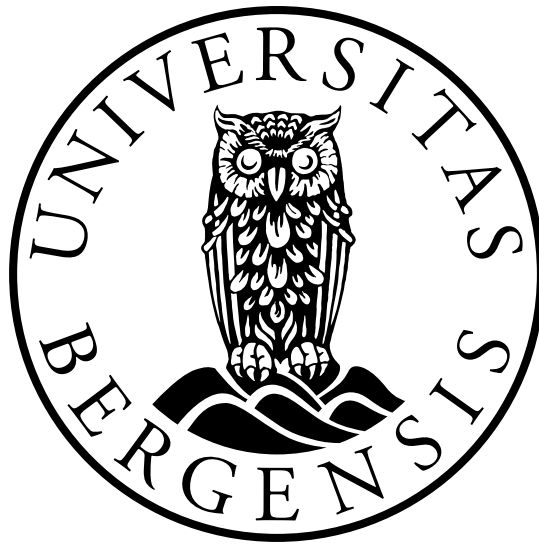


UNIVERSITETET I BERGEN



Institutt for informasjons- og medievitenskap

MASTEROPPGAVE

**Håndgripelig brukergrensesnitt
i Mixed Reality**

Audun Klyve Gulbrandsen

15. juni 2020

Audun Klyve Gulbrandsen
Masterprogram i medie- og interaksjonsdesign
Universitetet i Bergen
audun.gulbrandsen@uib.no

15. juni 2020

Nøkkelord

XR; MR; AR; AV; VR; TUI; Kjemi; Titrering

Sammendrag

I denne studien undersøker jeg hvordan man kan designe et håndgripelig grensesnitt for Mixed Reality. Prosjektet inkluderer en kartlegging av teknologi for Mixed Reality, som er tilgjengelig på markedet i dag. En sentral del av studien består av en prototyping-prosess, med utvikling av en TUI-prototype for kjemiooplæring i Mixed Reality, der væskene kun eksisterer i det virtuelle miljøet. Resultatene fra prototypingen analyseres og diskuteres ved bruk av filtrerings- og manifesteringsdimensjoner. Prototypen viser hvordan man kan gi en standard byrette et "digitalt lag", ved å 3D-printe et festeadapter og montere en sensor på stoppehanen. Prototypen består ellers av en egen programkode, for simulering av en titreringsøvelsen.

How can I tell what I think till I see what I make and do?

Christopher Frayling

Forord

Hovedveileder på prosjektet har vært professor Lars Nyre, ved institutt for informasjons- og medievitenskap, UiB. Takk for svært god faglig støtte og inspirasjon, gjennom hele studiet.

Biveileder har vært professor Barbara Wasson, ved SLATE (Centre for the Science of Learning & Technology), UiB. Takk for alle gode innspill, og lån av kontor og labfasiliteter.

Takk til gode kollegaer i Spellbound: Joakim Vindenes og Trym Røed Arvesen. Takk også til samarbeidspartnerne til Spellbound: Kjemisk institutt v/instituttleder Knut Børve, og professor Morten Fjeld.

Sist, men ikke minst: takk til familien, for uendelig oppbacking gjennom hele studietiden.

Innhold

Tabeller	xii
Figurer	xiii
Forkortelser	xv
KAPITTEL 1: INTRODUKSJON	1
1.1 Motivasjon	2
1.2 Samarbeid mellom Spellbound og Kjemisk institutt	4
1.3 Problemstilling	4
1.4 Avgrensninger	5
1.5 Oppgavestruktur	6
KAPITTEL 2: BAKGRUNN	7
2.1 Hva er Mixed Reality?	7
2.1.1 Extended Reality (XR)	8
2.1.2 VR, AR, AV, og MR	8
2.1.3 Frihetsgrader (Degrees of Freedom)	9
2.2 Håndgripelige brukergrensesnitt	10
2.3 Menneskelig persepsjon	11
2.3.1 Øyets oppløsningsevne, synsfelt og oppdateringsfrekvens	11
2.3.2 Embodiment og presence — opplevelse av tilstedeværelse	11
2.4 Datasyn (Computer Vision)	12
2.5 Kjemioplæring	13
2.5.1 Bruk av XR i kjemioplæring	13
2.5.2 Titrering	15
KAPITTEL 3: TEKNOLOGI	17
3.1 HodeseTT med display (HMD)	18
3.2 Enkel XR	19
3.3 Avansert XR	22
3.4 Bildekvalitet	24

3.4.1	Piksler per grad (PPD)	24
3.4.2	Field of View (FOV)	24
3.4.3	Oppdateringsfrekvens	25
3.5	Sensortechnologi	26
3.5.1	Kamera	26
3.5.2	Øyesporing	26
3.5.3	Romlig sporing	27
3.5.4	Håndsporing	27
3.5.5	Andre sensorer	28
3.6	Bruke “VR HMD” for Mixed Reality	29
3.6.1	Utstyr for prototyping	30
3.6.2	Båndbredde	31
KAPITTEL 4: METODE		33
4.1	Research through Design	33
4.1.1	Prototyping som metode	34
4.1.2	Analysemetode	36
KAPITTEL 5: PROTOTYPING		39
5.1	Case: Titrering	40
5.2	Iterasjon 1 - Ekte omgivelser (AR)	41
5.2.1	Teknisk oppsett	41
5.2.2	Målbeskrivelse	41
5.2.3	Use Case	42
5.2.4	Utvikling	42
5.2.5	Oppsummering	44
5.3	Iterasjon 2 - Virtuelle omgivelser (AV)	46
5.3.1	Teknisk oppsett	46
5.3.2	Målbeskrivelse	46
5.3.3	Use Case	47
5.3.4	Utvikling	47
5.3.5	Oppsummering	51
5.4	Filtrering og manifestering	53
5.4.1	Filtreringsdimensjoner	53
5.4.2	Manifesteringsdimensjoner	55
KAPITTEL 6: DISKUSJON		57
6.1	Delproblemstilling 1	57
6.1.1	State of the art	57

6.1.2	Valg av teknologi	58
6.2	Delproblemstilling 2	59
6.2.1	Augmented Reality vs. Augmented Virtuality	59
6.2.2	Fidelitet	60
6.2.3	Pedagogisk design	61
6.3	Forskningsbidrag	62
6.3.1	Prosess	62
6.3.2	Oppfinnelse	62
6.3.3	Relevans	63
6.3.4	Utvidbarhet	64
6.4	Begrensninger	64
6.5	Etikk	65
KAPITTEL 7: KONKLUSJON		67
7.1	Oppsummering	67
7.2	Videre forskning	68
Referanser		69

Tabeller

1	Enkel vs Avansert XR	18
2	Enkel XR	19
3	Avansert XR	22
4	Filtreringsdimensjoner [3, s. 7:11]	36
5	Manifestasjonsdimensjoner [3, s. 7:11]	37
6	Teknisk oppsett, iterasjon 1	41
7	Teknisk oppsett, iterasjon 2	46
8	Filtrering — prototypeprofil	53
9	Manifestering — prototypeprofil	55

Figurer

1	Reality-Virtuality Continuum, Milgram et al. [7, s. 2]	7
2	Extended Reality Scheme (<i>beskåret</i>), [4, s. 9]	8
3	Three Degrees of Freedom (3DOF), [9]	9
4	Six Degrees of Freedom (6DOF), [9]	10
5	Oppsett for en titrerings-øvelse [28]	15
6	Stasjonær XR med outside-in tracking [64, s. 24]	23
7	ZED Mini stereokamera	26
8	Leap Motion hand tracker	28
9	Vive tracker	28
10	HMD med stereokamera	29
11	HTC Vive Pro med ZED Mini	30
12	Festeadapter for Vive tracker	48
13	Simulering av væsker med ObiFluid	49
14	Håndsporing med Leap Motion	50
15	Test av prototypen, iterasjon 2	51

Forkortelser

XR	Extended Reality
VR	Virtual Reality (Virtuell virkelighet)
AR	Augmented Reality (Utvidet virkelighet)
AV	Augmented Virtuality (Utvidet virtualitet)
MR	Mixed Reality (Blandet virkelighet)
TUI	Tangible User Interface (Håndgripelig brukergrensesnitt)
HMD	Head-mounted display (Hodesett med display)
DOF	Degrees of Freedom (Frihetsgrader)
FOV	Field of View (Synsfelt)
PPD	Pixels per Degree (Piksler per grad)
RtD	Research through Design (Forskning gjennom design)
SDK	Software Development Kit (Programvareutviklingssett)
API	Application Programming Interface (Programmeringsgrensesnitt)

Kapittel 1

Introduksjon

I dette masterprosjektet utforsker jeg hvordan man kan kombinere håndgripelige brukergrensesnitt med Mixed Reality, nærmere bestemt Augmented Reality og Augmented Virtuality. Prosjektet består av en praktisk komponent og en teoretisk oppgave. Den praktiske komponenten er en prototype som står plassert i Media City Bergen og er tilgjengelig for demonstrasjon og utprøving der.

Filosofen Martin Heidegger hevder at en ting blir virkelig når den står i et meningsfylt forhold til mennesket. Han skiller mellom en teoretisk forståelse av verden (*Vorhandenheit*), og en praktisk tilnærning til verden (*Zuhandenheit*). I følge Heidegger er det praktiske overordnet det teoretiske [1]. Dette kan videre relateres til håndgripelige brukergrensesnitt (TUI), som lar oss bruke vår manuelle og generelle kroppslige intelligens. Berøring minner oss på vår kroppslige eksistens og sårbarhet, og kan stimulere til kognitiv utvikling og læring (sitater i [2, s. 65]).

Jeg har valgt å bruke artikkelen “The Anatomy of Prototypes” av Lim et al. som en struktur for dette prosjektet. Modellen som blir presentert i denne artikkelen, har gitt en god innfallsvinkel til arbeidet mitt. Rammeverket de har utviklet, er både et analytisk og et reflekterende verktøy, som har gitt innspill til konsept og teoretisk refleksjon om hvordan prototypen ble utformet, og om hvordan en kan tolke resultatene fra prototypingen. Artikkelforfatterne hevder at “Prototypes are used not for proving solutions but for discovering problems or for exploring new solution directions.” [3, s. 7]

Video med presentasjon av prototypen er tilgjengelig her:

<https://purl.org/spellbound>

Prototypen står plassert i Media City Bergen og er tilgjengelig for demonstrasjon og utprøving, etter nærmere avtale (*sommer/høst 2020*).

1.1 Motivasjon

Interaksjonsdesign og prototyping handler gjerne om å prøve ut teknologier, på jakt etter nye løsninger. XR er et medium som åpner for å ta i bruk hele rommet som grenseflate, og det åpner for å finne nye løsninger for hvordan brukeren kan interagere med rommet.

Selv liker jeg å bruke hele rommet som arbeidsflate ved å skrive på tavler, skrive på papir, henge opp post-it-lapper på korkvegger, og innrette arbeidsrom/kontor på en måte som gir en fysisk romfølelse. På datamaskinen er en begrenset av skjermens størrelse og oppløsning, på en todimensjonal overflate.

Med Extended reality, slik som Virtual og Augmented reality, endres noen av disse begrensningene, ved at hele det tre-dimensjonale rommet tas i bruk som arbeidsflate, og en er ikke lenger begrenset av en todimensjonal skjerm av relativt begrenset størrelse. Som en har sett i XR teknologi, åpner dette for nye måter å interagere med informasjon, både i romlig forstand, i dybde, høyde og vidde.

I over tretti år har det blitt jobbet med ulike former for metaforer i dataverdenen, skeuomorfisme, slik som skrivebordsmetaforen, der en navigerer i et grafisk brukergrensesnitt som gjerne skal symbolisere elementer fra den fysiske verden. Den mest kjente utvikleren av skrivebordsmetaforen var Apple, men de som gjerne regnes for å være oppfinnerne av dette var forskere ved Xerox Parc. Det var her datamusen ble til, og det var her de første eksemplene på skrivebordsmetafor i grafisk brukergrensesnitt ble utviklet.

Et romlig brukergrensesnitt, som XR, åpner samtidig for en mer "naturlig" måte mennesket kan interagere med datamaskiner på. Dagens løsninger er likevel i stor grad basert på fysiske håndkontrollere som er utviklet spesielt for den XR-løsningen man bruker. I det siste har vi sett en økende interesse for også å ta i bruk håndsporing som brukergrensesnitt, og ulike nye input-kontrollere er nå i utvikling. Mus-tastatur og touch er etablert som de viktigste input-devicene for tradisjonelle datamaskiner. I XR-verden eksperimenteres det med nye former for input-devicer, forbedringer av fysiske håndkontrollere og bruk av talegjenkjenning og håndsporing. Her er det mye mer som kan og bør utforskes.

Det jeg først og fremst er interessert i, er å bli i stand til å interagere med teknologien på en naturlig måte, at jeg kan integrere bruken av datamaskiner i livet mitt på en måte som minst mulig begrenses av de verktøyene jeg bruker, at teknologien blir en naturlig del av privatliv og arbeidsliv, ikke slik at jeg ønsker en bestemt type google-assistent som er parat

til å lytte til meg til enhver tid. Jeg vil heller kombinere det digitale med det manuelle og det fysiske, som å skrive med penn og papir, jobbe med lapper på en tavle, samarbeide med andre personer i rommet, men samtidig beholde et digitalt "lag". Dette vil være måter å frigjøre seg fra begrensningene som ligger i det å måtte styre alt fra en smarttelefon, nettbrett, eller en pc med mus og tastatur. Taleassistenter som google-home og Apple's Siri kan tjene et slikt formål i noen situasjoner, mens det i andre situasjoner er et mindre egnet grensesnitt.

En kan selvsagt frigjøre seg fra teknologien ved bare å slutte å bruke den. Jeg ønsker imidlertid å frigjøre meg fra begrensningene som følger med brukergrensesnittene vi bruker i dag, men samtidig dra nytte av de fordeler teknologien kan bidra med i ulike situasjoner. Jeg mener at det å kombinere datamaskiner med det manuelle, fysiske har et stort potensiale. Dette er et fagfelt som jeg ønsker å utforske mer.

Det å kunne bevege seg i rommet mens en tenker, kan være en fruktbar måte å arbeide på. Selv er jeg også opptatt av det tangible verktøyet, og ønsker å utforske måter der det romlige og det tangible kan kombineres med det digitale. I denne masteroppgaven er det dette feltet jeg beveger meg i, og prototypen som jeg har utviklet, er et eksempel på en kombinasjon av det romlige, tangible og digitale. Jeg ser på det å prototype, og selve prototypen, som en viktig del av hele forskningsprosessen. Lim et al formulerer det slik: "Prototypes are the means by which designers organically and evolutionarily learn, discover, generate, and refine designs. They are design-thinking enablers deeply embedded and immersed in design practice and not just tools for evaluating or proving successes or failures of design outcomes"

I løpet av bachelor- og masterstudiene ved Universitetet i Bergen, har jeg fått anledning til å utforske et bredt spekter av teknologier, og gjennomføre prosjekter med mål om å finne nye måter å anvende disse teknologiene. Prosjektene spenner fra droneprogrammering, til intelligente brukergrensesnitt og romlige medier.

Gjennom masterstudiet har jeg deltatt på flere konferanser i Norge og utlandet: Codemotion, Berlin 2017; Pyimageconf, San Francisco 2018; IBC, Amsterdam 2018; TekLab, Bergen 2017, London 2018, og Stavanger 2019. Dette har gitt meg verdifulle erfaringer med pågående arbeid innen datasyn og romlige medier. Jeg har også undervist i bachelorkurs om produksjon av innhold til virtuell virkelighet (VR), og etablert selskapet Spellbound, som utvikler læremidler til Extended Reality (XR).

Jeg har valgt å skrive denne avhandlingen på norsk, og håper slik å kunne gi et lite bidrag til fagmiljøet i Norge. I mangel av godt etablerte begreper på norsk, og for å unngå tvetydighet, har jeg likevel valgt å beholde en del engelske begrep, der det er nødvendig.

1.2 Samarbeid mellom Spellbound og Kjemisk institutt

Prototypingen ble utført av Spellbound, i samarbeid med Kjemisk institutt ved Universitetet i Bergen, og masteravhandlingen bygger videre på mine bidrag i dette prosjektet.

Utgangspunktet for samarbeidet mellom Spellbound og Kjemisk institutt, var et ønske fra instituttet om å kunne tilby mer mengdetrening i laboratoriet for studentene. På grunn av tekniske begrensninger med ventilasjonsanlegget i bygget, samt behovet for å ha instruktører til stede ved bruk av kjemiske væsker, ble det tatt initiativ til å utforske i hvilken grad Augmented Reality kunne tas i bruk i opplæringen, som et supplement til den tradisjonelle labundervisningen.

Spellbound ble valgt som FoU-leverandør til prosjektet, med oppdrag om å gjennomføre en forstudie. Jeg hadde rollen som prosjektleder for Spellbound sitt bidrag i prosjektet. Mine oppgaver var å jobbe frem en tydelig problemformulering, gjennomgang av tidligere forskning, og skrive rapport. I tillegg utviklet jeg en prototype, sammen med en medarbeider i Spellbound, Trym Arvesen.

1.3 Problemstilling

Problemstilling for masterprosjektet er:

Hvordan kan man designe et håndgripelig brukergrensesnitt (TUI) for Mixed Reality?

Jeg vil forsøke å belyse hovedproblemstillingen ved hjelp av følgende delproblemstillinger:

Delproblemstilling 1:

Hva er "state of the art" – den beste teknologien for Mixed Reality, som er tilgjengelig på markedet i dag?

Delproblemstilling 2:

Hvilke muligheter og begrensninger må en forholde seg til ved utvikling av en TUI-

prototype for kjemiopplæring i Mixed Reality, der kjemiske væsker kun eksisterer som virtuell grafikk?

Hovedproblemstillingen tar sikte på å generere kunnskap som kan være nyttig for fagfeltet. Delproblemstillingene er ment å bidra til å konkretisere og kontekstualisere arbeidet, og til innhenting av erfaringer og bakgrunnsinformasjon som kan være nyttig for å besvare hovedproblemstillingen.

1.4 Avgrensninger

Prosjektet er en teknologiorientert studie. Selv om case for prototypingen dreier seg om bruk av Mixed Reality i en lærings situasjon, har prosjektet en klar avgrensning der fokuset ligger på selve teknologien, og utforming/design av håndgripelige brukergrensesnitt for Mixed Reality. Auditive grensesnitt (lyd), spesifikke brukere/brukergrupper, og læringseffekter/læringsanalyse, er områder som ikke omfattes av denne studien.

1.5 Oppgavestruktur

KAPITTEL 1: *Introduksjon*

Innledning med presentasjon av motivasjon, problemstilling og forskningsspørsmål for prosjektet.

KAPITTEL 2: *Bakgrunn*

Presentasjon av litteratur og definisjoner som er relevant for oppgaven.

KAPITTEL 3: *Teknologi*

Gjennomgang av “state of the art” innen XR-teknologi for Mixed Reality, som er tilgjengelig på markedet i dag.

