

Hyperloop

Een profielwerkstuk

Reinier van der Leer
151767

Daan van Zwienen
152572

Anno 2016/2017 n. Chr.

Inhoudsopgave

1	Begin van het ontwerpproces	2
1.1	Stap 1: Introductie en probleemstelling	2
1.2	Research en achtergrondinformatie	3
1.2.1	Levitatietechnieken	3
1.2.2	Aandrijvingstechnieken	6
2	Ontwerpplan	7
2.1	Stap 2: Programma van Eisen en mogelijke oplossingen	7
2.2	Stap 3: Deeluitwerkingen	8
2.2.1	Eis 1: Energie-efficiëntie	8
2.2.2	Eis 2: Laadcapaciteit	9
2.2.3	Eis 3: Magneet-efficiëntie	10
2.2.4	Eis 4: Efficiënte aandrijving	11
2.2.5	Eis 5: Minimale kosten	12
2.3	Ontwerpvoorstel	13
2.4	Prototypes en tests	15
2.4.1	Basisbeginselen, maatvoering en 3D-modellen	15
2.4.2	Testen	16
2.4.3	De lineaire motor	16
2.4.4	Revisie	17
2.5	Conclusie	17

Hoofdstuk 1

Begin van het ontwerpproces

1.1 Stap 1: Introductie en probleemstelling

In de huidige maatschappij waarin het belangrijk is om zoveel mogelijk tijd nuttig te besteden, wordt steeds gezocht naar snellere, zuinigere manieren van vervoer. Er zijn reeds vier vormen van vervoer: schepen, vliegtuigen, treinen en natuurlijk auto's. Al deze bestaande vormen van vervoer hebben echter een nadeel: ze zijn traag of duur en milieuvriendelijk of zelfs een combinatie van beiden. Daarom is er behoefte naar een nieuwe, vijfde vorm van vervoer. Deze vorm van vervoer moet niet alleen snel zijn, maar ook betaalbaar en duurzaam.

Die behoefte ontging *Elon Musk*, een succesvolle Amerikaanse zakenman en ondernemer, niet. In augustus 2013 publiceerde hij met zijn bedrijf **SpaceX** een 57 pagina's tellende whitepaper¹ waarin hij zijn ideeën over het transport van de toekomst uitgebreid uiteenzette onder de naam *Hyperloop Alpha*². Hij stelde zich buistransport voor, met capsules aangedreven door lineaire motoren en zwevend op luchtkussens, omgeven door een tunnelbuis waarin een lage druk heerst. Dit concept werd pas echt opgepakt toen **SpaceX** in Juni 2015 de *Hyperloop Pod Competition* aankondigde. Iedereen die dat maar wilde mocht een voertuig, een zogenaamde **Pod**, ontwerpen, om die in Januari 2017 op een door **SpaceX** gebouwd testcircuit te mogen testen. Honderden partijen van over de hele wereld, waaronder universiteiten, bedrijven en start-ups, maar ook particulieren, namen deel aan deze competitie³. Uit de meer dan duizend partijen die zich oorspronkelijk inschreven kwamen er uiteindelijk zo'n 120 door de ontwerpfase, waarvan er in Januari 2016 uiteindelijk 24 geselecteerd werden om hun ontwerp te verwezenlijken en te testen op de nog te bouwen testfaciliteit van **SpaceX**. Deze zeer interessante en ook snelle ontwikkelingen vonden wij interessant om te volgen, en aangezien we nog een onderwerp voor een Profielwerkstuk moesten hebben, was deze keuze snel gemaakt.

Probleemstelling

Huidige vormen van vervoer zijn niet efficiënt genoeg. Ze zijn óf duur óf traag óf milieuvriendelijk of een combinatie daarvan. Er is een nieuwe manier van vervoer nodig die duurzaam en efficiënt is.

Doelstelling

Wij willen een proof of concept maken van een techniek die nog in ontwikkeling is om bovenstaande problemen op te lossen. Deze techniek is de Hyperloop, zoals die in de inleiding omschreven is. We zijn van plan een werkend schaalmodel te maken van de Hyperloop. Dit houdt in dat we een (miniatuur) magneetzwefstrein gaan construeren die werkt op basis van inductie.

¹Elon Musk, (Hyperloop Alpha) <http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf>

²bron: <http://www.spacex.com/hyperloopalpha>

³bron: https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperloop_pod_competition

1.2 Research en achtergrondinformatie

Het wiel. Een duizenden jaren oude uitvinding die duizenden jaren ook nog eens onveranderd is gebleven. Wanneer en door wie het wiel is uitgevonden, is tot op heden niet duidelijk. Wat we wel weten is dat het wiel destijds de gangbare transportvorm, de slee, versloeg. Met zijn veel kleinere weerstand bleek het wiel een stuk efficiënter. Nu, in 2016, wordt het wiel nog steeds veel gebruikt, zowel in personenauto's als in openbare vervoersvormen als treinen en metro's. Het is echter tijd voor verbetering. Wetenschappers zoeken al jaren naar betere, efficiëntere vormen van verplaatsing dan het wiel. Vanaf het begin van de twintigste eeuw is men al bezig een nieuwe toepassing van magneten te ontdekken: MagLev of magnetic levitation. Deze vorm van vervoer reduceert de wrijving aanzienlijk doordat er geen contact is met rails. Al snel werden er verschillende patenten omtrent MagLev verkregen, en in de jaren tachtig werd de eerste commerciële zweeftrein ingezet in Birmingham, Engeland⁴. Na elf jaar werd die zweeftrein een halt toe geroepen na aanhoudende problemen met de elektronische systemen. De zweeftrein nam echter toe in populariteit en het aantal commerciële zweeftreinen groeide. Vandaag de dag zijn zweeftreinen sterk in opkomst, en daarmee zijn ook technieken om ze zo efficiënt mogelijk te maken volop in ontwikkeling. Er zijn grofweg twee zweeftechnieken die veel gebruikt worden, deze zullen we in de volgende paragraaf verder toelichten.

