

De zelfgemaakte Railgun

2020-2021

Man Van 't Hart en Fedde Beekman, 6VWO

Begeleidende docent Wilfred van Es

17 December 2020



Logboek Fedde

Datum	Aantal uur	Wat is er gedaan
Start van pws tot 16 september 2020	7	Onderwerp bepalen, opzet van PWS maken.
17 september 2020	1	Cursus PWS VU
24 september 2020	3	Loskoppelen van school/ ouders voor onderwerp overhalen
5 november 2020	2	PWS uur + zelfstudie
12 november 2020	1	
16 november 2020	3	Deelvragen uitwerken
17 november 2020	3	Deelvragen uitwerken
19 november 2020	2	
26 november 2020	2	Cursus PWS VU + bouwen voorbereiden
30 november 2020	1,5	
1 december 2020	7	Bouwdag + theorie verder uitwerken
2 december 2020	1	Voorbereiden bouwdag
3 december 2020	7	bouwdag
6 december 2020	4	Projectielen afmaken + experiment uitwerken
8 december 2020	1	
9 december 2020	1,5	
10 december 2020	4	Laatste bouwdag
11 december 2020	4,5	Testdag
12 december 2020	10,5	Testdag + videometen + verslag schrijven
13 december 2020	11,5	Testdag + videometen + verslag schrijven
14 december 2020	4,5	Verslag schrijven
15 december 2020	5	Verslag schrijven
16 december 2020	5	Verslag afmaken

Totaal aantal uren= 92 uur

Logboek Max

Datum	Aantal uur	Wat is er gedaan
Inschrijving – 27 november 2020	20	Onderzoek onderwerp + onderzoek benodigde materialen
17 september 2020 + 26 november 2020	2	Cursus PWS VU
1 oktober – 28 november 2020	3	Verzamelen materiaal
29 november 2020	3	Begin constructie stroombron
1 december 2020	6	Bouwdag + werken aan verslag + constructie stroombron
2 december 2020	3	Hout op maat laten zagen + accukabels met ogen verkregen
3 december 2020	8	Bouwdag + werken aan verslag
6 december 2020	4	Bouwen + extra materiaal verzamelen
10 december 2020	4	Laatste bouwdag
11 december 2020	5	Testdag + verslag
12 december 2020	6	Testdag + verslag
13 december 2020	7	Testdag + verslag
14 december 2020	5	Verwerken metingen + verslag
15 december 2020	6	Verslag
16 december 2020	6	Verslag afronden

Totaal aantal uren = 88 uur

Abstract

Because Fedde follows the IB course, Fedde is required to write an English abstract regarding the 'PWS' research project.

Introduction

A railgun is an electromagnetic cannon, which in the military is able to accelerate a projectile to a speed of Mach seven or approximately 2400 m/s. Yet there is not much known on the technology involving the railgun on a smaller scale, could it have undiscovered purposes? This research focusses on what a railgun is, how it works, and what is required to build a railgun on tabletop scale? Next to the overarching practical question, more specific aspects of the railgun, like the lengths of the rails and the way the capacitors are switched, series or parallel have been investigated. Also, within the project the efficiency of the homemade railgun, the Lorentz force and the relation between the Voltage and the velocity of the projectiles has been analyzed. The experiments were focused on firing the railgun with different components and at different voltages.

Results

The results of the experiment showed that the main question has been answered. The railgun was able to accelerated the projectile to reasonably high velocities. However, when the results of the experiment were examined, it was concluded that there was quite some variation in measurements. Acceleration could be quite different at given voltages for instance.

Conclusion

The results lead to the conclusion that although the project was successful, the variations in outcome of firing the railgun posed a problem in obtaining more precise answers and insight. However, even though there had been many inconsistencies in the results of the measurements, some conclusions could still be drawn. For instance, it is clear that the railgun accelerates the projectile to a higher velocity at a higher voltage. It became clear that parallel switched capacitors in the circuit accelerated the projectile to higher velocities than series switched capacitors in the circuit. Also, it could be concluded that in the railgun design the rail length could be significantly reduced without negatively affecting the acceleration capabilities of the railgun.

Voorwoord:

Fedde Beekman

Ik wilde graag mijn PWS houden voor een vak waar ik ook iets kon uitvoeren, dus niet puur theoretisch maar ook experimenten doen. Toen ik Max hoorde over het maken van een Railgun was ik meteen verkocht. Hiermee kon ik een van mijn favoriete vakken, natuurkunde, combineren met een praktisch onderzoek, waar ook een bouwproces aan verbonden zat. Het idee van de railgun vond ik vooral erg aantrekkelijk omdat maatschappelijk niet veel mensen weten wat het precies is en daarom heb je ook het gevoel dat je je verdiept in een nieuw onderwerp.

Max Van 't Hart:

Vanaf het moment dat ik natuurkunde kreeg op school wist ik dat dit mijn favoriete vak zou worden. Het onderwerp elektriciteit vind ik het meest interessant. Ook ben ik vrij goed met mijn handen en heb ik altijd al veel plezier gehad aan het zelf maken van kanonnen. Dus toen dacht ik bij mezelf: kan ik deze twee onderwerpen niet met elkaar combineren? Het antwoord op deze vraag: ja, een railgun combineert deze twee onderwerpen namelijk met elkaar. Een railgun maken vond ik dus aantrekkelijk omdat ik mij wat verder kon gaan verdiepen in elektriciteit en omdat ik met de handen kan werken.

Inhoudsopgave

Inleiding	7
Hoofdvraag	8
Theorie	9
Het ontwerp en opbouw van de railgun	14
Vuren van de railgun: stappenplan	31
Het filmpje analyseren	32
Resultaten	34
Deelvraag 1 Beantwoorden	36
Deelvraag 2 Beantwoorden	39
Deelvraag 3 beantwoorden	42
Deelvraag 4 beantwoorden	45
Deelvraag 5 Beantwoorden	47
Discussie	50
Conclusie	52
Persoonlijke reflectie	52
Geleerde lessen	53
Referenties	54

Inleiding

Toen in China 1000 jaar na Christus het buskruit werd uitgevonden was dat de grondlegging voor een van de meest destructieve wapens binnen de militaire technologie. Het kanon ontwikkelde zich verder in Azië en Perzië totdat het zijn weg vond naar Europa in de 14e eeuw. In de eeuwen daarna heeft het kanon altijd een grote functie gehad in alle grote oorlogen. Maar de wetenschap laat zien, dat het ouderwetse kanon, artillerie genoemd, bijna uit ontwikkeld lijkt te zijn. Toen de ontwikkeling van de artillerie technologie tegen zijn eind liep, begon men te zoeken naar eventuele alternatieve technieken die hetzelfde, zo niet meer zou kunnen.

Al sinds de jaren 80 test het Amerikaanse leger het gebruik van een elektromagnetisch kanon, ook wel een railgun genoemd. Het kanon is revolutionair, deels omdat het kanon projectielen met een zeer hoge snelheid tot wel mach 7 (2382 m/s) zou kunnen afvuren. En omdat het kanon geen springstof nodig heeft het ook milieuvoordelen.

Om meer inzicht in de technologie achter een railgun te krijgen en hoe het werkt wordt er daarom in dit onderzoek een railgun gemaakt op tafelformaat. Er gaat niet geprobeerd worden om ook maar een fractie van de snelheid te bereiken van wat een militaire railgun kan bereiken, maar er wordt op kleine schaal gekeken wat de bepalende factoren zijn bij het functioneren van een railgun, en bij de werking van een railgun. Hierbij worden er projectielen afgevuurd.

Over het algemeen is m.b.t. de techniek van de railgun bij het grote publiek niet bekend en weet men dus ook niet dat deze 'gun' werkt met behulp van een elektromagnetische versnelling. Wanneer er veel duidelijk is over werking van deze elektromagnetische versnelling kan er ook een maatschappelijk plaats aan verbonden worden.

Hoewel wapentechnologie over het algemeen in een negatief daglicht staat biedt de technologie achter de railgun in de toekomst ook de mogelijkheid om bijvoorbeeld raketten m.b.v. elektromagnetische versnelling te lanceren. Zo kan men op een veel milieuvriendelijke manier ruimtevaart mogelijk maken, zonder de negatieve milieueffecten.

In dit werkstuk wordt er dus gekeken naar de werking van een railgun. Er wordt gekeken naar efficiëntie van de energie omzetting en er wordt gekeken naar wat de meespelende factoren zijn om de railgun heen zoals materialen, soorten schakeling en oppervlakte van het projectiel.

Uiteraard kent dit onderzoek de nodige beperkingen, zo was het bijvoorbeeld niet toegestaan om de experimenten op school uit te voeren, waar over het algemeen betere experimentele faciliteiten zijn. Maar is het van belang te realiseren dat ook het maken van de projectielen, ontwerpen van de rail gun en de elektronica allemaal door onszelf is gedaan met relatief beperkte middelen.

Hoofdvraag

In hoeverre is het mogelijk om een railgun te maken, binnen de mogelijkheden waarover wij bezitten?

Deelvragen

1. **Wat is de (Lorentz)kracht die op het projectiel werkt bij een spanning van 300 V?**
2. **Wat is het verband tussen het de spanning en de snelheid van het projectiel?**
3. **Wat is het rendement van de energie omzetting in een railgun op verschillende spanningen?**
4. **In hoeverre speelt de lengte van de rails een rol, kijkend naar een korte en een langere rails?**
5. **In hoeverre is er een verschil wanneer de condensatoren in serie of parallel is geschakeld, kijkend naar de snelheid?**
- 6.

Theorie

Een railgun is een elektromagnetisch geweer dat een elektrisch geleidend projectiel afvuurt gebruikmakend van de lorentzkracht.

De Lorentzkracht

De lorentzkracht is de kracht op een bewegende lading of stroomdraad in een magnetisch veld. De richting van de kracht hangt af van de richting van de stroom en de richting van het magnetische veld. De grootte van de lorentzkracht hangt af van de stroomsterkte, de magneetveldsterkte en de lengte van de draad waarop het magneetveld werkt.

$$F_l = B \cdot I \cdot L$$

F_l = Lorentzkracht in Newton

B = Magneetveldsterkte in Tesla

I = Stroomsterkte in Ampère

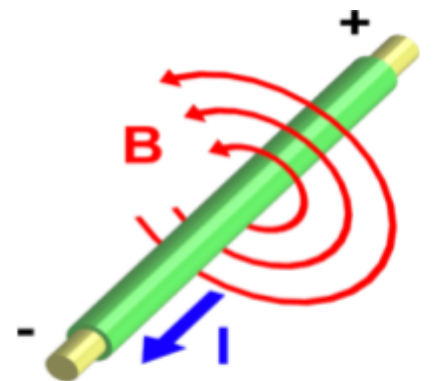
L = lengte van de draad in meters

De toepassing van de Lorentzkracht in een railgun

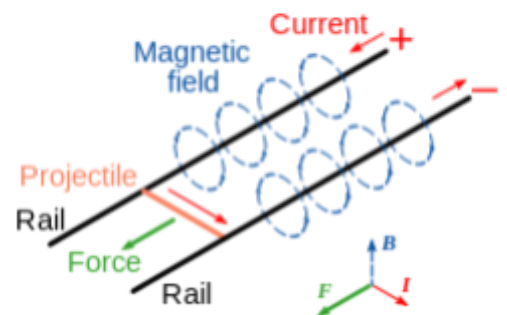
In de meeste apparaten waarin elektriciteit wordt omgezet in beweging wordt de lorentzkracht, het meest bekende apparaat is de elektromotor. In de railgun wordt de lorentzkracht ook gebruikt om beweging te creëren, dit gebeurt al volgt:

In een railgun worden twee sleepcontacten gebruikt waarop een zeer hoge spanning op staat, dit zijn de rails van de railgun. Als er een projectiel tussen de twee rails wordt geplaatst, gaat er een stroom lopen door het projectiel en door de rails. Om de rails ontstaan cilindervormige magneetvelden die loodrecht op het projectiel gaan staan. De combinatie van een hoge stroomsterkte en een sterk magneetveld zorgt ervoor dat er een sterke lorentzkracht wordt uitgevoerd op het projectiel dat zich tussen de rails bevindt. Door deze sterke lorentzkracht wordt het projectiel in een korte tijd zeer hard versnelt waardoor het projectiel dus weggeschoten wordt.

De Lorentzkracht is de 'driving force' van de railgun, deze versnelt het projectiel. Zoals hierboven beschreven wordt door de rails een sterk magneetveld (B) opgewekt en interacteert deze met de stroom die door het projectiel loopt. De richting van de Lorentzkracht is langs de rails, zoals weergegeven in Afbeelding 2.



Afbeelding 1: het magneetveld rond een draad.



Afbeelding 2: De toepassing van de magneetvelden en Lorentzkracht in een railgun.

De formule voor de Lorentzkracht op het projectiel is hieronder weergegeven¹.

$$F_l = B \cdot I \cdot l$$

F_l = Lorentzkracht in Newton

B = Magneetveldsterkte in Tesla

I = Stroomsterkte in Ampère

l = breedte van het projectiel in meters

De l is bekend en constant en gelijk aan de breedte van de loop van de railgun.

Voor het magneetveld rond een draad² geldt:

$$B = \frac{\mu}{2\pi r} I$$

μ = magnetische permeabiliteit van lucht

r = de afstand tot de draad

I = Stroomsterkte in Ampère

Het combineren van bovenstaande formules levert:

$$F_l = \frac{\mu l}{2\pi r} I^2$$

Daarnaast is de Lorentzkracht in de railgun opgebouwd uit een component die afkomstig is van de linker als ook de rechter rails.

Op basis hiervan mag worden geconcludeerd dat de Lorentzkracht (F_l) evenredig is met het kwadraat van de stroomsterkte (I).

Efficiëntie van de railgun

Het doel is een zo efficiënt mogelijke railgun te maken. Daarbij is het van belang om de elektrische energie zo efficiënt mogelijk om te zetten in kinetische energie van het projectiel. Er gelden de volgende energieformules.

Voor de opgeslagen energie in een condensator geldt³:

$$E_{cond} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

E = opgeslagen energie (in J)

C = capaciteit van condensator (in Farad)

U = spanning (in V)

Voor het projectiel geldt voor de kinetische energie⁴ de volgende vergelijking:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$$

¹ Binas 35

² Allain, R. (2017, 3 juni). <https://www.wired.com/2014/08/the-physics-of-the-railgun>

³ BINAS 35, D2

⁴ BINAS 35, A4

Voor de efficiëntie (η) van de railgun wordt gekeken naar de mate waarin de elektrische energie (E_{cond}) wordt omgezet in kinetische energie (E_{kin}). Hiervoor geldt de formule:

$$\eta = \frac{E_{kin}}{E_{Cond}} \cdot 100\%$$

Deze vergelijkingen combineren leidt tot onderstaande vergelijking:

$$\eta = \frac{mv^2}{C \cdot U^2} \cdot 100\%$$

Condensatoren

Belangrijk voor een goed functionerende railgun is een zo hoog mogelijke stroomsterkte bij het afvuren van de railgun. De stroomsterktes in railguns zijn vaak zo groot dat plasma ontstaat waarbij zelfs het metaal van de rails en het metaal van het projectiel kunnen opbranden. Deze hoge stroomsterktes worden opgewekt door behulp van een speciale stroombron, een stroombron die heel veel stroom opwekt in een hele korte tijd, een impuls stroombron. Deze impuls stroombron kan worden opgebouwd uit condensatoren. Een condensator is een elektrische component waarin elektrische lading opgeslagen kan worden. Die lading kan heel snel uit de condensator stromen, afhankelijk van de weerstand van het elektrische circuit. Dus als de weerstand laag genoeg is, kan de ontlading snel zijn en kan een condensator kan dus functioneren als een impuls stroombron.