KAPITTEL 4: *Metode*

Beskrivelse av metodene som er brukt i forskningen.

KAPITTEL 5: *Prototyping*

Beskrivelse av prototypingen, iterasjon 1 og 2.

KAPITTEL 6: *Diskusjon*

Analyse og diskusjon av prototype og resultater opp mot forskningsspørsmålene.

KAPITTEL 7: *Konklusjon*

Konklusjon og videre forskning.

Kapittel 2

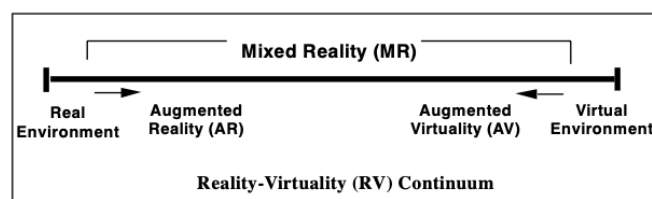
Bakgrunn

Siden jeg bruker MR-teknologi for å utvikle denne prototypen, er det nødvendig å presisere hvilke begreper og definisjoner jeg bruker når jeg formulerer meg omkring prosessen.

2.1 Hva er Mixed Reality?

Mixed Reality er en medieteknologi som blander ekte og virtuelle verdener for å skape komplekse miljø, der fysiske og digitale elementer kan interagere i sanntid [4, s. 10].

Det eksisterer mange ulike definisjoner av Mixed Reality. Som beskrevet av Speicher et al. [5], er det også store variasjoner i hvordan forskere og teknologibransjen bruker begrepet. Den definisjonen som trolig har fått størst betydning, er Milgram et al. sitt såkalte “Reality-Virtuality Continuum” [6, 7]. Milgrams modell beskriver et kontinuum med to ytterpunkt: fra helt fysiske (reelle) omgivelser på den ene enden, til helt virtuelle omgivelser (digital virkelighet) på den andre enden av skalaen. Alt som befinner seg *mellem* disse ytterpunktene, blir betegnet som Mixed Reality (MR). Første versjon av modellen er fra 1994 [6], og en revidert versjon ble publisert i 1995 (figur 1) [7].



Figur 1: Reality-Virtuality Continuum, Milgram et al. [7, s. 2]

2.1.1 Extended Reality (XR)

Extended Reality (XR) [4] er en samlebetegnelse som inkluderer alt *fra* det fysiske miljøet, *til og med* det helt virtuelle miljøet (figur 2). XR fungerer dermed som en nøytral beskrivelse av teknologien, enten man snakker om AR, AV, VR - eller MR. Ofte kan ett og samme produkt brukes til å skape flere typer opplevelser, alt fra AR til VR. Det kan derfor være fornuftig å skille mellom teknologien man bruker (XR-teknologi), og hva slags opplevelser produktet har mulighet til å levere (AR, AV, og/eller VR). I stedet for å bruke begrep som “VR-hodesett” og “AR-hodesett”, bruker jeg derfor benevnelsen “XR-hodesett” eller “XR-produkt”.



Figur 2: Extended Reality Scheme (*beskåret*), [4, s. 9]

2.1.2 VR, AR, AV, og MR

I arbeidet med denne studien har jeg valgt å bruke følgende definisjoner:

Virtual Reality (VR)

Virtual Reality (virtuell virkelighet) er et miljø hvor brukeren er totalt omsluttet (“immersed”) av en syntetisk verden som man kan interagere med [6, s. 2].

Augmented Reality (AR)

Augmented Reality (utvidet virkelighet) kan defineres som ethvert tilfelle der et ellers reelt miljø blir “utvidet” ved hjelp av virtuelle elementer [6, s. 4].

Augmented Virtuality (AV)

Augmented Virtuality (utvidet virtualitet) kan defineres som ethvert tilfelle der et ellers virtuelt miljø blir “utvidet” ved hjelp av elementer fra det reelle miljøet (f.eks. brukerens hender) [7, s. 285].

Mixed Reality (MR)

Mixed Reality (blandet virkelighet) omfatter både AR og AV. Det blander ekte og virtuelle verdener for å skape komplekse miljø, der fysiske og digitale elementer kan interagere i

sanntid. Mixed Reality kan defineres som et kontinuum som befinner seg *mellom* det helt ekte og det helt virtuelle miljøet (uten å inkludere disse ytterpunktene) [4, s. 10].

2.1.3 Frihetsgrader (Degrees of Freedom)

En sentral egenskap ved XR-mediet, er at brukeren har en viss grad av autonomi - en frihet til å rotere eller bevege seg i miljøet. Det finnes imidlertid mange typer XR-produkter, der noen produkter tillater større bevegelsesfrihet enn andre: tre frihetsgrader eller seks frihetsgrader. Consumer Technology Association (CTA) definerer frihetsgrader på følgende måte [8, s. 1-2]:

Tre frihetsgrader (3DOF)

Tre frihetsgrader (*Three Degrees-of-Freedom*) refererer til brukerens evne til å rotere i en XR-verden. De tre frihetsgradene omfatter:

- Tre typer rotasjon:
 - Vridning til venstre og høyre (*yawing*);
 - Tilting fremover og bakover (*pitching*); og
 - Tilting fra side til side (*rolling*).



Figur 3: Three Degrees of Freedom (3DOF), [9]

Seks frihetsgrader (6DOF)

Seks frihetsgrader (*Six Degrees-of-Freedom*) refererer til brukerens evne til å bevege seg (*translation*), samt rotere i en XR-verden. De seks frihetsgradene omfatter:

- Tre typer bevegelse (*translation*):
 - Bevegelse opp og ned (*elevating/heaving*);
 - Bevegelse til venstre og høyre (*strafing/swaying*); og
 - Bevegelse fremover og bakover (*walking/surging*).
- Tre typer rotasjon:
 - Vridning til venstre og høyre (*yawing*);

- Tilting fremover og bakover (*pitching*); og
- Tilting fra side til side (*rolling*).



Figur 4: Six Degrees of Freedom (6DOF), [9]

2.2 Håndgripelige brukergrensesnitt

Tangible User Interface (TUI) er brukergrensesnitt som utvider den reelle fysiske verdenen, ved å koble digital informasjon til fysiske hverdagsobjekter og miljøer [10, s. 235].

Begrepet ble introdusert av Hiroshi Ishii og Brygg Ullmer i 1997 [10]. I denne oppgaven vil jeg bruke den norske benevnelsen “håndgripelig brukergrensesnitt” og forkortelsen TUI.

Håndgripelige grensesnitt gjør at en kan ta i bruk berøringsansen. De fysiske formene kan kontrollere og representere det digitale. TUI gjør digital informasjon direkte manipulerbar med hendene. [11, s. xvi]

En TUI består av konkrete og immaterielle deler. De immaterielle delene kan være informasjon som grafikk og lyd. De konkrete delene er fysiske objekter man kan gripe tak i og manipulere.

I følge Ishii, har TUIer vanligvis to tilbakemeldingsløkker [11, s. xxi]: 1. En passiv haptisk tilbakemeldingsløkke som gir brukeren en øyeblikkelig bekreftelse på at han eller hun har grepet og beveget objektet. 2. En digital tilbakemeldingsløkke; en sensor registrerer at et fysisk objekt er beveget av brukeren. Dataene blir behandlet og viser resultatene som visuell (og auditiv) tilbakemelding. Denne andre løyfen tar derfor lengre tid enn den første løyfen.

Et håndgripelig brukergrensesnitt har sensorer som registrerer endringer i miljøet (input), og aktuatorer som tilfører endringer i miljøet (output). En sensor registrerer for eksempel når brukeren vrir på en skrue. Aktuatoren responderer slik at den korresponderer med handlingene til brukeren. Måten aktuatoren responderer på, kan være i form av visuell feedback, utløsning av et script, haptisk feedback, eller auditiv feedback, etc.

2.3 Menneskelig persepsjon

Når man skal utvikle nye løsninger for Extended Reality (XR), kan det være nyttig å se nærmere på noen av de grunnleggende mulighetene og begrensningene som gjelder for menneskelig persepsjon, slik som øyets oppløsningsevne, synsfelt og oppdateringsfrekvens, samt enkelte andre faktorer som har innvirkning på sanseopplevelsen. Denne kunnskapen er også nyttig når man skal vurdere kvalitetsforskjeller mellom ulike XR-teknologier.

2.3.1 Øyets oppløsningsevne, synsfelt og oppdateringsfrekvens

Den engelske forskeren Robert Hooke beregnet allerede på 1600-tallet hva som er oppløsningsevnen i øyet hos de fleste mennesker. Han beregnet det til å være 1/60 av en grad (1 arc minute) [12, s. 122]. Dette er et mål på øyets evne til å skille detaljer fra hverandre - evnen til å se skarpt. Det er imidlertid bare i en liten del av synsfeltet (fovea) vi kan oppnå en slik skarphet.

Hver for seg har øynene et synsfelt på $\sim 160^\circ$ horisontalt, og $\sim 175^\circ$ vertikalt. Det binokulære synsfeltet hos et menneske er $\sim 120^\circ$ horisontalt, og $\sim 135^\circ$ vertikalt. Det binokulære synsfeltet er området der begge øynene jobber sammen (stereoskopisk) for å persipere dybde. [13, s. 1]

Det sentrale synsfeltet er ca $5-17^\circ$, der skarpsynet (fovea) utgjør ca 5° [14, s. 3]. Alt utenfor det sentrale synsfeltet kan referes til som det perifere synsfeltet.

Oppdateringsfrekvens oppgis i hertz, og kan enkelt forklares som antall ganger et bilde oppdateres per sekund. En lyskilde som blinker med en frekvens lavere enn ~ 60 Hz, vil av de fleste mennesker oppfattes som flimring, mens en høyere frekvens oppleves som jevnt lys. Det er imidlertid individuelle forskjeller, og ulike terskelverdier. I periferisynet kan man også sanse bevegelser som har høyere hastighet/oppdateringsfrekvens enn 60 Hz. [15]

2.3.2 Embodiment og presence — opplevelse av tilstedeværelse

Begreper som tilstedeværelse (presence) og legemligjøring (embodiment) er sentrale i medier for utvidet og virtuell virkelighet (AR og VR). Grabarczyk og Pokropski [16, s. 30] foreslår

tre hovedkategorier som påvirker virtuell tilstedeværelse: sensorisk stimulering, brukerens mulighet til kontroll over grensesnittet og brukerens mulighet til å endre miljøet.

For å samhandle med virtuelle objekter, må brukeren først oppfatte de mulige handlingene som objektet tilbyr, såkalte affordances (*handlingsforslag*), samt ha en virtuell representasjon av kroppen.

Embodiment blir som oftest brukt i betydningen legemliggjørelse, dvs. følelse av sted, av kroppslig handlingsrom, av eierskap og i omgivelser som krever handlinger [16, s. 30]. Denne bruken av embodiment korresponderer også med Heidegger, som sier at vi mennesker er i verden som involverte, affektive, kognitive og praktiske vesen. Vi er kroppslige i verden, midt i det som finnes [17].

Et sentralt spørsmål er hvordan man ved bruk av teknologi kan skape en opplevelse av tilstedeværelse. "Rubber Hand Illusion" er her et klassisk eksempel som handler om hvordan hjernen overbevises om at en gummihånd tilhører brukerens kropp, gjennom enkel manipulering. [18].

2.4 Datasyn (Computer Vision)

Datasyn (Computer Vision) er en komponent som ofte blir brukt i ulike XR-løsninger, og var også en sentral komponent i prototypingen vår. Datasyn er det å bruke en datamaskin til å automatisk registrere, prosessere, analysere og forstå innhold i et digitalt bilde [19].

Ved bruk av datasyn, kan en applikasjon identifisere elementer i et stillbilde eller en video. Elementer som typisk kan detekteres eller gjenkjennes ved bruk av datasyn er ansikter, bilder, tekst, farger, eller visuelle markører (fiducial marker) som strekkoder og mosaikk-koder (QR-kode, ArUco, Data matrix, etc.).

Datasyn kan også brukes til å ekstrahere ut dybdeinformasjon ved å analysere bilder fra ett eller flere kameraer [20], f.eks. fra et stereokamera (kamera med to linser). Sporingen skjer gjerne ved såkalt SLAM (Simultaneous localization and mapping [21]).

2.5 Kjemiopplæring

Prototypen vi utviklet, ble tenkt inn som en del av det å anvende MR i laboratoriekurs i et kjemistudium. Kjemi er på mange måter et praktisk fag, der øvelser i laboratoriet utgjør en sentral del. Ved siden av den teoretiske kunnskapen, er det viktig å lære praktisk bruk av laboratorieutstyret, og prosedyrer for gjennomføring av ulike typer forsøk.

Mange blir introdusert for laboratoriekurs i kjemi, som del av videregående utdanning. Laboratoriekurs i kjemi er også en sentral komponent i studieprogram for kjemi, farmasi og medisin, på universitetsnivå. Laboratorieopplæring krever mye plass, avtrekksvifter og fokus på sikkerhet. For å håndtere sikkerheten er det nødvendig å ha instruktører tilstede i lokalet.

Kjemifaget har gjennom historien hatt stor innvirkning på svært mange områder, ikke minst ser vi hvor avgjørende faget er i en pandemi. En effektiv laboratorieopplæring for utdanning av kjemikere er av stor betydning for samfunnet, i arbeidet med utvikling av nye vaksiner, etc.

2.5.1 Bruk av XR i kjemiopplæring

Hovedtyngden av tidligere forskning som er gjort på bruk av XR til kjemiundervisning, ser ut til å fokusere på metoder for visualisering av organisk kjemi. Mens mange av prosjektene dreier seg om rene VR-miljø, med bruk av 2D-skjerm eller HMD, er det færre prosjekt som fokuserer på Mixed Reality. Det finnes likevel eksempler på tidligere forskning som tar for seg bruk av MR i kjemiundervisning.

I artikkelen *Augmented Chemistry: an interactive educational workbench*, fra 2002 [22], presenteres det et system for bruk av håndgripelige brukergrensesnitt (TUI) til kjemiundervisning. Forfatterne beskriver en fysisk arbeidsstasjon, kalt Augmented Chemistry (AC), bestående av en skjerm, et kamera, og et sett med håndgripelige verktøy. Verktøyene har visuelle markører som spores av kameraet. Gjennom fysisk interaksjon med verktøyene, kan brukeren bygge tredimensjonale molekylmodeller, som vises på skjermen. Ettersom flere verktøy kan brukes samtidig, gir systemet også mulighet for samarbeid.

I en nyere studie fra 2019 [23], beskrives det et system med bruk av Leap Motion håndsporing

og haptiske hansker. Læringsmiljøet er hovedsakelig virtuelt, utvidet med en virtuell representasjon av brukerens egne hender. Brukeren kan bygge molekyler ved å bruke hendene, og mottar haptiske tilbakemeldinger fra vibrerende motorer som er plassert i fingertuppene på hanskene.

Et annet eksempel, utenfor litteraturen, men som det likevel kan være verdt å nevne, er *Virtual Augmented Laboratory*, utviklet av XXII [24]. XXII bruker 3D-printede plastmodeller som representerer labutstyret, og plasserer vanlige håndkontrollere oppi modellene. Dette kan være en enkel måte å gi brukeren mulighet til interagere med utstyr som har andre former enn håndkontrollene. Likevel, det er rimelig å anta at plastmodellene som brukes i eksempelet, har en annen overflate, størrelse og vekt enn det labutstyret de er ment å representere.

Læringseffekter

I en studie av Wu et al. (2013) [25, s. 43-44] er det identifisert fem områder der XR (artikkelen fokuserer på AR/MR) har potensial innen læring: (1) gi 3D-perspektiv til læringsinnhold, (2) allestedsnærværende, samarbeidende og lokalisert læring, (3) øke brukerens opplevelse av tilstedeværelse, umiddelbarhet og fordypning, (4) visualisering av abstrakte konsepter og det usynlige, og (5) å bygge bro mellom formell og uformell læring.

Forskningen på læringseffektene ved bruk av XR, er imidlertid fortsatt på et tidlig stadium [25, s. 47]. Dette var også blant de viktigste funnene i en nyere metastudie av Kaplan et al. (2020), *The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality as Training Enhancement Methods: A Meta-Analysis*. Her er det gjort en sammenstilling av empiri på effektene av å bruke XR til opplæring. Forfatterne oppgir å ha brukt strenge utvalgs-kriterier i et forsøk på å fastslå den direkte effekten av å bruke XR til opplæring [25, s. 3]. Blant hovedfunnene vises det til at:

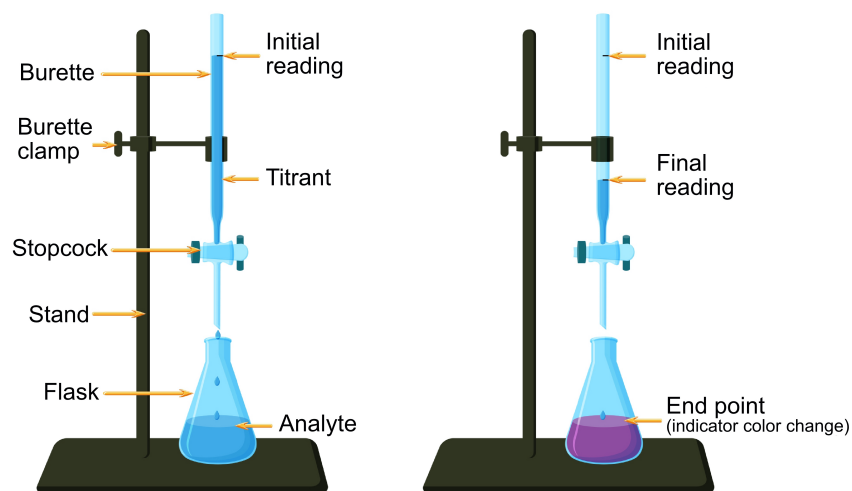
- Effektene av opplæring i XR er generelt sammenlignbare med effektene av opplæring i tradisjonelle omgivelser.
- Utvalget av befolkningen, og oppgaven det øves på, kan påvirke hvorvidt XR er et effektivt medium for opplæring.
- Forskningsfeltet er for uensartet til å fastslå presist hvilke faktorer som bidrar til bedre effekter av opplæring i XR.

Forfatterne fremhever at teknologien utvikles i høyt tempo, og at det er store variasjoner i hva slags XR-teknologi som er blitt brukt i tidligere studier. Det kan være store forskjeller i kvaliteten på teknologien som brukes, noe som gjør det vanskelig å sammenligne resultatene mellom de ulike studiene [26, s. 2, 10–11].

2.5.2 Titrering

Som beskrevet i introduksjonen, har jeg tatt utgangspunkt i øvelsen for titrering av sterk syre mot sterk base, og brukt dette som case for prototypeutviklingen. Titrering er en metode for kjemisk analyse, der en løsning av kjent konsentrasjon brukes for å fastslå den ukjente konsentrasjonen av en annen løsning [27].

