

Honoursprogramma: Projectverslag

Interdisciplinair project: Informatica & Deeltjesfysica

Patryk Pilichowski
Begeleider: Prof. Pierre Van Mechelen

2024-2025

Abstract

Dit interdisciplinaire project combineert informatica en deeltjesfysica door een 2D top-down simulatiespel te ontwikkelen met behulp van de Godot-engine, met einddoel om de fundamenteën van deeltjesversnellers toegankelijk en boeiend te maken voor spelers. Gebruikers bouwen een LINAC of synchrotron met RF-caviteiten, dipool- en quadropoolmagneten, en visualiseren direct de bundelomhulling en faseruimte ellips. Vereenvoudigde bundeloptica, gebaseerd op transfermatrices, vormt de kern van de simulatie. Ondanks tijdsbeperkingen leverde het project een werkend prototype op met een intuïtieve interface en functionele visualisaties, dat een solide basis biedt voor verdere ontwikkeling.

Dankwoord

Ik wil graag mijn dank betuigen aan mijn projectbegeleider, Prof. Pierre Van Mechelen, voor zijn waardevolle begeleiding en expertise op het gebied van deeltjesversnellers en deeltjesfysica. Zijn steun heeft niet alleen dit project verrijkt, maar ook de reis naar CERN in 2024 mogelijk gemaakt, wat mijn interesse voor deeltjesfysica heeft aangewakkerd.

Daarnaast ben ik het honoursprogramma erg dankbaar voor het bieden van een stimulerende en plezierige tweejarige ervaring. Het programma creëerde nieuwe interesses en mogelijkheden.

Inhoud

1	Inleiding	4
1.1	Context en Motivatie	4
1.2	Doelstelling en Onderzoeksvraag	4
2	Theoretische achtergrond	4
2.1	Deeltjesversnellers	4
2.2	Literatuurstudie en beam optics	4
2.3	Transfermatrices	5
2.4	Emittantie en Visualizaties	5
3	Implementatie en Resultaten	6
3.1	Implementatie	6
3.2	Spelstructuur en visuele stijl	6
3.3	Componenten	7
3.4	Bundelsimulatie en visualizatie	8
3.5	Samenvatting	9
4	Toekomstig werk	10
4.1	Interactieve tutorials	10
4.2	Level progressie	10
4.3	Granulaire beamline en componenten	11
4.4	Deeltjesdetectoren en botsingen	11
5	Conclusies	12

1 Inleiding

1.1 Context en Motivatie

Deeltjesversnellers zijn heel cruciaal in zowel fundamenteel onderzoek als in toegepaste technologieën, van de zoektocht naar nieuwe deeltjes tot de bestralingstherapie in de geneeskunde. Het complexe samenspel van elektromagnetische velden en bundeloptica maakt het echter lastig om de onderliggende principes intuïtief te doorgronden. Door deze scheiding tussen theorie en praktijk ervaren veel studenten en geïnteresseerden een hoge instapdrempel. In dit project willen we met een interactieve videogame een brug slaan tussen de formele wiskunde achter transfermatrices en een visueel, speels leerproces.

1.2 Doelstelling en Onderzoeksvraag

Het hoofddoel van dit onderzoek is het ontwikkelen van een 2D top-down simulatiespel in de Godot-engine, waarin gebruikers stap voor stap een deeltjesversneller kunnen bouwen en direct de gevolgen van hun ontwerpkeuzes zien. We richten ons daarbij op de implementatie van basiscomponenten zoals RF-caviteiten, dipool- en quadrupoolmagneten, en de visualisatie van bundelomhulsel en faseruimte-ellips. De centrale onderzoeksvraag is dus: “Hoe kan een educatieve videogame worden ontworpen en ontwikkeld om de concepten van deeltjesversnellers effectief te onderwijzen en de interesse van spelers in deeltjesfysica te vergroten?”.