Condensatoren komen voor in vrijwel elk elektrisch apparaat, waarvan een computer een goed voorbeeld is. In de meeste gevallen worden condensatoren gebruikt om spanningsvariaties af te vlakken. Condensatoren komen in allerlei verschillende kleuren, soorten en maten (zie afbeelding 3).

‘Opladen’ van de condensator

Om een condensator op te laden tot de optimale operatie spanning van de condensator, moet de condensator onder spanning worden gezet met een spanning die even groot of groter is dan de optimale operatie spanning. De hoge spanning die voor de railgun nodig is wordt opgewekt met een zogenaamde “boost converter”, waarover later meer.

Eigenschappen van een condensator

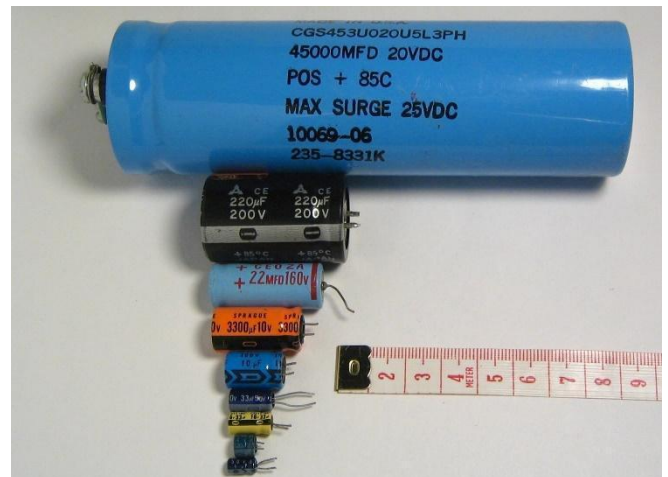
De twee factoren die bepalen hoeveel energie een condensator bevat zijn de capaciteit van de condensator en de spanning die in de condensator is opgeslagen.

$$E_{Condensator} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

$E_{condensator}$ = Energie opgeslagen in Joule

C = Capaciteit van condensator in Farad

U = Spanning van de condensator in Volt



Afbeelding 3: condensatoren in verschillende soorten en maten.

De twee factoren die bepalen hoe snel een condensator zijn lading kwijtraakt zijn de weerstand van het elektrische circuit en de capaciteit van een condensator.

$$\tau = R \cdot C$$

$$U(t) = U_{\text{Origineel}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

τ = tijdsconstante in seconden

R = Weerstand van het circuit in Ohm

C = Capaciteit van condensator in Farad

$U(t)$ = Spanning op moment "t" in Volt

$U_{\text{origineel}}$ = Originele spanning over de condensator voor het moment van ontlading in Volt

t = Verlopen tijd in seconden

Als condensatoren in een parallelschakeling worden gezet⁵ geldt:

$$E_{\text{totaal}} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{totaal}} \cdot U^2$$

$$C_{\text{Totaal}} = C_{\text{condensator 1}} + C_{\text{condensator 2}}$$

Of:

$$E_{\text{Totaal}} = E_{\text{condensator 1}} + E_{\text{condensator 2}}$$

E = Energie opgeslagen in Joule

C = Capaciteit van condensator in Farad

U = Spanning van de condensator in Volt

Voor condensatoren in serie⁶ geldt

$$E_{\text{totaal}} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{totaal}} \cdot U_{\text{totaal}}^2$$

$$\frac{1}{C_{\text{totaal}}} = \frac{1}{C_{\text{condensator 1}}} + \frac{1}{C_{\text{condensator 2}}}$$

$$U_{\text{totaal}} = U_{\text{condensator 1}} + U_{\text{condensator 2}}$$

E condensator = Energie opgeslagen in Joule

C = Capaciteit van condensator in Farad

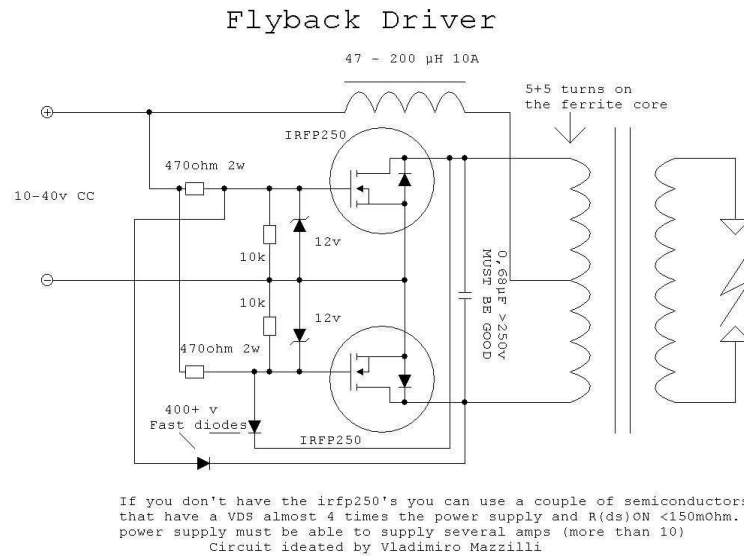
U = Spanning van de condensator in Volt

ZVS Boost Converter DC-DC

⁵ Binas 35D

⁶ Binas 35D

Een Zero Switching boost maakt gebruik transformator. elektrisch wordt toegepast verhogen of een wisselspanning. transformator is een apparaat bewegende dat bestaat uit magnetisch spoelen. De meestal



Voltage converter van een Dit is een apparaat dat voor het verlagen van Een in principe zonder onderdelen, twee gekoppelde spoelen zijn

gewonden rondom een gesloten ijzerkern gewonden. Loopt er een wisselstroom door de primaire spoel, dan ontstaat er een inductiespanning in de secundaire spoel, waarbij het aantal windingen belangrijk is. Als de secundaire spoel drie keer zoveel windingen heeft als de primaire, dan is de uitgangsspanning drie keer zo hoog als de ingangsspanning en dan is de uitgangsspanning drie keer zo klein. In een gelijkspanning ZVS Boost Converter wordt de gelijkspanning eerst omgezet in wisselspanning dit gebeurt met behulp van een elektronische timer, meestal een 5-5-5 timer, in combinatie met een MOSFET, een elektrische schakelaar. Hierna wordt deze wisselspanning verhoogt door middel van een transformator en deze verhoogde wisselspanning wordt dan weer omgezet in gelijkspanning.

Afbeelding 4: een schematische tekening van een ZVS boost converter.

Het ontwerp en opbouw van de railgun

Bij het bouwen van een railgun moet er met een groot aantal aspecten rekening gehouden worden. Ten eerste moet een zeer hoge stroomsterkte geleverd worden aan de railgun, daarnaast moeten de sleep contacten zo efficiënt mogelijk contact maken met het af te vuren projectiel en ten slotte moet er natuurlijk rekening gehouden worden met de veiligheid van de railgun, voor, tijdens en na het vuren van de railgun.

Het ontwerp van een railgun kan in vier onderdelen worden opgedeeld: de stroombron, het voorversnellingselement, de rails en het projectiel. Deze vier onderdelen vormen samen een railgun.

De stroombron

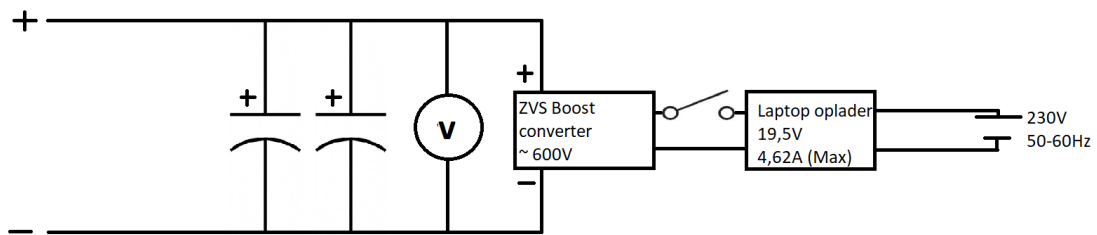
Voor het vuren van een railgun is er een grote stroomsterkte nodig. Deze grote stroomsterkte door de rails en het projectiel, zorgt ervoor dat de magneetvelden rond de rails heel sterk worden. Samen met de stroomsterkte door het projectiel veroorzaken deze magneetvelden een lorentzkracht op het projectiel. De vraag is alleen: hoe kan een zeer grote stroomsterkte worden opgewekt? Uit een stopcontact kun je de benodigde stroomsterkte voor het vuren van een railgun niet halen, zelfs niet op locaties met industriële stoppen in de meterkast, deze kunnen maar maximaal 125 Ampère leveren, terwijl je in een normaal huis maar 16 Ampère kunt krijgen.

Daarom is er voor een andere oplossing gekozen. Door middel van condensatoren is het mogelijk om een impulsstroom te creëren. Een condensator is een elektrische component waarin elektrische lading opgeslagen kan worden. Een condensator kan heel snel ontladen waardoor een condensator dus kan functioneren als een impuls stroombron.

Blijft de vraag: hoe worden de condensatoren opgeladen. De meest geschikte condensatoren zijn elektrolytische condensatoren met een operatie voltage van tussen de 350 volt en 500 volt. Om een condensator op te laden tot de optimale operatiespanning van de condensator, moet de condensator onder spanning worden gezet die even groot of groter is dan de optimale operatiespanning van deze condensator. Dit soort voltages kunnen niet zomaar uit een stopcontact gehaald worden, hiervoor is een boost converter nodig. Een boost converter is een elektrisch apparaat dat in staat is om lage voltages met een hoge stroomsterkte om te zetten in een hoger voltage met een lagere stroomsterkte.

Hierdoor is het mogelijk om met een omgebouwde laptopoplader die 19,5 volt en 4,6 A een spanning op te wekken van bijvoorbeeld 500 volt met een veel lagere stroomsterkte dan de ingangsstroom.

Wij hebben ervoor gekozen om twee condensatoren met een capaciteit van 16000 micro farad en een operatie voltage van 450 volt per stuk te gebruiken. Deze condensatoren worden opgeladen door middel van een boost converter en een omgebouwde laptop oplader. Dit ziet er schematisch als volgt uit:



Afbeelding 5: een schematische tekening van de stroombron van de railgun.

1x oude laptop oplader (19,5V – 4,62A (Max))

1x ZVS Boostmodule (~600V)

2x Condensator: KEMET 450V 16000uF 0,016 Ohm ESR

Diameter: 90mm

Lengte: 194mm

Kabel van condensator naar rails: 2x Laskabel 70mm² met zwarte neopreen mantel. Lengte: 2,55 meter.

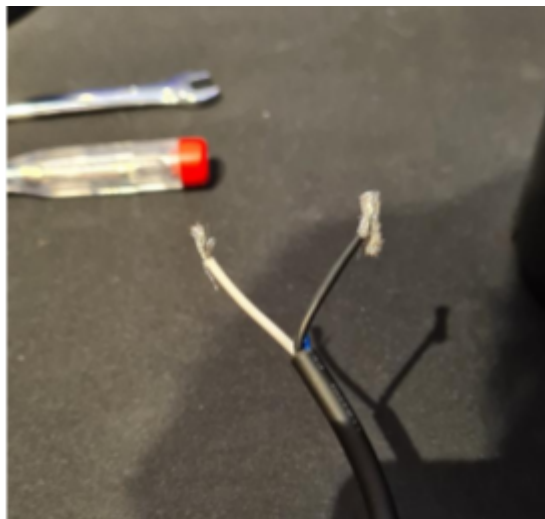
Constructie van de impulsstroombron



Afbeelding 6: de materialen die gebruikt zijn voor de stroombron.

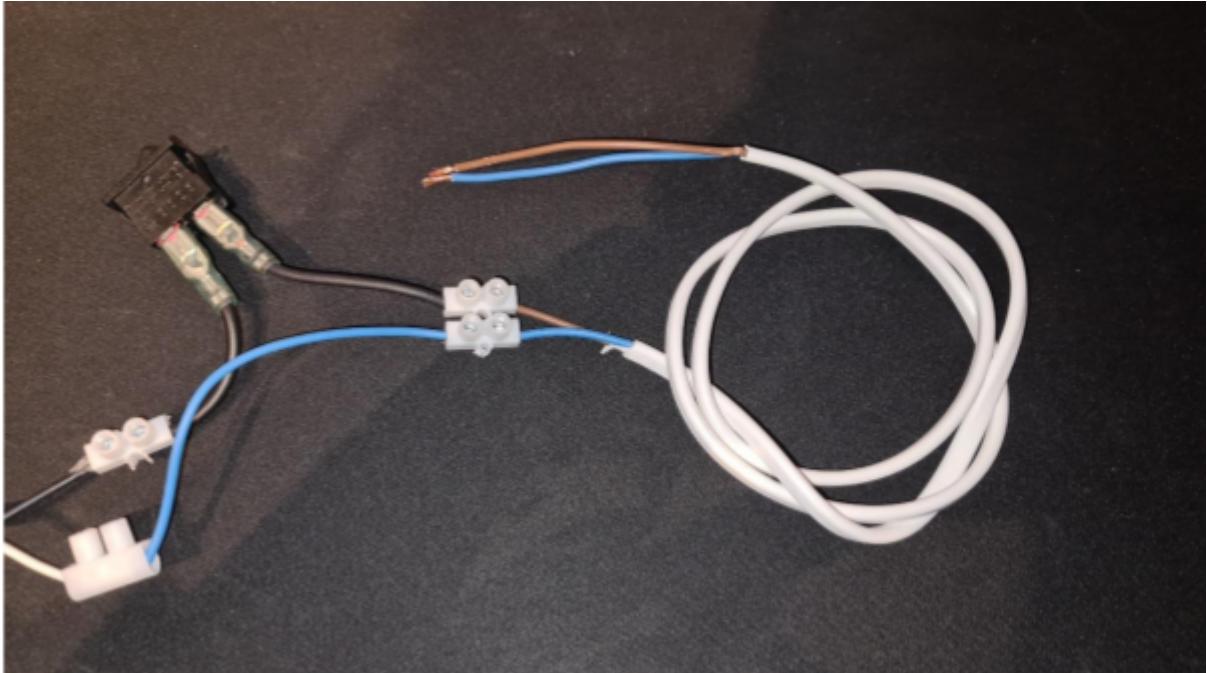
Voor het maken van de impulsstroombron hebben wij het volgende gebruikt:

- Een oude laptop oplader (19,5V – 4,62A (Max))
- Een ZVS Boostmodule (~600V)
- Twee Condensatoren: KEMET 450V 16000uF 0,016 Ohm ESR
- Een voltmeter met toebehorende draden
- Vier roestvrij stalen profielen met voorgeboorde gaten
- Koperen stroomdraad
- Een schakelaar (250V - 10A)
- Bouten en moeren
- Ringen
- Vier kroonsteentjes



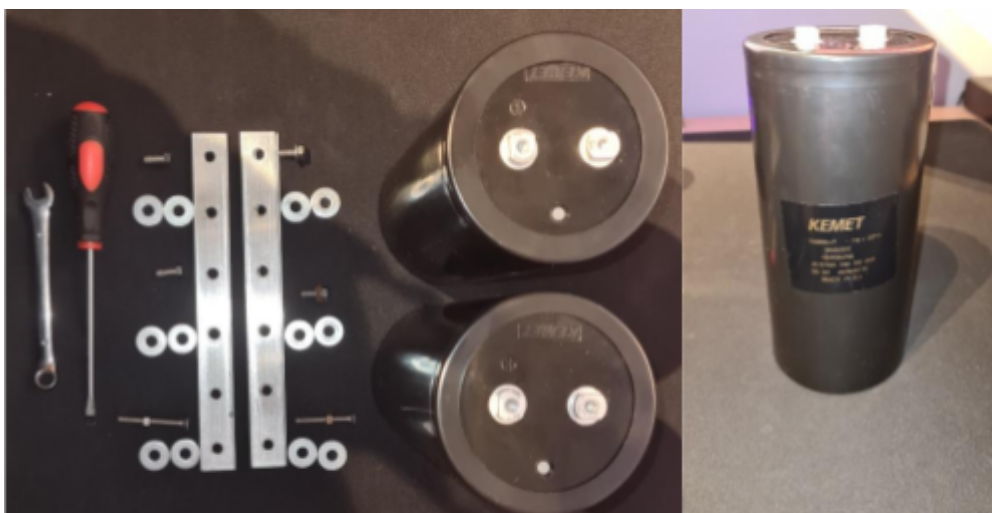
Afbeelding 7: de stroomdraden uit de laptop oplader.