1.2.1 Levitatietechnieken

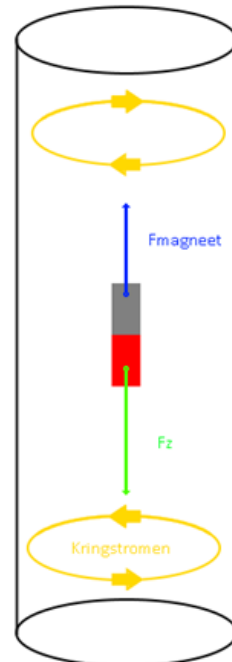
Electromagnetic suspension (EMS), een vorm van magnetische levitatie, houdt in dat magneten aan de trein (die onder de rails zijn gebogen) een aantrekkingskracht uitoefenen op permanente magneten in de rails. Gezien de instabiliteit van magnetische aantrekking is er een elektronisch regelsysteem aanwezig dat de trein op de juiste hoogte houdt. Deze techniek heeft het voordeel dat de magnetische velden binnen en buiten de voertuigen beperkt blijven, in tegenstelling tot EDS. Verder werkt EMS ook bij stilstand, waardoor er voor lage snelheden geen wielen nodig zijn.

Electrodynamic suspension (EDS), ook een vorm van MagLev, berust op elektromagnetische inductie. Bij een bepaalde snelheid wekken magneten in de trein inductiestromen op in de geleidende rails. Deze stromen creëren een omgekeerd magnetisch veld, waardoor afstoting van de magneten plaatsvindt en de trein dus gaat zweven.

Air bearing suspension is een derde techniek die wordt gebruikt voor zweefdoeleinden. Tot op heden is deze techniek nog niet toegepast in commerciële zweeftreinen. De levitatie wordt hier verkregen door middel van samengeperste lucht onder de pod te stuwen. Het principe is hetzelfde als dat van een hovercraft. De samengeperste lucht wordt via een intake naar een compressor gebracht en vervolgens met hoge snelheid onder de pod geblazen. Omdat dit echter zeer moeilijk is om op kleine schaal na te maken zullen we ons vooral focussen op magnetische levitatie.

Vergelijking

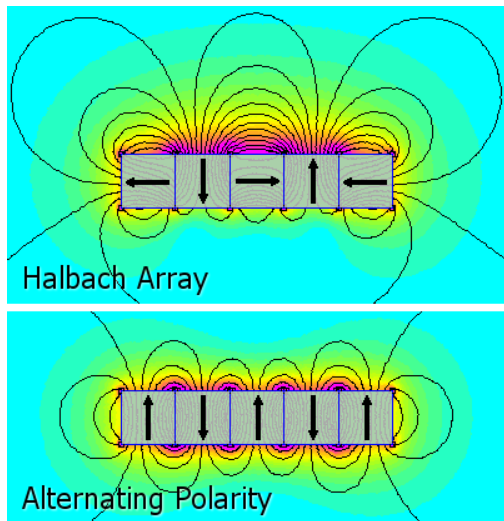
Wat is nu precies de natuurkundige achtergrond hiervan? Bij de eerste bovengenoemde techniek (EMS) is dit duidelijk: tegengestelde polen trekken elkaar aan, gelijke polen stoten elkaar af. Een elektronisch regelsysteem met elektromagneten houdt de afstand tussen de pod en de rails in de gaten. Het principe waar de tweede zweefmethode (EDS) op berust is echter wat gecompliceerder. De natuurkunde hierachter valt uit te leggen met de wet van Lenz⁵, een bijzonder geval van de wet van Faraday. De wet van Lenz stelt: de richting van de inductiestroom die door een bewegend magnetisch veld is ontstaan in een geleider is zo gericht dat het een magnetisch veld zal genereren die tegengesteld gericht is aan het magnetische veld waardoor die inductiestroom is ontstaan. Een bekend voorbeeld hiervan is dat van een magneet in een koperen buis: laat een staafmagneet in een geleidende buis naar beneden vallen en hij zal vertraagd worden door het tegenwerkende magneetveld.



⁴bron: https://nl.wikipedia.org/wiki/Magneetzweeftrein#Commerci.C3.ABle_uitbating

⁵bron: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lenz's Law>

Terug naar de Hyperloop: magneten in de pod creëren een inductiestroom in de aluminium rails. Vervolgens ontstaat er een tegengesteld magneetveld wat de magneten in de pod omhoog duwt. Om dit te bereiken zijn, naast het aluminium in de baan, ook magneten in de pod nodig. Nu zouden we gewoon hele sterke magneten kunnen gebruiken, maar dit levert een redelijk groot probleem op: sterke magneten in de pod zouden een gevaar kunnen vormen voor passagiers met pacemakers of andere gevoelige apparaten met spoeltjes of magnetische opslagmedia erin; er bevindt zich namelijk ook een sterk magnetisch veld boven het onderstel. Daarnaast moet de minimale snelheid om de trein in de lucht te krijgen bij gebruik van magneten die ook nog bruikbaar zijn qua formaat, relatief hoog zijn. Een oplossing voor deze beide problemen is de zogenaamde Halbach array⁶. Dit is een speciale rangschikking van magneten waarbij aan de ene kant van de opstelling het magnetische veld wordt geminimaliseerd en aan de andere kant het veld wordt versterkt. Dit is gevisualiseerd in de volgende afbeelding:^{7,8}



Het verhogen van de snelheid zorgt voor een sterker tegengesteld magneetveld; De inductiespanning U op een bepaald moment is evenredig met de grootte van de magnetische fluxdichtheid B (in tesla), evenredig met de lengte van de geleider in het magnetische veld l (in meter) en evenredig met de snelheid v van de geleider ten opzichte van het magnetische veld:

$$U = -B * l * v$$

Dus als de snelheid toeneemt, neemt de inductiespanning ook toe. In deze formule zien we tevens dat dit ook geldt voor de magnetische fluxdichtheid B . De magnetische fluxdichtheid wordt als volgt berekend:

$$B = \mu * H$$

Waarin H de veldsterkte is en μ de magnetische permeabiliteit van het materiaal is. Sterkere magneten hebben een sterker veld om zich heen. In de bovenstaande formule zien we dat de veldsterkte evenredig is met de magnetische fluxdichtheid, die op zijn beurt weer evenredig is met de inductiespanning in de eerste formule. Een grotere veldsterkte (sterkere magneet) leidt dus tot een hogere inductiespanning en dus een groter tegengesteld magneetveld. Hierdoor wordt de laadcapaciteit verhoogd.