En sentral del av læringsutbyttet i en titrerings-øvelse er å opparbeide seg erfaring med presis justering av stoppehanen. Stoppehanen justeres for hånd og regulerer hvor mye væske som renner/drypper fra byretten og ned i kolben/begerglasset. Presisjonsnivået ved justering av stoppehanen er avgjørende for det resultatet man ender opp med.



Figur 5: Oppsett for en titrerings-øvelse [28]

Prosedyre:

1. Byrette fylles med en viss mengde sterk base av kjent konsentrasjon (titrant), og begerglass fylles med en viss mengde sterk syre av ukjent konsentrasjon (analytt). Analytten tilsettes en indikator.
2. Mengden titrant og analytt leses av før start av titrering.
3. Brukeren åpner stoppehane og lar titrant dryppe/renne ned i analytten frem til indikator/analytten begynner å endre farge.
4. Stoppehanen stenges straks indikatoren i analytten endrer farge.
5. Brukeren leser av mengde titrant som er igjen i byretten. Differansen mellom opprinnelig mengde og mengden det stopper på, utgjør mengden titrant som er tilsatt analytten.

Prosedyren gjentas flere ganger for å verifisere resultatet. Den første titreringen kan gjøres i raskere tempo, for å kartlegge omslagspunktet. De neste rundene gjøres mer presist, der man tilsetter dråpe for dråpe når man nærmer seg omslagspunktet. En vellykket titrering er gjennomført når man har utført tre påfølgende titreringer, der resultatet (mengden titrant tilsatt analytten) ikke avviker mer enn $<0,1$ ml.

Resultatet kan så brukes til å regne ut konsentrasjonen av analytten.

Dette er en forenklet prosedyre, der operasjoner som det å skylle med vann rundt kanten av kolbe/begerglass, bruk av pipette og trakt, etc., er utelatt.

Kapittel 3

Teknologi

I dette kapitlet vil jeg gjøre en gjennomgang av teknologi for Mixed Reality, som er tilgjengelig på markedet i dag. Kapitlet relaterer særlig til delproblemstilling 1:

Hva er "state of the art" — den beste teknologien for Mixed Reality, som er tilgjengelig på markedet i dag?

Når man skal designe nye løsninger og utvikle prototyper, er det viktig å ha god kjennskap til teknologien, slik at man har en bevissthet rundt de valgene man tar, og for å kunne beskrive resultatene på en presis måte som andre kan bygge videre på.

Som det blir diskutert i metastudien til Kaplan et al. [26], kan det være vanskelig å sammenligne tidligere forskningsresultat. En av årsakene til dette er at teknologien utvikler seg svært raskt. Mye kan ha endret seg i løpet av kort tid - til og med innen forskningen publiseres. Dersom det i tillegg er begrenset med informasjon om hva slags teknologi som er blitt brukt i forskningen, kan dette gjøre det enda vanskeligere å bygge videre på resultatene fra studien.

En sentral komponent i denne studien har derfor vært å sammenligne funksjonalitet, kvalitet og prisforskjeller på teknologien som er tilgjengelig i dag. Hos Zimmerman [29, s. 499] fremholdes det at man i *Research through Design*-prosjekter bør legge mindre vekt på økonomiske aspekter, som produserbarhet, distribusjon, integrasjon av et produkt i en produktkjede, etc. Jeg mener likevel at det kan være relevant å ha med pris som et element i teknologigjennomgangen. Prisen på teknologien kan fortelle mye om hvilken retning utvikling går, og mulighetene for å skalere opp forskningsprosjektene.

Som vi går nærmere inn på i dette kapitlet, er det store forskjeller i funksjonalitet og kvalitet på teknologien som finnes tilgjengelig i dag. I teknologigjennomgangen har jeg kartlagt relevante mål for kvalitet og funksjonalitet, og sammenstilt data fra flere kilder som presenteres i egne tabeller.

3.1 Hodese sett med display (HMD)

Definisjonen av Mixed Reality, slik den blir beskrevet hos Milgram et al. [6, 7], er ikke avgrenset til hvilken medieteknologi som blir benyttet. Likevel, den teknologien som er vanligst å bruke for å oppleve Mixed Reality i dag, er hodese sett med innebygget display, såkalte "Headmounted Display" (HMD). Jeg har derfor valgt å avgrense teknologigjennomgangen til å gjelde hodese sett med display (HMD), i tillegg til sensorteknologi som kan brukes til å skape MR-opplevelser. Som nevnt i introduksjonskapittelet, har jeg ellers avgrenset studien til å fokusere på det visuelle, det taktile og det håndgripelige. Auditive grensesnitt er ikke et område som det fokuseres på i denne studien, og de blir heller ikke omtalt i teknologigjennomgangen.

Extended Reality (XR) [4] er en samlebetegnelse som inkluderer alt *fra* det fysiske miljøet, *til og med* det helt virtuelle miljøet (figur 2). XR fungerer dermed som en nøytral beskrivelse av teknologien, enten man snakker om AR, AV, VR - eller MR. Ofte kan ett og samme produkt brukes til å skape flere typer opplevelser, alt fra AR til VR. I teknologigjennomgangen presenterer jeg derfor ulike XR-produkter, og diskuterer i hvilken grad disse er egnet til å levere opplevelser for Mixed Reality.

Tabell 1: Enkel vs Avansert XR

	Enkel XR	Avansert XR	
		Stasjonær	Frittstående
Avhengig av ekstern PC/smarttelefon?	Ja (med unntak av integrerte produkter som Oculus Go og ClassVR)	Ja	Nei
Frihetsgrader (DOF)	3 DOF	6 DOF	6 DOF
Pris (eks. mva.) uten PC/smarttelefon	fra ca. 50 NOK	fra 4 250 NOK	fra 4 250 NOK
Pris (eks. mva.) inkl. PC/smarttelefon	fra ca. 1 800 NOK	fra ca 14 000 NOK	fra 4 250 NOK
Mest kjente produkter	Google Cardboard, Samsung Gear, Oculus Go, Ludenso Magimask	HTC Vive, Oculus Rift	Microsoft HoloLens, Oculus Quest











Jeg har valgt å dele teknologien inn i to hovedkategorier: Enkel XR og Avansert XR (tabell 1). Skillet går ved antall frihetsgrader. Enkle XR-produkter gjør det mulig å bevege seg i tre

frihetsgrader, mens avanserte XR-produkter åpner for bevegelse i seks frihetsgrader. Bevegelsesgraden som teknologien tillater kan ha stor innvirkning på brukerens følelse av innlevelse/tilstedeværelse og autonomi.

Enkle XR-produkter er langt rimeligere enn avanserte XR-produkter. Når det gjelder utvikling av XR-innhold, er det imidlertid vanskelig å peke på et klart skille i kostnadene ved å produsere innhold for enkel eller avansert XR, ettersom prosessen og teknologien som kreves, stort sett er den samme for begge kategoriene. Likevel blir det riktig å si at høy kvalitet med mer avanserte tekniske løsninger, generelt vil gi dyrere produksjonskostnader enn enklere løsninger av lavere kvalitet. Dette gjelder særlig for XR-produksjoner med opptak av 360-foto eller video, der kamera- og lydutstyr av høy kvalitet driver produksjonskostnadene opp.

3.2 Enkel XR

Tabell 2: Enkel XR

	Enkel XR				
					
Produsent	Google (+ flere)	Samsung	Avantis Systems	Oculus	Ludenso
Produkt	Cardboard	Gear VR	ClassVR	Go	Magimask
Lanseringsår	2014	2015	2017	2018	2018
Avhengig av ekstern smarttelefon?	Ja	Ja	Nei	Nei	Ja
Frihetsgrader (DOF)	3 DOF	3 DOF	3 DOF (6 DOF MR)	3 DOF	3 DOF (6 DOF MR)
3D?	Ja (stereoskopisk)	Ja (stereoskopisk)	N/A	Ja (stereoskopisk)	Nei (monoskopisk)
VR/MR	VR	VR	VR / MR	VR	VR / MR
Opplysning (pikstør)	(telefonens spesifikasjoner)	(telefonens spesifikasjoner)	2560 x 1440	2560 x 1440 1280 x 1440 per øye	(telefonens spesifikasjoner)
Oppdateringsfrekvens	(telefonens spesifikasjoner)	(telefonens spesifikasjoner)	70 Hz	60-72 Hz	(telefonens spesifikasjoner)
Kamera?		 Mono (i tlf)	 Mono		 Mono (i tlf)
Pris (eks. mva)	fra ca 50 NOK	640 NOK	ca 28 000 NOK (8 stk)	1 800 NOK	N/A
Kommentar	VR-briller laget av papp + plastlinser	(versjon SM-R325)	Alt-i-ett-enhet (innebygget skjerm). Selges som klassesett + abonnement.	Alt-i-ett-enhet (innebygget skjerm)	Pris ikke tilgjengelig, men er tidligere oppgitt å være ca 1 000 NOK

Kilder: [30–42]

Det finnes mange varianter av enkle XR-produkter på markedet. De mest kjente er Google Cardboard som ble lansert i 2014. Google publiserte "oppskriften" til Cardboard på sine nettsider, slik at folk kunne laste ned en mal og lage sine egne VR-briller ved å skjære ut et stykke papp/kartong etter malen. Plastlinsene som brukes i brillene kunne man finne hos en hobbybutikk, eller bestille online. Etter hvert dukket det opp flere produsenter som solgte ferdige flatpakkede sett, som man bretter sammen selv. Aviser og magasiner som New York Times og Teknisk Ukeblad sendte også ut gratis pappbriller, slik at abonnentene deres kunne oppleve XR-innholdet som ble produsert.

I tabell 2 har jeg gjort et utvalg av enkle XR-produkter som finnes på markedet i dag, og sammenlignet dem. De fleste enkle XR-produkter krever at man bruker en smarttelefon som plasseres inni hodesettet. Dette gir en ekstrakostnad pr enhet, tilsvarende kostnaden ved en smarttelefon. Oppløsningen og oppdateringsfrekvensen på skjermen avhenger av smarttelefonens spesifikasjoner. Det finnes også såkalte "alt-i-ett"-produkter, som ClassVR og Oculus Go, der skjerm, prosessor og sensorer er innebygget i produktet.

Mens de fleste enkle XR-produkter er beregnet på VR, kan produkter som ClassVR og Magimask også brukes til MR. ClassVR har et kamera plassert i forkant av hodesettet, mens Magimask bruker kameraet i smarttelefonen. Bildene fra kamera vises på skjermen i hodesettet, slik at brukeren kan se sine ekte omgivelser. Ved bruk av datasyn-teknologi, kan applikasjonen identifisere elementer i bildet, f.eks. en QR-kode, og vise virtuell grafikk som er plassert i forhold til der hvor QR-koden befinner seg i bildet. Brukeren kan interagere med de virtuelle objektene ved å bevege på de fysiske markørene, og ved å bevege seg rundt i rommet.

For Magimask er nettopp MR-funksjonaliteten blant de fremste salgsargumentene. Magimask skiller seg ellers ut fra andre XR-produkter ved at de bruker en monoskopisk linse, i stedet for et stereoskopisk oppsett med to linser. I hodesett med stereoskopiske linser vises det ett bilde per øye. De to bildene er litt forskjellige og tilpasset for å gi brukeren dybdesyn (3D). I Magimask vises det ett bilde over hele skjermen. Slik oppnår de høyere oppløsning og lavere belastning av prosessoren. Den monoskopiske løsningen gjør imidlertid at bildet mangler dybde (3D).

Et kjent problem med enkle XR-produkter, og da særlig for produkter som baserer seg på smarttelefoner, er lav prosessorkapasitet. Ved bruk av applikasjoner som genererer mye virtuell grafikk, er det vanlig å oppleve varmgang i telefonen. Telefonen må da kjøles ned før man kan fortsette å bruke applikasjonen. De billigste hodesettene har også linser av lav kvalitet, noe som gir mindre skarpe bilder og en dårligere brukeropplevelse.



















Selv om enkle XR-produkter er begrenset av tre frihetsgrader, finnes det tilleggsprodukt som skal gjøre det mulig å oppnå seks frihetsgrader, slik som Nolo CV1 [43]. Slike produkt er imidlertid lite utbredt. Den høye prisen (ca 2 800 NOK) [44] gjør at det fort vil svare seg å investere i et mer avansert XR-produkt, som Oculus Quest, i stedet.

3.3 Avansert XR

Avanserte XR-produkter har sensorer som gjør det mulig å bevege seg i seks frihetsgrader (6DOF). Sensorene sporer de romlige omgivelsene (spatial tracking). Dette gjøres gjennom outside-in tracking eller inside-out tracking.

Outside-in tracking (figur 6) bruker eksterne sensorer som monteres i hver sin kant av rommet. Sensorene registrerer hvor hodesettet, håndkontrollere og eventuelle andre sporingsenheter befinner seg i rommet. Ved inside-out tracking skjer all romlig sporing fra sensorer som sitter i hodesettet. Dette gjøres vanligvis med bruk av kamera (datasyn).

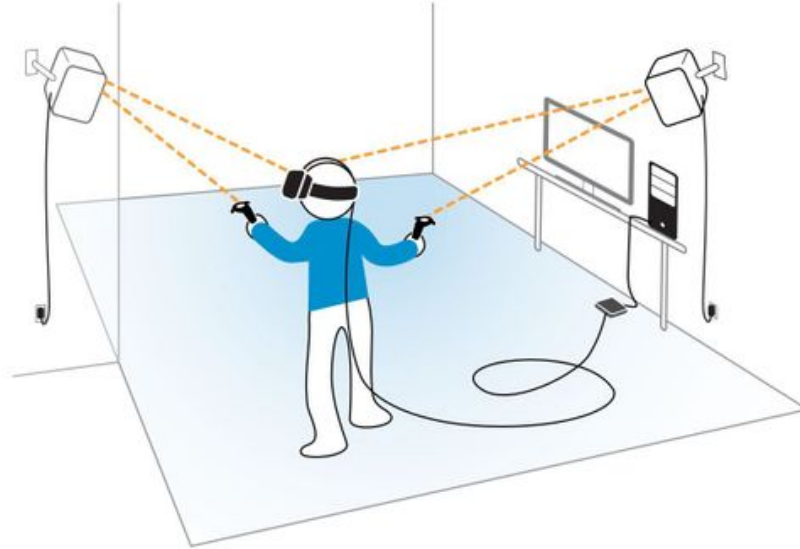
Tabell 3: Avansert XR

	Avansert XR					
	Stasjonær			Frittstående		
						
Produsent	HTC	Oculus	Varjo	Oculus	Microsoft	Magic Leap
Produkt	Vive Pro	Rift S	XR-1	Quest	HoloLens 2	Magic Leap 1
Lanseringsår	2018	2019	2019	2019	2019	2019
Avhengig av ekstern PC?	Ja	Ja	Ja	Nei	Nei	Nei
Tracking	Outside-in	Inside-out	Outside-in	Inside-out	Inside-out	Inside-out
Frihetsgrader (DOF)	6 DOF	6 DOF	6 DOF	6 DOF	6 DOF	6 DOF
3D?	Ja (stereoskopisk)	Ja (stereoskopisk)	Ja (stereoskopisk)	Ja (stereoskopisk)	Ja (stereoskopisk)	Ja (stereoskopisk)
VR/MR	VR / MR	VR / MR (AV)	VR / MR	VR / MR (AV)	VR / MR	MR (AR)
Field of View (FOV)	110°	90°	87°	100° (estimert)	52°	50°
Oppøsning (piksler per grad)	13.09 PPD	11.63 PPD	60 PPD (central display), 16.55 PPD (peripheral display)	14.4 PPD	47 PPD	N/A
Oppøsning (piksler per øye)	1440 x 1600 per øye	1280 x 1440 per øye	N/A	1440 x 1600 per øye	N/A	N/A
Oppdateringsfrekvens	90 Hz	80 Hz	60 / 90 Hz	72 HZ	120 Hz	120 Hz
Kamera?						
Eyetracking?						
Pris (eks. mva)	10 500 NOK	4 250 NOK	ca 140 000 NOK	4 250 NOK	ca 35 000 NOK	ca 25 000 NOK
Kommentar			Pris inkl. 1 års abonnement på programvare og brukerstøtte, samt Steam VR basestasjoner			Pris inkl. tilgang til utviklerverktøy

Kilder: [39, 45–63]

Stasjonært vs frittstående

Stasjonære hodesett må være koblet til en ekstern PC med ledning, og prosesseringen skjer hovedsakelig på den eksterne PCen. De stasjonære produktene i vårt utvalg krever alle støtte



Figur 6: Stasjonær XR med outside-in tracking [64, s. 24]

av en kraftig PC med avansert grafikkort. Kostnaden for den eksterne PCen (priser fra ca 10 000 til 50 000 NOK) kommer i tillegg til prisene oppgitt i tabell 3. Den samme PCen kan også brukes til utvikling av XR-innhold.

De frittstående produktene krever ikke ekstern PC. Prosessor og alle sensorer er integrert i produktet. De er dermed langt mer portable enn de stasjonære løsningene, men de har lavere prosessorkapasitet tilgjengelig. For utvikling av XR-innhold til frittstående enheter, må man ha en kraftig ekstern PC, som beskrevet over.

VR / MR

Hololens 2 og Magic Leap 1 er hovedsakelig laget for Mixed Reality. De har gjennomslipplige skjermer som lar brukeren se sine ekte omgivelser. Det er også mulig å kjøre rene VR-applikasjoner på Hololens, men på grunn av lav field of view ("liten skjerm"), vil brukeren fortsatt se sine ekte omgivelser i det perifere synet.

De andre produktene i utvalget består av hodesett som isolerer brukeren fra det ekte miljøet, men har likevel mulighet til å inkludere det ekte miljøet som AR/AV. Oculus Rift S og Quest støtter kun Augmented Virtuality, mens HTC Vive Pro og Varjo XR-1 også har mulighet for Augmented Reality.

De forskjellige XR-produktene er optimalisert for ulike bruksområder. Det er også forskjellig hvilke spesifikasjoner produsentene fremhever og hva slags informasjon som oppgis i det hele tatt. Dette gjør det vanskeligere å sammenligne funksjonalitet og kvalitet, og sammenstil-

lingen må baseres på data fra flere ulike kilder. I den videre analysen har jeg valgt å fokusere på avansert XR, da jeg anser denne teknologien som mest relevant for dette prosjektet.

3.4 Bildekvalitet

Bildekvalitet kan ha stor innvirkning på brukeropplevelsen. Det er særlig tre faktorer som er viktige for opplevd bildekvalitet: piksler per grad (PPD), synsfelt (FOV), og oppdateringsfrekvens. Det er store variasjoner i hva slags type data de ulike produsentene oppgir for sine produkter. Informasjon for disse tre faktorene kan imidlertid gi et godt grunnlag for å sammenligne kvalitet på tvers av ulike typer produkter.

3.4.1 Piksler per grad (PPD)

Pikseltetthet, målt i PPD, er en god måte å sammenligne bildeskarpheit mellom ulike XR-produkter. PPD er antall piksler per grad i synsfeltet som produktet leverer.