Op de afbeelding hiernaast zijn de stroomdraden uit de laptop oplader te zien. Om deze bloot te kunnen leggen is eerst de connector van de draad afgeknipt en zijn de losse draden gestript. Hierna zijn de plus en de min draad geïdentificeerd door middel van een voltmeter. De zwarte draad is de negatieve draad, de witte draad is de positieve draad.



Afbeelding 8: Stroomdraden met schakelaar ertussen.

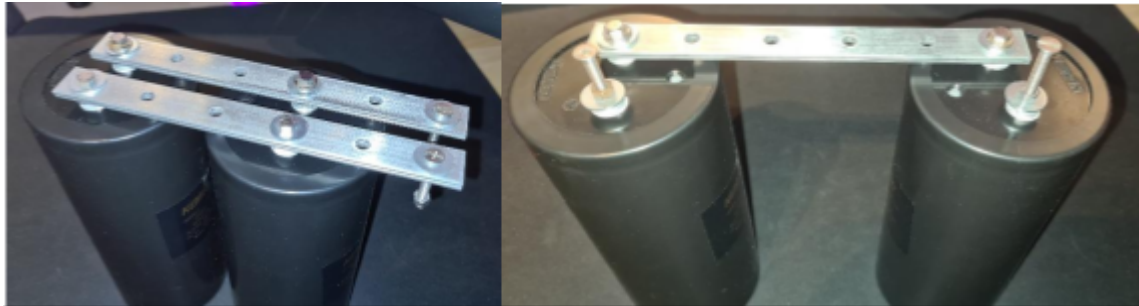
Op de afbeelding hierboven is te zien hoe de stroomdraad uit de laptop oplader verbonden zijn met een ander stuk draad. Tussen de twee stukken draad zit een schakelaar, deze verbind de draden uit de laptop oplader met de andere stroomdraden, dit is gedaan door middel van vier kroonsteentjes. De bruine draad is de negatieve draad, de blauwe draad is de positieve draad.



Afbeelding 9 en 10: Links zijn de benodigde spullen zichtbaar, rechts is een condensator in detail zichtbaar.

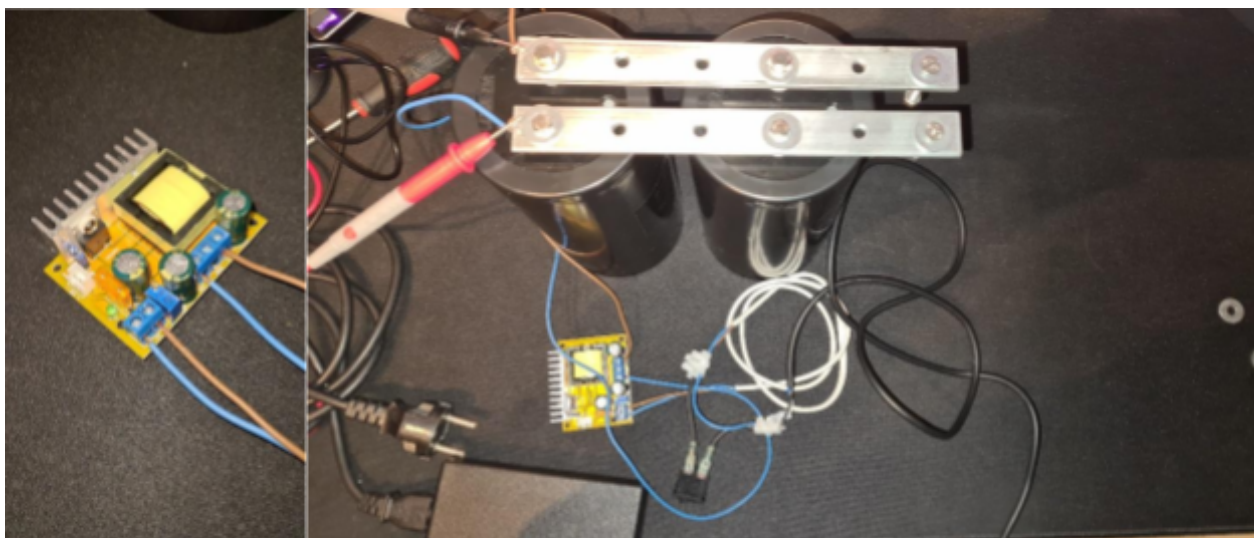
Op de afbeeldingen hierboven zijn de spullen die nodig zijn om een condensatorbank te maken zichtbaar. Deze bestaan uit de vier roestvrijstalen platen met gaten, 12 ringen, 4 korte moeren en 2 langere moeren met bouten. Twee roestvrijstalen platen worden op elkaar gelegd,

met aan de onderkant en aan de bovenkant 1 ring per moer. De kleine moeren worden gebruikt om de platen te bevestigen aan de condensatoren, de grote moeren worden gebruikt om de ogen van de accukabels te monteren aan de condensatorbank. De condensatoren zijn van de fabrikant KEMET. Ze hebben een maximale operatievoltage van 450 volt en een capaciteit van 16000 microfarad. Een condensator heeft een diameter van 90mm en een hoogte van 194mm. Onze condensatoren worden gemonteerd doormiddel van de aanwezige schroefklemmen op de condensatoren.



Afbeelding 11 en 12: links is de condensatorbank in parallelschakeling zichtbaar, rechts is de condensatorbank in serieschakeling zichtbaar.

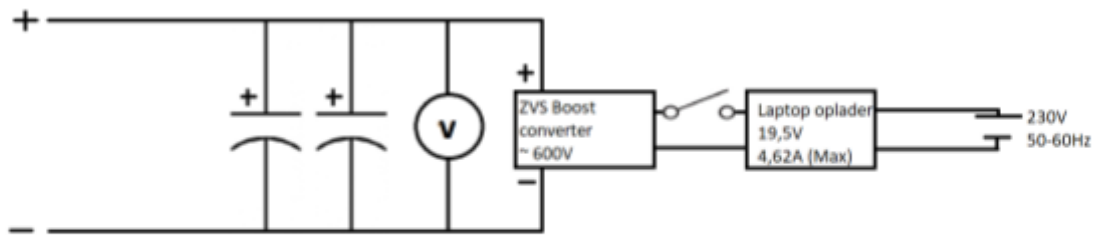
Op de linker bovenstaande afbeelding is de parallelschakeling zichtbaar. Hierbij worden alle vier de roestvrij stalen plaatjes gebruikt en worden de ogen van de accukabels aan de uiteinden van de plaatjes gemonteerd. De plaatjes verbinden twee soortgelijke polen van de condensatoren met elkaar in de parallelschakeling. Op de rechter bovenstaande afbeelding is de serieschakeling zichtbaar. Hierbij worden er twee van de vier roestvrij stalen plaatjes gebruikt en worden de ogen van de accukabels rechtstreeks aan de condensatoren gemonteerd. De twee plaatjes verbinden in de serieschakeling een pluspool en een minpool van verschillende condensatoren met elkaar.



Afbeelding 13 en 14: links is er een close-up foto te zien van de ZVS boost converter en rechts is de totale opstelling van de impulsstroombron te zien.

Op de afbeeldingen hierboven is te zien hoe de bedrading uiteindelijk gemonteerd is. De bedradingen zijn allemaal gemonteerd met plus op plus en min op min. Eerst gaan de draden van de laptop oplader in de boost converter. Deze boost converter wordt aangesloten op de

condensatorbank. Aan de uiteinden van de draden die uit de boost converter lopen worden de draden van de voltmeter aangesloten in een parallelschakeling.



Afbeelding 15: een schematische tekening van de impulsstroombron.



Afbeelding 16 en 17: op de linker afbeelding is de houten constructie te zien en op de rechter afbeelding is de opstelling in de plastic bak te zien.

Op de bovenstaande afbeeldingen is te zien hoe de opstelling wordt geplaatst in een isolerende plastic bak. In deze bak licht een houten constructie die ervoor zorgt dat de condensatoren niet ongewenst kunnen bewegen. Ook zijn er gaten geboord in de wand van de plastic bak om de accukabels op een veilige wijze aan te kunnen sluiten op de condensatorbank. Als alle apparatuur zich in de plastic bak bevindt, word er een plastic deksel op de bak gedaan, hier lopen de twee draden van de voltmeter en de stroomdraad van de accu onder uit, de voltmeter word op de deksel van de bak geplaatst en de schakelaar bevindt zich buiten de bak. De accukabels waarvan de koperen kern een doorsnede oppervlak van 70 vierkante millimeter heeft, worden gebruikt om de condensatorbank te verbinden met de rails van de railgun.

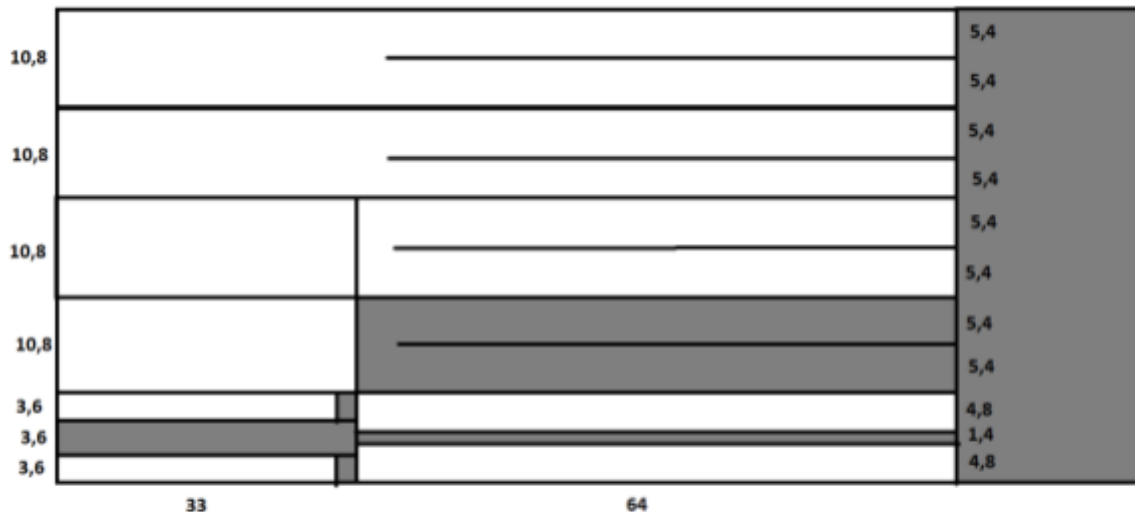
Constructie Railgun



Afbeelding 18: de materialen die zijn gebruikt voor het maken van de railgun.

Voor de constructie van de railgun zijn de volgende materialen gebruikt:

- Een grote plaat hardhouten multiplex (7-laags, hoogte van 12mm)
- Tien bouten
- Zes vleugelmoeren
- Zes ringen
- Twee roestvrij stalen balken (12mm x 12mm x 330mm)
- Een pvc-buis
- Een zadelklem
- Touw
- Schroeven



Afbeelding 19: De zaagsneden die gemaakt zijn in de hardhouten multiplex plaat. De maten zijn gegeven in centimeters en de donkergrijze gedeeltes zijn niet gebruikt voor de constructie van de railgun.

Hierboven is te zien hoe de hardhouten multiplex plaat is opgedeeld in verschillende planken. In het midden van de lange planken zijn zaagsneden gemaakt om ervoor te zorgen dat het touw van de boog de kogel kan voor versnellen. De railgun is opgebouwd uit vijf lagen multiplex die bij elkaar gehouden worden door middel van schroeven, bouten en moeren. De bovenste twee planken zijn gebruikt voor de onderkant van de railgun. De vier planken daaronder zijn gebruikt voor de bovenste twee lagen van de railgun. De onderste vier planken zijn gebruikt in het midden van de railgun. De linkerkant van de multiplex plaat kan beschouwd worden als de voorkant van de railgun. Van de onderste drie lagen is er eerst een geheel gemaakt door middel van schroeven, de bovenste twee lagen worden vastgezet door middel van de bouten en moeren.



Afbeelding 20 en 21: Op de rechter afbeelding zijn de twee verschillende ogen van de accukabels zichtbaar en op de linker afbeelding is zichtbaar hoe deze ogen met de rails worden vastgezet.

Op de bovenstaande afbeeldingen is te zien hoe de ogen en de rails worden gemonteerd aan het houten gedeelte van de railgun. In de tweede houten laag van onder is er een laag van de 7 lagen multiplex weggehaald door middel van een Dremel. In deze rechthoekige inkepingen worden de twee ogen gelegd. De ogen worden vastgehouden door middel van een schroef per inkeping, deze zorgen ervoor dat de ogen niet horizontaal van plaats kunnen veranderen. Over deze ogen komen de rails te liggen, de ogen steken net een beetje boven het hout uit waardoor er goed contact tussen de rails en ogen ontstaat wanneer de rails worden vastgeklemd. De rails zelf steken ook uit boven de middelste laag hout van de railgun, hierdoor zitten de rails met de ogen daaronder zeer stevig vast wanneer de twee bovenste platen worden vastgezet door middel van bouten en vleugelmoeren.



Afbeelding 22 en 23: Op de linker afbeelding is te zien hoe de pin wordt geplaatst bij het opspannen van de boog en op de rechter afbeelding is de pin zelf te zien.



Afbeelding 24: de railgun met de accukabels en zonder de boog.

Als trekker hebben wij een soort granaatpinprincipe gemaakt. Hierbij is een spijker, waarvan de scherpe punt er afgeslepen is, aan een stuk touw vastgemaakt. Deze spijker wordt dan aan de zijkant van de derde laag van de railgun in een gat gestopt, achter deze spijker wordt het touw opgespannen.

Uiteindelijk zijn alle lagen op elkaar gemonteerd en is er aan de linker kant van de railgun een boog vastgemaakt. Deze boog bestaat uit een stuk pvc-buis van 75 centimeter lang. Aan het uiteinde van deze pvc-buis zijn er gaten geboord waardoor het touw is vastgemaakt aan de pvc-buis. Deze boog is vastgemaakt aan de railgun door middel van een zadelklem en twee schroefjes.