⁶bron: https://en.wikipedia.org/wiki/Halbach_array

⁷In dit voorbeeld wordt het magneetveld aan de bovenkant van de array versterkt en aan de onderkant verzwakt.

⁸bron: <https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=halbach-arrays>

Om wat meer een beeld te krijgen van de invloed van de grootte van de magneten op de magnetische fluxdichtheid rondom de magneet, zochten we een formule op waarmee dit kan worden berekend. Hier blijken geen simpele formules voor te zijn, maar een formule⁹ waarmee de fluxdichtheid op verschillende punten bij blokmagnetten kan worden berekend is:

$$B = \frac{B_r}{\pi} \left[\arctan \left(\frac{LW}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}} \right) - \arctan \left(\frac{LW}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}} \right) \right]$$

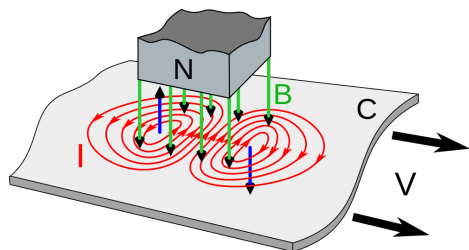
Deze formule kan op verschillende manieren worden ingevuld om grafieken te verkrijgen die verbanden beschrijven tussen o.a. de grootte van een magneet, de afstand vanaf een pool, de veldsterkte en de magnetische remnantie.

Tabel 1.1: Grootheden en eenheden bij bovenstaande formules

Symbol	Grootheid	Eenheid
B_r	Remnantie ¹⁰	Tesla (T)
z	Afstand ¹¹	lengte-eenheid
L	Lengte ¹²	lengte-eenheid
W	Breedte	lengte-eenheid
D	Diepte	lengte-eenheid

Kringstromen

In ons ontwerp spelen kringstromen of wervelstromen een essentiële rol. Met kringstromen bedoelen we elektrische stromen in een geleidend voorwerp, welke in een kring door een bepaald vlak in het voorwerp lopen. Deze stromen worden opgewekt wanneer een geleider zich bevindt in een bewegend magnetisch veld. Bij lage snelheid vormen deze kringstromen vooral een tegenwerkende kracht. Naarmate de snelheid echter toeneemt, neemt ook F_{lift} toe: er wordt steeds meer lift gegenereerd. De drag neemt toe tot aan de zogenaamde *transition speed*¹³. Nadat deze snelheid bereikt is, neemt F_{drag} af.¹⁴



Figuur 1.1: Kringstromen I bij het bewegen van geleidend oppervlak C door magneetveld B (groen), waarbij de kringstromen weer een eigen magneetveld (blauw) genereren.

⁹bron: <https://www.supermagnete.de/eng/faq/How-do-you-calculate-the-magnetic-flux-density>

¹⁰De magnetische remnantie B_r is afhankelijk van het materiaal: onze magneten hebben een remnantiegraad van N42, de remnantie is dan 1,29 tot 1,32 Tesla

¹¹Afstand op de symmetrie-as tot het oppervlak van een pool

¹²Afmeting in de richting van de symmetrie-as; de as die van de noord- naar de zuidpool loopt

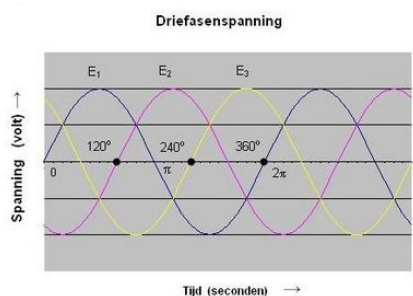
¹³bron: <https://en.wikipedia.org/wiki/Inductrack#Description>

¹⁴We hadden over de relatie tussen snelheid en de *lift:drag ratio* al wel wat hints gekregen van een (anonieme) bron, maar we vonden er pas een uur voordat we het inleverden ook een schriftelijke bron voor, namelijk Facebook Wikipedia.

1.2.2 Aandrijvingstechnieken

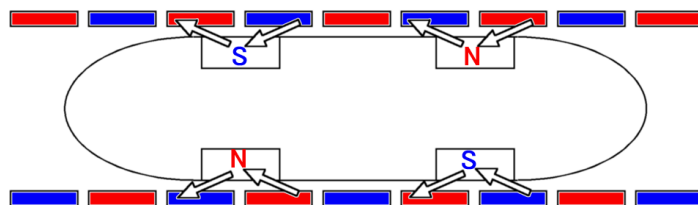
De aandrijving van de pod is ook een vak apart. Omdat er geen contact is tussen de pod en de omgeving, moet de aandrijving ook werken met behulp van magnetische velden. We hebben dus een lineaire motor nodig die werkt op basis van magnetisme. Er zijn twee manieren om dit te doen, deze zullen we hieronder verder toelichten.

Het eerste alternatief is een lineaire inductiemotor. Deze motor werkt, zoals de naam al doet vermoeden, op basis van inductie. Hierboven is al grotendeels uitgelegd hoe inductie werkt. Een lineaire motor bestaat uit een 'stator' en een 'rotor'¹⁵. In dit geval is de stator¹⁶ geïnstalleerd in de buis en is de rotor¹⁷ bevestigd aan pod. De stator bevat steeds rangschikkingen van drie spoelen. Elke spoel draagt een wisselstroom, die sinusvormig verandert. De elektrische stromen in de drie spoelen verschillen 120 graden in fase. Dit verschijnsel wordt *driefasestroom* genoemd. Doordat de drie spoelen ieder 120 graden in fase verschillen, ontstaat een bewegend magneetveld. Het bewegend magneetveld dat is ontstaan door de driefasestroom zorgt vervolgens voor kringstromen in de geleidende rotor in onze pod, waardoor er een tegengericht magnetisch veld ontstaat. Hierdoor versnelt de pod. De snelheid van de pod is dus de snelheid van het magnetische veld. Deze snelheid kan verhoogd of verlaagd worden door de frequentie van de driefasestroom te wijzigen.