For at en skjerm skal kunne gi brukeren samme skarpsyn som i den virkelige verden, må den ha en oppløsning med en pikseltetthet på 60 PPD [13, s. 1].

De fleste produsentene oppgir ikke PPD. I stedet er det vanlig å bare oppgi skjermens totale oppløsning, oppløsning per øye, antall grader synsfelt (FOV), og eventuelt antall piksler per tomme (PPI). Disse verdiene gir imidlertid ikke et godt nok grunnlag for å sammenligne skarpheit/oppløsning mellom ulike produkter, da man også er avhengig av å vite skjermens fysiske størrelse, avstanden fra brukerens øye til skjermen, etc., for å kunne sammenligne verdiene.

Til oversikten i tabell 3 har jeg derfor måtte basere PPD-verdiene på uverifiserte kilder [39], bortsett fra for Varjo XR-1 (central display) [58], og Hololens 2 [47].

3.4.2 Field of View (FOV)

Synsfeltet som XR-produktet leverer, kan forklares som størrelsen på bildet som brukeren ser i hodesettet. Et lavt FOV kan sammenlignes med å ha på seg “skylapper”, der deler av

brukerens perifere synsfelt er svart.

Microsoft HoloLens 2 skiller seg imidlertid ut ved at den har et gjennomiktig visir, slik at størrelsen på brukerens naturlige synsfelt begrenses i minst mulig grad. I visiret er det plassert en gjennomiktig skjerm, hvor den virtuelle grafikken vises. Denne skjermen utgjør 52° (diagonalt) i brukerens totale synsfelt [47]. Det virtuelle miljøet er dermed begrenset til et slags “rektangulært tunnelsyn”, mens synsfeltet for det ekte miljøet er tilnærmet normalt. Lignende løsninger kan man også finne i hjelmer som brukes av jagerflypiloter [65].

Det finnes flere måter å definere Field of View på: a) horisontal x vertikal FOV, b) diagonal FOV, eller c) total binokulær FOV. De fleste produsentene spesifiserer ikke hvilken type FOV de opererer med, men det skal være vanlig at de oppgir det største tallet, som er diagonal FOV. Diagonal FOV gir imidlertid ingen informasjon om formatet på bildet (aspect ratio). [66]

3.4.3 Oppdateringsfrekvens

De avanserte XR-produktene i vårt utvalg, har en oppgitt oppdateringsfrekvens som varierer fra 60 til 120 Hz. Men dersom skjermen bruker såkalt “interlacing” (sammenfletting), blir det mer komplisert.

Ved interlacing oppdateres ikke hele bildet samtidig. I stedet flettes ulike deler av bildet sammen i en gjentakende syklus. Dersom kun halve bildet oppdateres av gangen, vil en oppdateringsfrekvens på 120 Hz interlaced kunne tilsa at hele bildet har en oppdateringsfrekvens på 60 Hz. Jeg har ikke verifisert hvorvidt de ulike produktene benytter interlacing, men kritikere har hevdet at HoloLens 2 trolig benytter såkalt “Bidirectional Interlaced Scanning”, som betyr at deler av bildet har en oppdateringsfrekvens på kun 60 Hz [67]. Det skal også være brukere som har rapportert at de opplever flimring ved bruk av HoloLens 2 [68].

I tillegg til det jeg har diskutert her, er det også andre faktorer som har innvirkning på bildekvaliteten, slik som typen linser, fargegjengivelse, etc. Disse faktorene har jeg ikke hatt anledning til å gå nærmere inn på i denne studien.

3.5 Sensorteknologi

Sensorer spiller en stor rolle for MR-opplevelser, og muligheten for å kombinere ekte og virtuelle omgivelser. Sensorene er grenseflaten som kobler det ekte og det virtuelle miljøet. Jeg vil her presentere noen sentrale sensorteknologier for bruksområder som bilder (kamera), øyesporing, romlig sporing, håndsporing, og taktile/haptiske grensesnitt.

3.5.1 Kamera

Alle produktene i utvalget (tabell 3), har innebygget kamerateknologi.

HTC Vive Pro, Varjo XR-1, HoloLens 2 og Magic Leap 1 har kamera som gir brukeren mulighet til å ta fargebilde/-video av de ekte omgivelsene. Kamera i Vive Pro og XR-1 kan også brukes til såkalt “passthrough”, noe jeg kommer tilbake til i seksjon 3.6 (side 29).

Kameraene i Oculus Rift S og Quest brukes først og fremst til sporing. I tillegg til sporing kan kameraene brukes til passthrough, men gir kun bilde i gråtoner (ikke farge).

For stasjonær XR (produkter koblet til ekstern PC), er det også mulig å ta i bruk eksterne kamera, som ZED Mini fra Stereolabs (pris ca 4 200 NOK eks. mva. [69]).



Figur 7: ZED Mini stereokamera

3.5.2 Øyesporing

Varjo XR-1, Microsoft HoloLens 2, og Magic Leap 1 har innebygget øyesporing (eye tracking). Enheten sporer hvor brukeren ser, for å kalibrere bildet til brukerens øyne. Data fra øyesporingen kan også hentes ut til brukertesting, eller man kan integrere øyesporingen som en del

av brukergrensesnittet, for eksempel ved å gi brukeren mer informasjon om elementer de ser på i mer enn 5 sekunder.

Varjo XR-1 bruker øyesporing til å oppnå høyere skarphet/oppløsning der brukeren til enhver tid ser. Bildet i brukerens sentrale synsfelt genereres (rendres) med en oppløsning på 60 PPD. Bildet i det perifere synsfeltet genereres med en lavere oppløsning på 16,55 PPD. På denne måten sparer de prosessorkraft og båndbredde (hvor mye data som overføres i kabelen mellom hodesett og PC). [70, 71] Dette er en teknologi som kalles "Foveated Rendering" [72, 73].

3.5.3 Romlig sporing

Rift S, Quest, Hololens 2 og Magic Leap 1 bruker kamerateknologi (datasyn) til sporing av omgivelsene og sporing av eventuelle håndkontroller.

Vive Pro og XR-1 bruker sporingsteknologi fra Steam VR, som er basert på laser [74].

For stasjonær XR er det også mulig å bruke stereokamera, som ZED Mini, til romlig sporing. Dette kan brukes som alternativ eller supplement til andre sporingsløsninger.

3.5.4 Håndsporing

Håndsporing gjør det mulig å lage applikasjoner der håndgester er en del av brukergrensesnittet. Brukeren kan interagere med appen ved bruk av håndtegn, eller ved å ta på ekte og virtuelle elementer, etc.

HTC Vive Pro, Oculus Quest, Hololens 2 og Magic Leap 1 støtter håndsporing.

Oculus Rift S og Varjo XR-1 har sensorer som skal kunne brukes til håndsporing, men produsenten har p.t. ikke tilrettelagt for at utviklere kan ta sensorene i bruk til dette formålet.

For stasjonær XR er det også mulig å ta i bruk ekstern sensor for håndsporing, som Leap Motion (pris ca 1 000 NOK eks. mva. [75]).



Figur 8: Leap Motion hand tracker

3.5.5 Andre sensorer

I tillegg til ZED Mini og Leap Motion, finnes det en rekke andre sensorer som også kan være aktuelle å bruke til Mixed Reality, f.eks. Kinect (Microsoft), Intellisense (Intel), eller konduktive sensorer (touch sensor).

En sensor som kan brukes til mange ulike formål, er Vive tracker fra HTC (pris ca 1 000 NOK eks. mva. [76]). Dette er en sensor som kommuniserer med Steam VR - samme springsteknologi som brukes av HTC Vive Pro og Varjo XR-1. Sensoren kan festes til brukerens kropp, eller til objekter i rommet. Den kan gi presis sporing av posisjon og måler bevegelser i alle akser.



Figur 9: Vive tracker

Eksempler på andre mer spesialiserte produkter, som jeg ikke har hatt anledning til å gå nærmere inn på i denne studien, er haptiske hansker fra HaptX [77], og kroppsdrakt med haptisk feedback fra Teslasuite [78].

3.6 Bruke “VR HMD” for Mixed Reality

Hololens 2 og Magic Leap 1 bruker gjennomsiktige skjermer for å kombinere det ekte og det virtuelle miljøet. Et generelt problem med XR-teknologi som bruker gjennomsiktige skjermer er lav FOV, samt at det er vanskelig å unngå at grafikken blir gjennomsiktig.

En annen metode for Mixed Reality er å bruke “VR HMD” i kombinasjon med kamera. Live video fra kamera vises på skjermen i hodesettet (“camera passthrough”), og kan kombineres med virtuell grafikk. På denne måten kan man lage MR-løsninger som har bedre fargegjengivelse, og større FOV enn det som p.t. er mulig på hodesett med gjennomsiktige skjermer.



(a) HTC Vive Pro

(b) Varjo XR-1

Figur 10: HMD med stereokamera

HTC Vive Pro og Varjo XR-1 leveres med innebygget stereokamera som er plassert i front av hodesettet. Gjennom kameraet kan brukeren se et tredimensjonalt (stereoskopisk) bilde av de ekte omgivelsene.

Camera passthrough er det viktigste bruksområdet for Varjo XR-1. Stereokameraet har en oppløsning på 12 megapiksler per linse (90 Hz oppdateringsfrekvens) [58]. Dette er langt høyere oppløsning enn kameraet som er innebygget i HTC Vive Pro (~0,8 megapiksel, ved 90Hz) [79].

Det er ellers mulig å bruke et eksternt stereokamera, som ZED Mini fra Stereolabs. ZED Mini kan monteres på HMD som ikke har innebygget stereokamera, eller brukes som alternativ til kameraet som kommer med hodesettet (figur 11). ZED Mini kan levere en oppløsning på 0,8 megapiksel per linse ved 90 Hz, eller 1,8 megapiksel per linse ved 60 Hz [79, 80].

Oculus Rift S og Quest kan kun gi et gråtone-bilde av de ekte omgivelsene. Oculus bruker video fra de mange springkameraene i hodesettet, og setter disse sammen til et slags



Figur 11: HTC Vive Pro med ZED Mini

“røntgen-syn”. Dette gir brukeren mulighet til å orientere seg i det ekte miljøet. Løsningen, som de kaller “Passthrough+”, er relativt begrenset og kan ikke brukes til Augmented Reality. Men muligheten for håndsporing gjør Oculus Quest aktuell til Augmented Virtuality.

3.6.1 Utstyr for prototyping

Stasjonær VR HMD med camera passthrough kan være en god løsning for prototyping av Mixed Reality-applikasjoner, ettersom utstyret er koblet til en ekstern PC der man kan dra full nytte av prosessorkraften.

Det er fleksibelt/modulært, ved at man kan prøve kombinasjoner av ulike typer utstyr og programvare, og sette det sammen til en felles løsning.

På denne måten kan man teste ut avanserte funksjoner som det kan være vanskelig å kjøre på svakere prosessorer. Man kan lage prototyper på applikasjoner som i neste omgang er ment å brukes på frittstående enheter, som Hololens 2, eller på utstyr som enda ikke eksisterer.

Etter å ha funnet frem til gode løsninger som kjører bra på labutstyret, kan man gå videre med optimalisering av prosjektet, og prøve ut hvorvidt det vil være mulig å kjøre tilsvarende løsning også på enheter med svakere prosessor.

Det skal samtidig nevnes at også frittstående enheter, som Hololens og Oculus Quest, kan brukes til prototyping ved å koble dem til en ekstern PC med ledning. Hodesettet fungerer da som et display med sensorer, mens prosesseringen foregår på den eksterne PCen.

3.6.2 Båndbredde

To sentrale utfordringer ved bruk av VR HMD med camera passthrough, er oppløsning og forsinkelse (latency). For lav oppløsning på bildet kan føre til ubehag hos brukeren. Høy forsinkelse mellom brukerens bevegelser i miljøet og det som vises på skjermen i hodesettet, kan også føre til ubehag og kvalme.

Ved camera passthrough, må store mengder data overføres i kabel fra kameraet til PCen, og tilbake til hodesettet. Høyest mulig oppløsning, og lavest mulig forsinkelse, krever svært stor båndbredde (overføringskapasitet) på kabelen. Selv om kameraet i seg selv kan levere høy oppløsning, vil kabelen fungere som en flaskehals. Produsentene må derfor balansere oppløsning og forsinkelse mot båndbredden på kabelen, ved at bildene fra kameraet sendes til PCen med en lavere oppløsning og oppdateringsfrekvens, tilpasset båndbredden i kabelen. Med lavere størrelse på data som overføres, blir også forsinkelsen lavere.

ZED Mini oppgir en gjennomsnittlig forsinkelse på 60ms, mens det innebygde kameraet i HTC Vive Pro skal ha en gjennomsnittlig forsinkelse på ca 200ms [79].

Varjo XR-1 skal ha en forsinkelse på <20ms [58]. I følge produsenten skal de ha fått dette til ved å bruke fiberoptisk kabel som har høyere båndbredde enn kobberledning [81]. De sender fire parallelle videostrømmer til PCen (to per øye/linse): to strømmer nedskalert til 1 megapiksel hver, og to strømmer i full oppløsning som kun utgjør 0,4 megapiksel hver. De to strømmene som sendes i full oppløsning er så små fordi det kun sendes et lite utsnitt av bildet (834 x 520 piksler). Det er øyesporingen som styrer hvor i bildet utsnittet gjøres.

Kapittel 4

Metode

I problemstillingen for masterprosjektet, stiller jeg spørsmålet:

Hvordan kan man designe et håndgripelig brukergrensesnitt (TUI) for Mixed Reality?

Masterprosjektet er gjennomført som en kvalitativ studie som bygger på en hermeneutisk filosofi og metodologi i betydningen at all vår viten, også den naturvitenskaplige, bygger på en forståelse av det vi alt vet noe om. For å forstå en del av noe, må vi tolke det inn i den helheten detaljene er en del av. Og for å forstå helheten, må vi tolke det den består av – delene. Dette blir gjerne betegnet som ”Den hermeneutiske sirkel“ [82].

Gjennom dette forskningsprosjektet gir jeg svar på konstruktive forskningsspørsmål, slik Verne og Bratteteig formulerer det i artikkelen «*Inquiry when doing research and design: wearing two hats*» [83]. Det er her designet en prototype for å tilføre kunnskap til fagfeltet, for å svare på spørsmålet hvordan et håndgripelig brukergrensesnitt for MR kan konstrueres, hva ”state of the art” er, og hvilke muligheter og begrensninger en må forholde seg til ved utvikling av en TUI-prototype for en bestemt kontekst.

4.1 Research through Design

Prosjektet tar utgangspunkt i Research through Design (RtD), eller ”forskning gjennom design“. Dette er en metodologi som er mye brukt til forskning gjennom interaksjonsdesign.

Begrepet ble introdusert av Christopher Frayling i artikkelen *Research in Art and Design*, fra 1993 [84]. Frayling skiller her mellom *Research into art and design*, *Research through art and design*, og *Research for art and design* [84, s. 5]. Senere har det kommet til nye definisjoner

som bygger videre på Frayling [29, 85]. Zimmerman og Forlizzi definerer RtD på følgende måte [85, s. 169]:

research practice focused on improving the world by making new things that disrupt, complicate or transform the current state of the world

Metodologien legger vekt på det å lage noe som en vei til oppdagelse. Den fokuserer på artefakter som en konkretisering av et designkonsept, og på materialene og formene som inngår i artefaktet. Innholdet i ideen som utforskes, er i utgangspunktet forskerens perspektiv, slik kunsten i utgangspunktet er kunstnerens perspektiv. Det er fremskrittet for fagfeltet som er hovedformålet med aktiviteten. [83, s. 96-97]

Denne tilnærmingen er også sentral i masterprogrammet i medie- og interaksjonsdesign ved Universitetet i Bergen. Her blir studentene inspirert og utfordret til å prøve ut ulike teknologier, og utvikle prototyper som en metode for å generere ny kunnskap. Professor Lars Nyre skriver blant annet: *“Oppfinning føregår i spenninga mellom gamal og ny teknologi, mellom det amatørmessige og det profesjonelle, mellom risiko og tryggleik, mellom tilgang og ikkje-tilgang til teknologi.”* [86]

Flere forskere har bidratt med ulike modeller for forskning gjennom design ([29, 85, 87]). I artikkelen *«Research through design as a method for interaction design research in HCI»* [29], presenterer Zimmerman et al. en modell for bruk av RtD innen interaksjonsdesign, og presenterer et sett med fire kriterier som kan brukes til å evaluere forskningsbidrag gjennom interaksjonsdesign: prosess, oppfinnelse, relevans, og utvidbarhet [29, s. 499-500]. Jeg gjennomgår disse kriteriene i diskusjonen i kapittel 6.

I tillegg til Zimmerman et al., bruker jeg Lim et al. sin ”anatomi for prototyper“ (*“The Anatomy of Prototypes”*) [3], som rammeverk for refleksjon og analyse av prototypen i prosjektet.

4.1.1 Prototyping som metode

Verne og Bratteteig skiller mellom ulike typer designforskning: forskning som er avhengig av at man designer for å besvare forskningsspørsmålene, og forskning som kan gjøres uten å designe. Forskning om design (*research into design*) og forskning for design (*research for design*) er ikke avhengig av at forskeren selv deltar i designprosessen. Forskning som handler

om hvordan en ide kan materialiseres (RtD), krever imidlertid at forskeren designer, for å besvare spørsmålet. [83, s. 100]

Problemstillingen for masterprosjektet handler nettopp om å manifestere en idé – om hva slags form og hvilke materialer som kan brukes for å konkretisere idéen om å lage håndgripelige brukergrensesnitt for Mixed Reality. Prototyping har derfor utgjort en vesentlig komponent i studien. Å jobbe med design, og gjennomføre en prototyping-prosess, har vært nødvendig for å belyse problemstillingen på en god måte, og er en metode som egner seg godt til denne typen utforskende studie.

Prototypes are the means by which designers organically and evolutionarily learn, discover, generate, and refine designs. They are design-thinking enablers deeply embedded and immersed in design practice and not just tools for evaluating or proving successes or failures of design outcomes

Lim, Stolterman og Tenenbergh [3, s. 2]

I artikkelen “The Anatomy of Prototypes” skiller Lim et al. mellom begrepene *prototyping* og *prototype*. De presenterer to prinsipper for prototyping og en “anatomi for prototyper”:

Grunnleggende prinsipper for prototyping:

Prototyping er en aktivitet med det formål å skape en manifestasjon som i sin enkleste form filtrerer kvalitetene designere er interessert i, uten å fordreie forståelsen av helheten. [3, s. 7:4]

Økonomisk prinsipper for prototyping:

Den beste prototypen er en som på enkleste og mest effektive måte gjør mulighetene og begrensningene for en designidé synlige og målbare. [3, s. 7:4]

Anatomi for prototyper:

Prototyper er 1) filtre i en designprosess, og 2) manifestasjoner av designidéer som konkretiserer og eksterialiserer konseptuelle idéer. [3, s. 7:4 og 7:11]

4.1.2 Analysemetode

Som nevnt, bruker jeg Zimmerman et al. sin modell for RtD [29, s. 499-500], til analyse og diskusjon av forskningsbidragene.

