}$
27kV	$2.6 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3}$
	$2.8 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3}$
	$2.5 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3}$

Het is duidelijk dat de opgewekte kracht helemaal niet zo groot is en dat de massa van het vaartuig klein moet zijn om hem in beweging te doen krijgen. Wanneer we deze waarden plotten krijgen we de grafiek hieronder. Hierbij is de fout op de spanning 0.5kV.



Figuur 11: Stuwkracht in functie van de aangelegde spanning met lineaire fit

Op de figuur is duidelijk te zien dat het verband tussen de stuwwkracht en de aangelegde spanning lineair is. Hier moet echter nog een kleine kanttekening bij gemaakt worden. In de praktijk zal de stuwwkracht niet helemaal nul worden bij een spanning van ongeveer 18kV, maar zal deze geleidelijk naar nul naderen. Maar aangezien we niet in dit bereik geïnteresseerd zijn, veronderstellen we dat de stuwwkracht direct nul is wanneer de lineaire fit ook nul is. De gepostuleerde formule voor de stuwwkracht is dan:

$$F_s(U) = a(U - U_i)H(U - U_i) \quad (27)$$

Hierbij is U de aangelegde spanning (in kV!), U_i de initiële spanning de nodig is om een kracht te genereren en $H(U - U_i)$ de Heaviside stapfunctie. Deze laatste zullen we voor het gemak in het vervolg weglaten. Nu willen we nog de evenredigheidsconstante a bepalen. Dit doen we weer door middel van een fit in gnuplot. Zo krijgen we voor de opgewekte stuwwkracht de formule:

$$F_s(U) = (0.30 * 10^{-3} \pm 0.01 * 10^{-3})N/kV * (U - 18kV) \quad (28)$$

Nu kan deze opgewekte stuwwkracht in verband gebracht worden met de ionenstroom door middel van vergelijking 5:

$$I = \frac{\mu(0.30 * 10^{-3} \pm 0.01 * 10^{-3})N/kV}{d}(U - 18kV) = (1.3 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3})A/kV * (U - 18kV) \quad (29)$$

De ionenstroom die wordt opgewekt is dus ook recht evenredig met de aangelegde spanning. In de formule is d de afstand tussen de draad uit roestvrij staal en het zilverpapier. Deze is bij het voertuig gelijk aan $4.8\text{cm} \pm 0.05\text{cm}$.

Deze ionenstroom kan nu ook op een andere manier gepostuleerd worden. Namelijk met een constante die aangeeft in welke mate het materiaal de luchtmoleculen om zich heen kan ioniseren. Zij geeft dus aan hoeveel ionen (lees: lading) er gevormd worden per oppervlakte-eenheid, per tijdseenheid en voor een verhoging van het voltage. Wanneer er verondersteld wordt dat elk ion zich in de richting van de aarding zal bewegen, kan zo de ionenstroom geschreven worden als:

$$I = \zeta A(U - U_e) \quad (30)$$

Met ζ de net uitgelegde aëro-ionisatieconstante en A de oppervlakte van het materiaal. Door beide vergelijkingen voor de ionenstroom in elkaar te substitueren, krijgen we voor deze constante voor roestvrij staal:

$$\zeta_{RVS} = \frac{\mu(0.30 * 10^{-3} \pm 0.01 * 10^{-3})N/kV}{Ad} = 2.9 \frac{C}{kVm^2s} \pm 0.3 \frac{C}{kVm^2s} \approx 3.6 * 10^{19} \frac{\text{ionen}}{kVm^2s} \quad (31)$$

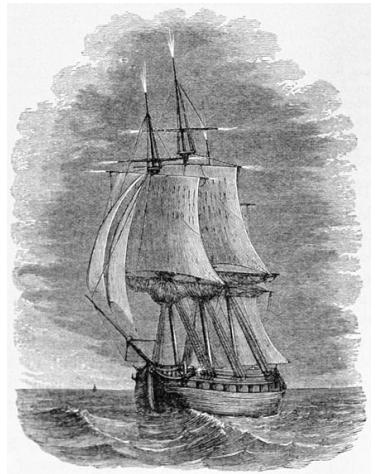
Hierbij is μ de mobiliteitscoëfficiënt van lucht en kan de oppervlakte van de draad berekend worden door te veronderstellen dat deze cilindervormig is met een diameter van 0.25mm en een lengte van 2 keer 27cm (De draad werd twee keer rond de zeshoek gewikkeld, de afstand tussen de draden was hierbij groot genoeg om te veronderstellen dat dit geen invloed geeft op de ionenontwikkeling). Nu hebben we de aëro-ionisatieconstante voor roestvrij staal, maar de vraag is natuurlijk of deze constante wel echt materiaalafhankelijk is en dus of andere materialen op dezelfde wijze ionen zouden creëren. Hiervoor is nog verder onderzoek nodig.