Een tweede manier van elektromagnetisch versnellen is de lineaire synchrone motor¹⁸. Bij dit systeem zijn er permanente magneten in de pod en elektromagneten langs de baan aanwezig. Door de magneten langs de baan zo aan te sturen dat ze op het juiste moment van polariteit wisselen worden de magneten in de pod versneld. Dit systeem is vergelijkbaar met het versnellen van een deeltje in een deeltjesversneller.

Figuur 1.2: Een diagram met daarin drie verschillende AC grafieken die één derde fase verschillen van elkaar



Figuur 1.3: Een schematische weergave van een lineaire synchrone motor

¹⁵zie figuur 2.3 op bladzijde 14

¹⁶de stator is het statische deel van een motor

¹⁷de rotor is het gedeelte van een motor dat beweegt

¹⁸zie figuur 1.2

Hoofdstuk 2

Ontwerpplan

2.1 Stap 2: Programma van Eisen en mogelijke oplossingen

Om op een systematische manier een ontwerp te kunnen maken moesten we eerst een programma van eisen opstellen waarin we de eigenschappen vastleggen die ons uiteindelijke product moet hebben. Verder wordt hierin voor iedere eis een eventuele controle beschreven en wordt aangegeven wie de belanghebbende is voor iedere eigenschap.

Tabel 2.1: Programma van Eisen

Eisen	Concreet	Controle	Belanghebbenden
1. Energie-efficiënt	Weerstand minimaliseren, efficiënte aandrijving ¹	Max. 10 kWh per passagier-km	Exploiteur, ijsberen en milieugekkies
2. Voldoende laadcapaciteit	Moet 2x zijn eigen gewicht kunnen dragen	Testen met wat extra gewicht erin	(zware) passagiers
3. Magneten zo gewichtsefficiënt mogelijk²	Max 25% van het gewicht mag uit magneten bestaan	Wegen	Passagier, fabrikant en exploitateur
4. Efficiënte aandrijving	Minimaal 75% rendement	Elektrische input en verkregen impuls omrekenen en vergelijken	Exploiteur, ijsberen en milieugekkies
5. Materiaalkosten zo laag mogelijk	Zo veel mogelijk 3D-printen	-	Producent/bouwer en exploitateur

¹Zie Eis #4

²Bij gebruik van permanente magneten, deze dan zo klein en krachtig mogelijk

2.2 Stap 3: Deeluitwerkingen

2.2.1 Eis 1: Energie-efficiëntie

Tabel 2.2: Vergelijking van de opties voor het voldoen aan **Eis nr.1: Energie-efficiëntie**

Voordelen per concept				
ElectroDynamic Suspension ³	ElectroMagnetic Suspension ⁴	InducTrack ⁵	Air bearing suspension	Mild vacuüm in tunnelbuis
· Geen rolweerstand · Van nature stabiele zweving · Geen actieve systemen nodig voor stabilisatie · Blijft werken bij stroomuitval · Grote laadcapaciteit mogelijk	· Geen rolweerstand · Magnetische velden in het voertuig kleiner dan bij EDS · Geen wielen nodig voor lage snelheden · Commercieel bewezen, reeds beschikbare en gebruikte technologie	· Geen rolweerstand · Net als EDS van nature stabiel, geen actieve systemen nodig voor zweving/stabilisatie · Blijft werken bij stroomuitval · Lage take-off snelheid · Magnetische velden in het voertuig blijven beperkt	· Minimale magnetische velden door het ontbreken van een magnetisch zweefstelsel	· Minder luchtweerstand · Hogere snelheid mogelijk
Nadelen per concept				
EDS	EMS	InducTrack	Air bearing suspension	Vacuümbuis
· Heeft wielen nodig voor lage snelheden · Relatief lange "startbaan" nodig om op te stijgen · Relatief hoge snelheid nodig voor take-off (~150 km/u) · Supergeleiders nodig als "permanente" magneten in het voertuig · Afzonderlijk aandrijvingssysteem nodig	· Van nature instabiel → elektronische systemen nodig voor stabilisatie · Heeft veel of heel dure magneten nodig → hoge kosten · Hoog energieverbruik voor zweving	· Wielen nodig bij lage snelheid	· Ingewikkelde elektronische systemen nodig + intercooler, compressor fan en compressor motor → relatief hoog gewicht · Lucht nodig, maar de Hyperloop-buis is vacuüm. Hierdoor is een nog krachtigere compressor nodig = nog meer extra gewicht.	· Compleet vacuüm heeft zeer sterke pompen nodig · Klein gat in de buis zorgt voor vollopen volledige buis met lucht

³Vorm van magnetische levitatie, verder afgekort tot *EDS*

⁴Vorm van magnetische levitatie, verder afgekort tot *EMS*

⁵Toepassingsvorm van EDS; Magnetische levitatie

2.2.2 Eis 2: Laadcapaciteit

Tabel 2.3: Vergelijking van de opties voor het voldoen aan **Eis nr.2: Laadcapaciteit**

Voordelen per concept		
Hoge snelheid (EDS en Inductrack)	Sterke magneten	Lichte materialen (3d-printed)
· Grotere afstotingskracht → maximaal draaggewicht omhoog	· Grotere afstotingskracht → maximaal draaggewicht omhoog	· Gewicht pod gaat omlaag → meer draagvermogen beschikbaar voor vracht · Deze techniek brengt relatief weinig extra kosten met zich mee
Nadelen per concept		
Hoge snelheid (EDS en Inductrack)	Sterke magneten	Lichte materialen (3d-printed)
· Langere versnellings- en remweg	· De pod wordt zwaarder door het extra gewicht van de permanente magneten · "Rare earth magnets" zijn relatief duur	· Zwakker dan andere materialen zoals hout, metaal en koolstofvezel

2.2.3 Eis 3: Magneet-efficiëntie

Tabel 2.4: Vergelijking van de opties voor het voldoen aan **Eis nr.3: Magneet-efficiëntie**