2 Theoretische achtergrond

2.1 Deeltjesversnellers

Er zijn grofweg drie hoofdtypen deeltjesversnellers: lineaire versnellers (LINAC), cyclotrons en synchrotrons. In een LINAC worden deeltjes in een rechte lijn versneld door opeenvolgende RF-caviteiten, waarbij elke kavititeit de energie van de deeltjes stapsgewijs verhoogt. Cyclotrons gebruiken een constant magnetisch veld en een oscillerend elektrisch veld om de baan van de geladen deeltjes in een spiraal steeds verder uit te laten dijen. Synchrotrons combineren dipool- en quadrupoolmagneten in een ringvormige baan, waarbij het magnetisch veld synchroon meegroeit met de energie van de deeltjes om ze op een constante straal te houden.

2.2 Literatuurstudie en beam optics

Zoals vermeld in het projectvoorstel, is het boek *K. Wille (2001) The Physics of Particle Accelerators: An Introduction* de primaire bron voor de theoretische achtergrond van dit project, meer bepaald hoofdstuk 3. Dit hoofdstuk geeft een inleiding tot de bundeloptica van deeltjesversnellers door uit te leggen hoe transfermatrices en CS-parameters de sturing van de deeltjes door multipool-magneten kunnen beschrijven. Bijvoorbeeld, stel dat de deeltjesbaan een bundelstructuur doorreist die bestaat uit drift- en quadrupool-secties. Dan wordt de trajectvector (bijv. in het x - x' -vlak) bestaande uit de positie x en snelheid x'

$$\mathbf{x}_{\text{in}} = \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}$$

getransformeerd door de transfermatrix

$$M = M_{D5} M_{Q4} M_{D4} \dots M_{Q1} M_{D1}, \quad \mathbf{x}_{\text{uit}} = M \mathbf{x}_{\text{in}}.$$

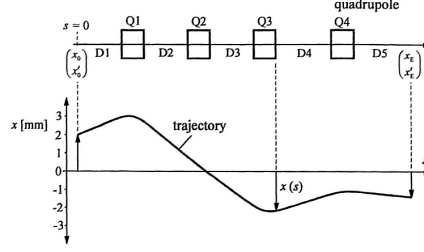


Figure 1: Deeltjesbaan door een stuurende bundelstructuur [1]

2.3 Transfermatrices

Verschillende componenten in een bundel hebben hun eigen transfermatrix omdat ze de positie en het momentum van het deeltje op hun eigen manier manipuleren. Om het eenvoudig te houden gaat hier alleen 1-vlak, of 2x2 matrices getoond worden.

- **Driftsectie:** Dit is een sectie zonder externe velden, dus de transfermatrix is:

$$M_{\text{drift}} = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

met s de lengte van de driftsectie.

- **Dipoolmagneten:** Deze buigen de deeltjesbundel. De transfermatrix voor een dipoolmagneet is:

$$M_{\text{dipool}} = \begin{pmatrix} \cos \theta & R \sin \theta \\ -\frac{1}{R} \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

waarbij $\theta = \frac{s}{R}$, met s de lengte van de magneet en R de buigstraal.

- **Quadrupoolmagneten:** Zowel focuserende als defocuserende quadrupoolmagneten bestaan er om de bundel te sturen. Voor 4x4 transfermatrices als een quadrupool één vlak focust, defocust hij het andere. Voor een focuserende quadrupool is de matrix:

$$M_{\text{QF}} = \begin{pmatrix} \cos \Omega & \frac{1}{\sqrt{|k|}} \sin \Omega \\ -\sqrt{|k|} \sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix}$$

$$M_{\text{QD}} = \begin{pmatrix} \cosh \Omega & \frac{1}{\sqrt{|k|}} \sinh \Omega \\ \sqrt{|k|} \sinh \Omega & \cosh \Omega \end{pmatrix}$$

waarbij $\Omega = \sqrt{|k|}s$, met k de quadrupoolsterkte en s de lengte van de magneet.