5.4 Corona ontlading

Zichtbaar in het paars links op figuur 12 is een zogenaamde corona, d.i een wolk plasma veroorzaakt door het ioniseren van de lucht. Deze bevindt zich voornamelijk aan scherpe punten en is ook hier te zien aan de hoeken van het aluminium en de draad omdat daar de veldsterkte het hoogst is, ook veroorzaakt ze een duidelijk hoorbaar sissend geluid. Dit fenomeen doet zich ook voor bij stormen en vulkaanuitbarstingen aangezien er dan sterke elektromagnetische velden ontstaan, ze wordt in dat geval ook wel 'Sint-Elmsvuur' genoemd (zie de afbeelding links op figuur 12). Deze vindt plaats op locaties met hoge spanningen waarvan het geproduceerd elektrisch veld hoger is dan de diëlectrische sterkte van het medium. Als de spanning (en dus het elektrisch veld) echter te hoog wordt krijg je dat het medium de stroom geleidt van 1 plaats naar een ander, in dat geval heb je te maken met doorslag (zie sectie 2.2). De paarse gloed doet zich voor doordat er fotonen worden geëmitteerd bij hercombinatie, hetzij, bij het botsen van de geproduceerde ionen met neutrale gasmoleculen nemen zij een elektron over en worden zo zelf terug neutraal waarbij ze elektromagnetische straling uitzenden. Bij lucht is de hoeveelheid uitgezonden ionen bij de gebruikte spanning zeer laag en er moet daarom met lange belichting in het donker gefotografeerd worden. Dit vrijkomend licht kan echter veel feller zijn voor andere gassen en spanningen en is het principe waar gasontladingslampen op zijn gebouwd.

5.5 Schlieren imaging

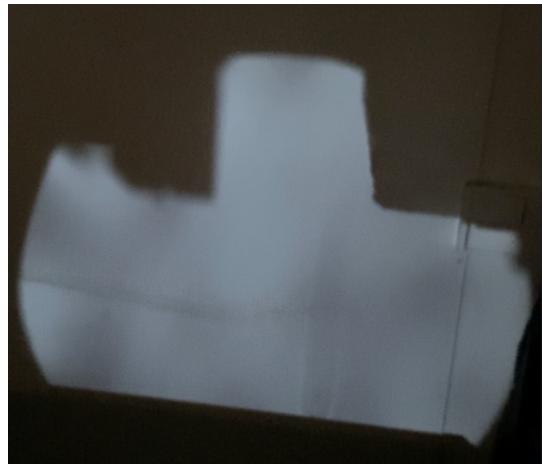
Het maken van de Schlieren setup had wat voeten in de aarde. Met de materialen die in ons bezit waren (hetzij een make-up spiegel als parabolische spiegel), was het enorm uitdagend om een beeld te krijgen van de ionenstroom. Het beeld is ondersteboven aangezien we ze voorbij het brandpunt laten gaan en projecteren op de muur. Figuur 13 is het duidelijkste beeld dat we verkregen hadden en diende als test van de setup, dit is een brandende kaars (zie het oranje rechtsboven) waarvan de warme luchtstroming duidelijk zichtbaar is als een traject van rechtsboven naar linksbeneden. Onze opstelling had echter niet de vereiste nauwkeurigheid om de kleine dichtheidsvariaties veroorzaakt door een ionenwind te visualiseren, om dit te omzeilen en toch een visualisatie te kunnen maken van het traject werd gebruik gemaakt van de rook van een uitgedooofde kaars. Deze produceert zo een sliert die op figuur 14 zichtbaar is en loopt van de draad (linksboven) naar het aluminiumfolie (rechtsboven). Meer dan een extra bewijs dat het gelukt is om een ionenstroom op te wekken heeft ons dit echter niet opgeleverd.