Voordelen per concept			
Ferrietmagneten gebruiken	Ferrietmagneten in een Halbach-array gebruiken	Neodymium-magneten gebruiken	Neodymium-magneten in een Halbach-array gebruiken
· Licht materiaal · Sterk materiaal, bestand tegen een stootje · Relatief goedkoop	· Licht materiaal · Sterk materiaal, bestand tegen een stootje · Relatief goedkoop · Versterkt magneetveld, maar geen extra magneet-gewicht	· Sterkste magneten op de markt⁶ · Beschikbaar in kubusvorm (makkelijker te implementeren) · Veel kleiner dan ferrietmagneten met eenzelfde houdkracht · Shiny (esthetisch)	· Sterkste magneten op de markt · Versterkt magneetveld, maar geen extra magneet-gewicht · Beschikbaar in kubusvorm⁷ · Veel kleiner dan ferrietmagneten met eenzelfde houdkracht · Shiny (esthetisch)
Nadelen per concept			
Ferrietmagneten gebruiken	Ferrietmagneten in een Halbach-array gebruiken	Neodymium-magneten gebruiken	Neodymium-magneten in een Halbach-array gebruiken
· Relatief zwak magneetveld in vergelijking met Neodymium magneten van hetzelfde formaat · Slijten snel bij contact	· Relatief zwak magneetveld in vergelijking met een Halbach-array van Neodymium magneten van hetzelfde formaat · Slijten snel bij contact	· Neodymium is heel bros en de nikkel coating is heel dun → ze kunnen slecht tegen directe botsingen met harde voorwerpen · Moeilijker te verwerken⁸ · Relatief zwaar in vergelijking met ferrietmagneten van hetzelfde formaat · Relatief duur	· Neodymium is heel bros en de nikkel coating is heel dun → ze kunnen slecht tegen directe botsingen met harde voorwerpen · Afhankelijk van de grootte van de magneten extreem moeilijk te verwerken⁹ · Relatief zwaar in vergelijking met ferrietmagneten van hetzelfde formaat · Relatief duur

⁶afhankelijk van de remnantiegraad

⁷Dit is vereist voor het bouwen van een Halbach-array, want een magneet moet dezelfde verhoudingen hebben als deze een kwartslag wordt gedraaid

⁸Neodymium magneten zijn heel sterk voor hun formaat. Door de grote kracht die ze op elkaar en op ferromagnetische voorwerpen kunnen uitoefenen, kunnen ze soms lastig te hanteren en verwerken zijn.

⁹Doordat Neodymium magneten zo sterk zijn is het lastig om ze in onnatuurlijke posities te dwingen. Ze willen in de lengterichting of zijdelings tegen een tegengestelde pool zitten, en als ze in een andere positie worden gedwongen levert dat grote afstotingskrachten op.

2.2.4 Eis 4: Efficiënte aandrijving

Tabel 2.5: Vergelijking van de opties voor het voldoen aan **Eis nr.4: Efficiënte aandrijving**

Voordelen per concept		
Accelerator in het midden van de baan die met draaiende wieltes de pod vooruit duwt	Lineaire inductie-motor	Lineaire synchrone motor
· Nauwelijks slip · Grote krachtoverbrenging mogelijk · Eenvoudig aan te sturen	· Relatief eenvoudig aan te sturen · Geen maximumsnelheid · Commercieel bewezen technologie	· Iets efficiënter dan een Lineaire Inductiemotor · Geen maximumsnelheid
Nadelen per concept		
Accelerator in het midden van de baan die met draaiende wieltes de pod vooruit duwt	Lineaire inductie-motor	Lineaire synchrone motor
· Werkt alleen voor lage snelheden, verlies groot bij hogere snelheden¹⁰ · Contact → wrijving	· Minder efficiënt dan beide andere opties · Grotere marge in de stator → verlies neemt kwadratisch toe in verhouding met de breedte van de gleuf in de stator	· Heeft een feedback loop nodig voor timing · Meer permanente magneten nodig in de pod > hogere kosten

¹⁰Op volledige grootte tot zo'n 200km/u

2.2.5 Eis 5: Minimale kosten

Tabel 2.6: Vergelijking van de opties voor het voldoen aan **Eis nr.5: Minimale kosten**

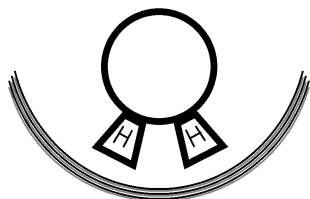
Voordelen per concept			
Gerycyclede materialen	Kostbare materialen beperkten tot de pod	Goedkope (generieke) materialen gebruiken	Accelerator-stations plaatsen
· Kostenbesparing · Duurzaam	· Minder materiaalkosten → pod is een relatief kleiner onderdeel van het geheel	· Minder kosten door materiaaltransport	· Veel minder spoelen en electronica nodig voor lineaire motor
Nadelen per concept			
Gerycyclede materialen	Kostbare materialen beperkten tot de pod	Goedkope (generieke) materialen gebruiken	Accelerator-stations plaatsen
· Hebben niet altijd de gewenste eigenschappen	· Pod wordt zo duurder	· Niet altijd handig voor andere belangen	· Snelheid tijdens de rit is niet 100% constant

2.3 Ontwerpvoorstel

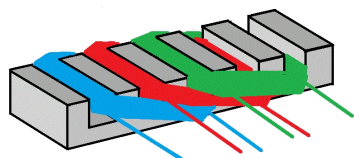
Om een zo klein mogelijke weerstand te behalen, willen wij InducTrack-technologie gebruiken om de pod te laten zweven. Het heeft als voordelen dat het een grotere flux genereert door de Halbach-array waardoor de lift-off bij lagere snelheden plaatsvindt. Voor de Halbach-array gebruiken we per ski 5 10x10x10mm neodymium (NdFeB) magneten met remnantiegraad N42. Elke ski wordt ongeveer 2 cm breed en zo'n 9 cm lang. De skis en de pod zelf willen we verkrijgen door de 3d-printer van school te gebruiken.

Een schets van de bovenkant van de pod is te zien in figuur 2.1, met de pijl in de de richting die de pod gaat. De vier skis bevatten ieder een Halbach-array; pijlen geven de richting van het magneetveld aan. De kruisjes stellen de onderkant (noordpool) van de magneet voor en de rondjes stellen de bovenkant voor. De achterkant van de pod is speciaal ontworpen om wervelingen te voorkomen, aangezien deze nadelig zijn omdat ze kinetische energie aan de pod onttrekken.