Het voorversnellingselement

Als er een projectiel wordt afgevuurd door middel van een railgun, moet het projectiel met een snelheid tussen de rails geschoten worden. Als het projectiel tussen de rails stilligt en de spanningsbron staat op scherp, dan kan het voorkomen dat het projectiel zichzelf tussen de rails 'vast last' door de hoge stroomsterkte. Door al een snelheid aan het begin te hebben heeft de versnelling door de Lorentzkracht de overhand en last het projectiel zichzelf niet vast. Om het projectiel met snelheid tussen de rails te brengen is een kruisboog systeem gemaakt. Bij dit systeem wordt er een pvc-buis, met daaraan een touw(visdraad) gemonteerd aan de zijkant van een lange loop, deze pvc-buis functioneert als boog. In de loop zit een pin, vergelijkbaar met de pin van een granaat. Achter deze pin wordt het touw van de boog gespannen en voor deze pin bevindt zich dan het af te vuren projectiel. Als deze pin wordt weggetrokken, versnelt het touw van de boog het projectiel en zo kan het projectiel met snelheid tussen de rails gebracht worden. Wij hebben gekozen voor een boog omdat deze manier van versnellen, makkelijk uitvoerbaar is. Daarnaast valt ons systeem hiermee niet onder de vuurwapenwet van Nederland⁷. Ook beperkt dit kruisboog systeem mogelijke geluidsoverlast en explosiegevaaren die er wel zijn bij het gebruik van een systeem wat luchtdruk of chemische energie gebruikt om het projectiel te versnellen.

De rails

Het meest kenmerkende onderdeel van een railgun zijn de rails. Tussen deze rails wordt het projectiel versnelt door middel van elektrische energie. Bij het ontwerpen van dit element moet rekening worden gehouden met twee dingen. Ten eerste is van belang dat de rail goed contact maakt met het projectiel, zodat er zonder al te veel weerstand een stroom kan gaan lopen. Er is gekozen voor twee massieve vierkante staven van aluminium met een doorsnede van 12mm x 12mm. Deze hebben een vlakke zijkant, waardoor de kogel optimaal contact kan maken met de rails. Ook zijn deze balken makkelijk verkrijgbaar en daarmee vervangbaar indien nodig. Ten tweede moet het materiaal om de rails heen, de loop, aan een aantal eisen voldoen. Ten eerste moet de loop glad zijn aan de binnenkant. Ten tweede moet de loop sterk zijn, door de magnetische velden die ontstaan tijdens het vuren van de railgun duwen de twee rails elkaar weg met een grote kracht. De loop en de rest van het omhulsel moet dus voorkomen dat de railgun zichzelf sloopt. Als laatste moet het materiaal ook heel goed isoleren, zodat de stroom alleen door het projectiel loopt en niet via de loop weglekt. Er is gekozen om een gestapelde houten constructie te maken voor de loop. In deze houten constructie wordt de rails van boven en onder vastgeklemd met behulp van zes bouten en vleugelmoeren. Hierdoor kan de loop makkelijk uitelkaar worden gehaald en weer in elkaar worden gezet. Dit is nodig om tijdens het experiment aanpassingen te kunnen maken indien nodig.

De lengte van de rails

De lengte van de rails heeft veel invloed op de snelheid waarmee het projectiel uiteindelijk wegvliegt. De condensator ontladst zich exponentieel en dus niet geleidelijk zoals bijvoorbeeld een normale batterij. Hierdoor zal in het begin de stroom hoog zijn, maar naarmate het projectiel langer in de rails is, zal de stroom sterk afnemen. Er zal een moment zijn dat de condensatoren volledig ontladen zijn en de de stroom op de rails wegvalt. Op dat moment is het ongunstig als het projectiel nog langs de rails beweegt, omdat het projectiel niet meer wordt door versnelt en de rails door wrijvingsweerstand het projectiel zal afremmen. Het is daarom van belang dat de lengte van de rails optimaal is, niet te lang omdat het projectiel dan een deel van zijn opgebouwde snelheid zou verliezen, ook moet de lengte

⁷ Een voorversnellingselement gebaseerd op luchtdruk zou ervoor hebben gezorgd dat het systeem wel onder de vuurwapenwet zou vallen.

van de rails niet te kort zijn, aangezien de condensatoren zich wel volledig moeten kunnen ontladen. Een goede middenweg lijkt een lengte van 33 cm voor de rails en de loop te zijn.

Accukabels

Om de rails te verbinden met de condensatoren maken we gebruik van twee dikke accukabels. Deze accukabels zorgen voor een goede geleiding en dat er zo min mogelijk energie verloren gaat bij het ontladen van de condensatoren. Dit komt doordat de accukabels een lage weerstand hebben.

Voor energieverlies in een draad geldt de formule:

$$P \sim I^2 * R$$

Voor de stroomsterkte binnen een circuit geldt

$$I = \frac{U}{R}$$

In de railgun is het hoge stroom essentieel, dus hoe lager de weerstand, hoe hoger de stroom uiteindelijk zal worden. En des te minder energie verloren zal raken door de accukabels per seconde.

Voor de weerstand over een draad geldt het volgende:

$$R = \frac{l}{A}$$

R = weerstand (in Ω)

ρ = soortelijke weerstand (Ωm)

l = de lengte van het draad (m)

A = de oppervlakte van het draad (m^2)

De oppervlakte van deze kabels is 70 mm^2 , dus $7,0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Voor een gemiddelde stroomdraad geldt $A = 2,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, hiermee heeft onze kabel een veel groter oppervlak ten opzichte van een gemiddeld stroomdraad. Uit de formule is hierdoor af te leiden dat de weerstand van het draad een stuk kleiner wordt, omdat het oppervlak groter is. De accukabel is gemaakt van koper, de soortelijke weerstand van koper is $17 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$. Dit is ook een relatief lage soortelijke weerstand. Om nu een weerstand van 1Ω te krijgen geldt het volgende

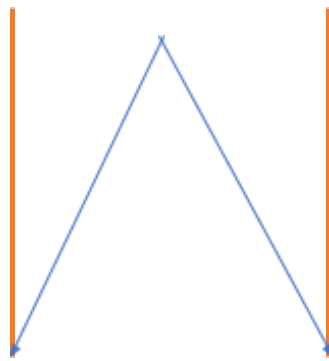
$(1 \times 7,0 \times 10^{-5}) / 17 \times 10^{-9} = 4117,65 \text{ m draad}$.

De maximale lengte accukabel die wij hebben is 5,10 m. De weerstand van de kabels zullen dus maar ongeveer $2 \text{ m}\Omega$ zijn. De weerstand in de draad is dus heel klein, waardoor er een enorm hoge stroomsterkte door het draad kan gaan bij een hoge spanning.

Het projectiel

Het projectiel heeft twee primaire eisen. Ten eerste moet het projectiel stroom kunnen geleiden, dit betekent dat het projectiel van een metaal moet zijn. Ten tweede moet het projectiel contact kunnen maken met de rails, dit kan door middel van een U-profiel of een V-profiel. Het projectiel is gemaakt uit metalen platen. Daarvan zijn eerst metalen strips gemaakt, die vervolgens op maat zijn gezaagd en gebogen.

Bij het bepalen van de uiteindelijke breedte van het projectiel moet gezocht worden naar een balans tussen contact tussen projectiel en rails en de mechanische wrijving tussen projectiel en rails. Als de wrijvingsweerstand te groot is, zal het projectiel vast komen te zitten in de rails, mocht het contact te laag zijn, dan zal er geen stroom lopen en zal de versnelling uitblijven.



Afbeelding 25: Schematische weergave van het van het projectiel. Het is belangrijk dat het projectiel dicht tegen de rails aanzit en zo goed mogelijk contact maakt. Aan de andere kant weinig mechanische wrijving ervaart.

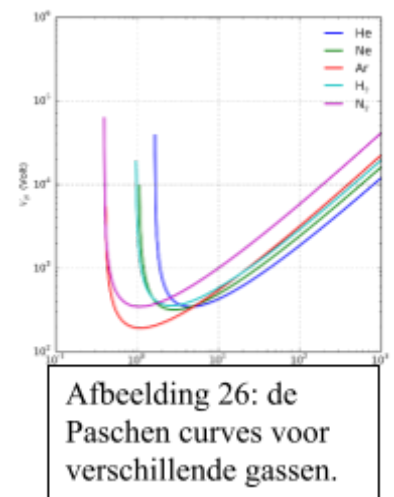
Plasma

Er is nog een derde effect waarmee rekening kan worden gehouden en dat invloed heeft op de geleiding. Als de afstand tussen de rails en het projectiel klein is en er een spanningsverschil is tussen de rails en het projectiel, kan plasma ontstaan. Plasma is een toestand waarbij een gas (deels) bestaand uit geladen deeltjes. Met behulp van een hoge elektrische veldsterkte (V/m) kan dit optreden. Bij een afstand van 1 mm is de doorslagspanning van lucht ca. 1 kV. Bij de veel korte, bijna contact, afstanden tussen het projectiel en de rails kan plasmavorming dus ook al optreden bij 10-100 volt.

In normaalgesproken geldt in een gas dat elk atoom of molecuul neutraal is, hierdoor is ook het gas neutraal en niet geladen of geleidend. Bij een plasma bestaat het gas (deels) uit geladen deeltjes, ionen. Deze ionen kunnen ontstaan door b.v. een hoge temperatuur of een hoog elektrisch veld. Als voldoende atomen of moleculen geladen zijn spreken we van een plasma, doordat geladen deeltjes vrij kunnen bewegen is een plasma goed geleidend. Plasma is de vierde fase van materie.

Als de elektrische energie groot genoeg is, kan ook een metaal van een vaste fase in een keer naar de plasma fase gaan, hierbij sublimeert het metaal en wordt het ontstane gas geïoniseerd. Dit effect wordt o.m. gebruikt bij het lassen van metalen. Ook kan de lucht tussen de rails en het projectiel veranderen in plasma, hiervoor is een grote elektrische veldsterkte nodig.

De wet van Paschen is een vergelijking die de doorslagspanning geeft, oftewel, de spanning die nodig is om een ontlading tussen twee elektroden in een gas als functie van druk en afstand tussen de elektroden. Deze functie kan worden uitgedrukt worden in een grafiek, de Paschen curves.

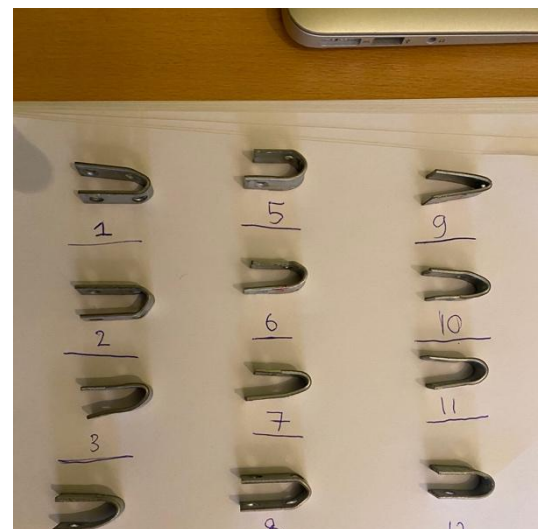


Plasma heeft twee opmerkbare eigenschappen, het kan elektriciteit geleiden en het kan worden beïnvloed door een magnetisch veld.

Plasma speelt een rol bij het vuren van een railgun. Door de grote hoeveelheid elektrische energie die in een keer wordt vrijgelaten zal er plasma ontstaan tussen de rails en het projectiel. Dit plasma zal een positief en negatief effect hebben op het rendement van de railgun. Het zal ervoor zorgen dat de geleiding tussen de rails en het projectiel zeer goed zal zijn, omdat het goed geleidende plasma de ruimte tussen de rails en het projectiel op zal vullen. Het negatieve effect is dat de vorming van het plasma ook energie vraagt, deze energie zal niet gebruikt kunnen worden om het projectiel te versnellen.

Projectielen

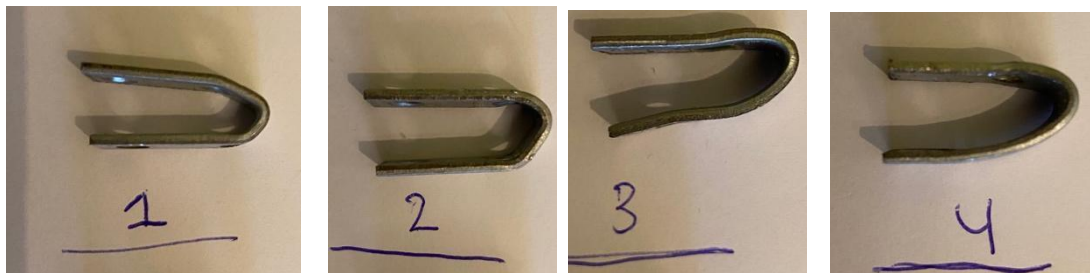
Er zijn voor de tests 12 projectielen gevormd. Om ervoor te zorgen dat de projectielen goed tussen de rails komen te zitten hebben de v of u-vorm van alle projectielen een breedte van minimaal 12 mm, er wordt echter niet gestreefd om het projectiel breder te maken dan 12 mm het belangrijkste is dat het projectiel contact maakt. Als het projectiel te breed wordt zal het projectiel zich niet kunnen voortbewegen door de rails. Ook is de hoogte van de projectielen overal gelijk zodat het projectiel goed tussen de rails en door de loop kan bewegen, de hoogte is 10 mm. De lengte, vorm en de massa van het projectiel verschilt. Dit komt



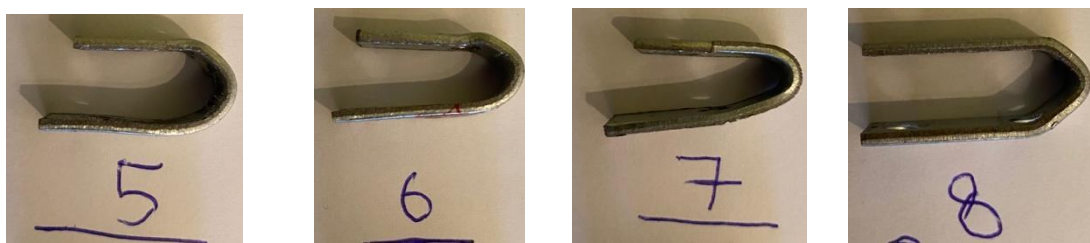
doordat de projectielen gemaakt zijn van strookjes van verschillende lengtes en omdat de projectielen handmatig zijn gevouwen. De middelen om dit met meer precisie te doen ontbraken.

Afbeelding 27: foto van alle projectielen.

Weergave van de projectielen



Afbeeldingen 28, 29, 30 en 31: weergave van projectielen 1, 2, 3 en 4



Afbeeldingen 32, 33, 34 en 35: weergave van projectielen 5, 6, 7 en 8



Afbeeldingen 36, 37, 38 en 39: weergave van projectielen 9, 10, 11 en 12

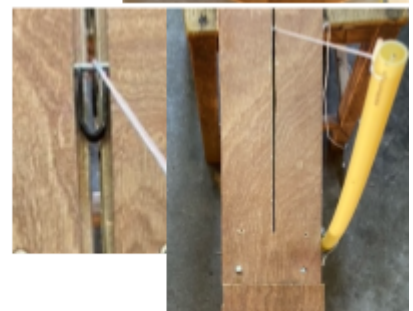
Projectiel	Massa (g)voor	Massa (g) na vuren
1	6,131	5,893
2	6,161	
3	5,492	
4	5,444	
5	5,351	
6	5,444	
7	5,391	
8	6,165	5,978
9	5,762	
10	5,504	
11	5,362	
Tabel 1: een weergave van alle massa's van alle projectielen.		
12	5,431	

Voor de verschillende experimenten worden de Projectielen gebruikt die in vorm en massa het meest overeenkomen. Welke projectielen worden gebruikt wordt gegeven per experiment in de methode

Vuren van de railgun: stappenplan

Voor het onderzoek werden er metingen gedaan bij verschillende spanningen om te onderzoeken welke deelvragen over de railgun beantwoord zouden kunnen worden. Daarom wordt hieronder gedetailleerd beschreven wat de stappen zijn die gezet worden om een meting uit te voeren. Bij deze beschrijving wordt er een voorbeeldmeting genomen die is gemaakt bij de lange rails, 33 cm, en bij een spanning van 300V.

