

Van abstracte data naar intuïtieve feedback: Het potentieel van Mixed Reality op de Meta Quest voor reanimatietraining binnen de geneeskunde.

Dogukan Uyanik.

Scriptie voorgedragen tot het bekomen van de graad van
Professionele bachelor in de toegepaste informatica

Promotor: Dhr. J. Willem

Co-promotor: Dhr. T. Cuelenaere

Academiejaar: 2025–2026

Eerste examenperiode

Departement IT en Digitale Innovatie .

**HO
GENT**

Woord vooraf

Voor u ligt de bachelorproef "Van abstracte data naar intuïtieve feedback: Het potentieel van Mixed Reality op de Meta Quest voor reanimatietraining binnen de geneeskunde". Dit onderzoek vormt het sluitstuk van mijn opleiding Professionele Bachelor in de Toegepaste Informatica aan HOGENT en is tot stand gekomen in het academiejaar 2025–2026.

Voor mij is technologie nooit een doel op zich geweest. Code, hardware en geavanceerde concepten zoals Mixed Reality zijn in mijn ogen puur een vehikel, een middel om tastbare, reële problemen op te lossen en iets fundamenteels bij te dragen aan de maatschappij. Dit project lag mij bovendien nauw aan het hart; omdat ik in mijn directe omgeving van dichtbij heb meegemaakt welke impact cardiologische aandoeningen op een leven en een gezin kunnen hebben, kreeg dit onderzoek een diepere, persoonlijke betekenis. Iets bouwen wat in de toekomst kan helpen bij het effectiever aanleren van levensreddende handelingen was de ultieme motivator om dit traject tot een succes te brengen.

Dit project had niet gerealiseerd kunnen worden zonder de onmisbare steun van enkele sleutelfiguren. Allereerst gaat mijn oprechte dank uit naar mijn promotor, Dhr. Jan Willem. Uw scherpe academische blik, constructieve kritiek en continue sturing hebben ervoor gezorgd dat dit onderzoek de juiste diepgang behield en helder werd gestructureerd.

Eveneens wil ik mijn co-promotor en opdrachtgever, Dhr. Thomas Cuelenaere, hartelijk bedanken. Uw diepgaande expertise binnen de gezondheidszorg en uw enthousiaste medewerking tijdens heel het traject waren van onschatbare waarde. U gaf mij de ruimte om met dit innovatieve idee aan de slag te gaan en bood de onmisbare klinische inzichten om de softwarematige feedback perfect af te stemmen op de praktijk.

Tot slot een bijzonder woord van dank aan mijn familie en vrienden. Jullie onvoorwaardelijke steun en het geloof in wat ik met dit project wilde bereiken, hebben me de rust gegeven om me volledig op dit onderzoek te kunnen focussen.

Dogukan Uyanik
Gent, mei 2026

Samenvatting

Traditionele reanimatietraining voor verpleegkundigen steunt vaak op externe 2D-interfaces voor feedback, wat leidt tot het *split-attention effect*. De hulpverlener moet hierbij de aandacht verdelen tussen de fysieke handeling op de reanimatiepop en een extern scherm, wat de cognitieve belasting verhoogt en de leercurve belemmert. Deze bachelorproef onderzoekt hoe Mixed Reality (MR) technologie dit proces kan optimaliseren door real-time, intuïtieve feedback direct in het gezichtsveld van de gebruiker te projecteren.

Het doel van dit onderzoek was de ontwikkeling van een Proof of Concept (PoC) op de Meta Quest 3, waarbij sensordata van een reanimatiepop in real-time wordt gevisualiseerd via een Unity-applicatie. Een significante technische barrière in dit proces was de gesloten aard van de beschikbare communicatieprotocollen. Hoewel de fabrikant eigen ecosystemen aanbiedt, ontbreekt een publiek toegankelijke en gedocumenteerde SDK die directe integratie met de Meta Quest 3 en de Unity-omgeving mogelijk maakt. Daarnaast vormt de beperkte native ondersteuning voor Bluetooth Low Energy (BLE) binnen de standaard Unity-ontwikkelomgeving voor Android-gebaseerde headsets een extra hindernis.

Om dit probleem te overbruggen, is een diepgaand technisch onderzoek uitgevoerd naar het communicatieprotocol van de pop. Door middel van *reverse engineering* technieken waaronder het decompileren van officiële software en het analyseren van Bluetooth Low Energy (BLE) pakketjes via *HCI snoop logs* en Wireshark op een gerouteerd Android-toestel zijn de verborgen handshakes en data-characteristics ontcijferd.

Het resultaat is een werkend prototype dat live sensordata (zoals compressiediepte en frequentie) vertaalt naar ruimtelijke visualisaties, waaronder een *ghost avatar* en een dynamisch reagerend hartmodel. De voorlopige resultaten van deze PoC tonen aan dat MR in staat is om de kloof tussen haptische ervaring en visuele feedback te dichten. Dit onderzoek legt hiermee de technische fundamenten voor een nieuwe generatie medische simulatietools die verpleegkundigen effectiever kunnen voorbereiden op kritieke levensreddende situaties.

Trefwoorden: Mixed Reality, Meta Quest 3, Reanimatietraining, Reverse Engineering, Bluetooth Low Energy, Unity, Zorginnovatie.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Lijst van figuren	viii
Lijst van tabellen	ix
Lijst van codefragmenten	x
1 Inleiding	1
1.1 Context en urgentie	1
1.2 Probleemstelling	1
1.3 Onderzoeksvraag	2
1.4 Onderzoeksdoelstelling	3
1.5 Opzet van deze bachelorproef	3
2 Stand van zaken	4
2.1 Reanimatie: Richtlijnen en Kwaliteitscriteria	4
2.1.1 De ERC Guidelines 2025	4
2.1.2 Kwaliteitscriteria voor High-Quality CPR (HQ-CPR)	5
2.1.3 Manikin-gebaseerde Feedback: Laerdal QCPR	6
2.1.4 De beperkingen van 2D-displays en het Split-Attention Effect	7
2.1.5 De Guidance Hypothesis en de Ontwikkeling van Interne Representaties	8
2.2 Cognitieve Belasting en Motorisch Leren	9
2.2.1 Het Split-Attention Effect	10
2.2.2 Situational Awareness (SA)	10
2.2.3 Proprioceptie en Haptiek	10
2.3 Mixed Reality in de Gezondheidszorg	11
2.3.1 Definities: Het Reality-Virtuality Continuum	11
2.3.2 Video Passthrough versus Optical See-Through	11
2.3.3 Spatial Computing en Verankering (Anchoring)	12
2.4 Visualisatietechnieken voor Motorische Feedback	12
2.4.1 Positionele Feedback: De Ghost Avatar	12
2.4.2 Directionele en Abstracte Feedback	13
2.4.3 Feedforward versus Feedback	13

2.5	Technische Infrastructuur en Communicatie	13
2.5.1	Bluetooth Low Energy (BLE) en GATT-profielen	14
2.5.2	Latency en Gebruikerservaring	14
2.5.3	De Unity Engine en Meta XR SDK	14
3	Methodologie	16
3.1	Fase 1: Requirements Analyse en Stakeholder-validatie	16
3.2	Fase 2: Architectuur en "Simulation First"-Ontwikkeling	17
3.3	Fase 3: Technical Spike en Hardware-integratie	18
3.4	Fase 4: Kwalitatieve Expert-Validatie	18
4	Analyse en Requirements	20
4.1	Probleemcontext	20
4.2	Functionele Requirements	20
4.3	Niet-functionele Requirements	21
4.4	Technische Randvoorwaarden	21
4.5	MoSCoW-Prioritering	21
4.6	Conclusie van de analyse	22
5	Reverse Engineering van het Communicatieprotocol	23
5.1	Methodologie van het onderzoek	23
5.2	Statische Analyse en de barrière van Obfuscatie	23
5.3	Dynamische Analyse: HCI Packet Sniffing	24
5.3.1	Opzet van de testomgeving	24
5.3.2	Data-acquisitie via Wireshark	24
5.4	Ontcijfering van het Protocol	25
5.4.1	Identificatie van Characteristics	25
5.4.2	De "Handshakeën Authenticatie	25
5.5	Data Mapping: Van Bytes naar Millimeters	25
5.6	Conclusie	25
6	Implementatie in Unity en Mixed Reality	28
6.1	Applicatie-architectuur en State Management	28
6.2	Applicatie-architectuur en State Management	28
6.3	Protocol-implementatie en Data-verwerking	29
6.3.1	De Geautomatiseerde Handshake	29
6.3.2	Realtime Data Parsing	30
6.4	Multisensorische Feedback en MR-Integratie	31
6.4.1	Visuele Begeleiding: Ghost Hands en Passthrough	31
6.4.2	Auditieve Feedback: De Adaptieve Metronoom	32
6.4.3	Het Vullende Hart en Gamificatie	34
6.4.4	Heads-Up Display (HUD) en Realtime Analyse	35
6.4.5	Ruimtelijke Kalibratie en World Alignment	36

6.5	Sessie-evaluatie en Resultaten	37
6.5.1	Data-aggregatie en Analyse	37
6.5.2	Didactische Feedback	38
6.6	Conclusie	38
7	Conclusie	39
7.1	Beantwoording van de deelvragen	39
7.2	Kritische reflectie, expert-validatie en synthese	41
7.3	Toekomstig werk	42
A	Onderzoeksvoorstel	44
A.1	Inleiding	44
A.1.1	Kaderen Thema en Doelgroep	44
A.1.2	Centrale onderzoeksvraag	45
A.1.3	Deelvragen	45
A.1.4	Onderzoeksdoelstelling	46
A.2	Literatuurstudie	46
A.2.1	Kwaliteitscriteria voor Reanimatie (CPR)	46
A.2.2	Beperkingen van Traditionele Feedbackmethoden	47
A.2.3	Cognitieve Belasting en het Split-Attention Effect	47
A.2.4	Mixed Reality in de Gezondheidszorg	47
A.2.5	Visualisatietechnieken voor Motorische Vaardigheden	48
A.2.6	Technische Aspecten: Connectiviteit en Latency	48
A.3	Methodologie	49
A.3.1	Fase 1: Requirements Analyse (Probleemdomein)	49
A.3.2	Fase 2: Technologie-selectie en Ontwerp (Oplossingsdomein)	50
A.3.3	Fase 3: Proof of Concept (PoC)	50
A.3.4	Fase 4: Experimentele Validatie (A/B Test)	51
A.3.5	Tijdsplanning en Mijlpalen	51
A.4	Verwacht resultaat, conclusie	54
	Bibliografie	55

Lijst van figuren

2.1	De Laerdal Little Anne QCPR pop in combinatie met de feedback-app op een tablet (Cortegiani e.a., 2017).	7
5.1	Degecompileerde broncode in Jadx-GUI waarbij de overgang naar native methoden de verdere statische analyse blokkeert.	24
5.2	Overzicht van de geselecteerde GATT-service (UUID eindigend op 0126) en de bijbehorende characteristics in nRF Connect.	26
5.3	Wireshark analyse van de HCI snoop log waarbij de activatie-bytes (03ff00) van de handshake worden verzonden.	27
5.4	Onderschepping van een live <i>Handle Value Notification</i> met de ruwe sensordata op de <i>Wave</i> characteristic.	27
6.1	Visuele representatie van de ghost-hands in de Unity-omgeving.	32
6.2	Realtime visuele feedback via Passthrough. De kleur van de handen en de HUD-instructies passen zich aan op basis van de Bluetooth-data.	33
6.3	Het resultatscherm (<i>Panel_Results</i>) met de geaggregeerde score, gemiddelde diepte, tempo en een gepersonaliseerde didactische tip.	37
A.1	Visuele weergave van de tijdsplanning en mijlpalen (2026).	53

Lijst van tabellen

2.1 Technische parameters voor kwalitatieve reanimatie conform ERC 2025 (Smyth e.a., 2025).	5
4.1 MoSCoW-prioritering voor de Proof of Concept.	21

Lijst van codefragmenten

6.1	C#-implementatie van de sequentiële BLE-handshake.	30
6.2	Realtime parsing en filtering van de binnengekomen BLE-sensordata.	30
6.3	Procedurele berekening van de gidsbeweging via de <code>Mathf.PingPong-</code> <code>functie</code>	31
6.4	Realtime berekening van de feedbackkleur en emissie via <code>Color.Lerp</code>	32
6.5	Dynamische volumeaanpassing en tijdsintervalberekening van de adap- tieve metronoom.	33
6.6	Dynamische vullogica en leegloopeffect van het virtuele hart.	34
6.7	Algoritme voor de stapsgewijze visuele hulpafbouw (scaffolding) via <code>Mathf.Lerp</code>	35
6.8	Logica voor het intelligent filteren en weergeven van corrigerende feed- backberichten op de HUD.	35
6.9	Dynamische berekening, formattering en kleurcodering van de trai- ningstimer op de HUD.	36
6.10	Manuele ruimtelijke kalibratie en world alignment op basis van controller- tracking.	37
6.11	Data-aggregatie en statistische analyse van de reanimatieparameters via LINQ ten behoeve van het eindrapport.	38

1

Inleiding

1.1. Context en urgentie

Ondanks de enorme technologische vooruitgang gemaakt in de moderne geneeskunde de afgelopen decennia, blijven hart- en vaatziekten de absolute nummer één doodsoorzaak wereldwijd. Jaarlijks is deze groep aandoeningen verantwoordelijk voor ongeveer een derde van alle sterfgevallen, wat neerkomt op miljoenen levens die vroegtijdig eindigen (Dattani e.a., [2023](#)). Wanneer een hartstilstand buiten het ziekenhuis plaatsvindt, krimpt de marge tussen leven en dood tot enkele kritische minuten. In deze fractie van tijd is de overlevingskans van het slachtoffer bijna volledig afhankelijk van één variabele: de kwaliteit van de omstanders of zorgverleners toegepaste reanimatie (CPR).

Hoewel het belang van kwaliteitsvolle reanimatie breed erkend wordt, blijft het effectief aanleren en onderhouden van deze motorische vaardigheid een grote uitdaging. De effectiviteit van een hulpverlener hangt af van uiterst precieze parameters, zoals een specifieke compressiediepte en een constant ritme. Het is net in deze educatieve fase, waar studenten de vertaalslag maken van theorie naar fysieke handeling, dat technologie een cruciale rol speelt.

1.2. Probleemstelling

De doelgroep van dit onderzoek is specifiek afgebakend tot bachelorstudenten in de opleiding Verpleegkunde en Geneeskunde aan HOGENT en partners zoals het UZ Gent en Zorglab. Voor deze toekomstige zorgverleners is het behalen van een hoge graad van bekwaamheid in CPR-technieken een essentieel onderdeel van het curriculum. In huidige onderwijsmethodiek wordt voor deze training vaak gebruikgemaakt van digitale oefenpoppen, zoals de Laerdal QCPR-serie. Deze poppen registreren via interne sensoren de kwaliteit van de handelingen, maar de wijze

waarop deze informatie aan de student wordt teruggekoppeld vertoont enkele tekortkomingen.

Ten eerste is er de barrière van abstracte feedback. Huidige systemen vertalen fysieke compressies naar numerieke scores, percentages of 2D-grafieken op een extern scherm, zoals een iPad of tablet. Voor een student die een motorische vaardigheid aanleert is deze vorm van feedback erg abstract en ingewikkeld te vertalen naar een concrete fysieke correctie Sigrist e.a. (2013). De student ziet op het scherm wellicht een score van 60%, maar krijgt geen directe, ruimtelijke instructie over hoe de handpositie of de drukhoek in de driedimensionale ruimte moet worden aangepast zodat die score verhoogd kan worden.

Ten tweede veroorzaakt het gebruik van een extern scherm het zogenaamde split-attention effect Sigrist e.a. (2013). Om de feedback te ontvangen wordt de student genoodzaakt de focus te verschuiven van de 'patiënt' (de oefenpop) naar de tablet. Dit verbreekt niet alleen de concentratie en de flow van de handeling, maar is ook niet representatief voor een realistische noodsituatie. In een werkelijke reanimatie-setting is een onafgebroken focus op het slachtoffer immer van levensbelang.

Deze problematiek staat in schril contrast met de bredere technologische evolutie binnen de gezondheidszorg. Terwijl Mixed Reality (MR) en Augmented Reality (AR) reeds succesvol worden ingezet voor chirurgische visualisaties an anatomische lessen (D'Angelo e.a., 2021), blijft reanimatietraining vooralsnog achter. Het verrijken van de werkelijkheid door feedback direct over de oefenpop te projecteren, biedt een logische oplossing om de hierboven beschreven cognitieve beperkingen weg te nemen.