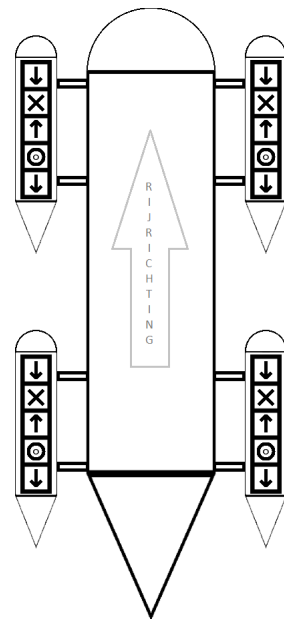
Wij zijn van plan om de baan in de vorm van een halve maan te maken, zie figuur 2.2. Doordat de zwaartekracht de pod van nature naar het laagste punt van de baan trekt, blijft deze netjes in het midden. Het oppervlak willen we bekleden met aluminium lagen (strakgespannen aluminiumfolie), afgewisseld met isolerende lagen. In deze aluminium lagen ontstaan dan vervolgens de kringstromen.



Figuur 2.2: schematische weergave van de met gelaamineerd aluminium beklede baan met een pod



Figuur 2.3: Een driedfasenopstelling; de spoelen zijn om de ijzeren kern gewikkeld en overlappen elkaar deels

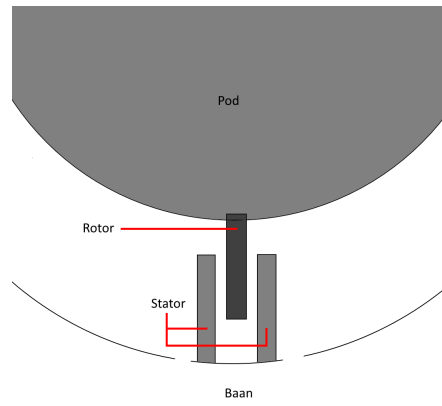


Figuur 2.1: semi-schematische weergave van de pod, gezien vanaf de bovenkant

Voor de aandrijving willen we gebruik maken van een lineaire inductiemotor. Dit doen willen we doen door middel van een driedfasestroom. We zijn van plan een rangschikking van kernen te maken waaromheen de spoelen liggen waardoor de driedfasenstroom doorheen wordt geleid. Een schets van de kernen met daar omheen de spoelen (de stator) is te zien in figuur 2.4 op de volgende bladzijde. Elke spoel heeft hier dus een andere spanning, vandaar de drie verschillende kleuren.

De spoelen genereren een bewegend magneetveld, wat kringstromen opwekt in de rotor¹¹; dit zorgt voor de voortstuwende kracht. Door de driedfasenopstelling in de figuur hierboven negentig graden te draaien, kunnen we aan beide kanten van de rotor een rij spoelen plaatsen, zie figuur 2.3 op de volgende bladzijde.

¹¹rotor: een geleidende plaat die aan de pod zelf zal worden bevestigd



Figuur 2.4: Een schematische doorsnede van de pod met zijn rotor en de buis met zijn stator; zie ook fig 2.4

2.4 Prototypes en tests

Na het uitdiepen van de theorie en het prakkiseren over de uitvoerbaarheid van ons plan was het tijd om dingen te gaan bouwen. Daarvoor moet je natuurlijk wel eerst een ontwerp hebben. We hadden een ontwerpvoorstel, maar voor het bouwen of printen van een model waren concrete tekeningen nodig. In die fase komen we nu terecht.

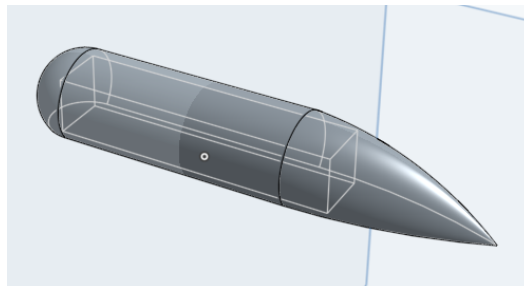
2.4.1 Basisbeginselen, maatvoering en 3D-modellen

De pod moet bestaan uit een body met daaraan vier ski's bevestigd. De pod en zijn ski's moeten natuurlijk een aerodynamische vorm hebben om de luchtweerstand te minimaliseren. Elke ski bevat een Halbach array van vijf neodymium blokmagneeten.

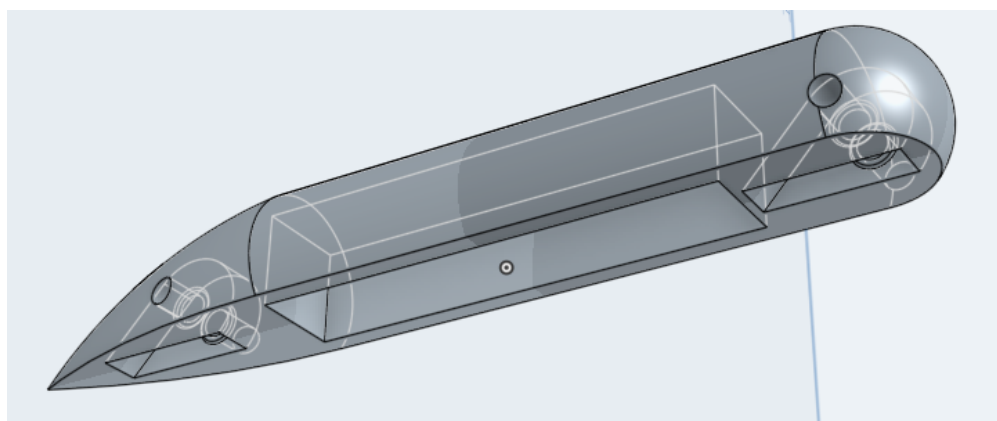
Om te kunnen testen hoe haalbaar het is om een Halbach-array in een ski te bouwen en deze vervolgens over aluminium te laten zweven, hebben we eerst een proto-ski gebouwd. Deze heeft als enige functie het in positie houden van de magneten en het hebben van min of meer de zelfde vorm en grootte als het uiteindelijke product, zodat we iets hebben om op voort te bouwen met ons ontwerp.

Het lastigste tijdens het bouwen van deze proto-ski was het fixeren van de magneten: de Halbach array hebben we in de ski gebouwd door met behulp van superlijm en een lijmklep steeds één magneet in de ski te bevestigen. Dit was niet altijd even makkelijk omdat magneten in deze positie van nature elkaar afstoten en/of aantrekken.