Jeg bruker også Lim et al. [3] sin “anatomie for prototyper” for å diskutere den praktiske komponenten. Anatomien er et rammeverk som bidrar til å artikulere prototypen, og danner et fundament for analyse og refleksjon [3, s. 7:23]. Den består av et sett med filtreringsdimensjoner (tabell 4), og et sett med manifesteringsdimensjoner (tabell 5).

Lim et al. beskriver to fundamentale måter å forstå en prototype på:

- 1) som et medium for å utforske et designområde ved å *filtrere* utvalgte aspekt av designidéen.
- 2) som et medium som *manifesterer* de filtrerte aspektene ved designidéen.

Filtreringsdimensjonene beskriver hva prototypen *undersøker*:

- a) fremtoning b) data, c) funksjonalitet, d) interaktivitet, og e) romlig struktur .

Manifesteringsdimensjonene beskriver hva prototypen *består av*:

- a) materialer, b) fidelitet, og c) scope.

Tabell 4: Filtreringsdimensjoner [3, s. 7:11]

Filtering Dimension	Example Variables
<i>Appearance</i>	size; color; shape; margin; form; weight; texture; proportion; hardness; transparency; gradation; haptic; sound
<i>Data</i>	data size; data type (e.g., number; string; media); data use; privacy type; hierarchy; organization
<i>Functionality</i>	system function; users' functionality need
<i>Interactivity</i>	input behavior; output behavior; feedback behavior; information behavior
<i>Spatial structure</i>	arrangement of interface or information elements; relationship among interface or information elements—which can be either two- or three-dimensional, intangible or tangible, or mixed

Tabell 5: Manifestasjonsdimensjoner [3, s. 7:11]

Manifestation Dimension	Definition	Example Variables
<i>Material</i>	Medium (either visible or invisible) used to form a prototype	Physical media, e.g., paper, wood, and plastic; tools for manipulating physical matters, e.g., knife, scissors, pen, and sandpaper; computational prototyping tools, e.g., Macromedia Flash and Visual Basic; physical computing tools, e.g., Phidgets and Basic Stamps; available existing artifacts, e.g., a beeper to simulate an heart attack
<i>Resolution</i>	Level of detail or sophistication of what is manifested (corresponding to fidelity)	Accuracy of performance, e.g., feedback time responding to an input by a user—giving user feedback in a paper prototype is slower than in a computer-based one); appearance details; interactivity details; realistic versus faked data
<i>Scope</i>	Range of what is covered to be manifested	Level of contextualization, e.g., website color scheme testing with only color scheme charts or color schemes placed in a website layout structure; book search navigation usability testing with only the book search related interface or the whole navigation interface

Kapittel 5

Prototyping

the act of bringing thoughts into material form is not incidental to the act of creation, but is itself constitutive of and essential to creation. Mind, then, is not simply the sum total of representations and processes within the brain, but also includes external manifestations of thought

Lim et al. [3, s. 7:9]

I dette kapitlet vil jeg presentere design og utvikling av den praktiske komponenten. Kapitlet retter seg særlig inn mot delproblemstilling 2:

Hvilke muligheter og begrensninger må en forholde seg til ved utvikling av en TUI-prototype for kjemiopplæring i Mixed Reality, der kjemiske væsker kun eksisterer som virtuell grafikk?

Lim et al. skiller mellom begrepene prototyping og prototype, der *prototyper* er representative og manifesterte former for designideer, og *prototyping* er aktiviteten å lage og bruke prototyper i design [3, s. 7:10].

Prototypingen i dette prosjektet har bestått av to iterasjoner. I den første iterasjonen utforsket vi ulike metoder for bruk av Augmented Reality. Til den andre iterasjonen gjorde vi et skifte, og gikk over til å fokusere på Augmented Virtuality. Resultatet fra iterasjon 2 utgjør den praktiske komponenten (“prototypen”) i masterprosjektet.

I denne oppgaven er prototypen beskrevet i form av tekst, bilder og video. Dette kan være en grei måte å gi oversikt over hvilke bestanddeler prototypen består av, og fungere som utgangspunkt for analyse og diskusjon. Likevel, tekst, bilder og video har sine begrensninger når man skal beskrive bruk av TUI i Mixed Reality. En annen god måte å formidle slike prototyper, er å la folk prøve dem ut.

Prototypen står plassert i Media City Bergen og er tilgjengelig for demonstrasjon og utprøving, etter nærmere avtale (*sommer/høst 2020*).

Video med presentasjon av prototypen er tilgjengelig her:

<https://purl.org/spellbound>

Utviklingen av prototypen ble gjennomført av Spellbound, i læringslaben til SLATE (Centre for the Science of Learning & Technology), samt i laben til NCE Media, i Media City Bergen.

I den innledende fasen gjorde vi en kunnskapsinnhenting, for å bedre kunne formulere problemområdet. Prosjektgruppen bestod av eksperter fra ulike fagfelt, med professorer i kjemi, kjemididaktikk, læringsanalyse og HCI. I tillegg besøkte vi laboratoriene ved kjemisk institutt, for en gjennomgang i hvordan den praktiske opplæringen gjennomføres, hvilket utstyr som er i bruk og hvordan utstyret brukes.

5.1 Case: Titrering

Prototypingen skal undersøke hvordan en kan lage et håndgripelig brukergrensesnitt for Mixed Reality, som gjør det mulig å utføre en titrering med fysisk labutstyr og virtuelle væsker.

En titreringsøvelse består av få komponenter og en relativt enkel prosedyre (ref. kap. 2.5.2). Læringsmålene for prototypen kan oppsummeres slik:

- Lære prosedyre for gjennomføring av en titrering
- Opparbeide taktil erfaring med presis justering av stoppehane

I den innledende fasen studerte vi instruksjonsmateriale for gjennomføring av en titreringsøvelse [88, 89]. Det tekniske utviklingsmiljøet ble satt opp, med installasjon av programvare og drivere, ihht dokumentasjon [90].

Vi fikk låne labutstyr for gjennomføring av en titreringsøvelse, fra Kjemisk institutt. Vi fikk også en veiledning av teknisk personell ved instituttet i hvordan utstyret skal brukes.

Basert på denne kunnskapsinnhenting, gikk vi videre med utviklingen av prototypen. Utviklingen bestod av to iterasjoner, der iterasjon 1 kan beskrives som Augmented Reality, mens iterasjon 2 kan beskrives som Augmented Virtuality.

5.2 Iterasjon 1 - Ekte omgivelser (AR)

- Ekte omgivelser
- Fysisk labutstyr
- Virtuelle væsker
- HMD med stereokamera

5.2.1 Teknisk oppsett

Tabell 6: Teknisk oppsett, iterasjon 1

Hardware	Software	Fysisk labutstyr
<ul style="list-style-type: none"> • HTC Vive Pro HMD • Stereolabs ZED Mini stereokamera • PC med NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti grafikkort 	<ul style="list-style-type: none"> • Unity (v 2018.1.9f2) • Unity plugins: <ul style="list-style-type: none"> - ZED Plugin for Unity (v 2.8.2) - OpenCV for Unity plugin (v 2.3.7) - Obi Fluid • ZED SDK (v 2.8.3) 	<ul style="list-style-type: none"> • Byrette med stoppehane • Stativ med klemme/muffe • Begerglass

5.2.2 Målbeskrivelse

Brukeren har på seg et HTC Vive Pro HMD. I front av hodesettet er det montert et stereokamera (ZED Mini). Det fysiske labutstyret er plassert på et bord foran brukeren.

Kameraet lar brukeren se sine ekte omgivelser gjennom displayet i hodesettet. Kameraet fungerer også som en sensor som detekterer utstyr/objekter og overflater i rommet, slik at den virtuelle grafikken kan tilpasses de ekte omgivelsene. På denne måten kan brukeren se og interagere med labutstyret, og samtidig se virtuell grafikk som harmonerer med utstyr og overflater i de ekte omgivelsene.

Det brukes ingen væsker i det fysiske labutstyret. Væskene skal kun vises som grafikk i det virtuelle laget.

Justering av den fysiske stoppehanen på byretten skal brukes som input for applikasjonen, slik at væskestrøm kan simuleres korrekt i det virtuelle laget.

5.2.3 Use Case

Brukerscenario (Use Case):	
1.	Det fysiske labutstyret står plassert på et bord foran brukeren. Byrette og begerglass er tomt.
2.	Brukeren starter applikasjonen og tar på seg hodesettet.
3.	Brukeren ser sine ekte omgivelser gjennom skjermen i hodesettet.
4.	Simulering av væsker: Byrette og begerglass fylles med titrant og analytt. Væsken eksisterer kun som virtuell grafikk, og er plassert slik at den harmonerer med det fysiske labutstyret i det ekte miljøet.
5.	Brukeren leser av hvor mye væske som er fylt opp i byretten.
6.	Brukeren åpner stoppehanen på byretten, ved å bruke hånden.
7.	Væske renner fra byrette til begerglasset. Analytten i begerglasset endrer farge når omslagspunktet er truffet.
8.	Brukeren stenger stoppehanen straks omslagspunktet er truffet.
9.	Brukeren leser av hvor mye væske som er igjen i byretten.
10.	Brukeren kan repetere prosessen ved å starte appen på nytt. Ved å gjennomføre flere titreringer kan brukeren øke presisjonen og stoppe kranen så nært omslagspunktet som mulig.

5.2.4 Utvikling

Script for titrering

Vi startet med å lage et script (programkode) for simulering av væsker og omslagspunkt.

I scriptet kan man definere mengde og molaritet for titrant og analytt, slik at øvelsen kan gjennomføres flere ganger med stoff av ulike mengde og konsentrasjon.

Scriptet brukes til å styre de virtuelle modellene, slik som mengden væske i byrette og begerglass, mengden titrant som renner/drypper ned i begerglass, samt at analytten endrer farge ved riktig omslagspunkt.

Okklusjon

En sentral del av Augmented Reality, er okklusjon. Okklusjon betyr her at et objekt i et 3D-miljø dekker til visningen av et annet objekt. Eksempel: Væsken (virtuell) er plassert slik at det ser ut som om byretten (ekte) er fylt opp med titrant. Dersom brukeren holder en hånd (ekte) foran byretten, skal grafikken av væsken skjules der hvor brukeren holder hånden foran.

God okklusjon gir brukeren en mer realistisk opplevelse, og bidrar til at brukeren kan bevare hånd-øye-koordinasjon.

Stereokameraet (ZED Mini) leveres med et SDK (programvareutviklingssett) som sørger for at man kan integrere kameraet i et Unity-prosjekt, og bruke ZED Mini i kombinasjon med HTC

Vive Pro. SDK styrer hvordan kameraet sporer dybde og overflater i rommet, samt håndtering av okklusjon.

For å teste okklusjon av virtuelle objekter, laget vi en 3D-modell av det fysiske labutstyret som vi plasserte på et bord i rommet. Vi kunne plassere hendene foran, bak og rundt den virtuelle modellen, og de delene av den virtuelle grafikken som var skjult bak hendene, ble okkludert på en god måte.

SDK for ZED Mini sørger ellers for god interaksjon mellom det ekte og det virtuelle miljøet, ved at skygger fra de virtuelle objektene treffer på riktig sted i det ekte miljøet.

Plassering av virtuell grafikk

For å posisjonere den virtuelle væsken, slik at grafikken harmonerer med det fysiske utstyret, måtte vi prøve ut flere løsninger.

Steam VR outside-in tracking, som brukes av HTC Vive Pro, sporer kun hvor hodesettet og eventuelle andre sensorer befinner seg i rommet. Den sporer ikke andre begrensninger i rommet, som vegger, tak, bord, etc. ZED Mini bruker derfor såkalt SLAM (Simultaneous localization and mapping [21]) for registrering av dybde og overflater, slik at den virtuelle grafikken kan blandes med live video av de ekte omgivelsene. SLAM-sporingen starter imidlertid på nytt hver gang applikasjonen restarteres, og det lagres ikke noen modell av omgivelsene mellom hver økt. Dette gir rask ytelse, men medfører også noen problemer med presisjon.

Ettersom modellen av rommet bygges opp på nytt for hver økt, opplevde vi problemer med at de virtuelle modellene ikke ble plassert på nøyaktig samme sted mellom hver økt. Hvor den virtuelle modellen ble plassert kunne variere med flere titall centimeter mellom hver økt. Dette blir et problem når det er meningen at grafikken skal legges som et lag over det fysiske labutstyret, og grafikken bommer på det fysiske utstyret med flere centimeter.

Vi gjorde derfor endringer i innstillingene for SDK, slik at den samme rom-modellen brukes hver gang. Dette er imidlertid ikke slik produktet er ment å brukes, i følge produsenten

Ved å overstyre innstillingene slik at hver økt bruker samme rom-modell, ble presisjonen noe bedre, men vi opplevde fortsatt variasjoner i hvor den virtuelle modellen ble plassert. Ved å justere ytterligere på innstillingene, og slå av dybdesporingen, oppnådde vi bedre presisjon. ZED brukes da kun som camera passthrough, uten sporing av dybde og overflater. Men uten dybdesporingen fungerer heller ikke okklusjon. De virtuelle objektene var synlig selv når de skulle vært okkludert av brukerens hender.

Fargesporing

Vi gjorde derfor forsøk med bruk av fargesporing (Chroma key), for håndtering av okklusjon. Fargesporing er en teknologi som har vært mye brukt til opptak av værmeldinger på TV. Værmeldereren står foran en grønn skjerm, og et datagrafisk værkart tegnes over alle stedene i bildet hvor det finnes grønn farge. Værmeldereren okkluderer værkartet de stedene grønnfargen er dekket til.

Ved å dekke byrette og begerglass med grønn kontaktfilm, kunne vi plassere grafikken der det er grønt. Ved å holde hånden foran deler av utstyret, vil deler av grønnfargen og dermed også deler av grafikken, okkluderes. Alternativt kan brukeren ha på seg grønne hansker, slik at grafikken dekkes til de stedene det er grønn farge i bildet.

Til fargesporing brukte vi OpenCV, som er et programvarebibliotek for datasyn. Våre tester med bruk av fargesporing ga imidlertid mye støy i overgangen mellom grønn farge og resten av bildet. Fargesporingen var relativt ustabil, og den falt lett ut. For at fargesporingen skal fungere optimalt, er man avhengig av svært jevn belysning.

ArUco

Vi testet også ArUco til sporing av det fysiske labutstyret og posisjonering av grafikken. ArUco er en type visuell markør, en mosaikk-kode som er utviklet for bruk til Augmented Reality, robotikk, etc. [91]. Koden kan printes på et ark og brukes som markør for datasyn. Så lenge kameraet ser alle fire hjørnene av ArUco-koden, har den nok informasjon til å kunne fastslå posituren.

ArUco fungerte greit til posisjonering av grafikken, men på samme måte som ved fargesporing, oppleves det noe ustabil ved at sporingen slutter å fungere straks kameraet mister alle fire hjørnene av syne. Grafikken “klipper” derfor inn og ut til stadighet, når brukeren beveger på hodet.

5.2.5 Oppsummering

Gjennom testingen fant vi ut at det kan være vanskelig å bruke dybdesporingen i ZED Mini til harmonisering av virtuell grafikk med det fysiske labutstyret.

Ved å deaktivere dybdesporingen i ZED Mini, og kun bruke camera passthrough, mister man samtidig okklusjon. Okklusjon kan muligens løses ved bruk av fargesporing, men det

kreves jevn belysning og mer optimalisering for å unngå støy i overgangene mellom grønn farge/grafikk og resten av bildet.

ArUco kan være egnet til sporing av fysisk labutstyr, og posisjonering av grafikk. Det er imidlertid utfordringer med at grafikken “klipper” inn og ut når brukeren beveger på hodet - både ved bruk av ArUco og ved fargesporing.

Et annet funn var at vi opplevde ubehag ved å bruke ZED Mini til camera passthrough over lengre tid. Bildet oppleves noe uskarpt. I tillegg er det en merkbar forsinkelse i overføringen av bildet til skjermen i hodesettet, når man beveger blikket rundt i rommet.

Vi hadde etter hvert flere funn som pekte i retning av at ZED Mini ikke er best egnet til å løse oppgaven. Vi valgte derfor å gjøre en ny iterasjon, uten ZED Mini, og i stedet ta i bruk Leap Motion for håndsporing.

5.3 Iterasjon 2 - Virtuelle omgivelser (AV)

- Virtuelle omgivelser
- Fysisk labutstyr
- Springssensor på stoppehane
- Virtuelle væsker
- HMD med håndsporing

5.3.1 Teknisk oppsett

Tabell 7: Teknisk oppsett, iterasjon 2

Hardware	Software	Fysisk labutstyr
<ul style="list-style-type: none"> • HTC Vive Pro HMD • Leap Motion Hand Tracker • Vive Tracker • PC med NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti grafikkort 	<ul style="list-style-type: none"> • Unity (v 2018.1.9f2) • Unity plugins: <ul style="list-style-type: none"> - Leap Motion Assets - Obi Fluid • Leap Motion SDK (Orion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Byrette med stoppehane • Stativ med klemme/muffe • Begerglass

5.3.2 Målbeskrivelse

Brukeren har på seg et HTC Vive Pro HMD. I front er det montert en håndsensor (Leap Motion). Det fysiske labutstyret er plassert på et bord foran brukeren. Det er festet en sensor (Vive tracker) til enden av stoppehanen, for å spore posisjonen til stoppehanen, samt for å spore hvor labutstyret står plassert i rommet.

Brukeren ser ikke sine ekte omgivelser, men ser kun en virtuell representasjon av labutstyret og egne hender. Hendene spores med Leap Motion Hand Tracker, og labutstyret spores med Vive Tracker. På denne måten bevares hånd-øye-koordinasjon, og brukeren kan interagere med det fysiske labutstyret i det ekte miljøet med sine egne hender.

Det brukes ingen væsker i det fysiske labutstyret. Væskene skal kun vises som grafikk i det virtuelle laget.

Justering av den fysiske stoppehanen på byretten brukes som input for applikasjonen, slik at væskestrøm kan simuleres korrekt i det virtuelle laget.

5.3.3 Use Case

Brukerscenario (Use Case):	
1.	Det fysiske labutstyret står plassert på et bord foran brukeren. Byrette og begerglass er tomt.
2.	Brukeren starter applikasjonen og tar på seg hodesettet.
3.	Brukeren ser et virtuelt miljø med grafikk som representerer labutstyret og brukerens egne hender. Brukeren ser ikke sine ekte omgivelser.
4.	Simulering av væsker: Byrette og begerglass fylles med titrant og analytt. Væsken eksisterer kun som virtuell grafikk.
5.	Brukeren leser av hvor mye væske som er fylt opp i byretten.
6.	Brukeren åpner stoppehanen på byretten, ved å bruke hånden.
7.	Væske renner fra byrette til begerglasset. Analytten i begerglasset endrer farge når omslagspunktet er truffet.
8.	Brukeren stenger stoppehanen straks omslagspunktet er truffet.
9.	Brukeren leser av hvor mye væske som er igjen i byretten.
10.	Brukeren kan repetere prosessen ved å starte appen på nytt. Ved å gjennomføre flere titreringer kan brukeren øke presisjonen og stoppe kranen så nært omslagspunktet som mulig.