Figuur 12: links: Corona ontlading op het testvaartuig en rechts: Sint-Elmsvuur



Figuur 13: schlieren image van een kaars



Figuur 14: schlieren image van stroming mbv rook

6 Conclusie

Het eerste doel van de bachelorproef, een voertuig maken aan de hand van het opwekken van een ionenwind, is geslaagd. Er werd een vaartuig gemaakt dat zich voortbewoog met een snelheid afhankelijk van de aangelegde spanning. We vonden een lineair verband tussen deze spanning en de snelheid van het vaartuig, dit wil zeggen dat dus ook de opgewekte ionenstroom evenredig is met de aangelegde spanning. Wij bekwamen de volgende vergelijking:

$$I = 0.3 * 10^{-3} \pm 0.1 * 10^{-3} \frac{\mu}{d} (U - 18kV) \quad (32)$$

Deze ionenstroom kan ook anders berekend worden door het aantal geïoniseerde moleculen per oppervlakte-eenheid te beschouwen. Op deze wijze kwamen we aan een materiaalafhankelijke constante ζ die voor roestvrij staal gelijk is aan: $\zeta = 2.9 \frac{C}{kVm^2s} \pm 0.3 \frac{C}{kVm^2s}$.

Verder hebben we ook de windsnelheden zelf gemeten en gemodelleerd. Ons model vertelde ons dat de windsnelheid eerst zou toenemen omdat de ionen een versnelling ondervinden door het aangelegde elektrische veld en daarna weer zou afnemen door de luchtweerstand die de ionen ondervinden. Dit model werd ook bevestigd tijdens de experimenten, maar enkel kwalitatief. Om exacte cijfers hierop te plakken is er een nauwkeurigere anemometer vereist.

Ten slotte hebben we deze ionenstroom ook nog gevisualiseerd door middel van schlierenimaging. De gebruikte materialen waren hiervoor net goed genoeg om de richting en zin van de ionenstroom met de theorie te confirmeren.

Referenties

- [1] 1921-2005 (viaf)111051475 Alonso, Marcelo, Edward J. Finn, and J. Rekved. *Fundamentele natuurkunde ten dienste van het wetenschappelijk onderwijs: 2 Elektromagnetisme*. Amerongen : Delta press, 6e druk edition, 1994.
- [2] G. K. Batchelor. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge Mathematical Library. Cambridge University Press, 2000.
- [3] Dr. Ilse De Looze en Dries Van De Putte. *Statistiek en Gegevensverwerking*. Universiteit Gent, 2018.
- [4] E. Husain and R. S. Nema. Analysis of paschen curves for air, n₂ and sf₆ using the townsend breakdown equation. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-17(4):350–353, 1982.
- [5] S. RAY. *an introduction to high voltage engineering*. PHI Learning, 2004.
- [6] H. Tammet. Reduction of air ion mobility to standard conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D12):13933–13937, 1998.
- [7] Leon Tribe. The physics of electrokinetic devices applying and adapting the child-langmuir law derivation for vacuum diodes part 2: electrokinetic devices in air. 2017.
- [8] Haofeng Xu, Yiou He, Kieran L. Strobel, Christopher K. Gilmore, Sean P. Kelley, Cooper C. Hennick, Thomas Sebastian, Mark R. Woolston, David J. Perreault, and Steven R. H. Barrett. Flight of an aeroplane with solid-state propulsion. *Nature*, 563(7732):532–535, Nov 2018.

A CODE

A.1 Figuur 2

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# %% Plot the fields
X,Y = np.meshgrid( np.arange(-5,5,.25), np.arange(-5,5,.25) )
E_x = (X - 1)/((X-1)**2 + Y**2) - (X + 1)/((X+1)**2 + Y**2)
E_y = Y/((X-1)**2 + Y**2) - Y/((X+1)**2 + Y**2)

plt.figure()
plt.streamplot(X,Y,E_x,E_y,color='b')
plt.scatter(-1,0,label='negatief geladen draad',color='blue')
plt.scatter(1,0,label='positief geladen draad',color='red')
plt.annotate('negatief geladen',(-1,0),textcoords="offset points",
            xytext=(-10,10),ha='center')
plt.annotate('positief geladen',(1,0),textcoords="offset points",
            xytext=(10,10),ha='center')
plt.title('2D doorsnede van het gegenereerde elektrisch veld')