Elke ski bevat aan de voor- en achterkant ruimte voor een 3mm dikke as en een wieltje van 10mm doorsnede. Deze wieltjes moeten de pod op het eerste gedeelte van zijn 'reis' dragen. De wieltjes zijn zo geplaatst dat er tussen de pod en de baan zo weinig mogelijk ruimte is, om te voorkomen dat de pod wordt opgetild door zijn wielen in plaats van het afstotende magneetveld. Daarnaast veroorzaken ze minder weerstand als ze minder ver uitsteken.



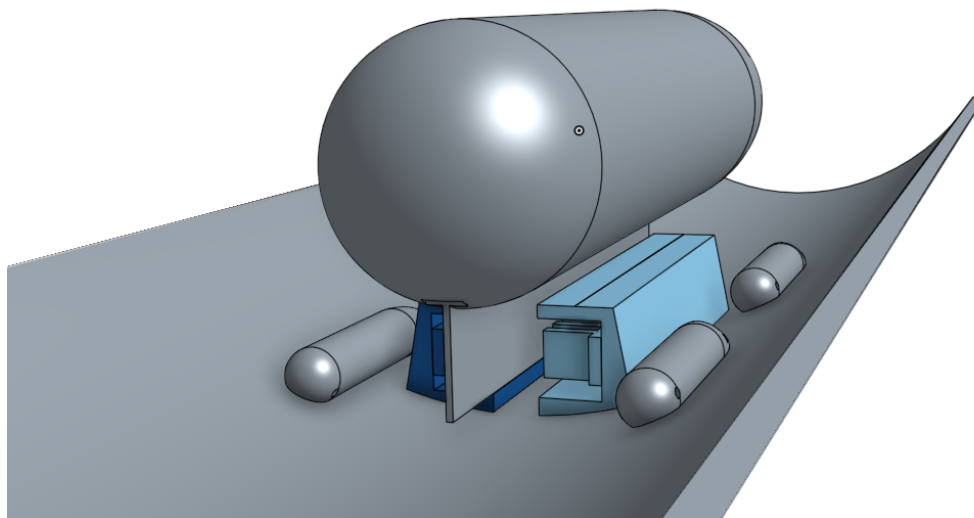
Figuur 2.5: Een 3D-model¹³ van onze uiteindelijke proto-ski



Figuur 2.6: Ons uiteindelijke ontwerp voor een ski: plaats voor een magneetopstelling en twee wieltjes.

¹³De witte lijnen zitten achter het zichtbare oppervlak en zijn normaliter dus niet zichtbaar.

De baan met daarop de lineaire motor is gebogen. De oorspronkelijke diameter is 1,80m, wij bouwen met een diameter van 30cm. De lineaire motor bestaat uit een ijzeren kern waar koperdraad omgewikkeld is. Elke spoel omvat steeds twee kernen. De lineaire motor is zo opgesteld dat er 15mm ruimte is tussen de twee rijen spoelen, zodat de aluminium rotorplaat van de pod er tussen past, en ook nog wat marge heeft.



Figuur 2.7: Een render van de belangrijkste onderdelen van de opstelling

2.4.2 Testen

Nadat het ons gelukt was de Halbach array in elkaar te zetten, hebben we onderzoek gedaan omtrent de werking ervan. Als eerste hebben we gekeken of het veld aan de onderkant van de Halbach array sterker was dan de bovenkant. Dit was inderdaad zo; de onderkant van de ski reageerde veel agressiever dan de bovenkant. Het veld aan de onderkant van de Halbach array was zeer sterk. Als het eenmaal in contact kwam met een metalen voorwerp, kostte het zeer veel moeite om de twee objecten weer van elkaar los te krijgen...

Om de theorie voor het levitatievermogen te testen, hebben we geëxperimenteerd met een "baan" van gelamineerd aluminium. Deze hebben wij gemaakt door aluminiumfolie en isolerende lagen (huishoudfolie) op elkaar te stapelen. Ook hebben we de interactie tussen een ski (met halbach array) en een massieve aluminium ondergrond getest.

Het resultaat verbaasde en verwarde ons: wanneer we de ski langs de massieve aluminium plaat bewogen, werd een tegenwerkende (afremmende) kracht op de ski uitgeoefend. Van *lift* was nauwelijks sprake. Dit gold ook voor de gelamineerde 'baan', al was het aluminiumfolie zo dun en hadden we niet heel veel lagen waardoor er überhaupt weinig effect merkbaar was.

2.4.3 De lineaire motor

De lineaire motor bestaat uit rangschikkingen van steeds drie spoelen. Deze zijn gewikkeld om een gelamineerde¹⁴ ijzeren kern om de veldsterkte te verhogen. (zie ook figuur 2.3, blz. 13)

¹⁴het lamineren van een kern voorkomt het ontstaan van grote wervelstromen, en daardoor beperkt het energieverliezen en productie van warmte

2.4.4 Revisie

Na enig research hebben we ons aanvankelijke ontwerp echter wel grondig moeten veranderen. Aangezien de snelheid hoog moet zijn, hebben we een lange baan nodig. Daarnaast bleek een gelamineerde aluminium baan in ons geval niet nodig te zijn, omdat dit alleen op grote schaal van belang is: het lamineren van de baan beperkt de warmteproductie (en daarmee ook de hoeveelheid energie die wordt omgezet in warmte), maar aangezien de baan niet permanent onder invloed is van inductie is dit sowieso al nauwelijks een probleem. Daarnaast is het maken van een gelamineerde baan een tijdrovend en secuur werkje, waarvoor we een hele avond bezig zijn geweest met het bouwen van een klein stukje "testbaan" met 10 lagen aluminiumfolie. Daarom moeten we kant-en-klaar aluminium plaatmateriaal van 3mm of 5mm dikte gebruiken.