1.3. Onderzoeksvraag

Op basis van bovenstaande probleemstelling wordt de volgende centrale onderzoeksvraag geformuleerd: "In welke mate kan een Mixed Reality-applicatie de kwaliteit van feedback tijdens reanimatietraining verbeteren in vergelijking met de huidige tablet-gebaseerde methoden?"

Om een onderbouwd antwoord te geven op deze hoofdvraag, wordt het onderzoek gesplitst in meerdere deelaspecten:

- **Probleemdomein:** Welke veelvoorkomende reanimatiefouten worden door de huidige hardware onvoldoende gevisualiseerd? En hoe ervaren studenten de vertaalslag van abstracte data naar fysieke handeling?
- **Oplossingsdomein:** Welke visualisatietechnieken binnen Mixed Reality zijn het meest effectief voor het aanleren van motorische vaardigheden? Hoe kan sensordata van de oefenpop real-time verwerkt worden binnen een MR-omgeving?

1.4. Onderzoeksdoelstelling

Het doel van dit onderzoek is de ontwikkeling en validatie van een Proof of Concept (PoC) om de potentie van MR binnen reanimatietraining te staven. Het concrete resultaat bestaat uit twee delen:

- Een werkend prototype ontwikkeld in Unity voor de Meta Quest 3, dat via Bluetooth communiceert met de oefenpop en visuele feedback (zoals de Ghost Avatar) projecteert.
- Een validatierapport waarin de effectiviteit van deze oplossing wordt vergeleken met traditionele methoden, gebruikmakend van objectieve prestatiescores en de NASA-TLX schaal voor cognitieve belasting.

1.5. Opzet van deze bachelorproef

De rest van deze bachelorproef is als volgt opgebouwd:

In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken binnen het onderzoeksdomein op basis van een literatuurstudie.

In Hoofdstuk 3 wordt de methodologie toegelicht en worden de technische stappen voor de ontwikkeling van de PoC besproken om een antwoord te kunnen formuleren op de onderzoeksvragen.

In Hoofdstuk 4 (Resultaten) behandelt de data-analyse van de experimenten, waarna in Hoofdstuk 7, tenslotte, de conclusie wordt gegeven en een antwoord geformuleerd op de onderzoeksvragen. Daarbij wordt ook een aanzet gegeven voor toekomstig onderzoek binnen dit domein.

2

Stand van zaken

Dit hoofdstuk biedt een diepgaande analyse van de theoretische en technische fundamenteën die noodzakelijk zijn voor de ontwikkeling van dit onderzoek. Waar de inleiding de maatschappelijke relevantie van reanimatietraining schetste, spitst dit hoofdstuk zich toe op de medische standaarden, de psychologische aspecten van motorisch leren en de technologische mogelijkheden van Mixed Reality. Deze literatuurstudie vormt de wetenschappelijke basis voor de methodologie en de technische keuzes die in [hoofdstuk 3](#) worden toegelicht.

2.1. Reanimatie: Richtlijnen en Kwaliteitscriteria

Om een effectief feedback-systeem te ontwerpen, moet eerst worden vastgesteld aan welke medische standaarden een kwalitatieve reanimatie moet voldoen. De leidraad hiervoor wordt gevormd door de internationale protocollen van de European Resuscitation Council (ERC).

2.1.1. De ERC Guidelines 2025

De meest recente standaarden voor reanimatie zijn vastgelegd in de *ERC Guidelines 2025 for Adult Basic Life Support*. Deze richtlijnen zijn gebaseerd op de wetenschappelijke consensus van de International Liaison Committee on Resuscitation (ILCOR) en introduceren enkele cruciale verschuivingen ten opzichte van de voorgaande 2021-editie (Smyth e.a., 2025).

De 2025-richtlijnen leggen een verhoogde nadruk op de snelheid van handelen en de ondersteunende rol van technologie in de overlevingsketen. De belangrijkste wijzigingen en aandachtspunten zijn:

- **Onmiddellijk alarmeren (Call First):** In tegenstelling tot eerdere protocollen wordt nu geadviseerd om de noodcentrale direct te bellen bij een niet-reageerbaar slachtoffer, nog vóór de volledige beoordeling van de ademha-

ling. De ademhalingscontrole vindt plaats terwijl de hulpverlener de dispatcher aan de lijn heeft (Smyth e.a., 2025).

- **Herkenning van agonale ademhaling:** Er is een grotere focus op het herkennen van abnormale ademhalingspatronen zoals "gasping" (happen naar lucht) en "panting" (bij sporters), die vaak foutief als een teken van leven worden geïnterpreteerd (Smyth e.a., 2025).
- **Integratie van technologie:** Voor het eerst worden digitale hulpmiddelen, variërend van video-instructies door dispatchers tot het gebruik van Virtual Reality (VR) en Augmented Reality (AR) in trainingen, expliciet ingebed in de relevante secties van de richtlijnen in plaats van als aparte categorie (Smyth e.a., 2025).

Deze verschuiving naar technologische integratie legitimeert de inzet van Mixed Reality als trainingsinstrument. Het systeem moet de gebruiker niet alleen instrueren over de techniek, maar ook ondersteunen in de kritieke besluitvorming die door de ERC 2025 wordt benadrukt.

2.1.2. Kwaliteitscriteria voor High-Quality CPR (HQ-CPR)

De effectiviteit van reanimatie wordt direct bepaald door de fysiologische impact van de handelingen op het lichaam van het slachtoffer. Om de overlevingskansen te maximaliseren, hanteert de Smyth e.a. (2025) strikte kwantitatieve criteria voor wat wordt gedefinieerd als 'High-Quality CPR'. Voor de ontwikkeling van een Mixed Reality feedback-systeem zijn deze parameters de kernwaarden waarop de algoritmen en visuele cues worden gekalibreerd.

De belangrijkste technische parameters zijn samengevat in [Tabel 2.1](#):

Parameter	Doelwaarde	Fysiologisch belang
Compressiediepte	5 – 6 cm	Genereren van voldoende bloedstroom
Compressiefrequentie	100 – 120 bpm	Optimaliseren van de coronaire perfusiedruk
Borstkas-recoil	Volledige ontlasting	Toelaten van ventriculaire vulling
Handpositie	Onderste helft sternum	Maximale compressie van de ventrikels

Tabel 2.1: Technische parameters voor kwalitatieve reanimatie conform ERC 2025 (Smyth e.a., 2025).

Compressiediepte

De richtlijnen schrijven een diepte voor van minimaal 5 cm, maar niet meer dan 6 cm. Compressies die ondieper zijn dan 5 cm resulteren in een inadequate bloedstroom naar de hersenen en het hart. Omgekeerd vergroten compressies dieper dan 6 cm het risico op iatrogen letsel, zoals ribfracturen of interne bloedingen

(Smyth e.a., 2025). In een MR-omgeving is dit de meest uitdagende parameter om te visualiseren door het gebrek aan diepteperceptie van bovenaf.

Compressiefrequentie

Het ideale ritme ligt tussen de 100 en 120 compressies per minuut. Een te lage frequentie leidt tot een te lage gemiddelde perfusiedruk, terwijl een te hoge frequentie (boven de 120 bpm) de borstkas onvoldoende tijd geeft voor recoil, wat de efficiëntie per compressie verlaagt.

Recoil en Leunen (Leaning)

Een veelvoorkomende fout bij hulpverleners is het blijven 'leunen' op de borstkas na een compressie. De ERC benadrukt dat volledige *recoil* (terugslag) essentieel is zodat het intrathoracale volume herstelt en het hart zich opnieuw met bloed kan vullen voor de volgende cyclus. Feedback-systemen moeten hier specifiek op controleren, aangezien dit een fout is die door de hulpverlener vaak niet wordt gevoeld.

2.1.3. Manikin-gebaseerde Feedback: Laerdal QCPR

De huidige standaard voor objectieve feedback in reanimatietraining wordt gevormd door intelligente oefenpoppen, waarvan de Laerdal QCPR-technologie de meest wijdverspreide is. Dit systeem maakt gebruik van een draadloze verbinding (vaak Bluetooth) tussen sensoren in de pop en externe software op een monitor of tablet (Cortegiani e.a., 2017).

Werking van de sensoren

De sensoren in de pop meten continu de mechanische belasting op de borstkas. De belangrijkste gemeten parameters zijn de compressiediepte, de frequentie, de handpositie en de mate van volledige ontlasting (*recoil*). Volgens Cortegiani e.a. (2017) berekent de software op basis van deze data een zogenaamde 'compression score': een gewogen gemiddelde (0–100%) dat de algehele kwaliteit van de reanimatie uitdrukt. In hun onderzoek bij middelbare scholieren bleek dat studenten die trinden met deze real-time feedback een significant hogere score behaalden (mediaan 90%) dan studenten die enkel vertrouwden op de instructies van een menselijke expert (mediaan 67%) (Cortegiani e.a., 2017).



Figuur 2.1: De Laerdal Little Anne QCPR pop in combinatie met de feedback-app op een tablet (Cortegiani e.a., 2017).

Superieure herkenning van technische fouten

Een inzicht uit de studie van Cortegiani e.a. (2017) is dat softwarematige feedback vooral effectief is voor parameters die voor het menselijk oog moeilijk waarneembaar zijn. Zo presteerde de QCPR-groep significant beter op het gebied van *chest recoil* (71% correcte uitvoering versus 24% in de controlegroep). Dit suggereert dat menselijke instructeurs moeite hebben om minieme fouten in de ontlasting van de borstkas te zien, terwijl de sensoren in de pop dit feilloos registreren.

Hoewel dit systeem de technische vaardigheidsverwerving versnelt, blijft de interface beperkt tot een 2D-weergave op een extern scherm. Zoals in de volgende sectie wordt toegelicht, creëert dit een nieuwe uitdaging op het gebied van aandacht en cognitieve belasting.

2.1.4. De beperkingen van 2D-displays en het Split-Attention Effect

Hoewel systemen zoals Laerdal QCPR objectieve data leveren, dwingen ze de gebruiker tot een onnatuurlijke werkhouding waarbij de aandacht verdeeld moet worden tussen de fysieke handeling en een extern scherm. Recent onderzoek van Hurt (2024) werpt een nieuw licht op de cognitieve nadelen van deze methode.

Situational Awareness en Performance

Een cruciale bevinding in het onderzoek naar motorische taken is de sterke positieve correlatie tussen *situational awareness* (SA) en prestatie bij het gebruik van Mixed Reality. Hurt (2024) stelt dat het beperken van *split-attention* essentieel is: wanneer informatie direct in het gezichtsveld wordt geprojecteerd, kunnen deelnemers hun focus volledig op de taak houden, wat leidt tot betere resultaten. Op-

vallend genoeg ontbrak deze correlatie bij het gebruik van tablets. Dit suggereert dat de tablet-modaliteit de gebruiker dwingt om de aandacht zo onregelmatig te verdelen dat de natuurlijke link tussen omgevingsbewustzijn en prestatie wordt verbroken (Hurt, 2024).

De Familiarity Bias en het TAM2-model

Een belangrijk punt voor dit onderzoek is waarom tablets momenteel de standaard zijn, ondanks de cognitieve nadelen. Hurt (2024) verklaart dit aan de hand van het *Technology Acceptance Model 2* (TAM2). Deelnemers rapporteren vaak een voorkeur voor tablets, niet omdat ze efficiënter zijn, maar vanwege een *familiarity bias*. Omdat studenten in hun dagelijks leven constant tablets gebruiken voor studie en ontspanning, ervaren ze een lagere drempel in gebruiksgemak, ongeacht de werkelijke taakbelasting (Hurt, 2024). Bij complexe, taakgerichte handelingen zoals CPR kan deze gewoonte echter de technische tekortkomingen van de modaliteit maskeren.

Task Load en Visuele Continuïteit

Aanvullend onderzoek toont aan dat de *task load* — een maatstaf voor mentale, fysieke en temporele inspanning — significant lager is bij Augmented Reality-instructies dan bij instructies op een monitor of tablet (Hurt, 2024, Tang et al. in). Door informatie via een *heads-up display* (HUD) aan te bieden, hoeft de gebruiker zijn ogen vrijwel nooit van de taak af te wenden. Dit vermindert niet alleen de oog- en hoofdbewegingen, maar zorgt er ook voor dat informatie in context blijft (Hurt, 2024, Haines et al. in). Voor reanimatietraining betekent dit dat de overgang van het observeren van de feedback naar het uitvoeren van de compressie naadloos verloopt, in tegenstelling tot de gefragmenteerde ervaring bij 2D-schermen.

2.1.5. De Guidance Hypothesis en de Ontwikkeling van Interne Représentaties

Een fundamenteel risico bij het gebruik van real-time feedbacksystemen is de *guidance hypothesis*. Volgens Sigrist e.a. (2013) kan permanente externe feedback tijdens het leerproces leiden tot een afhankelijkheid van deze informatiebron, wat de ontwikkeling van een autonoom spiergeheugen belemmert.

Het mechanisme van afhankelijkheid

De kern van de *guidance hypothesis* is dat de student de externe feedback (bijv. een balkje op een scherm) gebruikt als een kruk. In plaats van te leren vertrouwen op *intrinsic feedback*, de interne zintuiglijke waarneming van de eigen lichaamshouding en krachtoefening, reageert de student puur op de *augmented feedback* van het systeem (Sigrist e.a., 2013). Dit heeft tot gevolg dat de prestaties tijdens de training uitstekend zijn, maar dat de vaardigheid onmiddellijk degradeert zodra

de feedback wordt weggenomen (*retention tests*). De student heeft namelijk geen interne bewegingsrepresentatie opgebouwd die zonder hulp kan worden opgeroepen.

Simpele versus complexe motorische taken

Sigris e.a. (2013) maken een belangrijk onderscheid tussen simpele en complexe taken. Bij simpele taken is constante feedback vrijwel altijd schadelijk voor het leerproces op lange termijn. Echter, bij complexe taken zoals reanimatie, waarbij houding, diepte, tempo en recoil simultaan moeten worden beheerst, kan real-time feedback juist helpen om de cognitieve belasting te verlagen in de vroege leerfase. Het helpt de student om de "structuur" van de beweging te begrijpen zonder overweldigd te raken.

Strategieën voor effectief leren

Om de nadelen van de *guidance hypothesis* te beperken, stelt de literatuur verschillende strategieën voor die relevant zijn voor het ontwerp van een Mixed Reality PoC:

- **Fading feedback:** De frequentie van de visuele cues moet afnemen naarmate het vaardigheidsniveau van de student toeneemt (Sigris e.a., 2013).
- **No-feedback trials:** Het inbouwen van oefensessies zonder hologrammen is essentieel om te controleren of de student de correcte diepte en frequentie op gevoel kan reproduceren.
- **Bandwidth feedback:** Hierbij wordt alleen feedback gegeven wanneer de foutmarge een bepaalde drempel overschrijdt, wat de student dwingt om binnen de "veilige zone" zelfstandig te corrigeren.

Door de *ghost avatar* in Mixed Reality niet constant, maar adaptief aan te bieden, kan het systeem de student begeleiden in de vroege fase zonder dat er een permanente afhankelijkheid ontstaat die de inzetbaarheid in een echte noodsituatie ondermijnt.

2.2. Cognitieve Belasting en Motorisch Leren

In deze sectie wordt de psychologische rechtvaardiging voor de overstap naar Mixed Reality toegelicht. De effectiviteit van een trainingstool wordt niet alleen bepaald door de technische accuraatheid van de sensoren, maar vooral door de manier waarop de menselijke hersenen informatie verwerken tijdens een fysiek veeleisende taak zoals reanimatie.

2.2.1. Het Split-Attention Effect

Het *split-attention effect* treedt op wanneer een leerling gedwongen wordt om de aandacht te verdelen tussen twee of meer informatiebronnen die essentieel zijn voor de taak, maar die fysiek van elkaar gescheiden zijn. Volgens Hurt (2024) leidt dit bij traditionele CPR-trainingen met externe schermen tot een "cognitieve boete".

De student moet herhaaldelijk de blik afwenden van de borstkas van de pop (de plaats van actie) naar een tablet of monitor (de plaats van feedback). Volgens de *Cognitive Load Theory* zorgt dit voor een overbelasting van het werkgeheugen: de hersenen moeten de visuele context van de pop telkens mentaal loslaten om de abstracte data op het scherm te verwerken en vervolgens weer terug te koppelen naar de fysieke handeling. Mixed Reality elimineert deze barrière door de feedback direct over de pop te projecteren, wat de visuele continuïteit herstelt en de mentale verwerkingscapaciteit volledig beschikbaar maakt voor de motorische uitvoering.