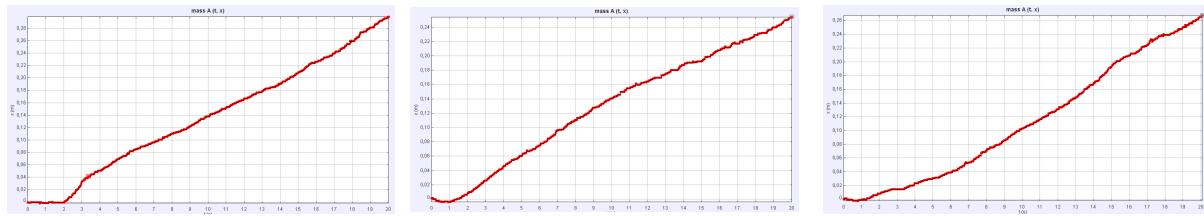
plt.figure()
plt.quiver(X,Y,E_x,E_y,scale=50)
plt.title('2D doorsnede van het gegenereerde elektrisch veld')
plt.show()
```

Hierbij werd als volgt tewerk gegaan:

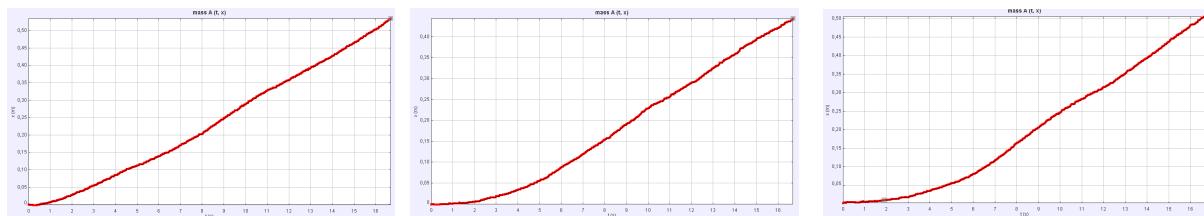
$$\frac{2d|\lambda|e}{4\pi\epsilon R\sqrt{R^2 + d^2}} \hat{\mathbf{n}} = C \frac{\mathbf{u}d}{R^2\sqrt{R^2 + d^2}} \xrightarrow{d \gg R} C \frac{\mathbf{u}}{R^2} \quad (33)$$

Waarbij de positieverctor $\mathbf{u} = R\hat{\mathbf{n}}$ is ingevoerd, dit laatste wordt dan in de code gebruikt met $C=1$.

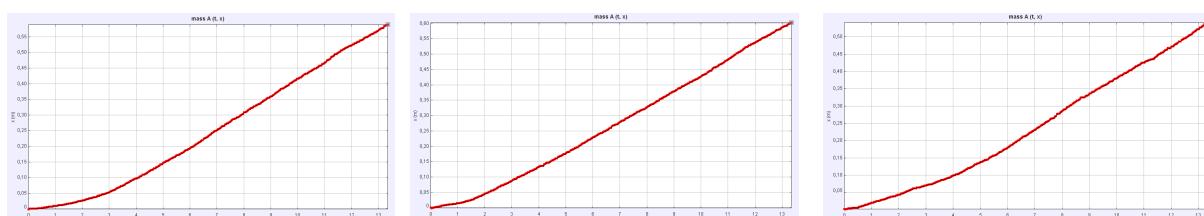
B Grafieken



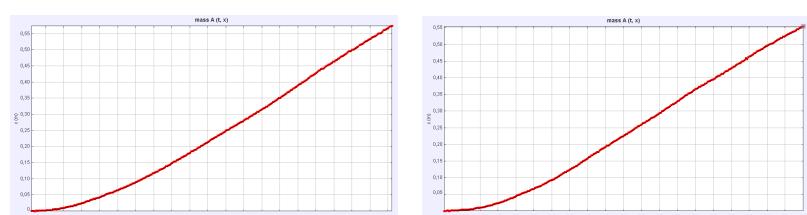
Figuur 15: Positie vaartuig in functie van de tijd (20kV)



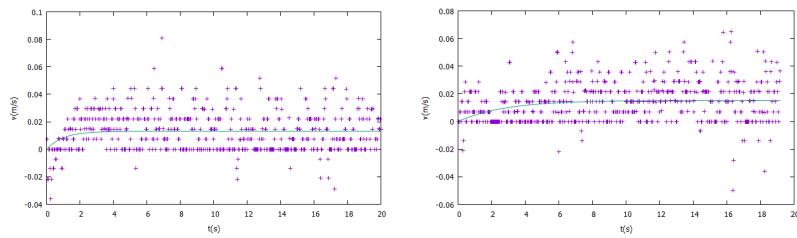
Figuur 16: Positie vaartuig in functie van de tijd (23kV)