- **Sextupool- en octupool-magneten:** Ze bestaan allebei om bepaalde fouten in de versneller te corrigeren die zich bijvoorbeeld bij elke omwenteling rond een synchrotron kunnen opstapelen. Nu zijn ze weggelaten, maar ze kunnen een functie zijn voor toekomstig werk.

2.4 Emittantie en Visualizaties

De CS-parameters α, β, γ worden gebruikt om de verdeling van posities en snelheden van de deeltjes in de bundel te beschrijven, bijvoorbeeld door er een bundelomhulsel of een fase-ruimte ellips mee te visualiseren. Parameter $\beta(s)$, ook wel de amplitudefunctie genoemd, beschrijft de

vorm of grootte van de bundel op positie s . De parameters $\alpha(s)$ en $\gamma(s)$ zijn allebei afgeleid van $\beta(s)$.

De emittantie ϵ , afgeleid van de CS-parameters maar ook de positie en snelheid van het deeltje in s , beschrijft het gebied van de fase-ruimte ellips (het gebied bezet door de deeltjesbundel). Hoewel de vorm van de ellips in de hele bundel verandert, blijft de oppervlakte over het algemeen hetzelfde, waardoor de emittantie constant blijft. De fase-ruimte ellips kan ons vertellen hoe gefocust de bundel is. Bijvoorbeeld, een kleinere ellips duidt op een geconcentreerde bundel, waardoor er minder deeltjes verloren gaan. Twee bundels met een interactiepunt zullen meer botsingen of zogenaamde “events” produceren als ze meer gefocust zijn.

Bovendien kunnen we emittantie en $\beta(s)$ gebruiken om de “grens” van de bundel langs het pad van de versneller te visualiseren, ook wel de bundelomhulsel genoemd. De bundelomhulsel functie is gedefinieerd als $E(s) = \sqrt{\epsilon\beta(s)}$. Dit kan ons inzicht geven in de stuurstructuur en vorm van de bundel.

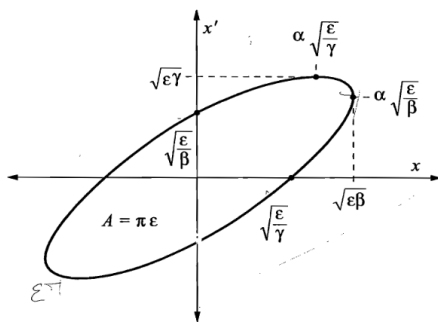


Figure 2: Fase ellips in $x-x'$ vlak [1]

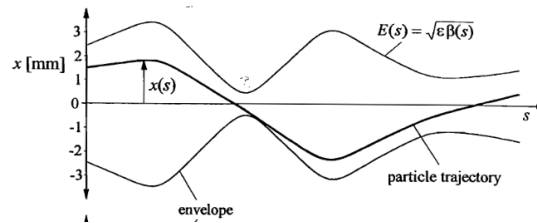


Figure 3: Bundelomhulsel [1]

3 Implementatie en Resultaten

3.1 Implementatie

Dit project maakt gebruik van de Godot engine, een game engine die geschikt is voor zowel 2D- als 3D-games met een flexibele omgeving die C# en zijn eigen scripttaal GDScript ondersteunt.[3]

De broncode van dit project is beschikbaar op www.github.com/magnustymoteus/protonic, met instructies hoe je het moet uitvoeren.

3.2 Spelstructuur en visuele stijl

Het spel is ontworpen in een 2D top-down stijl waarin spelers een deeltjesversneller kunnen bouwen door onderdelen op een grid canvas te plaatsen. De gebruikersinterface is intuïtief en simpel, met een werkbalk die toegang biedt tot verschillende componenten. Spelers kunnen deze componenten selecteren (linksboven in 4), op het raster plaatsen en verbinding maken met aangrenzende componenten die compatibel zijn.

Verder krijgen spelers ook een blauwe informatievenster (rechtsboven) over de component dat ze op dat moment hebben geselecteerd, evenals de taken die de speler in het huidige level moet uitvoeren (linksonder), maar het taaksysteem is nog niet volledig geïmplementeerd.