2.2.2. Situational Awareness (SA)

Situational Awareness (SA) is het vermogen om elementen in de omgeving waar te nemen, de betekenis ervan te begrijpen en te voorspellen hoe deze de taak in de nabije toekomst zullen beïnvloeden. In een reële reanimatiesituatie is SA van vitaal belang om adequaat te reageren op de AED-instructies, de toestand van het slachtoffer en de veiligheid van de omgeving.

Uit het onderzoek van Hurt (2024) blijkt dat er bij Mixed Reality een significante positieve correlatie bestaat tussen SA en de uiteindelijke prestatie. Bij tablet-gebaseerde modaliteiten ontbrak dit verband echter. Gebruikers van externe schermen vertonen vaak een vorm van "tunnelvisie" op de grafische feedback, waardoor zij het contact met de pop en de omgeving verliezen. Hurt wijst hierbij ook op de *familiarity bias*: omdat studenten zeer gewend zijn aan tablets, onderschatten zij vaak de hoeveelheid aandacht die het schakelen tussen scherm en pop werkelijk opeist.

2.2.3. Proprioceptie en Haptiek

Een uniek aspect van reanimatie is de noodzaak van haptische feedback: de fysieke weerstand van de borstkas die de hulpverlener moet voelen om de juiste kracht te kalibreren. Sigrist e.a. (2013) maken hierbij onderscheid tussen twee vormen van perceptie:

- **Haptiek:** De combinatie van tactiele perceptie (druk op de huid) en kinesthetische perceptie (het gevoel van de pose en beweging via receptoren in spieren en pezen).
- **Proprioceptie:** Het interne vermogen van het lichaam om de eigen positie en beweging in de ruimte waar te nemen zonder visuele controle.

Motorisch leren is volgens Sigrist e.a. (2013) het meest effectief wanneer externe feedback de interne zintuiglijke waarneming "kalibreert". In een traditionele setting voelen de handen de weerstand, maar de ogen zien een abstracte 2D-meter. In een Mixed Reality-omgeving vallen de visuele referentie (de *ghost avatar*) en de haptische ervaring (de fysieke weerstand van de pop) ruimtelijk samen. Dit zorgt voor een snellere neurologische koppeling: de hersenen leren de gevoelde spierspanning direct te associëren met de correcte diepte van 5–6 cm.

2.3. Mixed Reality in de Gezondheidszorg

In deze sectie worden de technologische kaders van Mixed Reality (MR) geschetst. Er wordt dieper ingegaan op de hardwarematige verschillen tussen huidige systemen en hoe deze van invloed zijn op de nauwkeurigheid van medische simulaties.

2.3.1. Definities: Het Reality-Virtuality Continuum

Om de positie van Mixed Reality te begrijpen, wordt vaak verwezen naar het *Reality-Virtuality Continuum* van Milgram. Volgens Gerup e.a. (2020) is Mixed Reality de overkoepelende term voor omgevingen waarin fysieke en digitale objecten in real-time naast elkaar bestaan en met elkaar interageren.

- **Augmented Reality (AR):** Voegt digitale elementen toe aan een verder ongewijzigde fysieke wereld, vaak via een smartphone of transparante bril (Carroll, 2020).
- **Virtual Reality (VR):** Sluit de gebruiker volledig af van de fysieke wereld en vervangt deze door een volledig gesimuleerde omgeving (Raymer e.a., 2023).
- **Mixed Reality (MR):** De samensmelting waarbij virtuele objecten (zoals de *ghost avatar*) niet alleen bovenop de werkelijkheid worden getoond, maar ook verankerd lijken aan fysieke objecten (zoals de reanimatiepop) (D'Angelo e.a., 2021).

2.3.2. Video Passthrough versus Optical See-Through

Bij het ontwerpen van een reanimatietrainer is de keuze van de visuele weergave cruciaal. Er bestaan twee dominante technologieën:

1. **Optical See-Through (bijv. Microsoft HoloLens 2):** Maakt gebruik van transparante glazen waar hologrammen op geprojecteerd worden. Het voordeel is een natuurlijke weergave van de omgeving, maar het nadeel is een beperkt gezichtsveld (*Field of View*) en transparante hologrammen die bij fel licht moeilijk zichtbaar zijn (Diller e.a., 2024).
2. **Video Passthrough (bijv. Meta Quest 3):** De headset is volledig gesloten

(zoals VR), maar gebruikt hoge-resolutie camera's om de buitenwereld in real-time te filmen en op de schermen te tonen.

Voor dit onderzoek is gekozen voor de Meta Quest 3 vanwege de superieure **diepteperceptie** en **occlusie**. Bij reanimatie bevinden de handen zich tussen de ogen van de hulpverlener en de pop. Video Passthrough staat toe dat virtuele feedback (zoals diepte-indicators) correct achter of rondom de fysieke handen getoond kan worden, wat bij optische systemen vaak problematisch is (Glover & Linowes, 2019).

2.3.3. Spatial Computing en Verankering (Anchoring)

Een essentieel aspect van de Proof of Concept is dat de *ghost avatar* exact gepositioneerd blijft op de fysieke reanimatiepop, ongeacht de bewegingen van de gebruiker. Dit proces wordt gefaciliteerd door *Spatial Computing*.

Volgens Glover en Linowes (2019) maakt de headset gebruik van *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) om de kamer in kaart te brengen. Door middel van **Spatial Anchors** kan de Unity-applicatie een digitaal coördinatensysteem koppelen aan een specifiek punt in de fysieke ruimte. Voor de reanimatiepop betekent dit dat de software de pop herkent als een vast ankerpunt, waardoor de feedback-overlay stabiel blijft en de student de haptische weerstand van de pop exact op de locatie van het hologram ervaart.

2.4. Visualisatietechnieken voor Motorische Feedback

De effectiviteit van een Mixed Reality-reanimatietrainer hangt grotendeels af van de manier waarop de verzamelde sensordata wordt vertaald naar begrijpelijke visuele instructies. In deze sectie worden de verschillende technieken voor visuele ondersteuning besproken, gebaseerd op de classificatie van Diller e.a. (2024).

2.4.1. Positionele Feedback: De Ghost Avatar

Positionele feedback heeft als doel de gebruiker te informeren over de gewenste lichaamshouding of de positie van de ledematen. De meest gebruikte techniek hiervoor is de *Transparent Target Avatar*, ook wel bekend als de 'Ghost Avatar'.

Volgens de uitgebreide survey van Diller e.a. (2024) biedt een transparante avatar het grote voordeel dat het dient als een direct ruimtelijk spiegelbeeld. In de context van reanimatie kan een Ghost Avatar de ideale handpositie en de volledige compressiecyclus (van de startpositie tot de maximale diepte van 5–6 cm) visualiseren. Doordat het hologram direct over de eigen handen en de pop wordt geprojecteerd, hoeft de student geen mentale rotatie of vertaalslag te maken vanaf een extern 2D-scherm. Dit minimaliseert de cognitieve belasting en maximaliseert de nauwkeurigheid van de positionering op het sternum.

2.4.2. Directionele en Abstracte Feedback

Hoewel een Ghost Avatar de doelpositie aangeeft, zijn aanvullende cues vaak nodig om de gebruiker in real-time te corrigeren wanneer deze van het ideale pad afwijkt.

- **Directionele Feedback:** Deze cues leiden de gebruiker actief naar de juiste positie. Diller e.a. (2024) identificeert hierbij technieken zoals 3D-pijlen die de richting van de benodigde kracht aangeven, of 'Rubber Bands' (virtuele elastieken) die de afstand tussen de huidige handpositie en de doelpositie visualiseren. Voor CPR-training zijn pijlen bijzonder nuttig om aan te geven dat een compressie dieper moet zijn of dat de handen volledig ontlast moeten worden (recoil).
- **Abstracte Feedback:** Hierbij wordt informatie versimpeld tot symbolen of kleuren. De meest effectieve methode is *Color Coding*. In een Mixed Reality-omgeving kan de Ghost Avatar of de reanimatiepop groen oplichten bij een correcte uitvoering, en rood verkleuren bij een foutieve diepte of frequentie. Dit biedt onmiddellijke bevestiging zonder dat de gebruiker tekstuele instructies hoeft te lezen.

2.4.3. Feedforward versus Feedback

Een cruciaal conceptueel onderscheid in motorisch leren is het verschil tussen *feedforward* en *feedback* informatie.

Sigrist e.a. (2013) legt uit dat **feedback** informatie geeft over een actie die al heeft plaatsgevonden (bijv. "de vorige compressie was te ondiep"). **Feedforward** daarentegen toont de gewenste actie vóór of tijdens de uitvoering (bijv. de Ghost Avatar die de beweging voordoet).

In dit onderzoek wordt gestreefd naar een synergie tussen beide:

1. De Ghost Avatar fungeert als een **feedforward-mechanisme** door continu het ideale pad en tempo aan te geven.
2. De Color Coding en directionele pijlen fungeren als **concurrent feedback** door de afwijking van dat ideale pad in real-time te markeren.

Volgens Sigrist e.a. (2013) is deze combinatie in de vroege leerfase van complexe taken essentieel om een correcte 'interne representatie' van de beweging op te bouwen, op voorwaarde dat de hulp later geleidelijk wordt afgebouwd om afhankelijkheid te voorkomen (zie [deelparagraaf 2.1.5](#)).

2.5. Technische Infrastructuur en Communicatie

De betrouwbaarheid van een Mixed Reality-reanimatietrainer valt of staat bij de technische integratie tussen de fysieke pop en de digitale interface. In deze sectie worden de protocollen voor datatransmissie, de impact van latentie en de rol van de ontwikkelomgeving toegelicht.

2.5.1. Bluetooth Low Energy (BLE) en GATT-profielen

Voor de draadloze communicatie tussen de reanimatiepop en de Meta Quest 3 is *Bluetooth Low Energy* (BLE) het aangewezen protocol. Volgens Chaari Fourati en Said (2020) is BLE bij uitstek geschikt voor medische sensoren vanwege het lage energieverbruik en de geoptimaliseerde overdracht van kleine datapakketten.

De pop fungeert binnen dit netwerk als een *GATT-server* (Generic Attribute Profile). De data (zoals compressiediepte in millimeters) wordt georganiseerd in *characteristics*, die gegroepeerd zijn onder specifieke *services*. De Mixed Reality-headset treedt op als *client* en maakt gebruik van een 'subscribe'-mechanisme. Hierdoor hoeft de headset niet constant om data te vragen (polling), maar verstuurt de pop automatisch een update zodra er een verandering in de sensordata optreedt. Dit draagt bij aan een efficiëntere verwerking en een langere batterijduur van de apparatuur (Chaari Fourati & Said, 2020).

2.5.2. Latency en Gebruikerservaring

In een real-time feedbacksysteem is *latency* - de vertraging tussen de fysieke actie en de visuele reactie - een kritieke factor voor het motorisch leerproces. Wanneer de visuele cue niet synchroon loopt met de haptische ervaring (het indrukken van de pop),

ontstaat er een cognitieve dissonantie die de leercurve negatief beïnvloedt.

Volgens het klassieke onderzoek van Miller (1968) ligt de grens voor een 'onmiddellijke' systeemreactie rond de 100 ms. Boven deze grens ervaart de menselijke hersenpan een merkbare vertraging, wat bij fijn-motorische taken zoals CPR kan leiden tot een over- of ondercorrectie van de diepte en frequentie. Voor een optimale Mixed Reality-ervaring is de ambitie echter om de *motion-to-photon latency* (de tijd tussen beweging en de update van de pixels in de bril) nog lager te houden, idealiter onder de 20 ms, om misselijkheid en desoriëntatie te voorkomen (Glover & Linowes, 2019).

2.5.3. De Unity Engine en Meta XR SDK

De softwarematige brug tussen de ruwe sensordata en de *ghost avatar* wordt gevormd door de Unity game engine in combinatie met de *Meta XR Core SDK*.

Unity dient als de *rendering engine* die de 3D-modellen en visuele feedback in real-time berekent. De *Meta XR SDK* is essentieel voor de *spatial awareness* van het systeem. Het biedt de benodigde API's voor:

- **Video Passthrough:** Het streamen van de camerabeelden van de werkelijkheid naar de displays van de headset met minimale vertraging.
- **Spatial Anchoring:** Het vastzetten van het digitale coördinatensysteem op een fysiek punt (de pop), zodat de Ghost Avatar stabiel blijft ongeacht de hoofdbewegingen van de gebruiker (Glover & Linowes, 2019).

Door deze technologieën te combineren, wordt de abstracte data van de BLE-verbinding omgezet in een tastbare, ruimtelijke ervaring die de student helpt bij het internaliseren van de correcte reanimatietechniek.

3

Methodologie

Om de onderzoeksvraag te beantwoorden, hanteert dit onderzoek een methodiek gericht op de ontwikkeling van een Proof of Concept (PoC), gevolgd door een experimentele validatiefase. Vanwege de complexiteit van de hardware-integratie wordt een iteratieve, agile aanpak gehanteerd waarin risicomanagement centraal staat.

Het onderzoek is onderverdeeld in de volgende vier-fasen:

Om de centrale onderzoeksvraag te beantwoorden, heeft dit onderzoek een methodiek gehanteerd die gericht was op het stapsgewijs ontwikkelen van een *Proof of Concept* (PoC), gevolgd door een gerichte validatiefase. Vanwege de technische complexiteit rondom de hardware-integratie en het ontbreken van een officiële SDK, is er gekozen voor een iteratieve, *Agile*-benadering waarin risicomanagement en technische haalbaarheid centraal stonden.

Het onderzoek is feitelijk uitgevoerd verspreid over de volgende vier fasen:

3.1. Fase 1: Requirements Analyse en Stakeholder-validatie

In de eerste fase van het onderzoek zijn de functionele en niet-functionele vereisten van de Mixed Reality-applicatie gedefinieerd. Het doel hierbij was om een objectief en medisch onderbouwd kader te scheppen waaraan de PoC moest voldoen om de geïdentificeerde problemen in de reanimatietraining effectief aan te pakken.

- **Doelstelling:** Het vastleggen van de exacte technische en medische randvoorwaarden voor een intuïtieve reanimatietraining in Mixed Reality.
- **Onderzoeksmethoden:**
 - *Literatuurstudie:* Diepgaande analyse van de meest recente ERC 2025-richtlijnen voor kwalitatieve borstcompressies om de streefwaarden (5–6 cm diepte, 100–120 BPM) te verankeren.

- *Stakeholder-consultatie*: Een verkennend expertgesprek met de opdrachtgever en co-promotor Thomas Cuelenaere, waarbij specifieke klinische noden en de problematiek rondom decompressie (*chest recoil*) in kaart zijn gebracht.
- *MoSCoW-prioritering*: Het categoriseren van de softwarevereisten (*Must have's* zoals realtime dieptemeting versus *Won't have's* zoals volledige beademingsanalyse) om de scope van de PoC scherp af te bakenen.
- **Deliverables**: Een formeel goedgekeurde en geprioriteerde lijst van functionele en niet-functionele vereisten.
- **Verantwoording**: Deze fase was essentieel om te garanderen dat de technologische ontwikkeling direct aansloot bij de reële noden uit het zorgveld, in plaats van te steunen op louter theoretische aannames.

3.2. Fase 2: Architectuur en "Simulation First"-Ontwikkeling

In de tweede fase is de software-architectuur en de technische fundering van de applicatie gelegd binnen de Unity game-engine met C#. Vanwege de kritieke afhankelijkheid van externe hardware is er gekozen voor een modulaire architectuur die de feedbacklogica volledig loskoppelt van de fysieke sensoren.

- **Doelstelling**: Het ontwerpen en realiseren van een hardware-agnostische Unity/C# PoC waarin de visuele en auditieve feedbackmechanismen onafhankelijk van de pop ontwikkeld en getest konden worden.
- **Onderzoeksmethoden**:
 - *Software Prototyping*: Ontwikkeling van een *Data Abstraction Layer* in C# die een universele interface biedt voor reanimatiedata.
 - *Simulatie*: Implementatie van een *MockSimulator* component die synthetische reanimatieparameters genereerde om de reactiviteit van de hologrammen te verifiëren.
 - *Visualisatie-ontwerp*: Het procedureel programmeren van de *Ghost Avatar* en de realtime *Color Coding*-algoritmen op basis van de didactische principes uit de literatuurstudie.
- **Deliverables**: Een functioneel Unity-project waarin de visuele feedback-loop operationeel was op basis van gesimuleerde data, inclusief de initiële configuratie voor *spatial anchoring* en *Passthrough*.
- **Verantwoording**: Deze "Simulation First"-benadering voorkwam dat software-ontwikkeling vertraging opliep door hardware-afhankelijkheden en verhoogde de codekwaliteit door een strikte scheiding van belangen (*Separation of Concerns*).