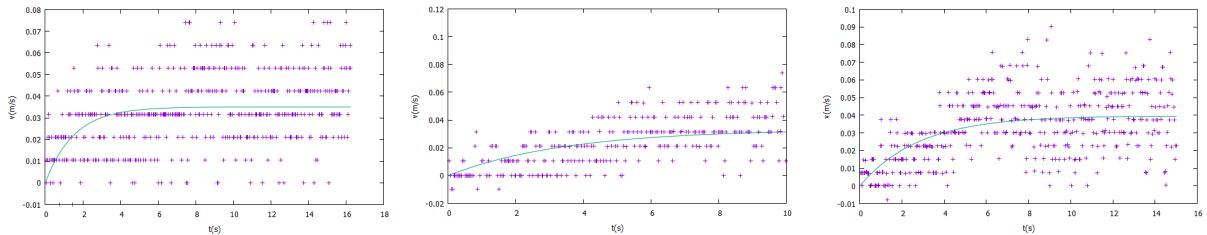
Figuur 17: Positie vaartuig in functie van de tijd (25kV)



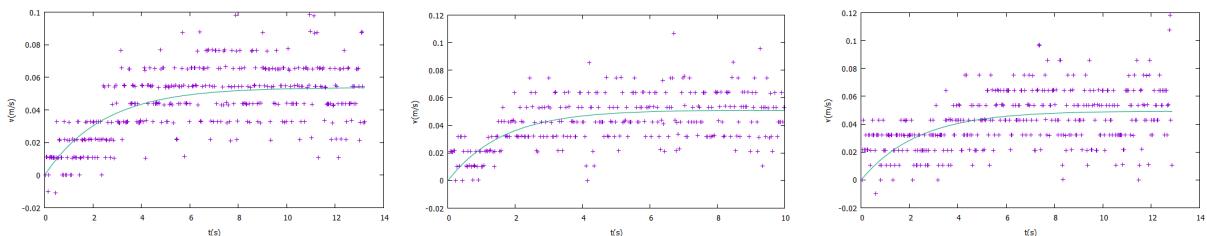
Figuur 18: Positie vaartuig in functie van de tijd (27kV)



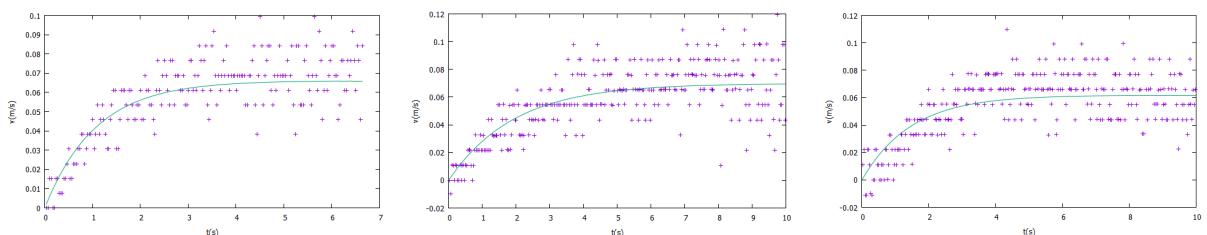
Figuur 19: Snelheid vaartuig in functie van de tijd (20kV)



Figuur 20: Snelheid vaartuig in functie van de tijd (23kV)



Figuur 21: Snelheid vaartuig in functie van de tijd (25kV)



Figuur 22: Snelheid vaartuig in functie van de tijd (27kV)

Opmerking: De waarden lijken hier niet zo mooi overeen te komen met de fit maar dit is enkel een gevolg van het 'overshooten' en 'undershooten' bij de positieaanduiding van het gebruikte programma, en in werkelijkheid ligt het gemiddelde van 2 opeenvolgende snelheidsbepalingen (automatisch gegenereerd door het programma) bijna exact op de fit.