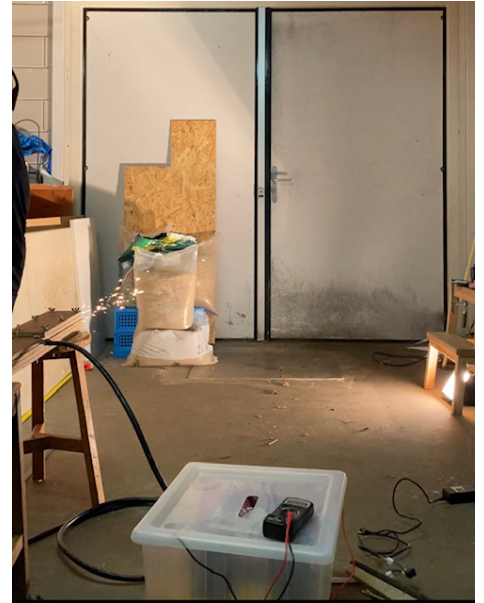
1. Om te beginnen moet het projectiel zo goed als mogelijk tussen de rails passen. Het gekozen projectiel wordt tussen de twee rails gelegd om na te gaan hoe goed het contact met de rails is en hoe goed het projectiel nog kan bewegen, met relatief weinig frictie. Er wordt geprobeerd om bij elke meting een goede combinatie te vinden tussen contact met de rails en nog redelijk vrij tussen de rails kunnen bewegen, daarom wordt voor elke meting het projectiel in de breedte aangepast met behulp van een tang. Deze actie verandert de vorm nauwelijks, visueel behoudt elk projectiel zijn oorspronkelijke eigenschappen.
2. Vervolgens worden de ogen van de accukabels op hun plaats gelegd door ze tussen de schroeven neer te leggen. Waarna de rails op de correcte positie bij de accukabel-ogen worden neergelegd. De positionering van de rails ten opzichte van de ogen van de accukabels is zo dat het uiteinde van de rails op het midden van de ogen ligt, dat kan gezien worden door de schroeven. Als de rails en de accukabels goed zijn gepositioneerd, wordt het rails element met behulp van zes vleugelmoeren dichtgeschroefd.
3. Hierna wordt het voorversnellingselement opgespannen. De pin (die elke keer op dezelfde plek erin gaat) zorgt voor het spannen van de boog en dat deze zo blijft staan. Het projectiel wordt vervolgens in het voorversnellingselement geplaatst, hierbij wordt naar gestreefd dat het projectiel hetzelfde ligt als de vorige meting. Tot slot wordt ook de kap over het voorversnellingselement geplaatst om ervoor te zorgen dat het projectiel altijd tussen de rails komt.
4. Om te kijken of de railgun nog even goed werkt na de laatste meting wordt er vervolgens een testmeting van het voorversnellingselement gemaakt. Deze meting meet de snelheid die het projectiel heeft zonder de werking van de stroom op het projectiel. Wat dit inhoudt is dat er een meting wordt gemaakt met de complete railgun, alleen zonder spanning in het circuit. (Uitgezoomde foto van de gehele railgun zonder stroom) De



Afbeeldingen 40 t/m 45: foto's van tijdens de test en van de opstelling zelf.

meting wordt gefilmd in slow motion op dezelfde plek als alle andere filmpjes.

5. Na de testmeting met het voorversnellingselement wordt stap 1 t/m 3 herhaald. Bij dit proces wordt de nadruk gelegd op consistentie tussen de metingen. Als stap 1,2 en 3 zijn voltooid worden de condensatoren opgeladen tot de vereiste spanning, in dit geval is dat 300V. De condensatoren lopen na het opladen langzaam leeg, daarom worden de condensatoren eerst tot een spanning gebracht die 3V hoger is dan het doel, in dit geval 303V. Er wordt gewacht dan totdat de spanning op het vereiste niveau staat, waarna pas gevuurd wordt. Het vuren gebeurt door middel van de pin wegtrekken uit het voorversnellingselement. Hierdoor vuurt het voorversnellingselement, komt het projectiel tussen de rails, vindt de ontlading plaats en wordt het projectiel versneld. Uiteraard wordt hier ook een slow motion filmpje van gemaakt. Na het vuren wordt de restspanning op de condensatoren gemeten.



Afbeelding 46: de testomgeving.

6. Na het vuren wordt eerst het projectiel bestudeerd. Er wordt onder andere gekeken naar de staat van het projectiel, is hij niet kapot of iets anders. Bij het projectiel wordt ook gekeken hoe er contact is gemaakt met de rails. Tegelijkertijd worden de twee gemaakte filmpjes geëdit, opgeslagen en genummerd, hier staan ook de begin- en eindspanningen in. De railgun wordt vervolgens uit elkaar gehaald, wordt de rails geanalyseerd. Door de plasmavorming is er na elk schot goed te zien waar de grootste ontlading is geweest, het ontladingsgedeelte en kan worden gekeken hoeveel contact er met de rails is geweest van het projectiel, maar ook waar, b.v. aan het begin of aan het eind.
7. Tot slot wordt de ruimte van en tussen de rails eerst schoongemaakt, zo blijft elke meting ongeveer hetzelfde. Ook wordt de rails een beetje opgeschuurd, zodat het volgende projectiel niet te veel wordt afgeremd en dat de geleiding optimaal is.

Het filmpje analyseren

Voorbeeld van een gemaakt filmpje, gemeten snelheid 59 m/s

Real time & slow motion:

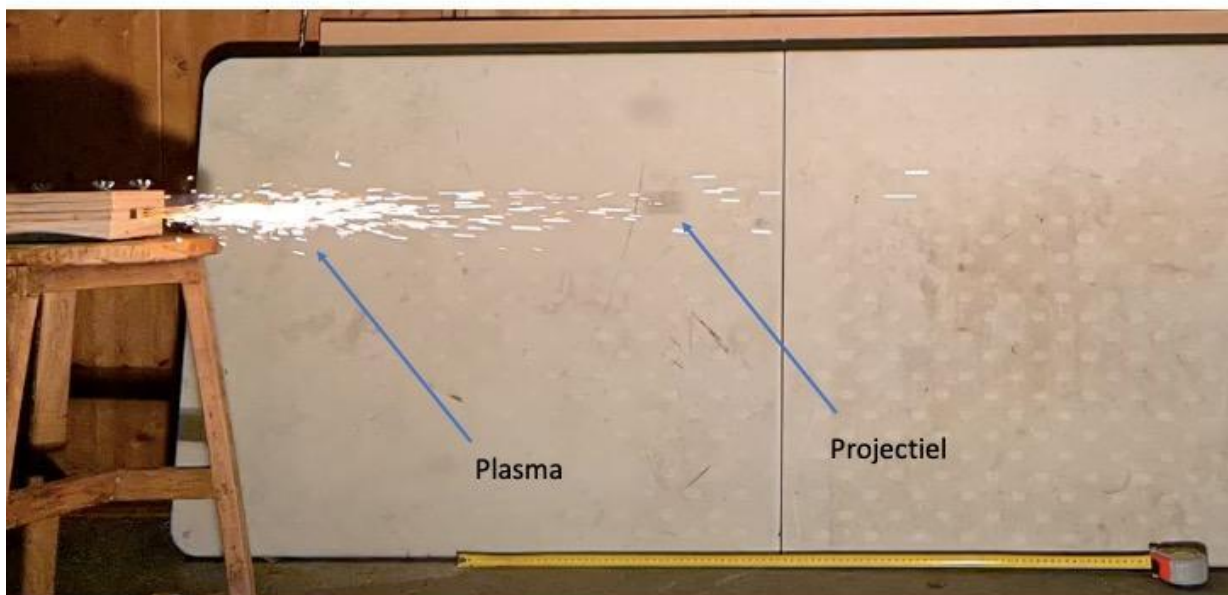
<https://www.youtube.com/watch?v=8z19iOmU5QY&feature=youtu.be>

Bij elke meting worden de twee filmpjes van het voorversnellingselement en het vuren in coach7 middels videometen geanalyseerd. Hier wordt uitgelegd wat er stapsgewijs gebeurt bij het videometen van een projectiel, de voorbeeldmeting is hier het voorversnellingselement en de meting van 300V met een lange rails.

1. Eerst wordt het filmpje van het voorversnellingselement geanalyseerd. In coach videometen wordt eerst de schaal goed aangepast, er is in elk filmpje een meetlint te zien van precies één meter lang. Om ervoor te zorgen dat de x-as en y-as in elk filmpje gelijk is, gaat de x-as altijd door het meetlint en gaat de y-as altijd door het midden van de loop van de railgun. Hierdoor is de afstand die het projectiel aflegt ook in het

filmpje altijd hetzelfde. De tijdstelling wordt ingesteld op 480 beeldjes per seconde in plaats van de standaard 30 beeldjes per seconde. De beeldjes worden geselecteerd waarin het projectiel zichtbaar is tijdens de vlucht, tussen het begin- en eindbeeldje wordt er gemeten.

2. Vervolgens wordt bij elk beeldje het midden van het projectiel gevolgd, door de soms grote snelheid is de grootte van de vorm van het projectiel soms erg uitgerekt, daarom wordt zoveel mogelijk het midden genomen zodat het altijd hetzelfde is.
3. Wanneer alle beeldjes gefilmd zijn, wordt er een x-t - en y-t diagram geplot om te kijken of de beeldjes een beetje goed te volgen zijn. Alle data uit de datarijen wordt op 4 decimalen specifiek gezet, waarna het wordt geëxporteerd naar een Excel bestand. Daarin wordt de gemiddelde snelheid nauwkeurig bepaald door een lineaire trendlijn door de meetpunten te trekken. De richtingscoëfficiënt van de x,t-lijn is een maat voor de snelheid. In Excel kunnen ook eenvoudig meetpunten worden verwijderd, dit is bijvoorbeeld nodig om het punt dat het projectiel de zak raakt, en waarvan de snelheid dus al is afgeremd niet mee te nemen in de snelheidsbepaling. Op dit moment is de snelheid van het voorversnellingsselement bepaald
4. Voor het tweede filmpje van het gevuurde projectiel wordt in feite stap 1, 2 en 3 herhaalt om daar de snelheid van het gevuurde projectiel te bepalen. Wat deze meting lastiger maakt is het feit dat er naast het projectiel ook plasmavonken uit de loop komen, zeker bij hoge spanningen. Toch is ook in deze gevallen de snelheid goed te analyseren. Hieronder is het plasma goed te zien net als het projectiel, hoewel duidelijk is dat deze wel wat vervaagt.



Afbeelding 47: een weergave waarop er gelet wordt tijdens het videometen.

Resultaten

Metingen op een rij.

Er zijn een groot aantal metingen gedaan verdeeld over drie dagen. Op de eerste dag, vrijdag 11 december, is veel tijd besteed aan het in de vingers krijgen van het experimenteren. Hoewel we erg blij waren dat de railgun vuurde heeft het tijd gekost voordat het hierboven beschreven stappenplan was uitgewerkt. Vanaf het begin was duidelijk dat een consistente manier van werken essentieel is om goede metingen te kunnen doen.

Ook op zaterdag is een aantal metingen gedaan, maar is door ervaring met het experimenteren ook het inzicht ontstaan dat een kortere rails mogelijk ook goed zou werken en de positionering van de rails t.o.v. het oog van de accukabels. Tevens bleek dat de projectielen zo goed behouden bleven dat ze goed meerdere keren konden worden gebruikt.

In onderstaande tabel staan de resultaten van de metingen van vrijdag, zaterdag en zondag. In de tabel o.m. weergegeven de snelheid van het voorversnellingsselement en de vuursnelheid. Zoals beschreven werden deze metingen steeds gezamenlijk uitgevoerd. Ook de gemeten beginspanning en de gemeten restspanning zijn weergegeven. Daarnaast zijn ook gegevens opgenomen over waar het ontladingsgedeelte op de rails te zien was. Welk projectiel er gebruikt is, of het een lange of korte rails betrof en welke positie de rails had. De beschrijving 'rails oud' betekent dat de positie van de rails niet in het centrum van de accukabel ogen was, maar tegen het hout aan.

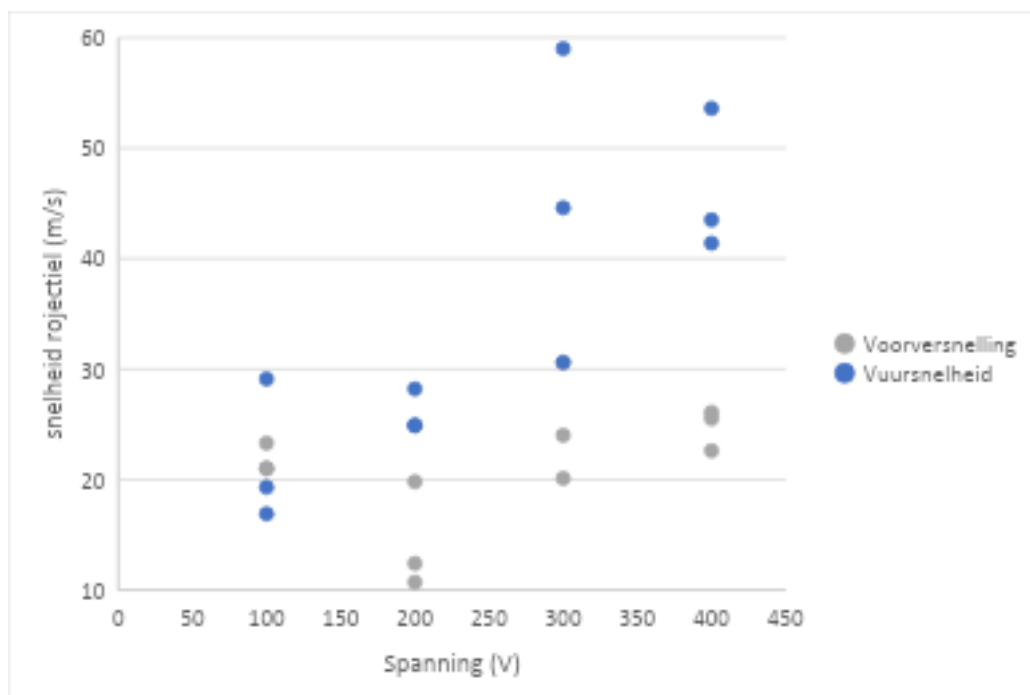
Spanning volt	Voorversnelling m/s	Vuursnelheid m/s	Gemeten begin volt	Gemeten eind volt	Dag	Ontlading	Projectiel nr.	Rails
100	23,3	16,9	100	1	Zaterdag	vroeg	8	rails oud
100	21	29,1	100	7	zondag	normaal	1	lange rails
100	21	19,3	100	7	zondag	normaal	1	korte rails
200	12,4	24,9	200	2	Vrijdag	normaal	8	rails oud
200	19,8	28,2	200	0	zondag	normaal	1	lange rails
200	10,7	24,9	200	0	zondag	normaal	1	korte rails
300	30,6	59	300	5	zaterdag	heel laat	8	rails nieuw
300	24	30,6	300	3	zondag	normaal	1	lange rails
300	20,1	44,6	300	14	zondag	iest later	1	korte rails
400	26,1	53,6	400	6	zaterdag	midden/laat	8	rails nieuw
400	25,5	41,4	400	6	zondag	normaal	1	lange rails
400	22,6	43,5	400	6	zondag	normaal	1	korte rails

Tabel 3: Alle metingen op vrijdag, zaterdag en zondag bij verschillende spanningen en verschillende railslengtes. Tevens is na elk schot het ontladings- of raakpunt geanalyseerd. Voor elk schot is ook steeds het voorversnellingsselement getest, is het projectiel nummer weergegeven en de restspanning die nog in de condensatoren achter bleef.