5.3.4 Utvikling

Vi brukte samme script som i iterasjon 1, med noen justeringer.

Virtuelt miljø

Gjennom arbeidet med iterasjon 1 erfarte vi at det å vise bilder fra ZED Mini på skjermen i hodesettet, kunne føre til ubehag, på grunn av uskarphet og forsinkelse. Helt virtuelle miljøer i HTC Vive Pro har høyere oppløsning og raskere respons, og var mer behagelig å bruke over tid.

I iterasjon 2 valgte vi derfor å bytte ut ZED Mini, og i stedet bruke en håndsensor. Brukeren opererer i et virtuelt miljø som utvides med elementer fra det ekte miljøet. Brukerens hender og det fysiske labutstyret blir representert av virtuelle modeller.

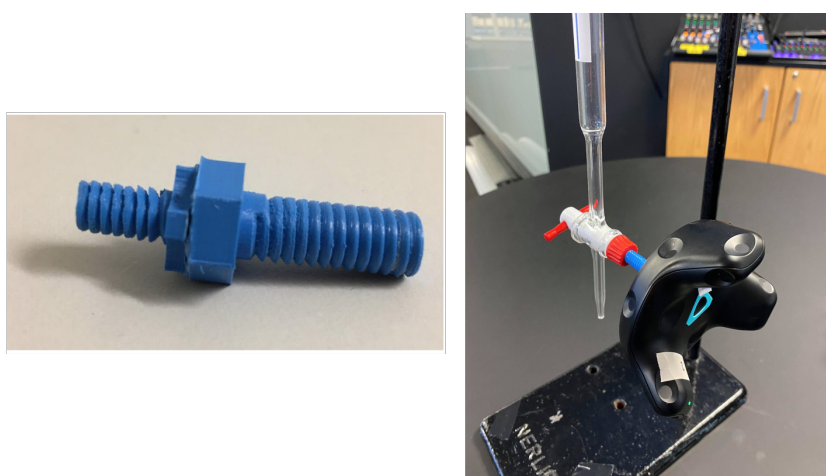
Fra iterasjon 1 hadde vi laget en enkel 3D-modell av labutstyret. For at brukeren skal kunne interagere med det fysiske labutstyret, men kun se den virtuelle 3D-modellen, måtte vi gjøre noen forbedringer på modellen, slik at målene på modellen stemmer bedre med det fysiske labutstyret.

Sensor på stoppehane

For registrering av bevegelser på stoppehanen, tok vi i bruk en sensor av typen Vive tracker. Det var imidlertid litt utfordrende å få festet sensoren til stoppehanen.

I de første testene brukte vi el-tape for å montere sensoren. Sensoren ga gode data og kunne registrere svært presise bevegelser på stoppehanen. Det var likevel en viss feilmargin knyttet til svikt i el-tapen. I tillegg måtte sensoren kalibreres hver gang vi monterte den på nytt, etter å ha ladet batteriene. En mer praktisk løsning ble derfor å bruke 3D-printer til å lage et eget festeadapter. Slik unngikk vi at sensoren gled ut av posisjon, og det var ikke nødvendig å kalibrere sensoren hver gang den ble montert på nytt.

Bruk av en egen sensor for registrering av bevegelser på stoppehanen viste seg å være nyttig, da den registrerer endringer i posisjon for stoppehanen også når stoppehanen er utenfor brukerens synsfelt. Dette gir presis og stabil input for applikasjonen.



Figur 12: Festeadapter for Vive tracker

Måling av væskestrøm

Stoppehanen regulerer hvor mye væske som drypper eller renner fra byretten. For at simuleringen av væsker skal bli realistisk, måtte vi måle volumstrøm ved ulike grader åpning på stoppehanen. Vi gjorde en rekke målinger med vann, der vi brukte sensoren på stoppehanen (Vive tracker) til å måle antall grader åpning, og brukte stoppeklokke til å måle hvor lang tid samme mengden vann brukte på å strømme ut av byretten. Luftbobler ble fjernet før hver måling.

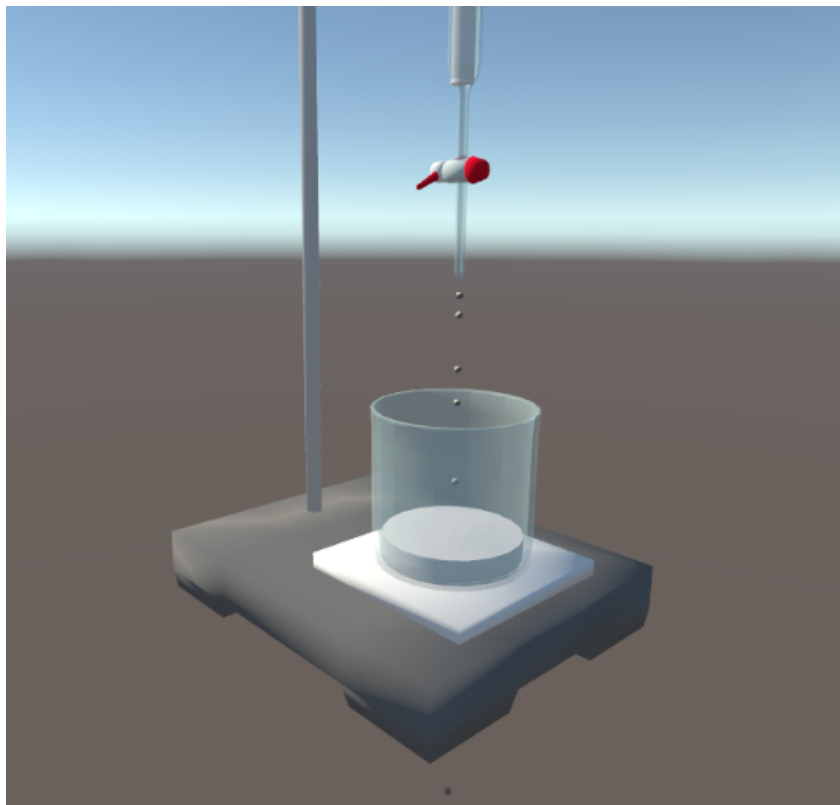
Resultatene brukte vi til å definere hvor mange milliliter som skal strømme ut av byretten per sekund, ved ulike grader åpning på stoppehanen.

Simulering av væsker

Til simulering av væsker tok vi i bruk Obi Fluid (Unity-plugin). Obi Fluid er utviklet spesielt for generering av virtuell grafikk som skal representere væsker. Den gir mulighet til å spesifisere fysiske egenskaper for væsken, som viskositet, tetthet, overflatespenning, etc.

Væsken genereres i sanntid, når man kjører applikasjonen. Antall milliliter væske i byrette og begerglass spesifiseres av brukeren før applikasjonen starter, og blir styrt gjennom scriptet vi har laget for titreringsøvelsen. Obi Fluid genererer væsken som dråpepartikler. Dette gjør det mulig å styre væskesimuleringen med høy presisjon. Ved liten åpning på stoppehanen, vil det kun komme dråper fra byretten.

Vi opplevde noen utfordringer med ytelse i forbindelse med væskesimuleringen. Selv om det kun er noen få centiliter som fylles i byrette og begerglass, blir det mange enkeltpartikler som skal genereres som grafikk i sanntid. Dette var krevende for grafikkprosessoren. Grafikken oppdateres ikke raskt nok til at væsken som kommer ut av byretten ser ut som en sammenhengende strøm. I stedet ser det ut som en strøm av enkeltpartikler (figur 13). Problemet kan trolig løses gjennom optimalisering av koden. Vi opplevde ikke samme problem når grafikken ble generert i større skala. En mulig løsning kan derfor være å først generere væskegrafikken i stor skala, for så å nedskalere den gjennom post-prosessering.

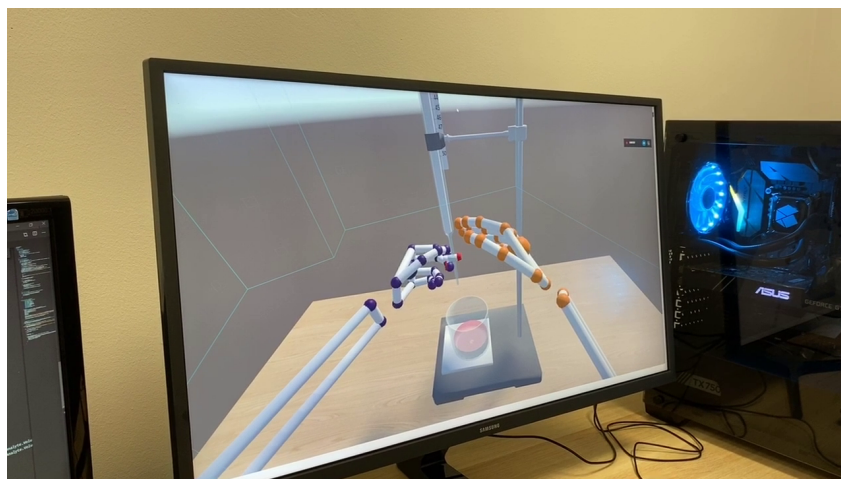


Figur 13: Simulering av væsker med ObiFluid

Håndsporing

Til håndsporing valgte vi å bruke Leap Motion. Dette er en sensor som ofte blir brukt i kombinasjon med VR HMD. Produktet kommer med egen SDK for integrasjon til XR-prosjekter i Unity. For å montere sensoren til hodesettet brukte vi en 3D-printet festebrikett.

Leap Motion gjør det mulig å vise virtuell grafikk som korresponderer med brukerens hender. I prototypen bruker vi en skjelettmodell som representasjon for brukerens hender. Dette er en modell som er tilgjengelig via SDK, og gir en grei oversikt over hvilke ledd i hånden som spores. Det er imidlertid mulig å endre modellen, og få et mer realistisk utseende på hendene, om ønskelig.



Figur 14: Håndsporing med Leap Motion

Innledningsvis måtte vi gjøre noe kalibrering, slik at håndmodellene treffer på riktig sted i det virtuelle miljøet. Sensoren ga presis sporing av hender og fingre. Selv om brukeren ikke ser sine ekte omgivelser, opplevde vi at håndsporingen gjorde det enkelt å interagere med det fysiske labutstyret. De virtuelle hendene bidrar til å ivareta brukerens hånd-øye-kordinasjon. Når brukeren justerer på den fysiske stoppehanen i det ekte miljøet, viser displayet at de virtuelle hendene justerer på den virtuelle stoppehanen på samme måte. Stoppehanen fungerer som et håndgripelig brukergrensesnitt, som gir brukeren en følelse av å faktisk ta på det virtuelle labutstyret. Selv med skjelettmodell for hendene, får man en sterk følelse av å være tilstede i det virtuelle miljøet.

Hendene spores kun når de befinner seg innenfor synsfeltet, ettersom håndsensoren sitter i front av hodesettet. Dette er i utgangspunktet ikke et problem for denne prototypen, siden håndsporingen kun brukes som navigasjonshjelp for interaksjonen med det fysiske labutstyret. Det kan imidlertid være noe forsinkelse før sensoren registrerer hendene. Man kan derfor oppleve at håndmodellen plutselig “klipper inn” og blir synlig i det virtuelle miljøet - særlig ved brå hodebevegelser. Vi opplevde ikke dette som spesielt sjenerende, men det er likevel et område som har potensial for forbedringer.

5.3.5 Oppsummering

Virtuelle omgivelser gir høyere oppløsning og raskere respons enn camera passthrough med ZED Mini stereokamera. Vi opplever at et virtuelt miljø er mer behagelig enn camera passthrough med ZED Mini.

En egen sensor for registrering av bevegelser i stoppehanen, gir presis og stabil input. Vive tracker fungerte godt til dette formålet.

Håndsporing med Leap Motion gir god støtte i navigasjonen med det fysiske labutstyret, når brukeren ikke kan se sine ekte omgivelser. Selv med abstrakte håndmodeller, kan håndsporing bidra til å gi brukeren en følelse av tilstedeværelse i det virtuelle miljøet. Hendene spores kun når de befinner seg innenfor synsfeltet, og man kan oppleve noe forsinkelse før sensoren registrerer hendene.

Det er viktig å vite volumstrøm ved ulike grader åpning av stoppehanen, slik at simuleringen av væsker blir realistisk. Simulering av væsker kan være krevende for grafikkprosessoren, og det er nødvendig å jobbe videre med hvordan dette kan optimaliseres.



Figur 15: Test av prototypen, iterasjon 2

5.4 Filtrering og manifestering

Lim et al. sin prototypeanatomie [3], med filtreringsdimensjoner og manifestasjonsdimensjoner, er utgangspunkt for refleksjon og analyse av prototypen, slik den fremstår etter iterasjon 2.

Jeg har brukt denne anatomien til å sette opp to prototypeprofiler: en for filteringsdimensjoner (tabell 8), og en for manifestasjonsdimensjoner (tabell 9).

5.4.1 Filtreringsdimensjoner

Filtreringsdimensjonene relaterer til hva prototypen undersøker og besvarer – hva prototypen filtrerer for. I tabell 8 har jeg systematisert de ulike aspektene som prototypen filtrerer, i henhold til dimensjonene *fremtoning*; *data*; *funksjonalitet*; *interaktivitet*; og *romlig struktur*.

Tabell 8: Filtrering — prototypeprofil

Filtreringsdimensjoner	Beskrivelse
<i>Fremtoning</i>	Virtuelle væsker: størrelse; farge; form; proporsjon; gjennomsiktighet; tekstur; viskositet Virtuelt labutstyr: størrelse; farge; form; proporsjon; gjennomsiktighet; tekstur Fysisk labutstyr: haptikk Virtuelle hender: størrelse; form; proporsjon
<i>Data</i>	Posisjon for fysisk stoppehane; viskositet, væskestrøm, mengde og konsentrasjon for virtuelle væsker; omslagspunkt (endepunkt) for titrering
<i>Funksjonalitet</i>	Systemfunksjonalitet: Regulering av virtuell væskestrøm etter antall grader åpning for stoppehane. Endre farge på analytt ved oppnådd omslagspunkt. Mulighet for å endre konsentrasjon på titrant og analytt.
<i>Interaktivitet</i>	Visuell og haptisk feedback ved justering av fysisk stoppehane; Passiv haptisk feedback: mulighet for å gripe og berøre alt labutstyr; Visuell feedback ved bevegelse av egne hender.
<i>Romlig struktur</i>	Presist romlig forhold mellom det fysiske labutstyret og den virtuelle grafikken som representerer labutstyret og væskene. Presist romlig forhold mellom fysiske og virtuelle hender.

I prototypeprofilen har jeg bare tatt med de aspektene som prototypen adresserer. Auditivt grensesnitt (lyd) og konvensjonelle grafiske brukergrensesnitt (knapper og menyer), er eksempler på aspekt som ikke adresseres, og de er heller ikke med i tabellen.

Fremtoning

Under dimensjonen *fremtoning* er det flere aspekt som undersøkes. For virtuelle væsker og virtuelt labutstyr var det nødvendig å adressere hvilken størrelse, farge, form, proporsjon, og gjennomsiktighet de skal ha. I tillegg måtte det adresseres hva slags viskositet væsken skal ha.

Stoppehanen utgjør et håndgripelig brukergrensesnitt for brukeren. Her er det haptisk fremtoning for det fysiske labutstyret som adresseres.

De virtuelle hendene som brukeren ser – den virtuelle representasjonen av brukerens egne hender – må ha en viss størrelse, form og proporsjon.

Data

For å kunne bruke den fysiske stoppehanen som grensesnitt, er det nødvendig å registrere data om posisjonen til stoppehanen. Dette kan for eksempel måles som en binær verdi, i form av åpen eller lukket posisjon, eller det kan måles mer presist i form av antall grader åpning.

Andre typer data som adresseres, er viskositet, væskestrøm, mengde og konsentrasjon for virtuelle væsker. I tillegg adresseres det hvordan beregningen av omslagspunkt skal skje. Som beskrevet i pkt. 5.2.4, er dette data som håndteres gjennom et eget script.

Funksjonalitet

Det er grunnleggende systemfunksjonalitet som adresseres i prototypen: regulering av antall grader åpning for stoppehane; endring av farge på indikator/analytt ved oppnådd omslagspunkt; endring av konsentrasjon på titrant og analytt.

Interaktivitet

Prototypen filtrerer for visuell og haptisk feedback ved justering av fysisk stoppehane. Resten av det fysiske labutstyret, slik som byretten og stativet, skal også kunne gripes og berøres (passiv haptisk feedback). Brukeren skal bevare hånd-øye-koordinasjon ved å se sine egne hender (visuell feedback).

Romlig struktur

Det skal være et presist romlig forhold mellom det fysiske labutstyret og den virtuelle grafikken som representerer labutstyret og væskene. Det skal være et presist romlig forhold mellom fysiske og virtuelle hender.

5.4.2 Manifesteringsdimensjoner

Manifesteringsdimensjonene beskriver hva prototypen består av – hvordan prototypen er manifestert. I tabell 9 har jeg laget en oversikt over hvordan prototypen svarer til dimensjonene *materialer*, *fidelitet* og *scope*.

Tabell 9: Manifestering — prototypeprofil

Manifesteringsdimensjoner	Beskrivelse
<i>Materialer</i>	MR-applikasjon laget i Unity; PC; HTC Vive Pro HMD; Leap Motion Hand Tracker; Vive Tracker; 3D-printet festeadapter; byrette med stoppehane; stativ med klemme/muffe; begerglass
<i>Fidelitet</i>	<p>Fremtoning:</p> <p><i>Virtuelle væsker</i>: lavt detaljnivå på utseende;</p> <p><i>Virtuelt labutstyr</i>: høyt detaljnivå på utseende;</p> <p><i>Virtuell modell av hånd</i>: lavt detaljnivå på utseende;</p> <p>Funksjonalitet:</p> <p>høy presisjon på simulering av viskositet for væske;</p> <p>høy presisjon på simulering av omslagspunkt;</p> <p>Interaktivitet:</p> <p>høy fidelitet for haptikk (stoppehane, labutstyr) og håndsporing;</p> <p>rask og presis visuell respons på haptisk input;</p> <p>Romlig struktur:</p> <p>presis harmonering av virtuelle og fysiske element</p>
<i>Scope</i>	<p>Begrenset til utforming av et TUI-grensesnitt, med tilhørende MR-app for utføring av en forenklet titreringsøvelse.</p> <p>Utenfor scope: grafiske knapper og/eller menyer; utforming av det virtuelle miljøet, ut over modeller for labutstyr, væske og hender; auditive grensesnitt; instruksjonsdesign; etc. Applikasjonen må startes og stoppes av en administrator, i Unity.</p>

Materialer

Prototypen består av en Mixed Reality-applikasjon, laget i Unity. Applikasjonen oppleves gjennom et HTC Vive Pro HMD (med outside-in tracking), som er koblet til en PC.