3.3. Fase 3: Technical Spike en Hardware-integratie

In de derde fase vond de kritieke transitie plaats van de gesimuleerde Unity-omgeving naar de fysieke testopstelling. De kern van deze fase bestond uit het overbruggen van de communicatiebarrière tussen de propriëtaire reanimatiepop en de XR-headset.

- **Doelstelling:** Het realiseren van een stabiele, realtime dataverbinding via Bluetooth Low Energy (BLE) tussen de Laerdal Little Anne-pop en de Meta Quest 3.
- **Onderzoeksmethoden:**
 - *Statische Analyse:* Het bestuderen van bekende openbare BLE-profielen en UUID-structuren van vergelijkbare medische sensoren.
 - *Wireshark HCI-sniffing:* Het live onderscheppen en analyseren van het Bluetooth-verkeer tussen de officiële mobiele applicatie en de fysieke pop via een Android-ontwikkelaarsomgeving om het fabrikant-specifieke GATT-protocol en de sequentiële handshake te kraken.
 - *Hardware-integratie:* Het vervangen van de `MockSimulator` uit Fase 2 door de actuele, gecapteerde BLE-datastroom in de Unity Update-loop.
- **Deliverables:** Een volledig geïntegreerde en functionele Proof of Concept die in realtime, zonder merkbare latentie, reageert op fysieke compressies op de pop.
- **Verantwoording:** Door dit complexe reverse-engineering-traject als een geïsoleerde *technical spike* te behandelen, bleef het hoofdproject beschermd tegen onvoorziene hardware-risico's en verbindingscrashes.

3.4. Fase 4: Kwalitatieve Expert-Validatie

In de initiële ontwerpfase van dit onderzoek was een kwantitatieve A/B-test met een grote studentengroep gepland. Door praktische beperkingen en het tijdsbestek van het onderzoek is deze fase omgevormd tot een gerichte, kwalitatieve *expert-review*. Dit sluit aan bij de aard van een technisch-ontwerpende bachelorproef Toegepaste Informatica, waarbij de validatie van de architectuur en de functionele haalbaarheid door een domeinexpert de hoogste prioriteit geniet.

- **Doelstelling:** Het kritisch evalueren van de didactische, ergonomische en functionele meerwaarde van de MR-applicatie ten opzichte van de huidige tablet-standaard.
- **Onderzoeksmethoden:**

- *Kwalitatieve Expert-Review*: Een hands-on evaluatiesessie waarbij co-promotor en healthcare-expert Thomas Cuelenaere de PoC intensief heeft getest.
- *Semi-gestructureerde Evaluatie*: Het systematisch toetsen van het systeem aan de vier vooraf opgestelde criteria: gebruiksvriendelijkheid, visuele helderheid, de effectiviteit van de groeikansenfeedback en de softwarematige aanpasbaarheid van de gesimuleerde omgeving.
- **Deliverables**: Een gestructureerde review-dataset bestaande uit deskundige praktijkbeoordelingen en didactische feedback, welke direct is aangewend voor de algemene conclusievorming en de reflectie van deze bachelorproef.
- **Verantwoording**: Deze methode bood een diepgaand, klinisch gefundeerd inzicht in de werkelijke meerwaarde en inzetbaarheid van het systeem binnen medische opleidingen, gevalideerd door een expert die dagelijks de noden van de doelgroep overziet.

4

Analyse en Requirements

In dit hoofdstuk worden de functionele en technische vereisten van de Proof of Concept (PoC) gedefinieerd. Waar de literatuurstudie in Hoofdstuk 2 de theoretische noodzaak voor Mixed Reality (MR) binnen de zorg vaststelde, vertaalt dit hoofdstuk die noodzaak naar concrete systeemeisen. De focus ligt op het overbruggen van de kloof tussen de fysieke hardware van de reanimatiepop en de digitale omgeving van de Meta Quest 3.

4.1. Probleemcontext

De huidige reanimatietrainingen lijden onder het zogenaamde *split-attention effect*, waarbij de cursist de aandacht moet verdelen tussen de pop en een extern feedbackscherf. De voorgestelde oplossing beoogt deze cognitieve belasting te verlagen door data direct in het gezichtsveld van de verpleegkundige te projecteren. De technische uitdaging is echter dat de gebruikte Laerdal Little Anne QCPR pop een gesloten systeem is zonder publiek toegankelijke API.

4.2. Functionele Requirements

De functionele eisen beschrijven wat de applicatie moet kunnen om als een effectieve trainingstool te dienen.

- **Draadloze Data-acquisitie:** De applicatie moet via Bluetooth Low Energy (BLE) verbinding maken met de reanimatiepop.
- **Real-time Feedback-lus:** Elke compressie moet onmiddellijk resulteren in een visuele verandering in de MR-omgeving.
- **Visuele Indicatoren:** Het systeem moet conform de ERC 2025 richtlijnen aangeven of de compressiediepte (5–6 cm) en de frequentie (100–120 bpm) correct zijn.

- **Ghost Avatar:** Een transparante referentie-avatar moet het ideale bewegingspatroon demonstreren om de student te begeleiden (*feedforward*).

4.3. Niet-functionele Requirements

De niet-functionele eisen bepalen de kwaliteit en de bruikbaarheid van de software.

- **Robuustheid:** De BLE-verbinding moet stabiel blijven in een omgeving met potentieel veel interferentie (zoals een ziekenhuis- of klasomgeving).
- **Intuïtieve UI:** De interface moet de *situational awareness* van de verpleegkundige versterken in plaats van deze te belemmeren met complexe menu's.

4.4. Technische Randvoorwaarden

Voor de ontwikkeling van deze PoC zijn de volgende hardware- en softwarekeuzes gemaakt:

Meta Quest 3: Gekozen vanwege de hoge-resolutie *video passthrough* en de krachtige *spatial computing* mogelijkheden voor hand-tracking.

Unity Engine: Gebruikt als primaire ontwikkelomgeving vanwege de volwassenheid van de Meta XR SDK en de flexibiliteit in het afhandelen van ruwe datastromen.

Android-gebaseerd OS: Aangezien de Quest 3 op Android draait, moet de communicatielaag compatibel zijn met de Android Bluetooth-stack.

4.5. MoSCoW-Prioritering

Gezien de beperkte tijdspanne van de bachelorproef en de complexiteit van de hardware-integratie, is de scope vastgelegd middels de MoSCoW-methode:

Prioriteit	Eis
Must-have	Stabiele BLE-datastroom, visualisatie van diepte en tempo, correcte ruimtelijke verankering op de pop.
Should-have	Implementatie van de Ghost Avatar, kleurcodering bij foutieve handelingen.
Could-have	Loggen van sessiedata voor latere evaluatie, ondersteuning voor verschillende reanimatie-scenario's.
Won't-have	Volledige integratie met ziekenhuis-informatiesystemen of multi-player functionaliteit.

Tabel 4.1: MoSCoW-prioritering voor de Proof of Concept.

4.6. Conclusie van de analyse

De analyse toont aan dat de grootste bottleneck niet de visualisatie in MR is, maar de acquisitie van de live data. Zonder een gedocumenteerde API van de fabrikant is een standaard implementatie onmogelijk. Dit noodzaakt een diepgaand onderzoek naar het communicatieprotocol van de pop, wat in het volgende hoofdstuk (Reverse Engineering) technisch zal worden uitgewerkt.

5

Reverse Engineering van het Communicatieprotocol

Dit hoofdstuk vormt de technische kern van het onderzoek. Het beschrijft het proces van het ontsluiten van de gesloten datacommunicatie tussen de Laerdal Little Anne QCPR en de Meta Quest 3. Aangezien er geen publieke SDK beschikbaar is voor integratie binnen de Unity-omgeving op Android-basis, was een *reverse engineering* traject noodzakelijk om de ruwe sensordata te vertalen naar bruikbare parameters voor de Mixed Reality-omgeving.

5.1. Methodologie van het onderzoek

Het onderzoek naar het protocol werd opgedeeld in drie fasen:

1. **Statische Analyse:** Het decompileren van de officiële Android-applicatie om de broncode te bestuderen.
2. **Dynamische Analyse:** Het onderscheppen van live Bluetooth-verkeer tussen de pop en een smartphone via HCI-sniffing.
3. **Protocol Mapping:** Het correleren van onderschepte bytes aan fysieke handelingen op de pop en het implementeren van deze logica in C#.

5.2. Statische Analyse en de barrière van Obfuscatie

De eerste poging tot het begrijpen van het protocol bestond uit het decompileren van de officiële Laerdal QCPR-app (APK-bestand) middels tools zoals *Jadx-GUI*. Hoewel de decompilatie succesvol was in het herstellen van de mappenstructuur, stuitte het onderzoek op een fundamentele barrière. Uit de decompilatie (zie Figuur 5.1) bleek dat de applicatie is gebouwd op het cross-platform Xamarin/Mono

5.4. Ontcijfering van het Protocol

Door de Wireshark-logs te correleren met de uiteindelijke Unity-implementatie, zijn de volgende technische specificaties achterhaald:

5.4.1. Identificatie van Characteristics

Er werd vastgesteld dat de pop communiceert via een specifiek Service-UUID-patroon (d746-4092-84e7-dad34863fe4a). De belangrijkste kanalen zijn:

Main Service: 00000126-d746-4092-84e7-dad34863fe4a

Auth Characteristic: 000001b1-d746-4092-84e7-dad34863fe4a

Wave (Data) Characteristic: 00000027-d746-4092-84e7-dad34863fe4a

5.4.2. De "Handshakeën Authenticatie

Een cruciale ontdekking was dat de pop beveiligd is met een authenticatie-mechanisme. Zonder het versturen van een specifieke *Auth Key* naar de pop, weigert de hardware sensordata te verzenden. De geanalyseerde handshake bestaat uit drie stappen:

1. **Authenticatie:** Het schrijven van een 20-byte array (startend met `0x5C 0x0E ...`) naar het *Auth-UUID*.
2. **Activatie 1:** Een write-opdracht met payload `0x03` naar *UUID ... 012b*.
3. **Activatie 2:** Een write-opdracht met payload `0x03 0xFF 0x00` naar *UUID ... 0127* (zie Figuur 5.3).

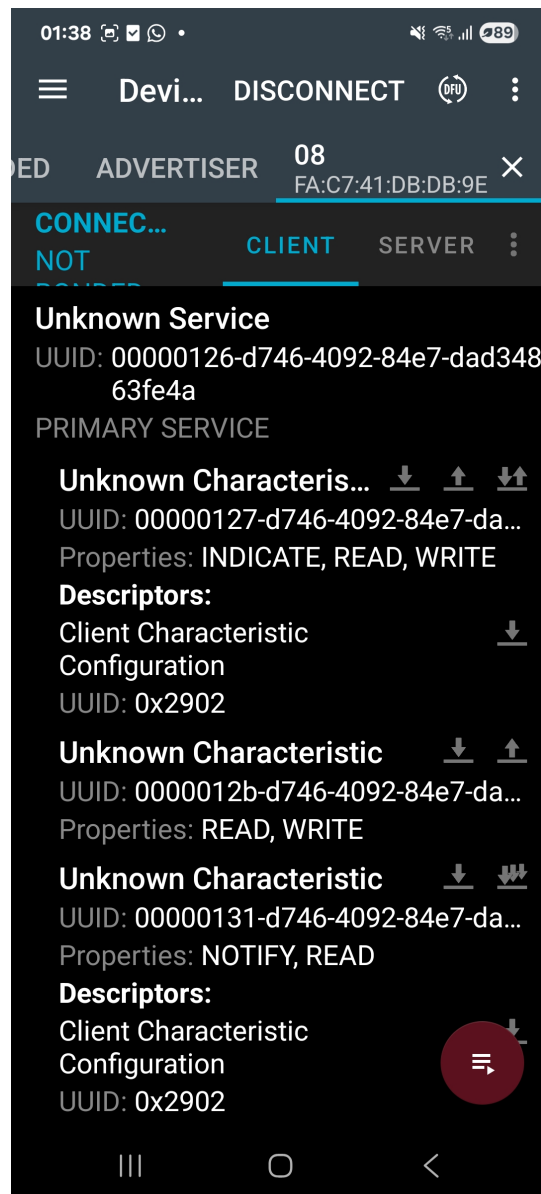
5.5. Data Mapping: Van Bytes naar Millimeters

Na de succesvolle handshake begint de pop met het uitzenden van *notifications* op het *Wave*-kanaal (zie Figuur 5.4). De data wordt verzonden als een byte-array. Uit de implementatie in C# blijkt dat de relevante informatie over de compressiediepte zich bevindt in de payload van deze pakketten.

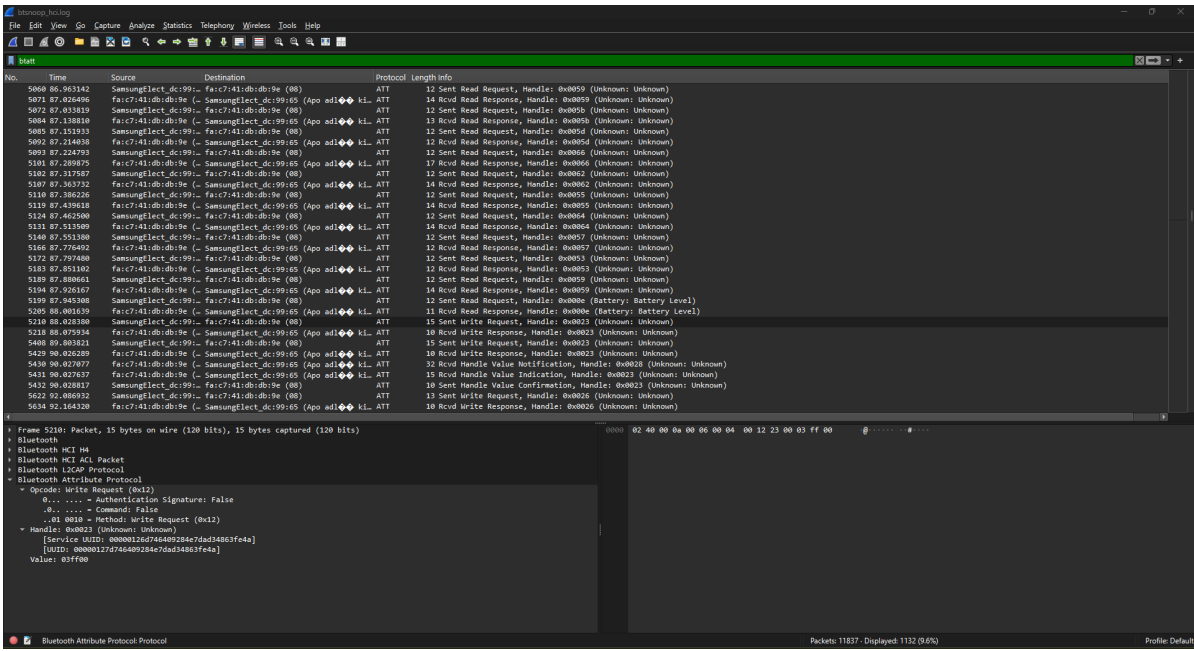
De ruwe waarde in deze bytes correleert direct met de fysieke indrukking van de borstkas. In de Unity-omgeving wordt deze waarde genormaliseerd en vertaald naar een procentuele diepte voor de visuele feedback-elementen in de Mixed Reality-ervaring.