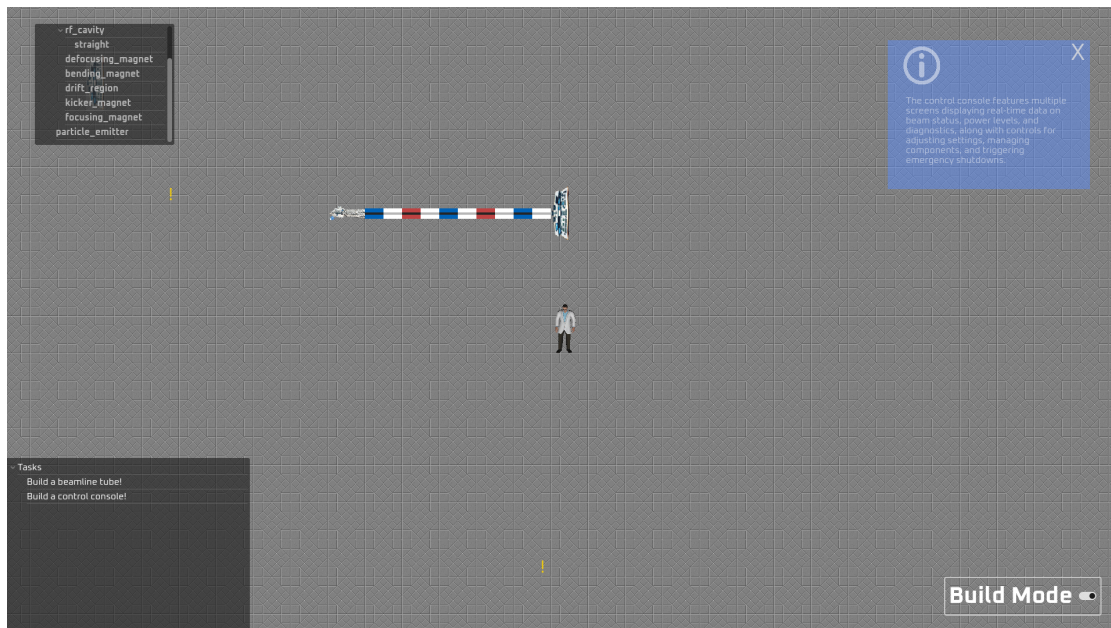


Figure 4: Screenshot van de spel met verschillende interface-elementen.

3.3 Componenten

De volgende componenten zijn geïmplementeerd in het spel:

- **RF-caviteiten:** Deze versnellen de deeltjesbundel. In de simulatie wordt de versnelling gemodelleerd door de energie van de deeltjes te verhogen op basis van een vaste parameter. Hoewel een realistische modellering van de fase en frequentie van het RF-veld complex is, is voor dit prototype een vereenvoudigde benadering gebruikt waarbij de versnelling constant is.
- **Dipoolmagneten:** Stuurt de deeltjesbundel, cruciaal voor het bouwen van synchrotrons.
- **Quadrupoolmagneten:** (De)focust de deeltjesbundel, cruciaal voor alle versnellers en gebruikt in FODO-lattices.
- **Deeltjesemitter:** De bron van deeltjes in het spel, zonder deze worden er geen deeltjes uitgezonden in de versneller en is visualisatie in dat geval dus niet mogelijk.
- **Control Console:** Een component dat een venster met visualisaties opent als erop wordt geklikt
- **Kickermagneten:** Hiermee kunnen injecties en extracties worden uitgevoerd tussen bijvoorbeeld een LINAC en een synchrotron.