Afbeelding 48: op de foto is te zien dat het ontladingsgedeelte op de rails beperkt is.

Afbeelding 49: De gegevens uitgezet in een spanning-snelheid grafiek.



Deze gegevens uitgezet in een snelheid-spanning grafiek is te zien in de afbeelding hierboven. Wat opvalt is de spreiding van de snelheidspunten, zowel bij het voorversnellingselement, als ook bij de vuursnelheid. Wel is goed te zien dat de hoogste snelheden worden bereikt bij de hogere spanningen.

Deelvraag 1 Beantwoorden

Wat is de (Lorentz)kracht die op het projectiel werkt bij een spanning van 300 V?

Inleiding

De kracht die op het projectiel werkt is de Lorentzkracht, de ‘drivingforce’. Deze kracht wordt veroorzaakt door de interactie van het magneetveld dat ontstaat rond de rails, op het moment dat er een grote stroomsterkte door de rails loopt, met de stroom die door het projectiel heen loopt. Omdat wij niet beschikken over een krachtmeter, of een manier om de stroomsterkte te meten, kan de Lorentzkracht niet direct worden gemeten. Maar het effect van de Lorentzkracht, de versnelling van het projectiel is wel bekend. Kan op basis van de beschikbare gegevens een schatting worden gemaakt van de Lorentzkracht?

Theorie en uitwerking

De theorie achter de Lorentzkracht en hoe deze kracht door een interactie van magneetvelden en elektrische stromen ervoor zorgen dat de Lorentzkracht wordt opgewekt is hierboven in het theoriegedeelte beschreven. Hier richten we ons op het effect van de Lorentzkracht, namelijk de versnelling van het projectiel.

De relatie tussen versnelling en een kracht is bekend:

$$F = m \cdot a$$

Waarbij F staat voor de kracht in Newton, in ons geval zou dat de Lorentzkracht zijn. De massa van het projectiel m in kg en de versnelling a in m/s². Verder geldt voor de versnelling:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{vuur} - v_{VE}}{\Delta t}$$

Dus de versnelling kan worden berekend door de snelheid van het voorversnellingsselement (v_{VE}) af te trekken van de eindsnelheid na het schot (v_{vuur}) en te delen door de tijd die nodig is om van de lagere naar de hogere snelheid te komen.

Wat is een realistische schatting voor Δt ? Om dit te bepalen hebben we meer gegevens nodig die iets zeggen over de tijd. Daarvoor is het wellicht goed om toch nog even terug te gaan naar de basis van de Lorentzkracht, namelijk de hoge stroomsterkte die in de railgun wordt opgewekt. Die zorgt voor de magneetvelden rond de rails en voor de stroom door het projectiel. Uit de analyse van de experimenten blijkt dat de ontlading vaak op een relatief beperkt gedeelte, ongeveer een gedeelte van 2cm, van de rails plaatsvindt (zie foto). We noemen dit voor het gemak het ‘ontladingsgedeelte’.

In het theoriegedeelte is gesteld dat de Lorentzkracht evenredig is met I^2 .

$$F_l = \frac{\mu l}{2\pi r} I^2$$

Dus bij hogere stroomsterktes, de sterke ontlading, zal de kracht veel groter zijn, dan als de stroomsterkte beperkt is.

Met behulp van het ontlandingsgedeelte is een schatting te maken van de tijd die de ontlading duurt en van daaruit is een gemiddelde versnelling en kracht te bepalen.

Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de bekende bewegingsvergelijking⁸:

$$s(t) = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

De plaats op een bepaald tijdstip t , $s(t)$, is te berekenen als de begin positie (s_0), begin snelheid, V_0 , de versnelling a en de tijd t bekend zijn.

Door gebruik te maken van de aanname dat de kracht alleen werkt tijdens het ontladingsgedeelte, kan $s(t)$ en s_0 worden gegeven. Zoals aangegeven is het ontladingsgedeelte ongeveer 2 cm. Voor het gemak stellen we $s_0=0$ en $s(t)=0,02$ m.

$$a = \frac{v_{vuur} - v_{VVE}}{\Delta t}$$

Voor Δt in bovenstaande formule geldt dat dit het verschil is tussen de begintijd (t_0) en eindtijd (t) van de ontlading. Voor het gemak kiezen we hier ook om te stellen $t_0=0$ s. Tevens geldt $v_0 = v_{VVE}$. Als dit alles wordt ingevuld in de bovenstaande bewegingsvergelijking is deze te schrijven als:

$$s(t) = v_{VVE} t + \frac{1}{2} \frac{v_{vuur} - v_{VVE}}{t} t^2 = \frac{1}{2} (v_{vuur} + v_{VVE}) t$$

Voor t kan nu het volgende worden geschreven:

$$t = \frac{2s(t)}{(v_{vuur} + v_{VVE})}$$

Omdat alle parameters bekend zijn kan t hieruit dus worden berekend.

We kiezen ervoor om de kracht voor maar één meting te berekenen. Namelijk 400V korte rails, de gegevens van deze meting zijn:

v_{VVE}	22,6 m/s
v_{vuur}	43,5 m/s
$S(t)$	0,02 m
$m(\text{projectiel } I)$	6,131 g
t	0,5 ms

De berekende tijd is dus 0,5 ms, dat is heel kort, maar wellicht niet irreëel. Ter controle, een projectiel dat met 40 m/s beweegt legt in 0,5 ms ongeveer 2 cm af, de afstand die experimenteel gezien werd voor het ontladingsgedeelte.

Doordat nu de tijd t berekend is kan vervolgens een schatting worden gemaakt van de gemiddelde kracht.

$$F = m \cdot a = m \frac{v_{vuur} - v_{VVE}}{t}$$

De berekende kracht wordt dan 250N. Omdat de Lorentzkracht de enige kracht is die de het projectiel versnelt, zou dus kunnen worden gesteld dat de gemiddelde Lorentzkracht 250 N bedraagt.

Conclusie

⁸ BINAS verwijzing

Het is ons gelukt om enigszins een Lorentzkracht te bepalen, de kracht die als driving force werkt binnen de railgun. Wat wel echter te stellen valt is dat er een redelijk grote aanname is gemaakt. De lengte waarover de railgun heeft versneld is een aanname die hoogstwaarschijnlijk wel in die richting zal zitten maar natuurlijk niet precies dat zal zijn. Daarnaast moet ook gezegd worden dat de extra verkregen snelheid misschien nog wel hoger of lager zou kunnen zijn geweest. Zoals al uit het onderzoek is gebleken, is er niet een constante snelheid geweest waarmee het projectiel, puur door de versnelling uit het voorversnellingselement, uit de railgun vloog. Hoogstwaarschijnlijk komt dit omdat de weerstand van de loop en de rails fluctueert per meting. De conclusie van deze deelvraag is dus dat de Lorentzkracht op het projectiel bij een spanning van 300V rond de 250N voor deze specifieke meting op 300V. Ervan uitgaande dat de weerstand door de loop en de rails hetzelfde is en dat het voorversnellingselement ook elke keer dezelfde kracht gaf.

Deelvraag 2 Beantwoorden

Wat is het verband tussen de spanning en de snelheid van het projectiel?

Inleiding

Bij het vuren met de railgun krijgt het projectiel een snelheid mee door een omzetting van energie. Bij het beantwoorden van deze vraag wordt er gekeken naar de snelheid waarmee het projectiel wordt versneld. Ook wordt er gekeken naar verschillende spanningen voor binnen het circuit en wat voor effect het heeft. De metingen tussen de twee worden vergeleken en zo wordt er bepaald of er een verband te vinden is tussen de twee.

Hypothese

Er wordt verwacht dat bij hogere spanningen een hogere snelheid van het projectiel wordt gehaald. Als de omzettingsefficiëntie van elektrische energie naar kinetische energie constant is voor alle spanningen wordt een lineair verband verwacht tussen het kwadraat van de spanning en het kwadraat van de snelheid die het projectiel uiteindelijk behaald.

Theorie

De twee formules waar we mee te maken hebben, zijn de formules voor de opgeslagen energie binnen de condensator en kinetische energie.

Voor de formule van de opgeslagen energie binnen een condensator geldt.

$$E_{\text{condensator}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

$E_{\text{condensator}}$ = opgeslagen energie in condensator (in J)

C = capaciteit van condensator (in Farad/CV⁻¹)

U = spanning (in V)

Voor de formule van de vrijkomende kinetische energie geldt.

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

E_{kin} = vrijgekomen kinetische energie (in J)

m = massa van het projectiel (in kg)

v = snelheid van het projectiel (in m/s)

Als de efficiëntie van de energieomzetting van elektrische energie naar kinetische energie die plaatsvindt in de railgun konstant is. Dan kan, omdat de capaciteit van de condensator en de massa van het projectiel constant zijn, worden gesteld:

$$U^2 \sim v^2$$

Resultaten en Verwerking

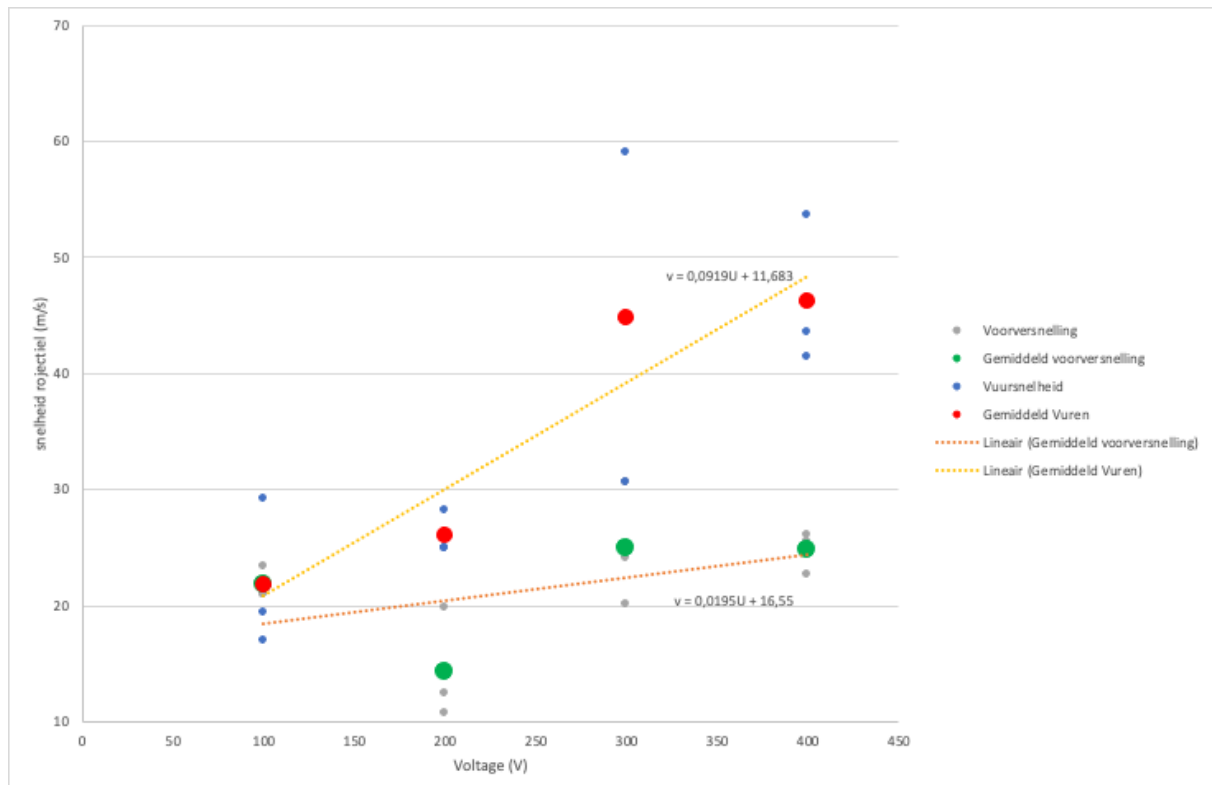
Tijdens het meten wordt snel duidelijk dat naarmate de spanning toeneemt, dat er veel meer energie vrijkomt bij het vuren van de railgun. Dit is te zien door bijvoorbeeld de hoeveelheid plasma die uit de railgun komt, maar ook uit de metingen blijkt, dat bij hogere spanningen hogere snelheden worden gehaald bij het vuren.

Spanning volt	Voorversnelling m/s	Vuursnelheid m/s	Gemeten begin volt	Gemeten eind volt	Dag	Ontlading	Projectiel nr.	Rails
100	23,3	16,9	100	1	Zaterdag	vroeg	8	rails oud
100	21	29,1	100	7	zondag	normaal	1	lange rails
100	21	19,3	100	7	zondag	normaal	1	korte rails
200	12,4	24,9	200	2	Vrijdag	normaal	8	rails oud
200	19,8	28,2	200	0	zondag	normaal	1	lange rails
200	10,7	24,9	200	0	zondag	normaal	1	korte rails
300	30,6	59	300	5	zaterdag	heel laat	8	rails nieuw
300	24	30,6	300	3	zondag	normaal	1	lange rails
300	20,1	44,6	300	14	zondag	iest later	1	korte rails
400	26,1	53,6	400	6	zaterdag	midden/laat	8	rails nieuw
400	25,5	41,4	400	6	zondag	normaal	1	lange rails
400	22,6	43,5	400	6	zondag	normaal	1	korte rails

Tabel 3: Alle metingen op vrijdag, zaterdag en zondag bij verschillende spanningen en verschillende railslengtes. Tevens is na elk schot het ontladings- of raakpunt geanalyseerd. Voor elk schot is ook steeds het voorversnellingsselement getest, is het projectiel nummer weergegeven en de restspanning die nog in de condensatoren achter bleef.

Maar zoals al eerder aangegeven is de spreiding in de meetresultaten groot, zowel bij de metingen van het voorversnellingsselement, alsook van de schoten van de railgun.

Bij spanningen van 100, 200, 300 en 400V zijn zowel het voorversnellingsselement als ook het schot gemeten. In onderstaande grafiek zijn al deze meetpunten weergegeven. De grote oranje en groene punten betreffen de gemiddelde waarden van respectievelijk de snelheid van het afgevuurde projectiel en het projectiel dat alleen door het voorversnellingsselement is afgeschoten.



Afbeelding 50: Datapunten van 3 metingen bij vier spanningen (100, 200, 300 en 400V). Kleine grijze puntjes de metingen van de snelheid van het voorversnellingselement. Deze meting is steeds voorafgaand aan het vuren gedaan. Kleine blauwe puntjes, de snelheid gemeten van het vuren van de railgun. Grote groene punten zijn de gemiddelde snelheid van het voorversnellingselement. De grote rode punten zijn de gemiddelde vuursnelheid per spanning

Discussie

Duidelijk te zien is dat de gemiddelde snelheid bij hogere spanningen toeneemt. Door de spreiding en meetfout is ook bij het voorversnellingselement enige variatie of toename te zien, iets dat je eigenlijk niet zou verwachten, want er staat bij deze metingen geen spanning op de rails en er is dus ook geen versnelling.

Door de datapunten is zowel voor het voorversnellingselement als bij het vuren een rechte-trendlijn gefit. Uiteraard zegt dit niets over het soort verband dat er tussen de spanning en de snelheid is, maar is vooral ter illustratie van de toename.