5.6. Conclusie

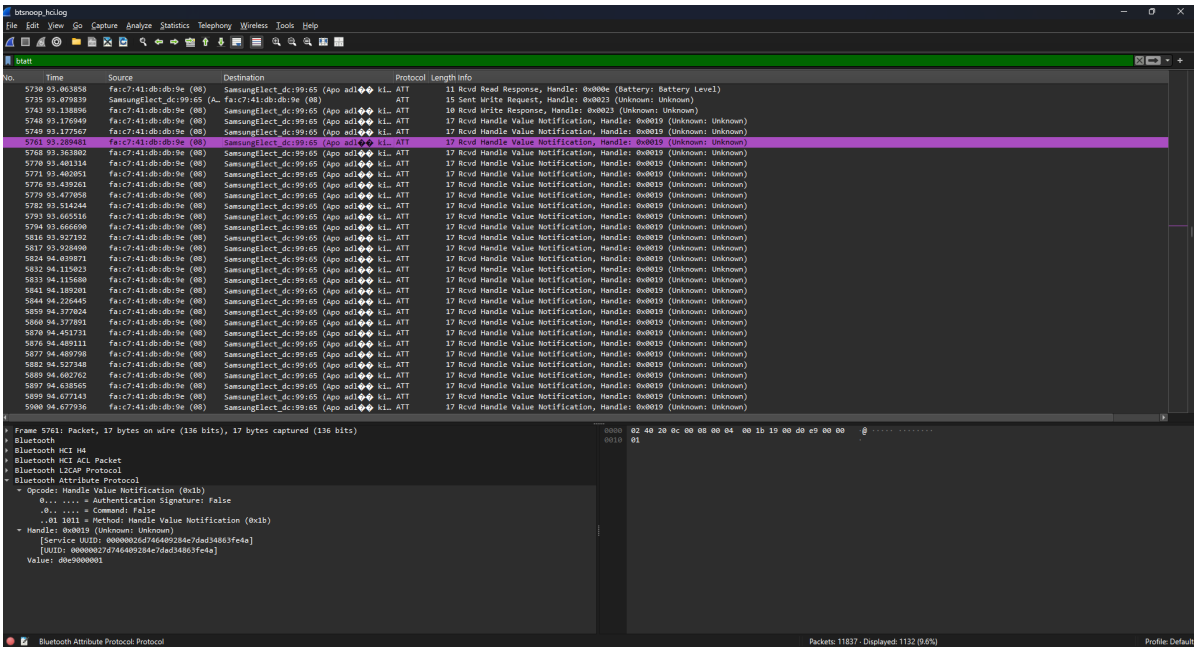
Het succesvol *reverse engineeren* van dit protocol heeft de afhankelijkheid van een officiële SDK weggenomen. Door het omzeilen van de obfuscatie via *packet sniffing* en het handmatig implementeren van de handshake in C#, is een stabiele databrug geslagen tussen de medische hardware en de Meta Quest 3.



Figuur 5.2: Overzicht van de geselecteerde GATT-service (UUID eindigend op 0126) en de bijbehorende characteristics in nRF Connect.



Figuur 5.3: Wireshark analyse van de HCI snoop log waarbij de activatie-bytes (03ff00) van de handshake worden verzonden.



Figuur 5.4: Onderschepping van een live Handle Value Notification met de ruwe sensordata op de Wave characteristic.

6

Implementatie in Unity en Mixed Reality

In dit hoofdstuk wordt de technische realisatie van de *Proof of Concept* (PoC) uitgebreid toegelicht. Waar het voorgaande hoofdstuk de focus legde op het ontsluiten van de datacommunicatie, verschuift de nadruk hier naar de integratie van deze data binnen de Unity-omgeving.

Het doel van de implementatie is om de ruwe Bluetooth-stroom van de Laerdal-pop te transformeren naar een immersieve trainingservaring op de Meta Quest 3. Hierbij wordt gebruikgemaakt van *Passthrough*-technologie om de fysieke pop te verrijken met multisensorische feedback-elementen, zoals visuele gidsen, adaptieve audio en realtime prestatie-analyse. De volgende secties beschrijven de software-architectuur, de verwerking van de sensordata en de didactische vertaalslag naar Mixed Reality.

6.1. Applicatie-architectuur en State Management

Om de verschillende fasen van de training (scannen, kalibreren, oefenen en evalueren) vloeiend te laten verlopen, is een centrale `AppFlowManager` geïmplementeerd...

6.2. Applicatie-architectuur en State Management

Om de verschillende fasen van de training (scannen, kalibreren, oefenen en evalueren) vloeiend te laten verlopen, is een centrale `AppFlowManager` geïmplementeerd. Deze component fungeert als een *finite state machine* die de actieve gebruikers-interface (UI) en de status van de simulatie beheert.

De `AppFlowManager` zorgt voor de transitie tussen de volgende *states*:

- **Lobby:** Het initialiseren van de Bluetooth-scan via de `ScannerTestScript`.

- **Calibration:** Het activeren van de *Passthrough*-view en het inschakelen van de VRKalibratie-logica.
- **Training:** Het starten van de *MockSimulator*, de timer en de live Bluetooth-datastroom.
- **Results:** Het aggregeren van de data en het tonen van het eindrapport.

Door deze gecentraliseerde aanpak blijven de individuele scripts (zoals de Bluetooth-handler en de simulator) ontkoppeld, wat de stabiliteit en onderhoudbaarheid van de code ten goede komt.

6.3. Protocol-implementatie en Data-verwerking

Nadat de stabiele communicatielaag was opgezet, is de logica uit de *reverse engineering* fase (Hoofdstuk 5) geïmplementeerd in een centrale *ScannedItemScript*-component. Deze component fungeert als de functionele brug tussen de Bluetooth-stack en de Unity-omgeving.

6.3.1. De Geautomatiseerde Handshake

Zoals vastgesteld in de dynamische analyse, vereist de reanimatiepop een specifieke opeenvolging van commando's voordat deze sensordata begint te verzenden. Omdat de Bluetooth-hardware op de pop een beperkte verwerkingscapaciteit heeft, bleek uit de testfase dat het simpelweg achter elkaar versturen van commando's leidde tot overbelasting en kritieke crashes van de Bluetooth-chip. Om dit op te lossen, is de handshake geïmplementeerd middels een *IEnumerator* (*ConnectionFlow*). Dit stelt de applicatie in staat om asynchroon te wachten tussen de verschillende schrijfacties zonder de hoofd-thread van Unity te blokkeren. De sequentie verloopt als volgt:

1. **Authenticatie:** De 20-byte *authKey* wordt naar de *Auth Characteristic* geschreven.
2. **Activatie Fase 1:** Een activatie-byte (0×03) wordt naar *UUID ... 012b* verstuurd.
3. **Activatie Fase 2:** De finale activatie-bytes (0×03 $0 \times FF$ 0×00) worden naar *UUID ... 0127* geschreven.

Tussen elke stap is een pauze van 0,5 seconden ingebouwd middels `yield return new WaitForSeconds(0.5f)`. Deze vertraging is cruciaal voor de stabiliteit van het systeem; het geeft de hardware van de pop de nodige tijd om de inkomende bytes te verwerken en de interne status aan te passen voordat het volgende commando arriveert.

```

1 // Sequentiële handshake met pauzes voor hardware-stabiliteit
2 BluetoothLEHardwareInterface.WriteCharacteristic(address, authSvc, authUUID,
3     authKey, authKey.Length, true, (id) => {
4     Debug.Log("RADAR\_LOG: [OK] Wachtwoord geaccepteerd.");
5 });
6
7 yield return new WaitForSeconds(0.5f); // Noodzakelijke pauze
8
9 BluetoothLEHardwareInterface.WriteCharacteristic(address, act1Svc, act1UUID,
10    act1Key, act1Key.Length, true, (id) => {
11    Debug.Log("RADAR\_LOG: [OK] Act-1 geaccepteerd.");
12 });

```

Codefragment 6.1: C#-implementatie van de sequentiële BLE-handshake.

6.3.2. Realtime Data Parsing

Zodra de handshake succesvol is afgerond, begint de reanimatiepop met het verzenden van *notifications* op de *Wave Characteristic*. In tegenstelling tot *polling*, waarbij de applicatie constant data opvraagt, zorgt dit *publish-subscribe* model ervoor dat de pop autonoom data verstuurt bij elke gedetecteerde beweging. Dit is essentieel voor de lage latentie die vereist is binnen een Mixed Reality-ervaring.

De binnenkomende data wordt ontvangen als een byte-array. Uit de correlatie-analyse in de *reverse engineering* fase bleek dat de actuele compressiediepte zich bevindt in de laatste byte van deze array. In de C#-implementatie wordt deze waarde geëxtraheerd en opgeslagen in de variabele *huidigeDiepte*.

```

1 // Callback-methode die wordt aangeroepen bij elke nieuwe notification
2 BluetoothLEHardwareInterface.SubscribeCharacteristic(address, sUUID, cUUID,
3     (notification) => { /* Actie bij statuswijziging */ },
4     (characteristic, bytes) => {
5         if (bytes != null && bytes.Length > 0)
6             {
7                 // Filter specifiek op het 'Wave' data-kanaal (...0027)
8                 if (characteristic.ToLower().Contains("00000027"))
9                     {
10                        // De ruwe sensorwaarde bevindt zich in de laatste byte
11                        int diepte = bytes[bytes.Length - 1];
12                        huidigeDiepte = diepte;
13                    }
14            }
15    }
16 );

```

Codefragment 6.2: Realtime parsing en filtering van de binnengekomen BLE-sensordata.

De ruwe waarde die op deze manier wordt verkregen, is een integer variërend van

0 (geen compressie) tot circa 74 (maximale compressie, overeenkomend met hex 0x4A). Deze waarde vormt de basis voor de visuele representatie. Door deze data direct in de Update-loop van Unity beschikbaar te maken, kan de visuele feedback zonder merkbare vertraging reageren op de fysieke handelingen van de student.

6.4. Multisensorische Feedback en MR-Integratie

De kernwaarde van deze applicatie ligt in de vertaling van passieve sensordata naar actieve, didactische sturing. In plaats van een numerieke weergave, maakt de applicatie gebruik van multisensorische feedback om de student intuïtief naar de perfecte reanimatietechniek te begeleiden. Dit proces wordt centraal beheerd door de `MockSimulator`.

6.4.1. Visuele Begeleiding: Ghost Hands en Passthrough

Door de *Passthrough*-technologie van de Meta Quest 3 blijft de student verbonden met de fysieke realiteit, terwijl een *ghost avatar* van handen over de reanimatiepop wordt geprojecteerd. Deze avatar fungeert als een dynamische visuele gids voor zowel het tempo als de diepte, wat de concrete praktijkgerichte uitwerking vormt van de *Transparent Target Avatar* uit de theoretische voorstudie (Subsectie 2.4.1).

Animatie en Bewegingslogica

De beweging van de gids wordt niet aangestuurd door een statische animatieclip, maar door een procedureel script (`GhostAnimator`). Om een realistisch compressieritme te simuleren, is gekozen voor een lineaire beweging in plaats van een vloeiende sinusgolf. Dit is gerealiseerd met de `Mathf.PingPong`-functie.

```
1 // Berekening van de gids-beweging (110 BPM, 6 cm diepte)
2 float pingPongWaarde = Mathf.PingPong(Time.time * snelheid, 1f);
3
4 // Vertaling naar verticale positie (Y-as)
5 float nieuweY = rustPositie.y - (pingPongWaarde * ideaalDiepte);
6 transform.localPosition = new Vector3(rustPositie.x, nieuweY, rustPositie.z);
```

Codefragment 6.3: Procedurele berekening van de gidsbeweging via de `Mathf.PingPong`-functie.

Realtime Kleurfeedback en Emissie

De belangrijkste indicator voor de student is de kleur van de gids. De `MockSimulator` berekent bij elke compressie of de cursist binnen de marges van 50-60 mm diepte en 100-120 BPM valt. De overgang tussen de kleuren gebeurt vloeiend via `Color.Lerp` om visuele onrust te voorkomen. Deze methode past het principe van *Color Coding* toe (zie Subsectie 2.4.2) om prestatieresultaten zonder tekstuele afleiding over te brengen.



(a) Onderaanzicht van de ghost-hands.



(b) Zijaanzicht van de compressiepositie.

Figuur 6.1: Visuele representatie van de ghost-hands in de Unity-omgeving.

```

1 // Bepaling van de feedbackkleur op basis van prestaties
2 Color doelKleur = (goedeDiepte && goedeBPM) ? Color.green : Color.red;
3 huidigeKleur = Color.Lerp(huidigeKleur, doelKleur, Time.deltaTime * 3f);
4
5 // Toepassing op het materiaal met emissie voor een "glow" effect
6 foreach (Renderer r in ghostRenderers) {
7     r.material.SetColor("_BaseColor", huidigeKleur);
8     r.material.SetColor("_EmissionColor", huidigeKleur * emissieKracht);
9 }

```

Codefragment 6.4: Realtime berekening van de feedbackkleur en emissie via `Color.Lerp`.

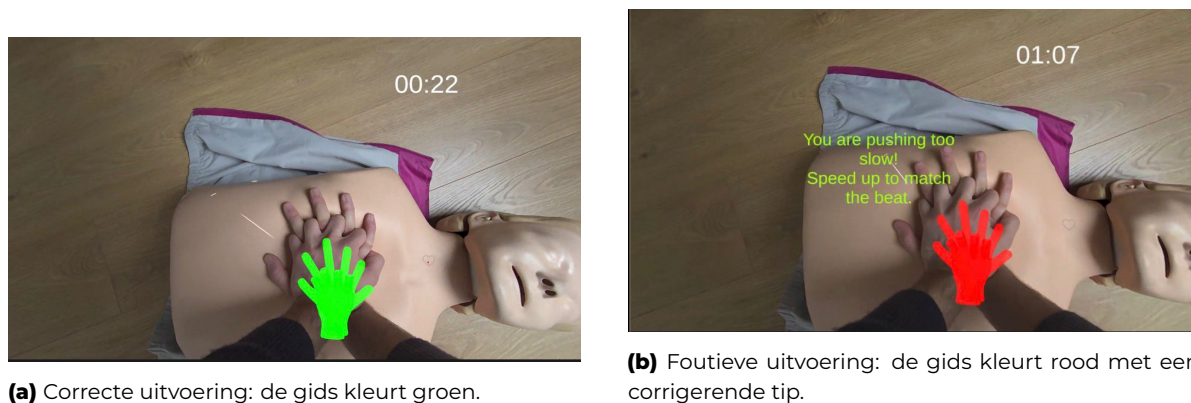
De emissiewaarde zorgt ervoor dat de handen oplichten in de Mixed Reality-omgeving, waardoor ze ook bij fel omgevingslicht (via Passthrough) duidelijk zichtbaar blijven voor de student.

6.4.2. Auditieve Feedback: De Adaptieve Metronoom

Om de cognitieve belasting te verlagen en de student te ondersteunen bij het aanhouden van het juiste ritme, bevat de applicatie een adaptieve metronoom. In plaats van een statisch geluidsfragment, is het volume van het getik dynamisch gekoppeld aan de voortgang van de reanimatie.

Implementatie van de Adaptieve Audio

In de `MockSimulator` wordt een timer bijgehouden die gebaseerd is op de perfecteBPM (110 BPM). Elke keer dat het interval wordt bereikt, wordt het volume van de `AudioSource` opnieuw berekend op basis van de `huidigeHartVulling`. Dit zorgt



(a) Correcte uitvoering: de gids kleurt groen.

(b) Foutieve uitvoering: de gids kleurt rood met een corrigerende tip.

Figuur 6.2: Realtime visuele feedback via Passthrough. De kleur van de handen en de HUD-instructies passen zich aan op basis van de Bluetooth-data.

ervoor dat het geluid luider is wanneer de patiënt in kritieke toestand verkeert, en wegsterft naarmate de stabilisatie vordert.

```

1 // Berekening van het interval op basis van de gewenste BPM
2 float interval = 60f / perfecteBPM;
3 audioTimer += Time.deltaTime;
4
5 if (audioTimer ≥ interval)
6 {
7     // Volume neemt af naarmate de patient stabiliseert (0.0 = stilte)
8     metronoomAudio.volume = 1f - huidigeHartVulling;
9     metronoomAudio.PlayOneShot(metronoomAudio.clip);
10    audioTimer = 0f;
11 }

```

Codefragment 6.5: Dynamische volumeaanpassing en tijdsintervalberekening van de adaptieve metronoom.

Didactisch Nut

Deze vorm van feedback maakt gebruik van *negative reinforcement*: het storende, luide getik fungeert als een prikkel die de student motiveert om de techniek te verbeteren. Zodra de student de juiste diepte en frequentie aanhoudt, vult het virtuele hart zich en neemt de auditieve druk af. Dit creëert een instinctieve drang om de patiënt naar een "stille" en stabiele toestand te brengen, wat de focus op de kwaliteit van de compressies verhoogt zonder dat de student constant naar een UI-scherm hoeft te kijken. Dit reduceert effectief het *split-attention effect* (Subsectie 2.2.1), aangezien de auditieve ondersteuning de visuele kanalen ontlast en de student in staat stelt de fysiologische focus volledig bij de reanimatiepop te houden.