En Leap Motion Tracker er montert i front av hodesettet, og brukes til håndsporing. Sensoren er koblet til PCen via ledning.

Det fysiske labutstyret består av: byrette med stoppehane, stativ og begerglass. Byretten er montert i stativet, og begerglasset er plassert under byretten.

En Vive Tracker er festet til stoppehanen, ved hjelp av et 3D-printet skrueadapter. Vive Tracker brukes til å spore posisjon for stoppehanen.

Fidelitet

Prototypen har generelt høy fidelitet. Som det går frem av tabellen, er det imidlertid varierende grad av fidelitet for de ulike aspektene som adresseres av prototypen.

Scope

Scope for prototypen er begrenset til utforming av et TUI-grensesnitt, med tilhørende MR-app for utføring av en forenklet titreringsøvelse.

Kapittel 6

Diskusjon

Som beskrevet i innledningen, har jeg formulert følgende problemstilling for masterprosjektet:

Hvordan kan man designe et håndgripelig brukergrensesnitt (TUI) for Mixed Reality?

I dette kapitlet vil jeg diskutere resultatene av arbeidet. Kapitlet er strukturert slik at jeg først diskuterer hver av de to delproblemstillingene, for så å adressere hovedproblemstillingen.

6.1 Delproblemstilling 1

Hva er "state of the art" – den beste teknologien for Mixed Reality, som er tilgjengelig på markedet i dag?

6.1.1 State of the art

Gjennom denne studien har jeg gitt en oversikt over XR-teknologi som finnes tilgjengelig på markedet i dag. Jeg har kartlagt kvalitet og pris for et utvalg relevante produkter, og sammenlignet dem. Det er store forskjeller i hvilke bruksområder de ulike XR-produktene er laget for. Det er også store forskjeller i kvalitet og pris.

Studien er basert på et utvalg av noen av de mest kjente XR-produktene som finnes på markedet i dag. Det finnes imidlertid mange flere produkter enn de som ble med i utvalget vårt, og nye produkter lanseres hyppig. Andre produkter som kunne vært relevant å ta med i

analysen er HTC Vive Pro Eye [92], HTC Cosmos XR (planlagt lansert ila 2020) [93], og Project North Star [94]. Jeg mener likevel at utvalget gir et representativt bilde av bredden i kvalitet og pris.

Ved sammenligning av produktene i utvalget, er det tre produkter som skiller seg ut: Microsoft Hololens 2, Varjo XR-1, og Oculus Quest. Hololens 2 har kommet lengst innen AR med bruk av gjennomsiktige skjermer. Varjo XR-1 lover høy kvalitet innen passthrough AR. Et annet produkt som er verdt å trekke frem, er Oculus Quest, som kan brukes til VR og AV. Oculus Quest har en god kombinasjon av portabilitet og kvalitet til en relativt lav pris.

Det har vært vanskelig å finne eksempler på eksterne sensorer som kan brukes sammen med Quest og Hololens 2. Både Varjo XR-1 og HTC Vive Pro har støtte for bruk sammen med ekstern sensor av samme type som vi tok i bruk i prototypen (Vive tracker). Likevel burde det være mulig å tilrettelegge for bruk av en sensor som kan kommunisere med Hololens 2/Quest over bluetooth [95, 96]. Inntil et slikt produkt finnes tilgjengelig på markedet, kan det hende man må lage en enkel sensor selv. For Oculus Quest kan man muligens få til en løsning ved å bruke håndkontrollerne som hører til hodesettet, som sensor.

6.1.2 Valg av teknologi

Ved valg av teknologi, følger det også med noen klare avgrensninger for hva slags løsninger man kan utvikle. HTC Vive Pro og Oculus Quest kan være godt egnet for AV, mens Varjo XR-1 og Microsoft Hololens 2 ser ut til å være bedre egnet for AR.

I tillegg til store forskjeller i pris, er det også forskjeller i hvor portable de ulike produktene er. De stasjonære produktene, som HTC Vive Pro og Varjo XR-1, krever mer plass til ekstern PC og outside-in tracking. Frittstående enheter som Hololens 2 og Oculus Quest har enklere prosessorer, men er langt mer portable. Frittstående enheter er slik enklere, uten behov for å sette av egne områder for bruk. Frittstående enheter krever ikke montering av sensorer for romsporing, og krever mindre plass til oppbevaring.

At de frittstående produktene har enklere prosessorer, kan legge begrensninger på hvor detaljrik grafikken kan være. Likevel, både Hololens 2 og Quest leverer bra grafikk, som er fullt i stand til å gi gode brukeropplevelser. Det finnes gode muligheter for optimalisering av prosjekter mot kjøring på frittstående enheter, og mindre detaljrik grafikk trenger ikke å være en begrensning på brukeropplevelsen og læringsutbyttet. Når det gjelder bruk av eksterne

sensorer som Vive tracker, er det p.t. kun stasjonære enheter som HTC Vive Pro og Varjo XR-1 som har støtte for Vive tracker. Som tidligere nevnt, burde det likevel være mulig å lage en enkel sensor som kommuniserer via bluetooth [95, 96].

6.2 Delproblemstilling 2

Hvilke muligheter og begrensninger må en forholde seg til ved utvikling av en TUI-prototype for kjemiopplæring i Mixed Reality, der kjemiske væsker kun eksisterer som virtuell grafikk?

Gjennom prototypingen fikk vi prøvd ut mulige løsninger for gjennomføring av en titreringsøvelse i Mixed Reality. Prototypen ble utviklet for HTC Vive Pro, som er et produkt mange universitet og andre institusjoner har valgt å ta i bruk de siste årene.

I den innledende fasen (iterasjon 1) valgte vi å bruke ZED Mini stereokamera, og jobbet for å lage en passthrough AR-app. ZED Mini markedsføres som et produkt som skal være egnet nettopp til dette formålet [80]. Vi fikk prøvd ut ulike måter å håndtere okklusjon og plassering av grafikk, og identifiserte noen potensielle utfordringer. I en studie fra 2009, beskrives det noen av de samme utfordringene som vi opplevde med at springen av visuelle markører “klipper”, og at de derfor kan oppleves som ustabile [97, s. 54]. I artikkelen presenteres det noen forslag til hvordan slike problemer kan håndteres. I og med at vi i iterasjon 2 valgte å heller fokusere på Augmented Virtuality, gikk vi samtidig bort i fra bruk av visuelle markører, og vi fikk ikke testet ut disse forslagene.

I prototypingen opplevde vi at passthrough AR, med lav oppløsning og høy forsinkelse, kan føre til ubehag for brukeren. Dette er et problem som, så vidt jeg kan se, kun kan løses med utstyr av bedre kvalitet. Varjo XR-1 skal her være i stand til å levere langt høyere oppløsning og lavere forsinkelse enn ZED Mini. Hololens 2 kan også være et godt alternativ til passthrough AR.

6.2.1 Augmented Reality vs. Augmented Virtuality

Som alternativ til passthrough AR, valgte vi å prøve ut en AV-løsning (iterasjon 2). I stedet for ekte omgivelser utvidet med virtuelle element, er brukeren omsluttet av virtuelle omgivelser

utvidet med elementer fra det ekte miljøet. Slik kan man oppnå høy oppløsning og lav forsinkelse i bildet brukeren ser, uten å investere i dyrt utstyr som Hololens 2 eller Varjo XR-1. En AV-app kan levere høy kvalitet, selv på rimeligere utstyr som HTC Vive Pro og Oculus Quest.

Augmented Virtuality er imidlertid en annerledes opplevelse enn Augmented Reality. I stedet for å se de ekte omgivelsene, og i stedet for å se sine egne hender, blir omgivelsene sporet og brukeren får presentert grafikk som representerer det ekte miljøet. Hvilke deler av de ekte omgivelsene som representeres med virtuell grafikk, avhenger av hva som blir sporet, og hva man velger å vise i applikasjonen. På denne måten kan man gjerne si at AV åpner for en større frihet enn AR. AV åpner også for å endre egenskaper ved elementer fra det ekte miljøet, slik som farge, form, tekstur, proporsjoner, etc. I prototypen er for eksempel brukerens hender erstattet med en skjeletthånd.

Selv med abstrakte håndmodeller, erfarte vi at det var mulig å oppnå en stor grad av tilstedeværelse i det virtuelle miljøet. Håndsporingen var viktig for å kunne navigere i miljøet. At brukeren også kan ta på det fysiske utstyret, og justere stoppehanen med hendene, bidro ytterligere til økt følelse av tilstedeværelse. Opplevelsen av tilstedeværelse trenger ikke være forbundet med at miljøet ser spesielt realistisk ut. Tidligere forskning, som den såkalte “rubber hand illusion” [18], har også bekreftet dette. “Rubber hand illusion” er et eksperiment som går ut på å gjøre enkle visuelle og haptiske manipuleringer, slik at hjernen overbevises om at en gummihånd tilhører brukerens kropp.

6.2.2 Fidelitet

Simulering av væsker

Simulering av væsker i sanntid kan være svært krevende for grafikkprosessoren. Dette gjelder både for AR og AV, så lenge væskene kun skal eksistere som virtuell grafikk. Dette kan trolig optimaliseres gjennom forbedringer av programkoden, eller ved å gjøre forenklinger i grafikken som representerer væskene.

Fremtoning for fysisk labutstyr

I prototypen kombinerer vi fysisk labutstyr med et AV-miljø. Her kan det være naturlig å stille spørsmålet om hvor viktig det er at brukeren jobber med ekte labutstyr. Er det for eksempel nok at man kun har en stoppehane som gir brukeren en realistisk følelse? Eller må alt utstyret være med i oppsettet, med korrekt utseende, vekt, og materiale som tilsvarer virkeligheten?

Svaret kommer gjerne an på hvilke læringsmål man har definert for MR-undervisningen. Dersom læringsmålet handler om å trene på prosedyre for gjennomføring av titrering, er det utformingen på det fysiske utstyret kanskje mindre viktig enn om det nettopp er selve den taktile interaksjonen med det fysiske utstyret som er definert som læringsmålet.

6.2.3 Pedagogisk design

Læringsmålet for caset var følgende:

- Lære prosedyre for gjennomføring av en titrering
- Opparbeide taktil erfaring med presis justering av stoppehane

En titreringsøvelse handler om å titrere en væske ned i en annen væske. Når analytten endrer farge, skal en stenge kranen. På et grunnleggende plan kan en si at det utgjør et viktig læringsmål for en titreringsøvelse. Læringsmålet for titrering har fungert som en kontekst som har bidratt til å gi designprosessen en meningsfylt retning. Det har vært nyttig å analysere TUI-grensesnittet opp mot dette læringsmålet. Dersom TUI-grensesnittet hadde vært for upresist i målingene, eller medført for store forsinkelser, ville dette ikke bidratt til å oppnå læringsmålet på en god måte. Instruksjonsdesign har slik vært nyttig for oss i konstruksjonen av TUI, fordi dette læringsmålet gir noen rammer og avgrensninger som må oppfylles for at det skal være et vellykket design. Det stiller noen tydelig krav til designet.

I prototypen må man definere mengde og molaritet for både titrant og analytt, før applikasjonen startes. Ved gjennomføring av en titreringsøvelse er det et sentralt poeng at brukeren ikke kjenner molariteten på analytten. En naturlig videreutvikling av prototypen kunne være å lage et grafisk brukergrensesnitt, der brukeren velger mengde analytt, samt mengde og molaritet for titrant, mens molaritet for analytt randomiseres mellom et sett forhåndsdefinerte verdier.

Andre elementer som kunne vært aktuelt å legge til, er instruksjoner i form av tekst og animasjoner, lyd, og/eller video. En kunne også vurdert å implementere en virtuell veileder - en karakter som guider brukeren gjennom stegene i øvelsen, og gir tilbakemeldinger på hvordan brukeren gjennomfører øvelsen.

6.3 Forskningsbidrag

I Zimmerman et al. sin modell for bruk av RtD innen interaksjonsdesign, presenteres det et sett med fire kriterier som kan brukes til å evaluere forskningsbidrag gjennom interaksjonsdesign: prosess, oppfinnelse, relevans, og utvidbarhet [29, s. 499-500].

6.3.1 Prosess

Zimmermann et al. viser til at en forskningsprosess må dokumenteres på en slik måte at den kan reproduseres [29, s. 499]. I tillegg må en begrunne valg av de spesifikke metodene en har benyttet. I masterprosjektet har jeg utført kunnskapsinnhenting, prototyping med utvikling av en artefakt, samt analyse av prototypen ved bruk av Lim et al. sin prototypeanatom.

I den innledende fasen for dette prosjektet gjorde vi en kunnskapsinnhenting, for å bedre kunne formulere problemområdet. Kunnskapsinnhenting har bestått i kartlegging av tilgjengelig teknologi ("state of the art"), og kartlegging av den faglige konteksten for prototypen (kjemiopplæring/titrering). Vi har besøkt laboratoriene ved kjemisk institutt, for en gjennomgang i hvordan den praktiske opplæringen der gjennomføres, hvilket utstyr som er i bruk, og hvordan utstyret brukes. Basert på dette innsiktsarbeidet, og i samarbeid med prosjektgruppen ved Kjemisk institutt, ble case for prototyping formulert. Kunnskapsinnhenting var nødvendig for å få en bedre forståelse av hva som burde utforskes gjennom prototyping. I teknologigjennomgangen har jeg identifisert noen av de vesentligste faktorene som skiller de ulike produktene, sammenstilt dataene i tabeller, og diskutert sammenhengen mellom de tekniske spesifikasjonene for produktene og "spesifikasjonene" for menneskelig persepsjon. Prosessen ved utvikling av prototypen er grundig beskrevet.

6.3.2 Oppfinnelse

I følge Zimmermans modell må et forskningsbidrag gjennom interaksjonsdesign demonstrere at en har produsert en ny integrasjon av ulike fagområder for å løse en spesifikk situasjon [29, s. 499].

Med henvisninger til relevant forskningslitteratur, har jeg beskrevet hvor bidraget plasserer seg, og hva det tilfører til fagfeltets nåværende "state of the art".

I dette prosjektet er det utviklet en prototype som kombinerer TUI med MR på en innovativ måte. Jeg har demonstrert hvordan man kan utvikle et håndgripelig brukergrensesnitt til Mixed Reality, ved bruk av relativt enkle og rimelige materialer.

Prototypen viser hvordan man kan gi en standard byrette et “digitalt lag”, ved å 3D-printe et festeadapter og montere en sensor på stoppehanen. Prototypen består også av en egen programkode, for simulering av en titreringsøvelse i et Mixed Reality-miljø.

MR-prototypen er utviklet på relativt dyrt utstyr, men ved å ta i bruk Augmented Virtuality demonstrerer jeg hvordan AV kan være et godt alternativ til AR. Ved å bruke AV i stedet for AR, kan man lage MR-løsninger som kjører med høy kvalitet, selv på langt rimeligere utstyr. Dette åpner for at simulatortrening, slik som en MR-kjemilab, kan bli gjort tilgjengelig for langt flere – for eksempel på steder der en ikke har ressurser til å ha en fullt utstyrt kjemilab, eller kyndig personale som kan håndtere utstyret.

6.3.3 Relevans

Forskere for interaksjonsdesign må formulere den foretrukne tilstanden som deres design forsøker å oppnå, og argumentere for hvorfor samfunnet bør anse denne tilstanden som foretrukket, hevder Zimmermann et al. [29, s. 499-500].

I artikkelen fremholdes det at RtD-prosjekter bør fokusere på å lage de *riktige tingene*, og at kommersielle aspekter som økonomi, produserbarhet, distribusjon, etc., bør ignoreres eller tones ned i problemformuleringen [29, s. 499].

I dette prosjektet har jeg designet et håndgripelig brukergrensesnitt for MR. Gjennom prototypingen har jeg vist hvordan dette kan anvendes til kjemiopplæring, der en skal trene på titrering av væsker. Dette kan bidra til å gjøre opplæring i titrering av farlige væsker tryggere.

Jeg mener å ha kombinert det økonomiske med det å lage *de riktige tingene*, på en god måte. I teknologigjennomgangen har jeg kartlagt priser for XR-teknologien, og brukt dette som grunnlag for diskusjonen. Som nevnt i pkt. 6.3.2, har jeg demonstrert hvordan simulatortrening som tar i bruk AV i stedet for AR, kan gjøre det mulig å kjøre løsningen også på rimeligere utstyr. På denne måten kan løsningen bli gjort tilgjengelig for langt flere – også der en ikke har ressurser til å ha en fullt utstyrt kjemilab, eller kyndig personale som kan håndtere utstyret. Dette kan være et viktig bidrag.

6.3.4 Utvidbarhet

Utvidbarhet (*extensibility*) referer til at forskningen må være dokumentert på en slik måte at andre kan dra nytte av kunnskapen som genereres [29, s. 500]: enten ved å bruke prosessen i et fremtidig designproblem, eller ved å forstå og utnytte kunnskapen som er skapt gjennom de resulterende artefaktene.

Gjennom denne avhandlingen har jeg dokumentert og artikulert kunnskapen fra prosjektet gjennom tekst, bilder og video. Jeg har gitt en grundig beskrivelse av teknologigjennomgang og prototyping, og analysert resultatene fra prototypingen ved bruk av Lim et al. sin prototypeanatomy.

6.4 Begrensninger

I denne studien har jeg fulgt en research through design-metodologi, der jeg har stilt konstruktive forskningsspørsmål/problemstillinger (ref. [83]), og jobbet med å besvare disse spørsmålene gjennom en utforskende prototyping-prosess. Mens de fleste studier innen interaksjonsdesign gjerne er brukerorientert, har denne studien vært teknologiorientert.

Den tilnærmingen jeg har hatt, kan sies å ligge i overgangen mellom det Dan Saffer referer til som *Systems Design* og *Genius Design* [98]. *Systems Design* har et sterkt analytisk fokus på komponentene i systemet man designer. *Genius Design*, eller *Rapid Expert Design*, som det også kalles, er en prosess, som i liten grad involverer brukere aktivt i designprosessen [98, s. 81]. Derimot er det viktig å bruke designerens personlige kunnskap, bygge videre på andres forskning, og tilegne seg kunnskap om domenet man opererer i (kontekst).

Det kan være vanskelig å vite hvor mye erfaring man bør ha, før man satser på å bruke en slik tilnærming. Etter å ha jobbet med XR-teknologi sammenhengende siden vinteren 2017, deriblant som faglærer på to bachelorkurs, tok jeg sjansen på at jeg hadde nok erfaring til å prøve ut denne tilnærmingen, der jeg får mulighet til å gi større plass til de utforskende sidene ved design. Jeg opplevde at en omfattende kunnskapsinnhenting, og bruk av Lim et al. sin prototypeanatomy, ga et godt grunnlag for å artikulere, systematisere og “dissekere” arbeidet med et høyt detaljnivå.