Conclusie

Zoals verwacht neemt de snelheid van het projectiel toe bij hogere spanningen, maar de metingen zijn niet consistent genoeg om te kunnen concluderen welk verband er is tussen beide parameters.

Deelvraag 3 beantwoorden

Wat is het rendement van de energie omzetting in een railgun bij verschillende spanningen?

Introductie

Bij het afvuren van de railgun gaat er een grote stroomsterkte door het projectiel en de rails. Door de weerstand in de rails, het projectiel en het contact tussen de rails en het projectiel, gaat veel nuttige energie verloren in de vorm van warmte, plasma vorming etc. Ook is er frictie tussen het projectiel, de loop en de rails is, dit zal er ook voor zorgen dat de snelheid lager wordt. In dit gedeelte wordt gepoogd de efficiëntie van de railgun te bepalen.

Hypothese

Aan de hand van bronnen van het internet en de extra weerstand die er bij onze railgun zijn, bijvoorbeeld de loop die voor weerstand kan zorgen gaan we uit van maximaal 5% rendement in de omzetting van energie.

Resultaten en uitwerking

M.b.t. de efficiëntie van de railgun wordt gekeken naar de mate waarin de elektrische energie wordt omgezet in kinetische energie.

$$\eta = \frac{E_{kin}}{E_{cond}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Voor de kinetische energie, dat samenhangt met de snelheid van het projectiel geldt:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

Voor de elektrische energie, dat samenhangt met de spanning op de condensatoren geldt:

$$E_{cond} = \frac{1}{2}C \cdot U^2 \quad (3)$$

Beide bovenstaande vergelijkingen ingevuld in de efficiëntievergelijkingen geeft:

$$\eta = \frac{mv^2}{C \cdot U^2} \cdot 100\% \quad (4)$$

Hierbij geldt: C = capaciteit van de condensator (16 mF per stuk) en de massa $m = 6g$

Als de efficiëntie over het volledige spanningsbereik van de railgun constant zou zijn zou in principe een meting, van de snelheid bij een bekende spanning voldoende zijn. Maar de verwachting is dat de efficiëntie weldegelijk afhankelijk is van de spanning.

Maar is het met onze railgun aan te tonen dat de efficiëntie van de railgun een afhankelijkheid vertoont t.o.v. de spanning?

Belangrijk bij het bepalen van de efficiëntie is dat naar het verschil in kinetische energie wordt genomen tussen het voorversnellingselement en het gevuurde projectiel. Het gaat om de toename in kinetische energie, of netto kinetische energie. In onderstaande vergelijking is weergegeven hoe dat is gedaan.

Waarbij v_{vuur} de snelheid van vuren is en v_{vve} de snelheid na het voorversnellingselement. Let op, er kan niet gewoon Δv^2 worden gebruikt.

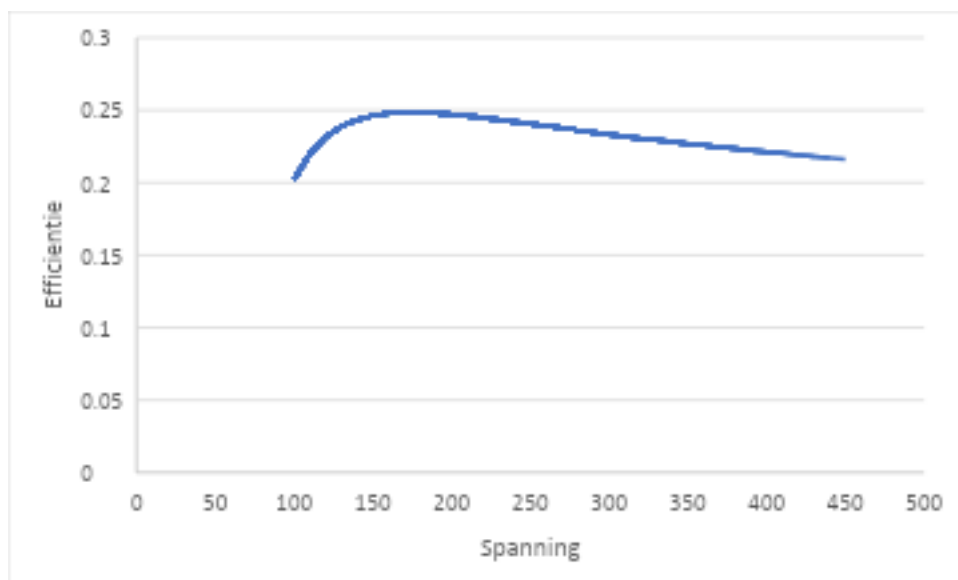
$$E_{kin,netto} = \frac{1}{2}mv_{vuur}^2 - \frac{1}{2}mv_{vve}^2 \quad (5)$$

$$E_{kin,netto} = \frac{1}{2}m \cdot (v_{vve}^2 - v_{vuur}^2) \quad (6)$$

Een vergelijkbaar principe geldt ook voor de condensator. Als er nog spanning op de condensator aanwezig is, dan moet daarvoor worden gecorrigeerd, omdat dat deel van de energie dan niet naar de railgun is gegaan. In de meeste gevallen is de spanning echter zo laag, 0-3 V, dat het te verwaarlozen is. Daarom is ervoor gekozen om de netto en bruto energie gelijk te schakelen, er wordt dus alleen gerekend met de ingestelde spanning.

Bij deelvraag 1 (verband snelheid spanning) is een vergelijking gegeven voor de trendlijn voor het vuren en het voorversnellingselement. Door deze vergelijkingen te gebruiken is op basis van deze trendlijnen een efficiëntie te bepalen, deze is tussen de 0,2 en 0,25% heel laag dus.

Afbeelding 50: een spannings- efficiëntie grafiek.



Hetzelfde kan worden gedaan voor de individuele meetpunten, resultaten hiervan staan in onderstaande tabel.

Tabel 4: de resultaten van verschillende metingen op 4 verschillende spanningen.

Spanning volt	Voorversnelling m/s	Vuursnelheid m/s	Gemeten begin volt	Gemeten eind volt	rendement
100	23,3	16,9	100	1	-0,4824482
100	21	29,1	100	7	0,76464049
100	21	19,3	100	7	-0,1290888
200	12,4	24,9	200	2	0,21857655
200	19,8	28,2	200	0	0,189
200	10,7	24,9	200	0	0,2369625
300	30,6	59	300	5	0,53028063
300	24	30,6	300	3	0,07508251
300	20,1	44,6	300	14	0,33096034
400	26,1	53,6	400	6	0,25690351
400	25,5	41,4	400	6	0,12468157
400	22,6	43,5	400	6	0,16192979

In bovenstaande tabel is te zien dat de efficiëntie ook nooit boven de 1% uitkomt, maar ook is te zien dat er voorbeelden zijn waarbij hogere rendementen behaald worden.

Conclusie:

De railgun is niet erg efficiënt, dit kan worden beredeneerd door de vele soorten weerstand die er in de railgun werken waardoor energie niet nuttig wordt benut. Ook kan dit verklaard worden door de relatief lage spanningen en energiehoeveelheden als je kijkt naar een militaire railgun. In de algemene discussie wordt er meer op ingegaan hoe de railgun een hogere efficiëntie kan behalen. De efficiëntie binnen onze railgun ligt echter nu gemiddeld rond de 0,2% en 0,25% rendement.

Deelvraag 4 beantwoorden

In hoeverre speelt de lengte van de rails een rol, kijkend naar een korte en een langere rails?

Tijdens de meting viel op dat het ontladingspunt meestal in het begin van de rails lag, dus vlak bij de aansluiting van de stroomdraden. Daarnaast was bij de het snelste schot, te zien dat, zonder dat daar een aanwijsbare reden voor was, dat de ontlading juist heel laat in de rails optrad.

Deze observaties bracht ons op het idee om te onderzoeken of een kortere rails wellicht evengoed of zelfs beter zouden kunnen werken.

Daarom zijn naast de standaardmaat van 33 cm ook kortere rails gemaakt van 15 cm lengte om het effect hiervan te meten.

Resultaten

In onderstaande tabellen zijn de metingen bij 100, 200, 300 en 400V voor zowel de langere als kortere rails gegeven.

Spanning	Voorversnelling	Vuursnelheid	Gemeten spanning (V)	Eind spanning (V)
100	21	29,1	100	7
200	19,8	28,2	200	0
300	24	30,6	300	3
400	25,5	41,4	400	6

Tabel 5: de resultaten van verschillende metingen op 4 verschillende spanningen met de rails van 33 cm..

Spanning	Voorversnelling	Vuursnelheid	Gemeten spanning (V)	Eind spanning (V)
100	21	19,3	100	1
200	10,7	24,9	200	0
300	20,1	44,6	300	14
400	22,6	43,5	400	3

Tabel 6: de resultaten van verschillende metingen op 4 verschillende spanningen met de rails van 15 cm.

In bovenstaande tabellen is zichtbaar dat de maximale snelheden van het projectiel bij 400V tussen 41 en 44 m/s. Daarnaast is uit deze metingen te concluderen dat hogere spanningen tot hogere snelheden van het projectiel leiden dan de lagere spanningen.

Daarnaast is te zien dat de ontlading van de condensatoren in beide gevallen nagenoeg volledig is. Alleen bij 300V en de korte rails blijft 14V, ongeveer 5% aan spanning achter in de condensatoren.

Uit de resultaten blijkt dat een korte of een andere rails een vergelijkbaar patroon laten zien.

Zijn er ook verschillen? Een duidelijk verschil, zowel tijdens de experimenten alsook uit bovenstaande gegevens was dat bij de korte rails het projectiel niet altijd 'clean' uit de loop komt. Zoals eerder aangegeven bestaat de loop uit de rails, die het projectiel in het horizontale vlak sturen, en aan de boven en onderkant een houten afsluitplaat, die het projectiel in de verticale richting sturen. De rails is wel ingekort, maar de houten afsluitplaat waren nog hetzelfde. Aan de boven en onderkant is de sturing van het projectiel dus hetzelfde in beide gevallen, maar in het horizontale vlak is de sturing bij de kortere rails in de loop weggevallen na 15 cm. Het lijkt erop dat deze extra bewegingsvrijheid van het projectiel, bij de kortere rails tegen het einde van de loop ervoor zorgt dat het projectiel in sommige gevallen tegen de loop botst en minder goed uit de loop komt. Zie bijvoorbeeld de zeer afwijkende snelheid van het voorversnellingselement in voorbereiding op het schot van 200V. Normaal geeft het VVE een snelheid van ca 20 m/s, bij deze meting bleek het slecht 10 m/s.

Conclusie:

De lengte van de rails van 15 cm is voor deze stroombron lang genoeg om volledige ontlading en even goede versnelling te kunnen krijgen. De lengte van de loop en de rails na 15cm, heeft waarschijnlijk alleen een remmend effect. Een rails van 15 cm heeft dus niet een effect op de overgebleven spanning in de condensatoren en zou het dus ook niet een effect moeten hebben op de snelheid van het projectiel.

Deelvraag 5 Beantwoorden

In hoeverre is er een verschil wanneer de condensatoren in serie of parallel zijn geschakeld, kijkend naar de snelheid.

Inleiding

Bij het vuren van een railgun is een grote stroomsterkte nodig. Deze hoge stroomsterkte wordt verkregen door het opladen en daarna kortsluiten van twee zeer grote condensatoren. Bij het beantwoorden van deze deelvraag wordt er gekeken naar welke van de twee schakelingen het beste is voor het gebruik bij een railgun door middel van het kijken naar welke van de twee schakelingen de beste resultaten oplevert.

Hypothese

Aan de hand van bronnen op het internet gaan wij er van uit gaan er van uit dat wanneer de condensatoren in parallelschakeling zijn geschakeld, de snelheid van het projectiel het hoogst kan worden op dezelfde spanning.

Theorie

De formules waar we mee te maken hebben zijn de formules die weergeven hoe de capaciteit en de spanning over de condensatoren zich verdelen in een parallelschakeling en in een serieschakeling.

Voor condensatoren in serie geldt:

$$E_{\text{totaal}} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{totaal}} \cdot V_{\text{totaal}}^2$$
$$\frac{1}{C_{\text{totaal}}} = \frac{1}{C_{\text{condensator 1}}} + \frac{1}{C_{\text{condensator 2}}}$$
$$V_{\text{totaal}} = V_{\text{condensator 1}} + V_{\text{condensator 2}}$$

E = Energie opgeslagen in Joule

C = Capaciteit van condensator in Farad

U = Spanning van de condensator in Volt

$$R_{\text{totaal}} = R_{\text{condensator 1}} + R_{\text{condensator 2}}$$

R = ESR = Inwendige weerstand = 0,016 Ω

R totaal = 0,032 Ω

Als condensatoren in een parallelschakeling worden gezet geldt:

$$E_{\text{totaal}} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{totaal}} \cdot V_{\text{totaal}}^2$$
$$C_{\text{totaal}} = C_{\text{condensator 1}} + C_{\text{condensator 2}}$$
$$V_{\text{totaal}} = V_{\text{condensator 1}} = V_{\text{condensator 2}}$$

$$E_{Totaal} = E_{condensator 1} + E_{condensator 2}$$

E = Energie opgeslagen in Joule

C = Capaciteit van condensator in Farad

U = Spanning van de condensator in Volt

$$\frac{1}{R_{totaal}} = \frac{1}{R_{condensator 1}} + \frac{1}{R_{condensator 2}}$$

R = ESR = Inwendige weerstand = 0,016 Ω

R totaal = 0,008 Ω

Materiaal

- railgun met 2 verschillende spanningen
- camera van Max zijn telefoon
- computer met coach videometen
- Een impactblok, bestaat uit potgrond en zandzakken
- 1 projectiel
- veiligheidsbril, vuurwerkbril
- oordopjes

Methode

Om de verspillen in snelheden tussen een serieschakeling en een parallelschakeling van de condensatoren te kunnen meten moeten de condensatoren geschakeld worden in beide soorten schakelingen. Ook moet de snelheid van het projectiel gemeten worden. Dit gaan we doen door middel van Coach videometen.

In dit onderzoek worden er vier metingen afgenomen waar bij twee van de metingen de condensatoren in serieschakeling staan en twee van de metingen de condensatoren in parallelschakeling staan worden. Hieronder is een overzicht te zien van de vier metingen en het projectiel wat daarvoor gebruikt wordt.

Meting	Spanning	Projectiel	Massa (g)	Schakeling
1	200	1	6,131	Parallel
2	300	1	6,131	Parallel
3	200	1	6,131	Serie
4	300	1	6,131	Serie

Tabel 7: een weergave van de uitgevoerde metingen.

De massa van het vuren van de projectielen worden ook nog gemeten. Wat er verwacht wordt is dat de massa van de projectielen na elke meting een heel klein beetje zal afnemen. Het meten van de massa wordt gedaan nadat er meerdere keren met hetzelfde projectiel is geschoten. Als de massa afgerond kan worden naar 6 gram gemiddeld, wordt de massa als 6 gram beschouwd.

Resultaten

Spanning	Voorversnellin	Vuursnelhei	Gemeten	Gemeten	Rendemen	Schakelin
g	g	d	begin	eind	t	g
volt	m/s	m/s	volt	volt		
200	19,8	28,2	200	0	1,008	Parallel
300	24	30,6	300	3	0,40044	Parallel
200	21,4	22,1	200	0	0,076125	Serie
300	18,1	20,3	300	3	0,0938761	Serie

Tabel 8: de resultaten van verschillende metingen met serie- en parallelschakelingen.