6.4.3. Het Vullende Hart en Gamificatie

Het centrale feedback-element van de applicatie is een *World Space UI* in de vorm van een hart, gepositioneerd in de nabijheid van de pop. De vulgraad (`fillAmount`) van dit hart fungeert als een metafoor voor de overlevingskans van de patiënt.

Dynamische Vullogica

De variabele `huidigeHartVulling` wordt realtime berekend op basis van de kwaliteit van de uitgevoerde compressies. Wanneer de student zowel het juiste tempo als de juiste diepte aanhoudt, stijgt de waarde. Bij inactiviteit of foutieve handelingen treedt er een "leegloop-effect" op, wat de urgentie van de handeling benadrukt.

```

1 // Logica voor het vullen en leeglopen van het hart
2 if (goedeDiepte && goedeBPM)
3 {
4     huidigeHartVulling += vulSnelheid; // Beloning voor correcte techniek
5 }
6 else
7 {
8     huidigeHartVulling -= 0.05f; // Strafpunt voor foutieve techniek
9 }
10
11 // Passieve leegloop bij inactiviteit (BPM < 10)
12 if (huidigeBPMcursist < 10f)
13 {
14     huidigeHartVulling -= leegloopSnelheid * Time.deltaTime;
15 }
16
17 // UI-update
18 hartVullingImage.fillAmount = huidigeHartVulling;

```

Codefragment 6.6: Dynamische vullogica en leegloopeffect van het virtuele hart.

Didactische Scaffolding: Hulpafbouw

Een uniek kenmerk van de applicatie is de implementatie van *scaffolding*. Dit houdt in dat de visuele ondersteuning (de *ghost hands*) geleidelijk wordt afgebouwd naarmate de student aantoont de techniek te beheersen. Dit dwingt de cursist om te vertrouwen op het eigen spiergeheugen in plaats van enkel de gids te volgen. Dit mechanisme vormt de directe functionele vertaling van het principe van *fading feedback* en tackelt het risico op afhankelijkheid zoals beschreven binnen de *guidance hypothesis* (Subsectie 2.1.5).

Via de `hulpAfbouwDrempel` wordt de transparantie (alfa-waarde) van de gids aangepast. Zodra de hartvulling boven de 50% stijgt, worden de handen minder zichtbaar.

Dit mechanisme zorgt voor een natuurlijke overgang van begeleid oefenen naar zelfstandige uitvoering, wat de effectiviteit van de training verhoogt.

```
1 // Afbouw van visuele hulp op basis van prestaties
2 if (huidigeHartVulling > hulpAfbouwDrempel)
3 {
4     float percentage = (huidigeHartVulling - hulpAfbouwDrempel) / (1f -
5         hulpAfbouwDrempel);
6     hulpAlpha = Mathf.Lerp(0.8f, 0f, percentage); // Faden van 80% naar 0% opacity
7 }
8 // Toepassing op de renderer
9 foreach (Renderer r in ghostRenderers) {
10     r.material.SetColor("_BaseColor", new Color(r.material.color.r,
11         r.material.color.g, r.material.color.b, hulpAlpha));
12 }
```

Codefragment 6.7: Algoritme voor de stapsgewijze visuele hulpafbouw (scaffolding) via `Mathf.Lerp`.

6.4.4. Heads-Up Display (HUD) en Realtime Analyse

Via de `CenterEyeAnchor` van de Meta Quest 3 wordt een Heads-Up Display (HUD) getoond. Deze interface is zodanig gepositioneerd dat de informatie beschikbaar is zonder dat de cursist de focus van de reanimatiepop hoeft te halen.

Intelligente Feedback-berichten

Om te voorkomen dat de student overspoeld wordt met informatie bij elke kleine afwijking, maakt de applicatie gebruik van een foutenteller (`foutenVoorWaarschuwing`). Pas wanneer een specifieke fout (bijv. te ondiep drukken) herhaaldelijk achter elkaar wordt gemaakt, wordt er een actieve tip getoond.

```
1 void CheckVoorFeedbackBericht() {
2     // Controleer of de foutendrempel (bijv. 3) is bereikt
3     if (fouteDiepteTeller ≥ foutenVoorWaarschuwing) {
4         if (laatsteGemetenPiek > 60f)
5             ToonTip("Je drukt te diep!\nGeef iets minder druk.");
6         else
7             ToonTip("Je drukt te ondiep!\nGebruik meer lichaamsgewicht.");
8     }
9     fouteDiepteTeller = 0; // Reset teller na weergave
10 }
11 }
```

Codefragment 6.8: Logica voor het intelligent filteren en weergeven van corrigerende feedbackberichten op de HUD.

De methode `ToonTip` zorgt er vervolgens voor dat het bericht een aantal seconden in beeld blijft via een variabele `verbergTekstTijd`, zodat de student de tijd heeft om de instructie te lezen en op te volgen.

Dynamische Trainingstimer

De timer fungeert niet enkel als informatiebron, maar ook als psychologische trigger. In de `UpdateTimerUI` methode wordt de resterende tijd berekend en geformatteerd naar een minuten- en secondennotatie.

```
1 void UpdateTimerUI() {  
2     float restTijd = Mathf.Max(0f, maxTrainingTijd - trainingTimer);  
3     int minuten = Mathf.FloorToInt(restTijd / 60F);  
4     int seconden = Mathf.FloorToInt(restTijd % 60F);  
5  
6     timerTekst.text = string.Format("{0:00}:{1:00}", minuten, seconden);  
7  
8     // Visuele urgentie bij de laatste 15 seconden  
9     if (restTijd ≤ 15f) timerTekst.color = Color.red;  
10    else timerTekst.color = Color.white;  
11 }
```

Codefragment 6.9: Dynamische berekening, formattering en kleurcodering van de trainingstimer op de HUD.

Door de kleur van de tekst te veranderen naar rood in de laatste 15 seconden, wordt een gevoel van urgentie gecreëerd dat de stress van een reële reanimatiesituatie nabootst.

6.4.5. Ruimtelijke Kalibratie en World Alignment

Een cruciaal aspect van een Mixed Reality-applicatie is dat de virtuele gids (de ghosthands) exact samenvalt met de fysieke reanimatiepop. In deze applicatie is gekozen voor een manuele kalibratiemethode via de `VRKalibratie`-module, wat een directe en betrouwbare *world alignment* garandeert zonder de noodzaak voor complexe beeldherkenning.

Manuele Positionering via Controller-tracking

Omdat de Meta Quest 3 via *Passthrough* de echte wereld toont, kan de cursist de rechter controller fysiek op de borstkas van de reanimatiepop plaatsen. Door op de 'A'-knop van de controller te drukken (`OVRInput.Button.One`), wordt de volledige simulatie-omgeving in één keer verplaatst en geroteerd naar de huidige positie van de hardware.

Door enkel de Y-as van de rotatie over te nemen, wordt gegarandeerd dat de virtuele handen altijd perfect horizontaal op de pop blijven staan, ongeacht de hoek waaronder de cursist de controller vasthoudt tijdens het kalibratiemoment.

```
1 void KalibreerEnStart()  
2 {  
3     // 1. Verplaats de hele simulatie naar de fysieke plek van de controller  
4     simulatieParent.transform.position = controllerRechts.position;  
5  
6     // 2. Draai de simulatie horizontaal (Y-as) gelijk aan de controller  
7     // De X en Z as worden genegeerd om kanteling te voorkomen  
8     Vector3 nieuweRotatie = controllerRechts.eulerAngles;  
9     simulatieParent.transform.rotation = Quaternion.Euler(0, nieuweRotatie.y, 0);  
10  
11     // 3. Start de trainingssessie via de flowManager  
12     flowManager.FinalStartTraining();  
13 }
```

Codefragment 6.10: Manuele ruimtelijke kalibratie en world alignment op basis van controller-tracking.

6.5. Sessie-evaluatie en Resultaten

Nadat de training is voltooid, is het essentieel dat de student objectieve feedback krijgt over de geleverde prestaties. De `MockSimulator` verzamelt gedurende de hele sessie data om een eindrapport te genereren dat verder gaat dan loutere observatie.



Figuur 6.3: Het resultatenscherf (Panel_Results) met de geaggregeerde score, gemiddelde diepte, tempo en een gepersonaliseerde didactische tip.

6.5.1. Data-aggregatie en Analyse

Tijdens de reanimatie worden alle individuele compressiewaarden (diepte en tempo) opgeslagen in dynamische lijsten. Bij het beëindigen van de sessie berekent de `EindigTraining`-methode de gemiddelden en de nauwkeurigheidsscore.

```
1 // Berekening van statistieken voor het eindrapport
2 float scorePercentage = totaalCompressies > 0
3   ? ((float)goedeCompressies / totaalCompressies) * 100f : 0f;
4
5 // Berekenen van gemiddelde waarden via LINQ
6 float gemDiepte = lijstDieptes.Count > 0 ? lijstDieptes.Average() : 0f;
7 float gemBPM = lijstBPMs.Count > 0 ? lijstBPMs.Average() : 0f;
```

Codefragment 6.11: Data-aggregatie en statistische analyse van de reanimatieparameters via LINQ ten behoeve van het eindrapport.

6.5.2. Didactische Feedback

Naast de numerieke data toont het `Panel_Results` een gepersonaliseerde tip. De applicatie analyseert welke fout het meest frequent voorkwam (bijvoorbeeld te ondiepe compressies) en koppelt hier een specifieke instructie aan via de `Language-Manager`. Dit zorgt voor een afsluitend leermoment waarbij de student direct weet op welk technisch aspect de focus moet liggen bij een volgende poging.

6.6. Conclusie

In dit hoofdstuk is aangetoond hoe de theoretische analyse van het Bluetooth-protocol succesvol is vertaald naar een functionele Unity-applicatie voor de Meta Quest 3. Door gebruik te maken van procedurele animaties, adaptieve audio-feedback en een toegankelijk kalibratiesysteem, is een stabiele brug geslagen tussen de fysieke medische hardware en een interactieve Mixed Reality-leeromgeving. De implementatie bewijst dat *reverse engineering* van bestaande apparatuur een waardevol alternatief biedt wanneer officiële SDK-ondersteuning ontbreekt.

7

Conclusie

Het doel van deze bachelorproef was het overbruggen van de kloof tussen fysieke medische simulatiehardware en immersieve softwaretechnologie, om zo tot een intuïtievare en effectievere reanimatietraining te komen. Binnen de huidige gezondheidszorgopleidingen is de kwaliteit van *Cardiopulmonaire Resuscitatie* (CPR) direct gekoppeld aan overlevingskansen in reële noodsituaties. Hoewel geavanceerde oefenpoppen over nauwkeurige sensoren beschikken, blijft de feedback vaak beperkt tot abstracte interfaces op externe schermen.

Met de realisatie van dit onderzoek is een werkend *Proof of Concept* (PoC) opgeleverd voor de Meta Quest 3. Door middel van een *reverse engineering*-traject is het gesloten Bluetooth-protocol van een commerciële reanimatiepop succesvol ontsloten. Deze realtime datastroom is vervolgens geïntegreerd in een Mixed Reality-omgeving die de student via multisensorische feedback bestaande uit procedurele visuele hulpmiddelen, adaptieve audio en gamificatie-elementen direct op het fysieke interactiepunt stuurt. In dit afsluitende hoofdstuk worden de resultaten geëvalueerd aan de hand van de initiële deel- en hoofdonderzoeksvragen, gevolgd door een kwalitatieve expert-validatie en een kritische blik op de toekomstige ontwikkelingsmogelijkheden van het systeem.

7.1. Beantwoording van de deelvragen

Om tot een sluitende academische synthese te komen, worden de in de inleiding geformuleerde deelvragen systematisch geëvalueerd op basis van de theoretische voorstudie en de praktische realisatie.

Deelvraag 1 (Probleemdomein): Welke veelvoorkomende reanimatiefouten worden door de huidige hardware onvoldoende gevisualiseerd? En hoe ervaren studenten de vertaalslag van abstracte data naar fysieke handeling?

Uit de protocol-analyse en de reverse engineering van de Laerdal Little Anne QCPR (Hoofdstuk 5) is gebleken dat kritieke mechanische foutelementen, zoals een incomplete decompressie (het onvoldoende laten opkomen van de borstkas waarbij het hart zich niet volledig kan vullen met bloed) en subtiele, kortstondige afwijkingen in de frequentie, realtime onvoldoende helder worden gevisualiseerd door standaardssystemen. Hoewel de interne sensoren van de pop deze microfluctuaties in diepte en timing wel degelijk registreren als ruwe data, blijft de weergave in de officiële, commerciële softwarepakketten beperkt tot post-hoc statistieken of numerieke dashboards op externe schermen.

Wat betreft de gebruikerservaring wijst de literatuurstudie (Hoofdstuk 3) uit dat studenten de vertaalslag van deze abstracte, tweedimensionale data naar een driedimensionale, motorische handeling ervaren als een bron van hoge cognitieve belasting. Het noodgedwongen moeten weggijken van de patiënt of reanimatiepop naar een tablet of monitor verstoort de fysiologische focus en de natuurlijke cadans van de hulpverlener. Feedback die niet rechtstreeks op het fysiologische interactiepunt, de borstkas van het slachtoffer, wordt geprojecteerd, belemmert het instinctief en onmiddellijk corrigeren van de reanimatietechniek. Dit sluit direct aan bij het didactische principe van *spatial contiguity*, waarbij het fysiek scheiden van de informatiebron en de actieplaats het leerproces negatief beïnvloedt.

Deelvraag 2 (Oplossingsdomein): Welke visualisatietechnieken binnen Mixed Reality zijn het meest effectief voor het aanleren van motorische vaardigheden? Hoe kan sensordata van de oefenpop real-time verwerkt worden binnen een MR-omgeving?

De praktische realisatie en de daaropvolgende evaluatie (Hoofdstuk 6) tonen aan dat *co-locatie* via stereoscopische *Passthrough* in combinatie met *didactische scaffolding* (hulpafbouw) de meest effectieve visualisatiemethoden vormen binnen Mixed Reality voor het aanleren van motorische vaardigheden. Door een procedurele *ghost avatar* van reanimatiehanden rechtstreeks over de fysieke pop te positioneren en deze realtime te kleuren via *emissive materials* (zoals gedocumenteerd in de transitie tussen Figuur 6.2a en 6.2b), krijgt de student onmiddellijke kinetische sturing.

Het stapsgewijs verlagen van de transparantie (alfa-waarde) van deze gids zodra de student boven de ingestelde hulpafbouw drempel van 50% presteert, dwingt de cursist bovendien om de transitie te maken van visuele afhankelijkheid naar het eigen spiergeheugen. Dit sluit aan bij de geldende literatuur rond *fading feedback*, die stelt dat het permanent aanbieden van visuele hulpmiddelen het langetermijn-

leereffect juist verzwakt omdat de student stopt met zelfstandig reflecteren. De realtime verwerking van de sensordata werd succesvol gerealiseerd door het omzeilen van de fabrikant-restricties op het Bluetooth Low Energy (BLE) protocol. Door de implementatie van een geautomatiseerde, sequentiële handshake middels een asynchrone `IEnumerator (ConnectionFlow)` worden de notificaties op het data-kanaal geactiveerd zonder de hardware-chip van de pop te overbelasten. De binnenkomende byte-arrays worden direct in de Unity Update-loop opgevangen en geparsed. De extractie van de laatste byte uit de *Wave Characteristic* stelt de applicatie in staat om de actuele compressiediepte met een verwaarloosbare latentie om te zetten in visuele, auditieve (de adaptieve metronoom) en gecentraliseerde gamificatie-feedback (huidigeHartVulling).

7.2. Kritische reflectie, expert-validatie en synthese

Vanwege praktische beperkingen binnen het tijdsbestek van dit onderzoek kon de applicatie niet worden onderworpen aan een grootschalige, kwantitatieve evaluatie met een studenten-testgroep. Om de didactische en functionele waarde van de opgeleverde *Proof of Concept (PoC)* alsnog kritisch en objectief te beoordelen, is het systeem onderworpen aan een kwalitatieve *expert-review* door co-promotor en healthcare-expert Thomas Cuelenaere.