3.4 Bundelsimulatie en visualizatie

Dit zijn de momenteel geïmplementeerde visualisaties/simulaties:

- **Bundelomhulsel:** Deze wordt geplot als een envelop die de maximale uitslag van de bundel toont. Dit helpt spelers te begrijpen hoe de bundel divergeert of convergeert na het passeren van magneten.
- **Deeltjestrajecten:** Het pad van meerdere deeltjes binnen de envelope. Een individueel deeltje binnen de omhullende heeft een stochastische factor bovenop de getransformeerde trajectvector om een algemene variabiliteit te geven.
- **Faseruimte-ellips:** Deze wordt weergegeven in een apart venster en toont de spreiding van de deeltjes in de (x, x') -ruimte. Er is momenteel geen manier om de ellips op een specifieke positie in de bundel te zien.
- **Configuratie van parameters:** Kan de CS-parameters van de corresponderende versneller aanpassen.

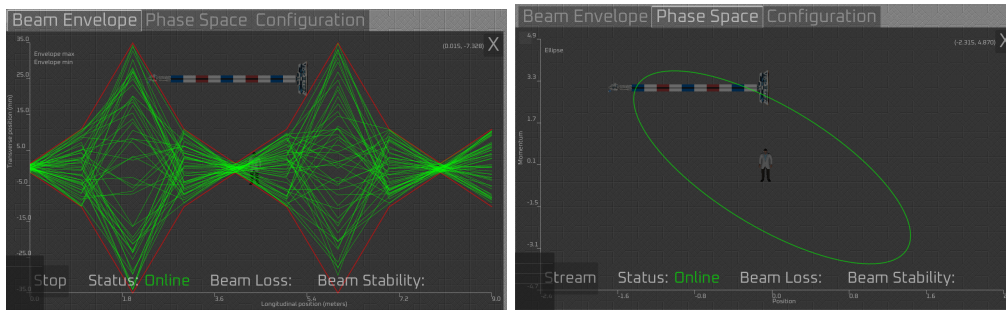


Figure 5: Visualizatie van de bundelomhulsel, deeltjestrajecten en faseruimte-ellips van een simpele LINAC.

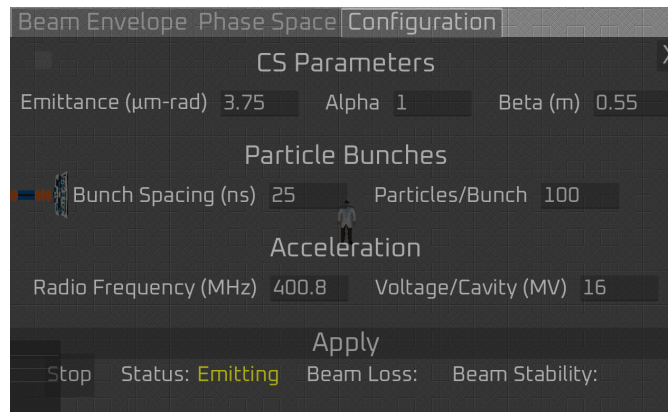


Figure 6: Configuratievenster van een LINAC.

3.5 Samenvatting

Het huidige versie van het spel stelt spelers in staat een basisversneller te bouwen en de effecten van hun ontwerpkeuzes direct te zien via de visualisaties. Hoewel de simulatie vereenvoudigd is, biedt het een effectieve introductie tot de basisprincipes van versnellerfysica. Spelers kunnen experimenteren met verschillende configuraties om te zien hoe deze de bundel beïnvloeden.

Enkele concrete resultaten zijn:

- Succesvolle implementatie van een lineaire versneller a.h.v FODO-lattices.
- Basisimplementatie van een synchrotron met een gesloten lusstructuur a.h.v dipoolmagneten.
- Werkende visualisatie van de bundelomhulling die reageert op de geplaatste componenten.
- Werkende faseruimte-ellips die de spreiding van de bundel toont.
- Configuratie van CS-parameters

Vanwege tijdgebrek zijn geavanceerdere functies, zoals de simulatie van deeltjesbotsingen en evaluatiemetrieken, niet gerealiseerd.