In de bovenstaande tabel is zichtbaar dat de snelheden van het projectiel hoger liggen wanneer de condensatoren in parallel staan geschakeld dan wanneer de condensatoren in serie staan geschakeld. Ook is het totale rendement van de railgun een stuk hoger wanneer de condensatoren in parallel staan geschakeld dan wanneer de condensatoren in serie staan geschakeld.

Dit kan komen door het volgende, de totale weerstand van de condensatoren is minder wanneer parallel staan geschakeld dan wanneer de condensatoren in serie staan geschakeld, zie de theorie. De inwendige weerstand van de condensatoren bij elkaar wanneer ze geschakeld staan in parallel is $8\text{ m}\Omega$, terwijl de inwendige weerstand van de condensatoren bij elkaar $32\text{ m}\Omega$ is wanneer deze in serie zijn geschakeld. Door de grotere weerstand bij een serieschakeling van de condensatoren gaat er vier keer meer warmte verloren en is de maximale stroomsterkte die de twee condensatoren kunnen leveren 4 keer zo klein. Dit betekent dat het rendement bij een serieschakeling van de condensatoren kleiner is dan bij een parallelschakeling van de condensatoren, iets wat zeer duidelijk is terug te zien in de resultaten. Ook is het zo dat in een parallelschakeling van de condensatoren er twee keer zo veel energie wordt opgeslagen dan wanneer de condensatoren in serie schakeling staan, dit heeft mogelijk ook invloed op het rendement van de railgun. Met een minder grote hoeveelheid elektrische energie ontstaat er minder plasma tussen de rails en het projectiel, hierdoor is de elektrische weerstand van het circuit een stukje hoger waardoor het rendement van de railgun ook verminderd. Vanwege de afwezigheid van consistentie in de resultaten kan er helaas geen vast verschil in rendement worden vastgesteld tussen de serieschakeling en de parallelschakeling van de condensatoren.

Conclusie

Uit de verkregen resultaten blijkt dat het beter is om de condensatoren te schakelen in parallel dan om de condensatoren in serie te schakelen. Bij een parallelschakeling blijkt het rendement van de railgun hoger te zijn op dezelfde spanningen. Dit verschil in rendement en snelheid is zodanig groot dat het echt van belang is om de condensatoren in parallel te schakelen.

Discussie

Observaties, knelpunten en oplossingen.

Wat het meest opvalt is de mate van consistentie in de resultaten. Er is geen vaste regelmatigheid in de verschillende snelheden die gemeten per spanning, bij de ene spanning zijn de gemeten snelheden van het projectiel vrij regelmatig en bij de andere spanning zijn de gemeten snelheden zeer onregelmatig. Deze onregelmatigheid kan komen door de volgende dingen.

We beginnen bij de railgun zelf. De loop van de railgun is gemaakt van hout met daarin de roestvrijstalen rails. Hout heeft een nare eigenschap van vervormen bij verschillende lucht vochtigheden en warmtes, hierdoor kan het voorkomen dat de loop over de tijd niet meer helemaal recht is na een tijd. Ook verandert de textuur van het hout aan de binnenkant van de loop een beetje elke keer na het schieten van de railgun, dit kan komen door heet plasma wat het hout aantast of door simpele slijtage van de kogel. De verandering van textuur na het schieten van de railgun kan ook invloed hebben op de regelmatigheid van de resultaten. Ook hebben de rails invloed gehad op de regelmatigheid van de resultaten. Voor de rails zijn roestvrijstalen balken gebruikt, deze stalen balken komen niet helemaal kaarsrecht uit de fabriek, nu hebben wij hierop gelet maar de balken zijn, misschien op het oog, nog steeds niet helemaal recht. Het feit dat de balken niet helemaal recht zijn kan ervoor zorgen dat de balken niet helemaal recht in de railgun kunnen liggen, waardoor de weerstand van de rails ook kan veranderen. Dit veranderen van de weerstand van de rails heeft invloed op de regelmatigheid van de resultaten. Ook het contact tussen de rails en de ogen op de accukabels was nooit helemaal hetzelfde. Na schieten op hogere spanningen zoals 300 volt en 400 volt hadden de rails de neiging om zich vast te lassen aan de ogen van de accukabel. Om de railgun te herladen en klaar te maken moest de hele loop schoongemaakt worden, dit betekent ook het losbreken van de accukabels en de rails wat voor een verandering van het contact zorgt naarmate dit vaker wordt gedaan. Ook verandert de textuur van de rails na elk schot, elk schot laat namelijk een vrij duidelijk punt achter waar te zien is wanneer het projectiel kortsluiting met de rails maakte. Deze contactpunten hebben een ruwe textuur en zijn na elk schot zeer licht opgeschuurd. Dit opschuren en deze ruwere plekken op de rails zorgen ervoor dat de weerstand die de rails uitoefenen op de kogel na elk schot een klein beetje veranderd, wat weer voor extra onregelmatigheid zorgt.

Het voorversnellingselement zorgt ook voor onregelmatigheid in de resultaten. Het is namelijk zo dat de boog zelf vervormt, het touw en de pvc-buis, na regelmatig gebruik. Dit zorgt ervoor dat de mate van voorversnelling na een tijd anders kan zijn dan oorspronkelijk, dit zorgt voor enige onregelmatigheid in de resultaten.

Ten tweede zorgen de projectielen voor inconsistenties in de resultaten. De projectielen zijn met de hand gemaakt en deze zijn dus niet allemaal hetzelfde. Om dit zo min mogelijk invloed te laten hebben op de resultaten hebben we de projectielen hergebruikt. Na het vuren van een projectiel verbuigt en verslijt het projectiel door de impact en door de magnetische krachten die plaatsvinden tijdens het vuren. Dit verbuigen zijn we zo veel mogelijk tegengegaan door middel van het goed buigen van het projectiel voor elk schot. Ook verliest het projectiel massa na elk schot, dit komt doordat een klein beetje materiaal veranderd in plasma en dus gaat het verloren. Dit gebeurt op de contactpunten tussen de kogel en de rails, deze punten zijn duidelijk zichtbaar net zoals op de rails. Ook deze punten worden schoongemaakt en opgeschuurd na elk schot en dus veranderd de textuur na elk schot een beetje op zo'n punt. Het verbuigen en de slijtage van het projectiel zorgen voor extra onregelmatigheid in de resultaten.

Om de inconsistentie in de resultaten te verminderen en om de prestaties van de railgun zelf te verbeteren kan het volgende gedaan worden.

Ten eerste moet de hele railgun van een ander materiaal gemaakt worden dan hout, bijvoorbeeld een harde kunststof. Deze kunststof wordt dan door middel van frezen in de juiste vorm gebracht. Door het gebruik van een stof die niet vervormd en niet snel slijt zullen de onregelmatigheden die door het hout veroorzaakt worden geëlimineerd worden. Door het in vorm brengen van de kunststof door middel van frezen zijn de afmetingen zeer precies wat ook onregelmatigheden in resultaten zal verminderen.

De loop zelf kan een stuk korter gemaakt worden, hierdoor wordt de weerstand van de rails die uitgeoefend wordt op het projectiel een stuk lager. Door deze verlaagde weerstand zal het rendement van de railgun toenemen. Ook is het minder duur om de rails te vervangen omdat deze een stuk korter zijn. De manier waarop de rails verbonden zijn met de ogen van de accukabel kan ook veranderd worden, dit kan misschien anders gedaan worden door middel van bijvoorbeeld moeren en bouten.

Het voorversnellingselement kan ook veranderd worden. Het kruisboogstelsel kan veranderd worden naar een luchtdruk systeem. Met een luchtdruk systeem kan je in combinatie met een drukmeter elke keer dezelfde mate van voorversnelling krijgen. Een luchtdruk systeem elimineert vrijwel alle onregelmatigheden die een kruisboogstelsel veroorzaakt.

De projectielen moeten ook op een andere manier verkregen worden. Dit kan gedaan worden door middel van frezen. Door het in vorm brengen van projectielen door middel van frezen zijn de afmetingen zeer precies wat onregelmatigheden in resultaten zal verminderen. Ook moeten de projectielen bij volgende testen niet hergebruikt worden.

Conclusie

Hoofdvraag: In hoeverre is het mogelijk om een railgun te maken, binnen de mogelijkheden waarover wij bezitten?

Om de hoofdvraag te beantwoorden, ‘In hoeverre is het mogelijk om een railgun te maken, binnen de mogelijkheden waarover wij bezitten?’ kan er worden beantwoord dat het zeker mogelijk is. In dit onderzoek is het gelukt om een railgun te maken die door middel van de Lorentzkracht als ‘driving force’, een projectiel met een hogere snelheid dan de snelheid van het voorversnellingselement af te vuren. Hoe goed de railgun werkt is echter redelijk te betwijfelen. In het leger en in de maatschappij geldt, dat een product bij bepaalde condities altijd hetzelfde resultaat moet geven. Of iets specifieker gezegd, als er deze hoeveelheid spanning in de condensatoren zitten, dan moet er zoveel kinetische energie vrijkomen. Omdat de apparatuur in dit onderzoek vaak zelfgemaakt of van huis tuin en keuken formaat was, is het ook logisch dat de verkregen resultaten enorm van elkaar verschillen. Daarom is het antwoord op de hoofdvraag van dit onderzoek: het is gelukt om een railgun te maken die in ieder geval het projectiel versnelt tussen de rails, maar er is nog veel wat er in de railgun verbeterd kan worden om meer consistentie te krijgen.

Persoonlijke reflectie

Max van 't Hart:

Wat ik heb geleerd is dat het maken van een functionerende railgun mogelijk is. Ik heb geleerd dat alle onderdelen van een railgun met veel precisie gemaakt moet worden om een railgun met regelmatige prestaties te krijgen. Ook ben ik erachter gekomen dat er veel tijd nodig is voor het maken van een railgun en voor het verzamelen van de materialen van de railgun. Ook heb ik geleerd dat grote hoeveelheden stroom niet eng zijn om mee te werken als je veilig met die stroom werkt door bijvoorbeeld veiligheidshandschoenen aan te hebben. Ook zijn we tijdens het testen van de railgun achter een paar verschillende, kleine ontwerpfouten gekomen zoals de rails die naar voren geschoven moeten worden. Ten slotte is de samenwerking tussen Fedde in mij zeer soepel verlopen, van het testen en maken van de railgun tot het schrijven van het verslag. Al in al heb ik veel plezier gehad in het maken van dit PWS.

Fedde Beekman:

Als ik terugkijk op het maken van de railgun dan ben ik eigenlijk best trots op mezelf. Het is ons gelukt om een functionerende railgun te maken met het materiaal wat we hadden. Wat ik tijdens het maken heb geleerd is dat het bouwen van een railgun toch uiteindelijk meer werk is dan dat je van tevoren zou hebben gedacht. Er zijn veel kleine specifieke kenmerken die echt precies moeten kloppen, waar je eigenlijk pas achter komt op het moment dat je de railgun bouwt. We hebben ook tijdens het bouwen snel moeten anticiperen op problemen die we zagen en ik ben heel tevreden op de manier waarop er op de problemen is gereageerd. De planning had misschien iets beter gekund in de zin dat we misschien al iets eerder het materiaal hadden kunnen verzamelen en eerder hadden kunnen bouwen. Maar als ik kijk naar hoe we het uiteindelijk in de beperkte tijd hebben gepland, is dat goed gegaan. Ik ben tevreden over de samenwerking met Max en ik had ook echt het gevoel dat onze sterke punten goed op elkaar aansloten.

Geleerde lessen

Tijdens het doen van de experimenten zijn er punten aan het licht gekomen, die direct zijn meegenomen in het ontwerp van de railgun en projectielen om de efficiëntie van de railgun te verbeteren.

1. Het projectiel. Van een verend systeem naar lage wrijving en ‘bijna contact’. Het oorspronkelijke idee om het projectiel goed contact te laten maken met de rails door middel van een “verend” projectiel hebben we geschrapt. Het veersysteem is een juist idee, alleen op de schaal waarop wij de railgun hebben gemaakt zorgt het voor te veel weerstand. Tijdens het testen zijn we overgestapt op het idee dat de kogels de rails zeer licht aanraken, het plasma wat dan ontstaat tussen de rails en het projectiel zorgt dan voor goed contact tussen de rails en het projectiel.
2. Positie Contactogen van accu kabels op de rails. Erachter gekomen dat dit echt aan het begin moest. Tijdens het testen zijn we erachter gekomen dat de positionering van de rails op de accukabels niet optimaal was. Als de ogen van de accukabels namelijk niet op het puntje van de rails waren aangesloten en het projectiel maakte vroeg contact met de rails, liep de stroom in de verkeerde richting, wat voor een afremmende lorentzkracht zorgde. Dit hebben we opgelost door de rails ongeveer 1 centimeter de loop uit te schuiven, hierdoor was het contact tussen de rails en de ogen van de accukabels echt op het uiteinde van de rails waardoor de stroomrichting niet tegen de richting van het projectiel in kon gaan lopen.
3. Lengte van de rails. De gekozen lengte van 33 cm, bleek niet altijd optimaal. Meestal was het ontladingsmoment aan het begin van de rails, waardoor de lengte van de loop vooral vertraging veroorzaakte.

Referenties

ondertitel.

Video's

Making a railgun and then testing it - *Hacksmith industries*

Link: <https://www.youtube.com/watch?v=fKEaDhDTciQ>

Backyard RAILGUN: Field Testing the 250 lb Electric Gun, 27,000 Joule (max) - *Ziggy Zee*

Link: <https://www.youtube.com/watch?v=vAs9EHtKfVc>

Capacitors Explained – The basics how capacitors work working principle – *The engineering mindset*

Link: <https://www.youtube.com/watch?v=X4EUwTwZ110>

How does a Transformer work - Working Principle electrical engineering - *The engineering mindset*

Link: <https://www.youtube.com/watch?v=UchitHGF4n8>

Bronnen:

Allain, R. (2017, 3 juni). *The Physics of the Railgun*. Wired.

<https://www.wired.com/2014/08/the-physics-of-the-railgun/>

Evans, P. (2020a, mei 31). *Capacitors Explained*. The Engineering Mindset.

<https://theengineeringmindset.com/capacitors-explained/>

Evans, P. (2020b, mei 31). *How Transformers Work*. The Engineering Mindset.

<https://theengineeringmindset.com/how-transformers-work/>

McFarland, J., & McNab, I. R. (2003). A long-range naval railgun. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(1), 289–294. <https://doi.org/10.1109/tmag.2002.805924>

McNab, I. R., Stefani, F., Crawford, M., Erengil, M., Persad, C., Satapathy, S., Vanicek, H., Watt, T., & Dampier, C. (2005). Development of a naval railgun. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(1), 206–210. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.839285>

Wikipedia contributors. (2020a, december 7). *Breakdown voltage*. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Breakdown_voltage

Wikipedia contributors. (2020b, december 8). *Paschen's law*. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Paschen%27s_law

Wikipedia contributors. (2020c, december 8). *Railgun*. Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Railgun>

Wikipedia-bijdragers. (2020, 15 mei). *Plasma (aggregatietoestand)*. Wikipedia.
[https://nl.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(aggregatietoestand\)#:%7E:text=In%20de%20natuurkunde%20wordt%20onder,het%20bose%2Deinsteincondensaat%20genoemd](https://nl.wikipedia.org/wiki/Plasma_(aggregatietoestand)#:%7E:text=In%20de%20natuurkunde%20wordt%20onder,het%20bose%2Deinsteincondensaat%20genoemd)

L. Xu and D. Wu, "Relating a Small-Scale Experiment to a Full-Scale Railgun Using Simulation and Similarity Theory," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 12, pp. 9749-9756, Dec. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2826453.

Andere bronnen:

- BINAS 6^{de} editie