Deze expert-validatie, gecombineerd met de theoretische fundamenten uit de literatuurstudie, maakt het mogelijk om een sluitend en onderbouwd antwoord te formuleren op de centrale hoofdonderzoeksvraag: *In welke mate kan een Mixed Reality-applicatie de kwaliteit van feedback tijdens reanimatietraining verbeteren in vergelijking met de huidige tablet-gebaseerde methoden?*

De synthese van de resultaten toont aan dat de MR-applicatie de kwaliteit van de feedback in significante mate verbetert ten opzichte van de huidige tablet-gebaseerde platformen. Deze conclusie is fundamenteel tweeledig onderbouwd:

- **Verlaging van de cognitieve belasting (Theoretische validatie):** Waar traditionele tablets de student dwingen om zijn fysiologische focus continu te splitsen tussen de reanimatiepop en een extern, tweedimensionaal scherm, doorbreekt de ontwikkelde MR-applicatie deze barrière volledig. Door de feedback via stereoscopische *Passthrough* rechtstreeks op de borstkas van de pop te integreren, wordt voldaan aan het didactische principe van *spatial contiguity* (Hoofdstuk 3). De student hoeft zijn blik niet meer te wenden, wat de focus en de natuurlijke cadans van de hulpverlener beschermt.
- **Intuitive kinetische sturing (Praktische validatie):** De healthcare-expert bevestigde dat de realtime synchronisatie van de adaptieve auditieve feedback (de metronoom) en de visuele *fading scaffolding* (de procedurele gids) een natuurlijke leeromgeving creëert. Fouten in diepte en tempo worden onmiddellijk gecorrigeerd op basis van kinetisch spiergeheugen, in plaats van

een achterwaartse of abstracte numerieke analyse op een tablet.

De expert vatte de specifieke functionele meerwaarde van de PoC samen aan de hand van de volgende vier kernpunten:

- **Gebruiksvriendelijkheid en Toegankelijkheid:** Het systeem is uiterst intuïtief in gebruik. Specifiek de manuele ruimtelijke kalibratiemethode via de Quest-controller werd geprezen, omdat deze een student in staat stelt om de virtuele omgeving snel, betrouwbaar en foutloos uit te lijnen met de fysieke hardware.
- **Duidelijke Visuele Feedback:** De directe projectie van de *ghost hands* over de borstkas biedt onmiddellijke kinetische duidelijkheid. Doordat de gids realtime reageert op de gecapteerde Bluetooth-datastroom, ziet de student direct zijn prestaties.
- **Gerichte Groeikansenfeedback:** Het systeem blinkt uit in het inzichtelijk maken van "groeikansen". De HUD-tips en kleurindicaties (Figuur 6.2) pinpointen fouten in tempo (te snel of te traag) en diepte (te diep of te ondiep) direct, wat de student concrete handvatten biedt om zijn techniek proactief bij te sturen.
- **Aanpasbaarheid van de Omgeving:** De flexibiliteit van de Mixed Reality-omgeving is een grote troef. Omdat fysiologische scenario's softwarematig aanpasbaar zijn, kan de training eenvoudig worden opgeschaald naar diverse didactische settings en stressniveaus.

De expert concludeerde dan ook dat de gerealiseerde applicatie een substantiële en effectieve meerwaarde levert om studenten binnen de geneeskunde op een correcte, autonome en intuïtieve manier te leren reanimeren. Het resultaat weerlegt hiermee de initiële twijfel of een reverse engineering-traject zonder officiële SDK stabiel genoeg zou zijn voor een realtime medische simulatortraining. Daarnaast bewijst het een belangrijk technologisch nevenaspect: het is uitermate haalbaar om hoogwaardige, merkonafhankelijke Mixed Reality-trainingsoftware te ontwikkelen rondom reeds bestaande hardware, waardoor onderwijsinstellingen niet hoeven te investeren in nieuwe, kostbare hardware-ecosystemen.

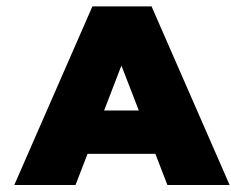
7.3. Toekomstig werk

Hoofdstuk 6 en de daaropvolgende expert-validatie hebben aangetoond dat de ontwikkelde *Proof of Concept* functioneel en didactisch slaagt in zijn opzet. Toch opent dit verkennende onderzoek verschillende deuren voor toekomstige academische en software-technische uitbreidingen:

1. **Geautomatiseerde Ruimtelijke Uitlijning (Object Tracking):** De huidige manuele kalibratie via de Meta Quest-controller werkt betrouwbaar, maar vereist een actieve handeling van de student. Toekomstig werk kan zich richten

op de integratie van de geavanceerde *Object Tracking SDK* of *Spatial Anchors* van Meta. Door computervisie en *deep learning* in te zetten om de fysiologische vormen van de reanimatiepop automatisch te herkennen via de camera's van de headset, kan de virtuele gids (de *ghost hands*) zonder enige manuele kalibratie direct en foutloos over de pop gecentreerd worden.

2. **Integratie van Ventilatie- en Beademingsdata:** In dit onderzoek lag de nadruk puur op de mechanische compressies (diepte en tempo). Het uitgevoerde protocol-onderzoek (Hoofdstuk 5) kan echter worden geëxtrapoleerd om ook de data-notificaties van het beademingsvolume te identificeren. Door deze sensordata te parsen, kan de applicatie worden uitgebreid naar een volledige 30:2-reanimatiecyclus, inclusief realtime feedback op de effectiviteit van de beademing.
3. **Kwantitatieve Empirische Validatiestudie:** Nu de stabiliteit van de technische infrastructuur is bewezen, verdient het aanbeveling om een grootschalige, kwantitatieve studie op te zetten binnen de opleiding Gezondheidszorg van HOGENT. Door een testgroep (die traint met de ontwikkelde Mixed Reality-applicatie) statistisch te vergelijken met een controlegroep (die traint via de traditionele methode), kan de effectiviteit van de leerefficiëntie, de retentie van motorische vaardigheden en de reductie van stress empirisch worden vastgelegd.



Onderzoeksvoorstel

Het onderwerp van deze bachelorproef is gebaseerd op een onderzoeksvoorstel dat vooraf werd beoordeeld door de promotor. Dat voorstel is opgenomen in deze bijlage.

A.1. Inleiding

A.1.1. Kaderen Thema en Doelgroep

Een hartstilstand is wereldwijd één van de meest voorkomende doodsoorzaken buiten het ziekenhuis. De overlevingskans van een slachtoffer hangt in grote mate af van de kwaliteit van de reanimatie die in de eerste minuten wordt toegepast, wat dus betekent dat het correct aanleren van deze vaardigheid aan zorgverleners cruciaal is (Olasveengen e.a., 2021).

De doelgroep van dit onderzoek bestaat specifiek uit bachelorstudenten Verpleegkunde en Geneeskunde die reanimatietechnieken moeten beoefenen.

Ten eerste is er sprake van abstracte feedback. De tablet toont de prestaties van de student vaak in de vorm van percentages, grafieken of algemene scores. Voor een student die een motorische vaardigheid aanleert, is deze data lastig te vertalen naar een fysieke correctie (Sigrist e.a., 2013). De student ziet op het scherm wellicht een score van 60%, maar krijgt geen directe, ruimtelijke instructie over hoe de handpositie of drukhoek fysiek aangepast moet worden om die score te verhogen. Ten tweede veroorzaakt het gebruik van een extern scherm het zogenaamde *split-attention effect* (Sigrist e.a., 2013). Om feedback te ontvangen wordt de student genoodzaakt om de blik af te wenden van de 'patiënt' (de pop) naar de tablet. Dit verbreekt niet alleen de concentratie, maar is ook niet representatief voor een realistische noodsituatie, waarbij de focus continu op het slachtoffer moet liggen.

Deze problematiek staat in contrast met de bredere technologische evolutie binnen de zorgsector. De afgelopen jaren heeft Augmented Reality (AR) en Mixed

Reality (MR) steeds vaker zijn weg gevonden naar de klinische praktijk, zoals bij chirurgische visualisaties of anatomische lessen (D'Angelo e.a., 2021). De meerwaarde van het verrijken van de werkelijkheid is in andere domeinen reeds aangetoond, wat een logische basis vormt om dit toe te passen op reanimatietraining.

A.1.2. Centrale onderzoeksvraag

Op basis van de bovenstaande probleemstelling wordt de volgende centrale onderzoeksvraag geformuleerd:

In welke mate kan een Mixed Reality-applicatie de kwaliteit van feedback tijdens reanimatietraining verbeteren in vergelijking met de huidige tablet-gebaseerde methoden?

A.1.3. Deelvragen

Om een antwoord te geven op deze hoofdvraag, wordt het onderzoek gesplitst in meerdere deelaspecten. Eerst wordt gefocust op het **probleemdomein** om de tekortkomingen van de huidige situatie in kaart te brengen:

- Welke veelvoorkomende reanimatiefouten worden door de huidige hardware niet of onvoldoende gedetecteerd tijdens een training?
- Hoe ervaren studenten de vertaalslag van de huidige abstracte vorm van feedback (zoals grafieken, cijfers en scores) naar de fysieke correctie van hun handeling?
- Welke specifieke feedback-parameters van hartcompressie worden door studenten als het meest problematisch of onduidelijk ervaren op de huidige dashboards?

Vervolgens richt het onderzoek zich op het **oplossingsdomein**, waarbij de focus ligt op de technische ontwikkeling en validatie van de applicatie:

- Hoe kan de sensordata van de oefenpop real-time uitgelezen en verwerkt worden binnen een Mixed Reality-omgeving?
- Op welke manier kan feedback visueel worden weergegeven zodat de student zijn vaardigheid autonoom kan verbeteren?
- In welke mate stelt de ontwikkelde Proof of Concept (PoC) studenten in staat om fouten sneller en accurater te corrigeren in vergelijking met de traditionele tablet-feedback?

A.1.4. Onderzoeksdoelstelling

De tekortkomingen van de huidige methodiek creëren een duidelijke opportuniteit voor het inzetten van deze nieuwe opkomende technologie, Mixed Reality. Het doel van deze bachelorproef is het ontwikkelen van een **Proof of Concept (PoC)** om de potentie van AR/MR binnen dit domein te valideren. Centraal staat de vraag of het integreren van real-time feedback in het gezichtsveld van de student leidt tot een betere gebruikerservaring en een efficiënter leerproces.

Het concrete eindresultaat van dit onderzoek bestaat uit twee delen: ten eerste een werkend prototype dat communiceert met de oefenpop en visuele feedback projecteert; ten tweede een validatierapport waarin de effectiviteit van deze oplossing wordt vergeleken met de traditionele trainingsmethoden.

A.2. Literatuurstudie

A.2.1. Kwaliteitscriteria voor Reanimatie (CPR)

De doeltreffendheid van reanimatie wordt bepaald door de nauwkeurigheid van de uitgevoerde handelingen. In Europa gebruikt men de *European Resuscitation Council* (ERC) om zo een standaard vast te leggen omtrent reanimatie. In de meest recente richtlijnen benadrukken Olasveengen e.a. (2021) dat 'High-Quality CPR' essentieel is voor de overlevingskans van het slachtoffer.

Voor de ontwikkeling van een feedback-systeem is het van groot belang dus om te specificeren welke parameters nodig zijn om de kwaliteit van compressies te beoordelen:

- **Compressiediepte:** De borstkas moet ingedrukt worden met een diepte van minimaal 5 cm en maximaal 6 cm. Compressies die ondieper zijn, genereren onvoldoende bloedstroom, terwijl diepere compressies het risico op letsel schade vergroten.
- **Compressiefrequentie (Rate):** Het ritme van de compressies moet tussen de 100 en 120 slagen per minuut liggen.
- **Recoil (Leunen):** Na elke compressie moet de borstkas volledig de kans krijgen om terug te veren ('recoil'). Het is cruciaal dat de hulpverlener niet op de borstkas blijft leunen, zodat het hart zich opnieuw kan vullen met bloed.
- **Handpositie:** De handen dienen geplaatst te worden op de onderste helft van het sternum (borstbeen), in het midden van de borstkas.

Daarnaast schrijven de richtlijnen een verhouding voor van 30 compressies afgewisseld met 2 beademingen (30:2), tenzij de hulpverlener niet in staat is om te beademen; in dat geval wordt continue hartmassage aanbevolen (Olasveengen e.a., 2021).

A.2.2. Beperkingen van Traditionele Feedbackmethoden

De Laerdal QCPR-technologie representeert de huidige standaard voor objectieve feedback in reanimatietraining. Het systeem maakt gebruik van geïntegreerde sensoren in de oefenpop die via Bluetooth verbinding maken met externe software. Tijdens de reanimatie meet het systeem continu parameters zoals compressiediepte, frequentie en de mate van borstkas-recoil. Deze data wordt real-time gevisualiseerd op een gekoppeld scherm, waardoor studenten hun motoriek direct kunnen corrigeren op basis van kwantitatieve gegevens. De effectiviteit van deze methode wordt ondersteund door Cortegiani e.a. (2017), die aantoonde dat studenten die trainden met deze real-time QCPR-feedback significant hogere compressiescores en betere technische vaardigheden behaalden dan studenten die enkel vertrouwden op verbale correcties van een instructeur.

Er is echter een belangrijk nadeel aan het huidige onderzoek naar feedback. Sigrist e.a. (2013) geven aan dat veel studies gebaseerd zijn op hele simpele taken in een lab. Maar reanimeren is juist een heel complex vaardigheid waarbij je je hele lichaam moet gebruiken. Het is dus een grote vraag of de resultaten van die simpele testen wel gelden voor het echte werk. Hierdoor duikt het zogezegde 'Guidance Hypothesis' tevoorschijn: studenten zullen zich puur focussen op het groen houden van de grafieken en worden afhankelijk van een scherm, in plaats van dat ze moeten aanvoelen hoeveel kracht ze werkelijk moeten zetten (Sigrist e.a., 2013). Als het visuele hulpmiddel wegvalt missen ze dus het benodigde spiergeheugen, hierdoor maken de auteurs de stelling dat simpele 2D-grafieken vaak tekortschieten en in de toekomst vervangen worden door realistische simulaties binnen virtuele omgevingen om dit gat te dichten (Sigrist e.a., 2013).

A.2.3. Cognitieve Belasting en het Split-Attention Effect

Recent onderzoek benadrukt de fysieke impact van display-modaliteit op de cognitieve belasting (Hurt, 2024). In een studie naar motorische taken werd een significant positieve correlatie gevonden tussen situational awareness en taakprestatie (Hurt, 2024). Bij traditionele methodes met externe schermen moet de student echter steeds wegstaren, waardoor deze focus wordt verbroken. Hoewel proefpersonen tablets soms als prettig ervaren, komt dit volgens de auteur vooral door gewenning (familiarity bias) en niet door efficiëntie (Hurt, 2024). Hurt concludeert dat Mixed Reality een betere oplossing is voor taken waarbij je je handen gebruikt. Informatie kan hierbij direct in het zicht worden geplaatst, waardoor het split-attention effect wordt voorkomen (Hurt, 2024).

A.2.4. Mixed Reality in de Gezondheidszorg

Volgens Gerup e.a. (2020) is de betekenis van Mixed Reality (MR) het samensmelten van de werkelijkheid en de virtuele wereld. De technologie combineert zowel Virtual Reality (VR) als Augmented Reality (AR) technologie (Gerup e.a., 2020). Het

resultaat hiervan is een nieuwe omgeving waarin objecten van de reële wereld en de virtuele wereld op hetzelfde moment met elkaar kunnen interacteren (Carroll, 2020).

De opkomst van MR in de zorg antwoord meteen op de tekortkomingen van eerdere simulatiemethoden. D'Angelo e.a. (2021) beschrijven dat pure Virtual Reality vaak tekortschiet door het gebrek aan haptische feedback (aanraking stimulatie), terwijl fysieke poppen juist de mogelijkheid missen om prestaties objectief te meten. MR biedt hier een oplossing voor, het combineert de tastbare weerstand van een fysiek model met de digitale analyse van een computer. Hierdoor kunnen studenten motorische vaardigheden trainen op een fysieke object, terwijl de software direct meetbare feedback geeft over hun handelen (D'Angelo e.a., 2021). Wel merken de auteurs op dat veel validatiestudies nog kleinschalig zijn, waardoor groter onderzoek nodig is om de klinische impact volledig te bevestigen.

A.2.5. Visualisatietechnieken voor Motorische Vaardigheden

Om motorische vaardigheden effectief te ontwikkelen via Mixed Reality, is de keuze van visuele cue van groot belang. In een recente survey van 39 studies categoriseren Diller e.a. (2024) de verschillende feedbackmethoden in drie hoofdgroepen.

Ten eerste is er sprake van **positionele feedback**, waarbij het doel is dat de participant een specifieke houding aanneemt. Meest gebruikte techniek hiervoor is de Transparent Target Avatar of ook wel de 'Ghost': een doorzichtig virtueel model dat dient als spiegelbeeld voor de ideale houding (Diller e.a., 2024).