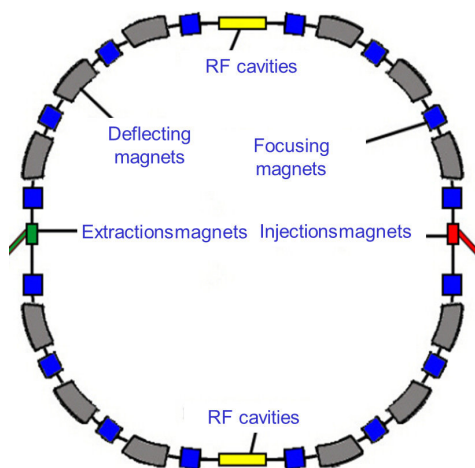


Figure 7: Illustratie van een synchrotron [2]

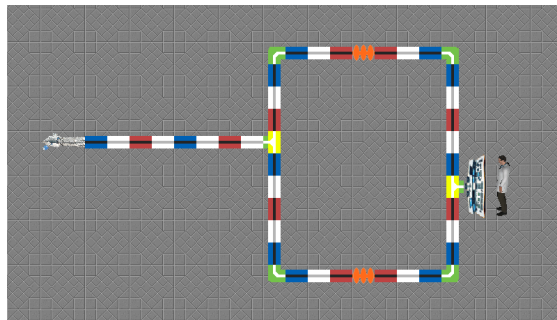


Figure 8: Synchrotron in het spel.

4 Toekomstig werk

Door de werkdruk van de hoofdvakken werden verschillende belangrijke functies die in het projectvoorstel werden beschreven, niet geïmplementeerd of voltooid. In dit gedeelte zullen we deze bekijken, evenals extra functies buiten het projectvoorstel die in de toekomst kunnen worden geïmplementeerd.

4.1 Interactieve tutorials

Geeft tips of hints hoe je de versneller bouwt tijdens het huidige level door te laten zien welke onderdelen gebouwd moeten worden en hoe. Dit kan door een apart menu te maken voor de tutorial zodat de speler deze kan lezen, en eventueel door de juiste opties te markeren tijdens het bouwen van de versneller.

4.2 Level progressie

Het projectvoorstel schetste een levelstructuur in het spel. Hoewel het mogelijk is om zowel een lineaire versneller als een synchrotron te bouwen (maar geen collider of storage ring), is er momenteel geen mechanisme dat een speler van het ene level naar het andere brengt. Dit kan worden geïmplementeerd door bepaalde waarden te "evalueren" van de versneller die de speler in een bepaald level heeft gebouwd en de speler door te laten gaan naar het volgende level als deze waarden binnen een acceptabel interval liggen:

1. LINAC

- **Inhoud:** Inleiding tot deeltjesversnelling. Focus is op deeltjesbronnen, RF-caviteiten, en FODO-lattices (quadrupoolmagneten).
- **Evaluatie:** Evalueer of de emittantie en de fase-ruimte-ellips voldoende klein zijn.

2. Synchrotron

- **Inhoud:** Inleiding tot cirkelvormige versnellers, met de nadruk op het gebruik van dipoolmagneten voor het buigen van de bundel en eventueel sextupool- en octupoolmagneten. Uitdagingen voor de speler zijn onder andere het handhaven van de stabiliteit van de bundel en het bereiken van hogere energieniveaus
- **Evaluatie:** Controleer of de betatron tune goed gekozen is om een stabiele deeltjesbeweging te garanderen. Instabiliteiten kunnen ontstaan als de tune in de buurt komt van resonantiewaarden, wat leidt tot deeltjesverlies en een kortere levensduur van de bundel.

3. Circulaire Botser

- **Inhoud:** Focus op deeltjesbotsers, waarbij de speler een systeem moet ontwerpen om stabiele bundels met elkaar in botsing te brengen.
- **Evaluatie:** Controleer ook op voldoende luminositeit. Hoe hoger, hoe grotere waarschijnlijkheid van "events".