Omdat het lastig was om een gebogen baan van (rechte) stroken aluminium te voorzien zonder daarbij het centrerende effect te verliezen, zijn we van plan om de baan vlak te maken en een buis als omhulsel te gebruiken. We gaan zo'n 3 meter baan voorzien van een aluminium plaat met daarop in het midden gemonteerd een I-profiel, de zogeheten *centerbeam*, eveneens van aluminium. Dan trekken we het voertuig voort met behulp van een katrol. Op deze manier moet het mogelijk zijn om een redelijke snelheid te behalen en de pod hierdoor te laten zweven.

In plaats van de lineaire motor in het midden van de baan, zoals we eerst van plan waren, zullen we nu proberen de lineaire motor in te bouwen in het voertuig (als we de tijd en vooral *benodigdheden* hebben), en om deze te laten werken op de centerbeam.

2.5 Conclusie

Al met al kunnen we zeggen dat we veel dingen hebben geleerd. Voordat we aan ons PWS begonnen, hadden we bijvoorbeeld nog nooit van een Halbach-array gehoord. Ook het inductiezweven was ons nieuw. Wij ondervonden echter, net als al zovele wetenschappers voor ons, dat het in de praktijk brengen van de theorie niet altijd even gemakkelijk gaat. Ook stuit je op die manier weer op problemen, die aanvankelijk niet aan het licht kwamen bij het theorieonderzoek. Het is cruciaal, maar soms ook vermoeiend om je op deze dingen weer af te stemmen. Het nadeel van het onderwerp van ons PWS is dat dit een relatief nieuw verschijnsel is. Het was lastig om de juiste informatie te vinden; vooral omtrent de halbach-arrays en de daarbijhorende kringstromen. Daarnaast vereist ons ontwerp bepaalde materialen en vormen die lastig/onmogelijk te verkrijgen zijn met normaal gereedschap, bijvoorbeeld gebogen aluminium beplating en ijzeren kernen voor de lineaire motor. Desondanks was het een leerzaam project, ook al was de planning was niet altijd even optimaal...

Bronvermelding

http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf
https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperloop_pod_competition
https://en.wikipedia.org/wiki/Lenz's_law
<https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=halbach-arrays>
https://nl.wikipedia.org/wiki/Magneetzweeftrein#Commerci.C3.ABle_uitbating
<https://www.nemokennislink.nl/publicaties/magneetzweeftreinen>

Daan		
Wanneer	Hoelang	Wat
Vrij 1-7	2 uur	Plan van aanpak
Zomervakantie	10 uur	Inlezen op onderwerp
18-8	1 uur	Start gemaakt met PvE
7-9	1,5 uur	PvE, informatie zoeken
21-9	1 uur	PvE en deeltuitwerkingen
23-9	1 uur	PvE en deeltuitwerkingen
28-9	2 uur	Gewerkt aan H1
30-9	1 uur	Gewerkt aan H1
1-10	6 uur	PvE afgemaakt, gewerkt aan H1, begonnen met deeltuitwerkingen
23-9	2 uur	Gewerkt aan PvE en uitwerking daarvan
1-10	5 uur	Uitwerken en afmaken PvE en deeltuitwerkingen
23-9	1 uur	PvE en deeltuitwerkingen
28-9	2 uur	Gewerkt aan H1
30-9	1 uur	Gewerkt aan H1
1-10	6 uur	PvE afgemaakt, gewerkt aan H1, begonnen met deeltuitwerkingen
6-10	2 uur	Ontwerpvoorstel, gewerkt aan H1
12-10	1,5 uur	Stap 4
17-10	2 uur	Stap 4
21-10	2 uur	Gewerkt aan stap 4 en inductie-experiment gedaan
13-11	2 uur	Stap 4
19-11	2 uur	Overbrengen uit Word naar Latex
21-11	3 uur	Word → Latex
29-11	3 uur	Word → Latex
30-11	3 uur	Word → Latex
1-12	2 uur	H1 + H2 afgemaakt, illustraties toegevoegd
28-12	2 uur	3D-Modellen
29-12	4 uur	Testopstelling gebouwd
30-12	3 uur	Testen, H2 aangevuld
05-1	3 uur	H2
06-1	4 uur	H2 (@RevSpace)
14-1	2 uur	Poging tot verhelderen werking InducTrack
21-1	3 uur	Reinier achter z'n broek zitten
26-1	2 uur	verslag *en
27-1	2 uur	verslag *en
30-1	1 uur	eindsprint
Totaal	93 uur	

Reinier		
Wanneer	Hoelang	Wat
Vrij 1-7	2,5 uur	Plan van aanpak
Zomervakantie	10 uur	Info verzamelen, kennis vergaren en inlezen op technieken
18-8 tot 20-8	5 uur	Uitwerken deelvragen
23-9	2 uur	Gewerkt aan PvE en uitwerking daarvan
1-10	5 uur	Uitwerken en afmaken PvE en deeluitwerkingen
5-10	1 uur	Bestanden opgeschoond, begonnen aan ontwerpvoorstel
6-10	1,5 uur	Gewerkt aan ontwerpvoorstel en H1
12-10	1,5 uur	Gewerkt aan stap 4
17-10	2 uur	Gewerkt aan stap 4
21-10	1,5 uur	Inductie-experiment gedaan
13-11	2 uur	Stap 4
18-11	2 uur	Word $\rightarrow$ Latex
19-11	3 uur	Word $\rightarrow$ Latex
21-11	3 uur	Word $\rightarrow$ Latex
23-11	3 uur	Word $\rightarrow$ Latex
21-11	2 uur	3d-printer tunen, verslag verder uitgebreid
24-11	2,5 uur	proto-3d-ski geprint, verslag uitgewerkt
28-11	2 uur	verslag uitgebreid
29-11	5 uur	magneetheorie uitgebreid en doorgerekend voor ons geval, aan de slag gegaan met feedback
30-11 en 1-12	9 uur	H1+2 afgemaakt, aangevuld, uitgebreid, feedback verwerkt, illustraties toegevoegd
05-1	3 uur	Revisie $\rightarrow$ H2
06-1	4 uur	Revisie $\rightarrow$ H2 (@RevSpace)
14-1	2 uur	Poging tot verhelderen werking InducTrack
21-1	1 uur	3D-modellen $\rightarrow$ plaatjes
26-1	2 uur	verslagenen
27-1	2 uur	3D-modellen $\rightarrow$ plaatjes, verslag *en
30-1	1 uur	eindsprint
Totaal	85 uur	