Ten tweede onderscheidt men **directionele feedback**. Hier is de bedoeling de gebruiker naar de juiste positie te leiden. Dit kan variëren van eenvoudige 3D-pijlen tot complexere technieken zoals Rubber Bands (virtuele elastieken die de afstand tot het doel visualiseren) of Trajectories (lichtsporen die het bewegingspad aangeven) (Diller e.a., 2024).

Tot slot is er **abstracte feedback**, waarbij informatie zoveel mogelijk wordt versimpeld. Methodiek dat veel voorkomt is Color Coding, waarbij ledematen van de virtuele avatar rood of groen kleuren afhankelijk van de nauwkeurigheid van de uitvoering (Diller e.a., 2024). Uit de analyse van Diller blijkt dat positionele feedback (zoals de avatar) momenteel het meest wordt toegepast, omdat deze manier de gebruiker de meest complete informatie geeft over de lichaamsoriëntatie.

A.2.6. Technische Aspecten: Connectiviteit en Latency

De technische communicatie tussen de reanimatiepop en de MR-bril verloopt via Bluetooth Low Energy (BLE). Dit protocol is ideaal voor medische toepassingen door zijn lage energieverbruik. Het werkt via de GATT-profiel, waarbij de pop datapakketten (zoals compressiediepte) verstuurt naar de bril (Chaari Fourati & Said, 2020). Een kritische factor hierbij is latency: de vertraging tussen actie en feedback moet onder de 100ms blijven zodat de gebruiker de interactie als 'direct' ervaart

(Chaari Fourati & Said, 2020). Aangezien BLE een snelheid van minimaal 7,5ms aan kan is het technisch mogelijk om in deze grens te blijven.

Voor de visualisatie en interactie wordt gebruikgemaakt van de Unity game engine. Aangezien de Meta Quest gebruikmaakt van Video Passthrough-technologie, dient Unity als de brug tussen de camerabeelden van de echte wereld en de virtuele feedback (Raymer e.a., 2023). Via de Meta XR Core SDK worden de beelden van de omgeving real-time ingeladen, waarna Unity de BLE-data dat binnenkomt van de reanimatiepop vertaalt naar virtuele overlays (Glover & Linowes, 2019). De engine zorgt ervoor dat de hologrammen stabiel op de videofeed worden geprojecteerd 'anchoring', zodat de gebruiker de illusie krijgt dat de feedback zich fysiek in de ruimte bevindt (Glover & Linowes, 2019).

A.3. Methodologie

Om de centrale onderzoeksvraag te beantwoorden, hanteert dit onderzoek een combinatie van methodiek voor aanpak. Het traject bestaat uit een ontwikkelingsfase waarin een *Proof of Concept* (PoC) wordt gerealiseerd, gevolgd door een experimentele fase waarin de POC wordt gevalideerd aan de hand van een vergelijkende studie met proefpersonen.

Het onderzoek is verdeeld in 4 concrete fases: Requirements Analyse, Selectie technologie (Long/Short list), Realisatie (POC) en Validatie.

A.3.1. Fase 1: Requirements Analyse (Probleemdomein)

Voor het starten met de ontwikkeling, worden zowel de functionele als niet-functionele vereisten van de gewenste applicatie vastgelegd. Het doel hier is om op een objectieve manier te bepalen waaraan de oplossing moet voldoen om de in sectie A.1 beschreven problemen (abstracte feedback en *split-attention*) op te lossen.

- **Literatuurstudie:** De reeds uitgevoerde literatuurstudie (sectie A.2) fungeert als theoretisch kader voor de keuze van effectieve visualisatietechnieken (zoals de 'Ghost Avatar').
- **Interviews met belanghebbenden:** Er worden interviews afgenomen met CPR-instructeurs of domeinexperts. Het doel is om inzicht te krijgen in de specifieke parameters waar studenten het vaakst op falen (bijv. te ondiep drukken of niet volledig loslaten).
- **MoSCoW-prioritering:** De verzamelde eisen worden gerangschikt volgens de MoSCoW-methode (*Must have, Should have, Could have, Won't have*). Dit bakent de scope van de PoC af en garandeert dat de essentiële functionaliteiten (real-time feedback) als eerste worden gerealiseerd.

A.3.2. Fase 2: Technologie-selectie en Ontwerp (Oplossingsdomein)

In deze fase wordt bepaald hoe de requirements van fase 1, technisch worden ingevuld. Aangezien de hardware beschikbaar wordt gesteld door de opdrachtgever (Zorglab), focust deze fase op hardware-validatie en ontwerpkeuzes.

Hardware Validatie

Er wordt een vergelijkende analyse uitgevoerd binnen het beschikbare spectrum van de opdrachtgever (Meta Quest 2 vs. Meta Quest 3). Het doel is hier om vast te stellen wat de minimale hardware-vereisten zijn voor een werkend MR-reanimatietraining applicatie.

- **Passthrough Kwaliteit:** Er wordt onderzocht of de monochrome (zwart-wit) camera's van de Quest 2 voldoende detail bieden om de fysieke pop en handposities correct waar te nemen, of dat de *Full Color Passthrough* van de Quest 3 een strikte vereiste is.
- **Hand Tracking accuratesse:** Een korte validatietest bepaalt welke headset de handbewegingen tijdens snelle compressies het meest stabiel registreert.

De uitkomst van deze analyse bepaalt op welk device de PoC primair ontwikkeld wordt.

Visualisatie Strategie (Long List / Short List)

Voor het ontwerp van de virtuele feedback wordt er ook een vergelijkende studie toegepast.

- **Long List:** Op basis van de literatuurstudie (sectie A.2) en de survey van Diller e.a. (2024) wordt een brede lijst opgesteld van mogelijke feedback-metaforen (o.a. abstracte meters, tekstuele instructies, 3D-pijlen, *Ghost Avatars*, en audio-feedback).
- **Short List:** Deze opties worden getoetst aan de requirements uit Fase 1 (b.v. cognitieve belasting). Hieruit volgt een selectie van de 2 of 3 meest veelbelovende visualisatievormen (bijvoorbeeld: Ghost Avatar gecombineerd met kleurcodes) die daadwerkelijk in de PoC geïmplementeerd zullen worden.

A.3.3. Fase 3: Proof of Concept (PoC)

Het technisch onderdeel van de bachelorproef is de ontwikkeling van de Mixed Reality-applicatie. De PoC wordt gebouwd in de **Unity** game-engine. Deze fase omvat de volgende technische stappen:

1. **Bluetooth (BLE) Integratie:** Het reverse-engineeren van de communicatie met de Laerdal Little Anne pop. Hierbij wordt het GATT-protocol geïmplementeerd om real-time waarden (compressiediepte in mm, frequentie in cpm) uit te lezen in C#.

2. **Kalibratie en Anchoring:** Het ontwikkelen van een mechanisme om de virtuele feedback exact op de fysieke pop te projecteren. Hierbij wordt gebruik gemaakt van *Spatial Anchors* (via de Meta XR SDK) om te garanderen dat de hologrammen niet 'wegdrijven' (drift) tijdens het reanimeren.
3. **Feedback Loop:** Het programmeren van de logica die sensorwaarden omzet naar visuele cues, inclusief het adaptieve mechanisme waarbij de 'Ghost Avatar' pas verschijnt bij aanhoudende fouten.

A.3.4. Fase 4: Experimentele Validatie (A/B Test)

Om de effectiviteit van de ontwikkelde PoC te meten, wordt een kwantitatief experiment uitgevoerd met een testgroep (studenten Verpleegkunde/Geneeskunde). Deze fase is cruciaal om de onderzoeksvragen met meetbare feiten te kunnen beantwoorden.

Proefopzet

De participanten worden willekeurig verdeeld in twee groepen:

- **Groep A (Controlegroep):** Voert een reanimatiesessie van 2 minuten uit op de pop, gebruikmakend van de traditionele tablet-applicatie (Laerdal Q CPR app) voor feedback.
- **Groep B (Interventiegroep):** Voert dezelfde sessie uit, maar maakt gebruik van de ontwikkelde MR-applicatie op de Meta Quest headset.

Metrieken

De vergelijking vindt plaats op basis van objectieve en subjectieve data:

1. **Reanimatie-prestaties (Objectief):** De sensoren in de pop registreren de kwaliteit van de CPR.
 - Gemiddelde compressiescore (0-100%).
 - Percentage correcte diepte.
 - Percentage correcte frequentie.
2. **Cognitieve Belasting (Subjectief):** Na afloop vullen beide groepen de gestandaardiseerde **NASA-TLX** vragenlijst in. Hiermee wordt gemeten hoeveel mentale inspanning de feedbackmethode vereiste en in welke mate de feedback als storend of helpend werd ervaren.

A.3.5. Tijdsplanning en Mijlpalen

Het onderzoek hanteert een iteratieve aanpak waarbij technische risico's (zoals de BLE-connectiviteit) zo vroeg mogelijk worden gemitigeerd.

De planning is opgedeeld in sprints met concrete opleverpunten (*deliverables*):

- **Fase 0: Technical Spike (30 jan – 16 feb)**

Focus ligt op het elimineren van technische risico's.

- **Actie:** Opzetten Unity-project en reverse-engineering van het Bluetooth GATT-protocol van de Laerdal pop.
- **Deliverable 16/02:** Werkend prototype (console-only) waarin data van de pop real-time zichtbaar is in Unity.

- **Fase 1: Requirements & Basis Visualisatie (17 feb – 10 mrt)**

Start stage. 1 dag per week focus op BP.

- **Actie:** Afnemen interviews experts, opstellen MoSCoW-lijst & implementeren van de basis 'Ghost Avatar' in Unity.
- **Deliverable 10/03:** Hoofdstuk 'Requirements Analyse' geschreven + Eerste visuele versie applicatie (Alpha).

- **Fase 2: Verfijning & Adaptieve Logica (11 mrt – 31 mrt)**

- **Actie:** Implementeren van *Spatial Anchors* (voor positiebehoud) en de **Adaptieve Feedback-logica** (waarbij de Ghost pas verschijnt bij foutieve handelingen).
- **Deliverable 31/03:** Definitieve Proof of Concept gereed voor testen.

- **Fase 3: Experimentele Validatie (1 apr – 21 apr)**

Testperiode (rekening houdend met paasvakantie).

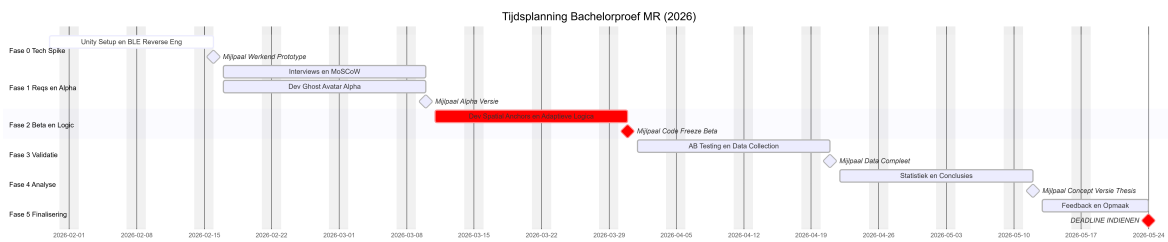
- **Actie:** Opzetten testomgeving, uitvoeren van A/B-tests met proefpersonen en data-export.
- **Deliverable 21/04:** Alle testdata verzameld (CSV-exports van de pop en ingevulde NASA-TLX vragenlijsten).

- **Fase 4: Analyse & Conclusie (22 apr – 12 mei)**

- **Actie:** Statistische verwerking van de resultaten (SPSS/Excel) en uitschrijven conclusies en discussie.
- **Deliverable 12/05:** Eerste volledige conceptversie van de scriptie ter review.

- **Fase 5: Finalisering (13 mei – 24 mei)**

- **Actie:** Verwerken feedback promotor, spellingscontrole, layout-optimalisatie en indienen.
- **Deliverable 24/05:** Definitieve indiening bachelorproef.



Figuur A.1: Visuele weergave van de tijdsplanning en mijlpalen (2026).

A.4. Verwacht resultaat, conclusie

De centrale hypothese van dit onderzoek is dat de MR-applicatie de reanimatiekwaliteit verbetert door het elimineren van het *split-attention effect* en aan de hand van intuïtieve real-time feedback. Verwacht wordt dat de interventiegroep significant beter scoort dan de tablet-groep. Dit zal visueel worden aangetoond in een staafdiagram waarin de gemiddelde QCPR-scores van de MR-groep de 70% overstijgen. Daarnaast zal een spreidingsdiagram (*scatter plot*) naar verwachting tonen dat de compressies van de MR-gebruikers stabiel binnen de ideale waarden vallen (X-as: 100–120 cpm, Y-as: 50–60 mm). Tevens wordt een lagere subjectieve werkbelasting verwacht op de NASA-TLX schaal.

De meerwaarde van dit onderzoek voor studenten Verpleegkunde en Geneeskunde ligt in de directe, ruimtelijke feedback dat autonoom leren mogelijk maakt. De vaardigheden van de studenten ontwikkelen sneller en zorgt op lang termijn voor een betere patiëntenzorg. Mochten de resultaten afwijken, zij het door ergonomische beperkingen van de headset of andere onvoorziene parameters, dan levert dit onderzoek alsnog waardevolle inzichten op over de huidige haalbaarheid van XR-hardware binnen medisch onderwijs.

Bibliografie

Carroll, W. M. (2020). *Emerging Technologies for Nurses: Implications for Practice*. Springer Publishing Company.

Chari Fourati, L., & Said, S. (2020). Remote Health Monitoring Systems Based on Bluetooth Low Energy (BLE) Communication Systems. *Smart Homes and Health Telematics*, 12157, 41–54. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51517-1_4

Cortegiani, A., Russotto, V., Montalto, F., Iozzo, P., Meschis, R., Pugliesi, M., Mariano, D., Benenati, V., Raineri, S. M., Gregoretti, C., & Giarratano, A. (2017). Use of a Real-Time Training Software (Laerdal QCPR®) Compared to Instructor-Based Feedback for High-Quality Chest Compressions Acquisition in Secondary School Students: A Randomized Trial. *PLOS ONE*, 12(1), e0169591. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169591>

D'Angelo, G., Rodio, A., Donati, M. E., Paternostro, F., Gulisano, M., & Marella, G. (2021). A Systematic Review of Simulation Techniques Based on Augmented Reality and Hybrid Simulators in Healthcare. *Applied Sciences*, 11(5), 2338. <https://doi.org/10.3390/app11052338>

Dattani, S., Spooner, F., Ritchie, H., & Roser, M. (2023). Causes of Death [<https://ourworldindata.org/causes-of-death>]. *Our World in Data*.

Diller, F., Scheuermann, G., & Wiebel, A. (2024). Visual Cue Based Corrective Feedback for Motor Skill Training in Mixed Reality: A Survey. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(7), 3121–3134. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2022.3227999>

Gerup, J., Soerensen, C. B., & Dieckmann, P. (2020). Augmented reality and mixed reality for healthcare education beyond surgery: an integrative review. *International Journal of Medical Education*, 11, 1–18. <https://doi.org/10.5116/ijme.5e01.eb1a>

Glover, J., & Linowes, J. (2019). *Complete Virtual Reality and Augmented Reality Development with Unity: Leverage the power of Unity and become a pro at creating mixed reality applications*. Packt Publishing.

Hurt, G. J. (2024). *Untethered Displays: The Effects of Mixed Reality on Split-Attention in Fine-Motor Tasks* [Bachelor of Philosophy Thesis]. University of Pittsburgh. <http://d-scholarship.pitt.edu/46363/>

Miller, R. B. (1968). Response time in man-computer conversational transactions. *AF-IPS '68 (Fall, part I): Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference*, 267–277. <https://doi.org/10.1145/1476589.1476628>

- Olasveengen, T. M., Semeraro, F., Ristagno, G., Castren, M., Handley, A., Kuzovlev, A., Monsieurs, K. G., Raffay, V., Smyth, M., Soar, J., Svavarsdottir, H., & Perkins, G. D. (2021). European Resuscitation Council Guidelines 2021: Basic Life Support. *Resuscitation*, *161*, 98–114. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2021.02.009>
- Raymer, E., MacDermott, Á., & Akinbi, A. (2023). Virtual reality forensics: Forensic analysis of Meta Quest 2. *Forensic Science International: Digital Investigation*, *47*, 301658. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2023.301658>
- Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*(1), 21–53. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0333-8>
- Smyth, M. A., van Goor, S., Hansen, C. M., e.a. (2025). European Resuscitation Council Guidelines 2025: Adult Basic Life Support. *Resuscitation*, *215*, 110771. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2025.110771>