4. Storage Ring

- **Inhoud:** De speler richt zich op het handhaven van een stabiele bundel van hoge kwaliteit gedurende lange perioden door de energie constant te houden, in tegenstelling tot typische versnellers die deeltjes voornamelijk versnellen tot hoge energieën.

- **Evaluatie:** Controleren of de levensduur van de deeltjes in de bundel hoog genoeg is.

4.3 Granulaire beamline en componenten

In een volgende versie wil ik de beamline opsplitsen in granulaire segmenten met instelbare lengte en veldsterkte, zodat spelers echt kunnen experimenteren met continuprofile magneten in plaats van vaste modules. Met schuifbalken en numerieke invoervelden kan de gebruiker de buighoek van dipoolmagnetten nauwkeurig aanpassen (bijvoorbeeld 45° , 30° of elke waarde ertussenin) en de gradient van quadrupoolmagnetten gradueel finetunen. Bovendien voeg ik sextupool- en octupoolmagnetten toe om chromatische en hogere-orde aberraties te corrigeren.

4.4 Deeltjesdetectoren en botsingen

Een logische uitbreiding van het spel is de toevoeging van deeltjesdetectoren en de simulatie van botsingen. In echte deeltjesversnellers zijn botsingen het hoofddoel, omdat we daarmee de fundamentele eigenschappen van materie kunnen bestuderen.

Spelers zouden detectoren kunnen plaatsen op interactiepunten langs de versneller. Deze detectoren zouden dan gesimuleerde gegevens kunnen genereren op basis van de botsingen die plaatsvinden. Voor de implementatie kan een vereenvoudigd model worden gebruikt waarbij botsingen worden gemodelleerd met basiswaarschijnelijkheden en de detectoren bepaalde “events” registreren. Dan kunnen de spelers bijvoorbeeld experimenteren met configuraties van detectoren en botsingen tussen verschillende deeltjes om te zien hoe die de verzamelde gegevens beïnvloeden.

Enkele concrete ideeën voor implementatie zijn:

- **Botsingspunten:** Introduceer speciale componenten die botsingspunten vertegenwoordigen, waar twee bundels elkaar kruisen.
- **Detectoren:** Laat spelers detectoren plaatsen die informatie geven over de botsingen, zoals het aantal events of de energie van de geproduceerde deeltjes.
- **Data-analyse:** Voeg een eenvoudig data-analyse venster toe waar spelers de verzamelde data kunnen bekijken en interpreteren.
- **Challenges:** Creëer levels of uitdagingen waarbij spelers moeten proberen om specifieke botsingsresultaten te bereiken, zoals een hoog aantal events of de detectie van zeldzame deeltjes.

5 Conclusies

Dit verslag liet zien dat de kerncomponenten van een lineaire versneller en een eenvoudige synchrotron gebouwd en gevisualiseerd kunnen worden in een interactieve omgeving. Het project bleek een uitdaging te zijn, niet alleen omdat het de eerste keer was dat ik me in een onbekend onderwerp verdiepte, maar ook vanwege de tijdsdruk. Tijdens dit proces heb ik geleerd over hoe deeltjesversnellers werken, zoals de rol van RF-caviteiten, dipool- en quadropoolmagneten en de wiskunde achter bundeldynamica, zoals overdrachtsmatrices en CS-parameters. Ik heb ook ervaring opgedaan met het ontwikkelen van games in de Godot-engine.

Er is een functioneel prototype opgeleverd dat de basis legt voor toekomstige verbeteringen. Verdere stappen zijn mogelijk een meer gedetailleerde bundellijn, interactieve tutorials en de toevoeging van botsingen en detectoren. Het spel vormt dus een startpunt voor een meer diepgaande en realistische educatieve videogame over deeltjesversnellers.

References

- [1] Wille, K. (2001). The Physics of Particle Accelerators: An Introduction.
- [2] Machine Protection and Interlock Systems for Circular Machines - Example for LHC - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Typical-components-of-a-circular-accelerator_fig1_306186287
- [3] Godot Engine - Free and open source 2D and 3D game engine. <https://godotengine.org/>