6.5 Etikk

Som det vises til i studien til Kaplan et al. [26], er nytten ved bruk av XR til simulært opplæring størst for operasjoner som innebærer risiko (f.eks. dykking, brannøvelser, håndtering av farlige væsker, etc.). Forfatterne viser til at det er i opplæring av risikable prosedyrer, at simulert opplæring kan ha størst nytteeffekt. Denne balansegangen mellom høy risiko, og samtidig høy nytteeffekt av bruk av XR til opplæring, er også gjeldende for prototypen i dette prosjektet. Det kan være en risiko for at prototypen vi har designet inneholder tause" (tacit) feil, som i verste fall kan bidra til "vranglære" i gjennomføringen av en titrering. Slike feil kan få store og alvorlige konsekvenser for samfunnet.

Heidegger understreker at en instrumentell forståelse av teknikk – det at det er et middel for et mål, også gjelder for moderne teknologi [99]. Det å sette seg mål, tilvirke og benytte verktøy, redskap og maskiner er menneskelige verk som hører med i teknikken [100]. Heidegger spør hva det vil si at noe er, og han hevder at teknikkens vesen ikke er det samme som teknikken. Teknikkens vesen representerer et syn på tilværelsen der tingene bare er dersom de lar seg innordne og tilpasse som bestand eller ressurser. Faren med dette, mener Heidegger, er at denne måten å forstå verden på kan fortrenge alle de andre [101]. Dette er også en etisk utfordring vi som teknologer må ta hensyn til.

Kapittel 7

Konklusjon

7.1 Oppsummering

I denne studien har jeg undersøkt hvordan man kan designe et håndgripelig grensesnitt for Mixed Reality.

Jeg har gjennomført en kunnskapsinnhenting, med kartlegging av teknologi for Mixed Reality, som er tilgjengelig på markedet i dag. En sentral del av studien har vært å gjennomføre en prototyping-prosess, der jeg har utviklet en TUI-prototype for kjemiopplæring i Mixed Reality, der væskene kun eksisterer i det virtuelle miljøet. Prototypingen ble utført av Spellbound, i samarbeid med Kjemisk institutt ved Universitetet i Bergen. Valg av case for prototypingen ble gjort i samarbeid med kjemisk institutt. Samarbeidet ga oss verdifull innsikt i fagfeltet, noe som var nyttig i planleggingen og gjennomføringen av prosjektet.

Prototypingen har resultert i en artefakt som kombinerer TUI med MR på en innovativ måte. I denne oppgaven har jeg demonstrert hvordan man kan utvikle et håndgripelig brukergrensesnitt til Mixed Reality, ved bruk av relativt enkle og rimelige materialer. Prototypen viser hvordan man kan gi en standard byrette et “digitalt lag”, ved å 3D-printe et festeadapter og montere en sensor på stoppehanen. Prototypen består ellers av en egen programkode, for simulering av en titreringsøvelsen.

MR-prototypen er utviklet på relativt dyrt utstyr, men ved å ta i bruk Augmented Virtuality demonstrerer jeg hvordan AV kan være et godt alternativ til AR. Ved å bruke AV i stedet for AR, kan man lage MR-løsninger som kjører med høy kvalitet, selv på langt rimeligere utstyr. Dette åpner for at simulatortrening, slik som en MR-kjemilab, kan bli gjort tilgjengelig for langt flere – for eksempel på steder der en ikke har ressurser til å ha en fullt utstyrt kjemilab, eller kyndig personale som kan håndtere utstyret.

7.2 Videre forskning

I videre forskning kan det være en god ide å inkludere forskere med kompetanse på optikk og visuell persepsjon. Ikke for å utvikle ny hardware, men for å gjøre kvalifiserte målinger på spesifikasjonene til det utstyret man bruker. Ved å gjennomføre egne målinger kan man bedre verifisere ytelse og eventuelle begrensninger med utstyret, og finne frem til gode måter å optimalisere designet (software og valg av hardware).

Mulighetene for fjernundervisning og samarbeid, er også et interessant område. Gjennom rammeverk som WebXR [102], kan man utvikle XR-applikasjoner som åpner for samhandling over internett. Det er mulig å lage en felles løsning som kan brukes på ulike typer utstyr, både i nettleseren på PCen, og på avanserte XR-produkter.

Å velge rammeverk som WebXR kan imidlertid også legge begrensninger på hvor avanserte løsninger det er mulig å lage. Høy grad av plattformuavhengighet kan bety lavere detaljrikhet på grafikken, og enklere funksjonalitet. Dette kan innebære at det vil være vanskelig å integrere eksterne sensorer for sporing av stoppehane, etc.

En klar fordel med å velge WebXR, kan være at studentene også kan få tilgang til å bruke løsningen hjemmefra, ved å investere i eget utstyr.

De første objektene som mennesker tok fysisk tak i, for eksempel hammeren som Heidegger viser til, var verktøy som ga direkte kontroll. Det mekaniske måtte vike for elektrisk kontroll da strømmen kom. Etterhvert som det har kommet til flere og flere produkter som hadde enda mer funksjonalitet, ble det vanskeligere å forstå funksjonene til produktet utifra utseendet. I dag styrer vi komplekse operasjoner gjennom digitale verktøy med enkle grensesnitt. Denne utviklingen gjør at det virtuelle mer og mer blir en del av vår daglige verden.

Referanser

- [1] Simon Critchley. «Being and Time, part 3: Being-in-the-world | Simon Critchley». I: *The Guardian* (22. jun. 2009). ISSN: 0261-3077.
- [2] Orit Shaer og Eva Hornecker. «Tangible User Interfaces: Past, Present, and Future Directions». I: *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction* 3.1 (11. mar. 2010), s. 4–137. ISSN: 1551-3955, 1551-3963. DOI: 10/fv6f8z.
- [3] Youn-Kyung Lim, Erik Stolterman og Josh Tenenber. «The anatomy of prototypes: Prototypes as filters, prototypes as manifestations of design ideas». I: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 15.2 (jul. 2008), s. 1–27. ISSN: 1073-0516, 1557-7325. DOI: 10/d2dsfd.
- [4] Oliver Schreer mfl. *XR4ALL - D4.1: Landscape Report*. Fraunhofer HHI / XR4ALL Consortium, 30. nov. 2019.
- [5] Maximilian Speicher, Brian D. Hall og Michael Nebeling. «What is Mixed Reality?» I: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '19. Glasgow, Scotland Uk: Association for Computing Machinery, 2019, s. 1–15. ISBN: 978-1-4503-5970-2. DOI: 10/ggp859.
- [6] Paul Milgram og Fumio Kishino. «A taxonomy of mixed reality visual displays». I: *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77.12 (1994), s. 1321–1329. ISSN: 0916-8532.
- [7] Paul Milgram mfl. «Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum». I: *Proceedings of SPIE* 2351.1 (1995), s. 282–292. ISSN: 0277-786X. DOI: 10/dh8jnv.
- [8] *CTA Standard. Definitions and Characteristics of Augmented and Virtual Reality Technologies (CTA-2069)*. Consumer Technology Association. 2018. URL: <https://shop.cta.tech/products/definitions-and-characteristics-of-augmented-and-virtual-reality-technologies>.
- [9] Kei Studios. *A quick guide to Degrees of Freedom in Virtual Reality*. Kei Studios. 2018. URL: <https://kei-studios.com/quick-guide-degrees-of-freedom-virtual-reality-vr/>.

- [10] Hiroshi Ishii og Brygg Ullmer. «Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms». I: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*. CHI '97. Atlanta, Georgia, USA: Association for Computing Machinery, 1997, s. 234–241. ISBN: 978-0-89791-802-2. DOI: 10/chjrkd.
- [11] Hiroshi Ishii. «Tangible bits: beyond pixels». I: *Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction*. TEI '08. Bonn, Germany: Association for Computing Machinery, 18. feb. 2008, s. xv–xxv. ISBN: 978-1-60558-004-3. DOI: 10/br4qbk.
- [12] Nicholas Wade og Mike Swanston. *Visual Perception: An Introduction, 3rd Edition*. Psychology Press, 5. mar. 2013. 337 s. ISBN: 978-1-136-17830-6.
- [13] Achintya K. Bhowmik. «Advances in Virtual, Augmented, and Mixed Reality Technologies». I: *Information Display* 34.5 (2018), s. 18–21. ISSN: 2637-496X. DOI: 10/ggqmp3.
- [14] Hans Strasburger, Ingo Rentschler og Martin Jüttner. «Peripheral vision and pattern recognition: A review». I: *Journal of Vision* 11.5 (1. mai 2011), s. 13–13. ISSN: 1534-7362. DOI: 10/fx28dx.
- [15] Alex Wiltshire. *How many frames per second can the human eye really see?* PC Gamer. 19. jan. 2017. URL: <https://www.pcgamer.com/how-many-frames-per-second-can-the-human-eye-really-see/>.
- [16] Paweł Grabarczyk og Marek Pokropski. «Perception of Affordances and Experience of Presence in Virtual Reality». I: *AVANT. The Journal of the Philosophical-Interdisciplinary Vanguard* VII.2 (1. des. 2016), s. 25–44. ISSN: 20826710. DOI: 10/ggwsg6.
- [17] Søren Overgaard. «Heidegger on embodiment». I: *Journal of the British Society for Phenomenology* 35.2 (2004), s. 116–131. ISSN: 0007-1773. DOI: 10/ggx6wc.
- [18] Matthew Botvinick og Jonathan Cohen. «Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see». I: *Nature* 391.6669 (feb. 1998), s. 756–756. ISSN: 1476-4687. DOI: 10/cdkb9k.
- [19] *Machine Vision vs Computer Vision: What's the Difference?* - VidoLab. Vidolab Blog. 2018. URL: <https://computer-vision-ai.com/blog/machine-vision-vs-computer-vision/>.
- [20] TS Huang. «Computer Vision: Evolution and Promise». I: *1996 CERN SCHOOL OF COMPUTING* (1996), s. 21.
- [21] *Simultaneous localization and mapping*. Wikipedia. 2020. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Simultaneous_localization_and_mapping.

- [22] M. Fjeld og B.M. Voegtli. «Augmented Chemistry: an interactive educational workbench». I: *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Okt. 2002, s. 259–321. DOI: 10/bjt63d.
- [23] Bosede Iyiade Edwards mfl. «Haptic virtual reality and immersive learning for enhanced organic chemistry instruction». I: *Virtual Reality* 23.4 (1. des. 2019), s. 363–373. ISSN: 1434-9957. DOI: 10/ggkmt8.
- [24] XXII. *Conduct Chemistry Experiments In A Virtual Lab*. 2017. URL: https://www.youtube.com/watch?v=055o0wimf_w.
- [25] Hsin-Kai Wu mfl. «Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education». I: *Computers & Education* 62 (2013), s. 41–49. ISSN: 0360-1315. DOI: 10/zn6.
- [26] Alexandra D. Kaplan mfl. «The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality as Training Enhancement Methods: A Meta-Analysis». I: *Human Factors* (2020), s. 0018720820904229. ISSN: 0018-7208. DOI: 10/ggp835.
- [27] Grethe Wibetoe. *titrimetri*. I: *Store norske leksikon*. 2020.
- [28] Colourbox/Spellbound. *Laboratory experiment of acid base titration with glass burette and Erlenmeyer flask and text*. 2020.
- [29] John Zimmerman, Jodi Forlizzi og Shelley Evenson. «Research through design as a method for interaction design research in HCI». I: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. 2007, s. 493–502.
- [30] ClassVR. *ClassVR – Virtual Reality for the Classroom*. 2020. URL: <https://www.classvr.com/>.
- [31] ClassVR. *World's first virtual reality set designed for schools launches at Bett 2017 – ClassVR*. URL: <https://www.classvr.com/worlds-first-virtual-reality-set-designed-for-schools-launches-at-bett-2017/>.
- [32] Google. *Google Cardboard – Google VR*. 2020. URL: https://arvr.google.com/intl/no_no/cardboard/.
- [33] Kickstarter. *MagiMask - Immersive, High Definition Augmented Reality*. Kickstarter. 2018. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/ludenso/magimask-immersive-high-definition-augmented-reali>.
- [34] Ludenso. *MagiMask*. MagiMask. 2020. URL: <https://www.magimask.com>.
- [35] Oculus. *Oculus Go: Frittstående VR-briller | Oculus*. 2020. URL: <https://www.oculus.com/go/>.

- [36] Samsung. *Gear VR with Controller (SM-R325) | SM-R325NZVCNEE | Samsung NO*. 2020. URL: <https://www.samsung.com/no/wearables/gear-vr-r325/SM-R325NZVCNEE/>.
- [37] Tablet Academy. *ClassVR Educational Virtual Reality Classroom Set*. 2020. URL: <https://www.tablet-academy.com/shop/virtual-reality/567-classvr.html>.
- [38] Eirik Helland Urke. *Gjengen bak MovieMask vil bli størst på mobilbasert AR*. Tu.no. 2018. URL: <https://www.tu.no/artikler/gjengen-bak-moviemask-vil-bli-storst-pa-mobilbasert-ar/445605>.
- [39] Wikipedia. *Comparison of virtual reality headsets*. 2020. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Comparison_of_virtual_reality_headsets.
- [40] Wikipedia. *Google Cardboard*. 2019. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Google_Cardboard.
- [41] Wikipedia. *Oculus Go*. 2020. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Oculus_Go.
- [42] Wikipedia. *Samsung Gear VR*. 2019. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Samsung_Gear_VR.
- [43] Nolo Inc. *NOLO—Motion Tracking for VR/AR*. 2020. URL: <https://www.nolovr.com/productDetails>.
- [44] Banggood.com. *NOLO CV1 VR Console Game Controller Bevegelsessporing for mobiltelefon PC mediespillere from elektronikk on banggood.com*. www.banggood.com. 2020. URL: <https://www.banggood.com/no/NOLO-CV1-VR-Console-Game-Controller-Motion-Tracking-for-Mobile-Phone-PC-p-1391897.html>.
- [45] Dean Takahashi. *Magic Leap formally launches Magic Leap 1 and reveals enterprise partners*. VentureBeat. 2019. URL: <https://venturebeat.com/2019/12/10/magic-leap-formally-launches-magic-leap-1-and-reveals-enterprise-partners/>.
- [46] HTC. *VIVE Pro Full Kit | The professional-grade VR headset*. 2020. URL: <https://www.vive.com/eu/product/vive-pro-full-kit/>.
- [47] Lauren Goode. *Microsoft's HoloLens 2 Puts a Full-Fledged Computer on Your Face | WIRED*. Wired. 24. feb. 2019. URL: <https://www.wired.com/story/microsoft-hololens-2-headset/>.
- [48] Magic Leap. *Choose Your Bundle | Magic Leap*. 2020. URL: <https://shop.magicleap.com/#/>.

-
- [49] Magic Leap og Rony Abovitz. *Magic Leap 2019 – The Year In Review*. 30. des. 2019. URL: <https://www.magicleap.com/news/op-ed/magic-leap-2019-the-year-in-review>.
- [50] Magic Leap. *Magic Leap 1*. 2020. URL: <https://www.magicleap.com/magic-leap-1>.
- [51] Magic Leap. *Viewing Frustum & Clipping Plane | Magic Leap*. 11. nov. 2019. URL: <https://developer.magicleap.com/en-us/learn/guides/field-of-view>.
- [52] Microsoft. *HoloLens 2—Pricing and Options | Microsoft HoloLens*. 2020. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/buy>.
- [53] Microsoft. *Microsoft HoloLens | Mixed Reality Technology for Business*. 2020. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>.
- [54] Oculus. *Oculus Quest: Alt-i-ett VR-briller | Oculus*. 2020. URL: <https://www.oculus.com/quest/>.
- [55] Peter H. Diamandis. *5 Breakthroughs Coming Soon in Augmented and Virtual Reality*. Singularity Hub. 10. mai 2019. URL: <https://singularityhub.com/2019/05/10/5-breakthroughs-coming-soon-in-augmented-and-virtual-reality/>.
- [56] Prisjakt. *HTC Vive Pro Kit 2.0 (VR-briller)*. 2020. URL: <https://www.prisjakt.no/product.php?p=4780960>.
- [57] Prisjakt. *Oculus Rift S (VR-briller)*. 2020. URL: <https://www.prisjakt.no/product.php?p=5125464>.
- [58] Varjo Technologies. *XR-1*. Varjo.com. 2020. URL: <https://varjo.com/products/xr-1/>.
- [59] Varjo Technologies. *Varjo's XR-1 Developer Edition Now Available and Shipping*. 2. des. 2019. URL: <https://varjo.com/press-release/varjos-xr-1-developer-edition-now-available-and-shipping/>.
- [60] Varjo Technologies. *XR-1 Developer Edition*. 2020. URL: <https://store.varjo.com/varjo-xr-1>.
- [61] Wikipedia. *HoloLens 2*. 2020. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=HoloLens_2.
- [62] Wikipedia. *HTC Vive*. 2020. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=HTC_Vive.
- [63] Wikipedia. *Oculus Rift S*. 2020. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Oculus_Rift_S.
- [64] HTC. *Vive PRE User Guide.pdf*. 2016.

- [65] Jim Melzer. *How Much is Enough? The Human Factors of Field of View in Head-Mounted Displays (Presentation)*. 12. apr. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/317605847_Melzer_SPIE_slides_April_2017.
- [66] Jim Melzer. «How much is enough? the human factors of field of view in head-mounted displays». I: *Degraded Environments: Sensing, Processing, and Display 2017*. Degraded Environments: Sensing, Processing, and Display 2017. Bd. 10197. International Society for Optics og Photonics, 5. mai 2017, 101970P. DOI: 10/ggqph6.
- [67] Karl Gutttag. *Hololens 2 First Impressions: Good Ergonomics, But The LBS Resolution Math Fails!* Karl Gutttag on Technology. 28. feb. 2019. URL: <https://www.kgutttag.com/2019/02/27/hololens-2-first-impressions-good-ergonomics-but-the-lbs-resolution-math-fails/>.
- [68] Karl Gutttag. *Hololens 2 Video with Microvision "Easter Egg" Plus Some Hololens and Magic Leap Rumors*. Karl Gutttag on Technology. 10. okt. 2019. URL: <https://www.kgutttag.com/2019/10/10/hololens-2-video-with-microvision-easter-egg-plus-some-hololens-and-magic-leap-rumors/>.
- [69] *ZED Mini*. Stereolabs Inc. 2020. URL: <https://store.stereolabs.com/products/zed-mini>.
- [70] Varjo Technologies. *How Varjo Delivers Human-Eye Resolution with Bionic Display™*. 21. aug. 2019. URL: <https://varjo.com/blog/introducing-bionic-display-how-varjo-delivers-human-eye-resolution/>.
- [71] Varjo Technologies. *Industrial-Strength Eye Tracking in Varjo VR-1*. 19. apr. 2019. URL: <https://varjo.com/blog/industrial-strength-eye-tracking-in-varjo/>.
- [72] Brian Guenter mfl. *Foveated 3D graphics*. 1. nov. 2012.
- [73] PatneyAnjul mfl. «Towards foveated rendering for gaze-tracked virtual reality». I: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* (11. nov. 2016).
- [74] *This Is How Valve's Amazing Lighthouse Tracking Technology Works*. Gizmodo. 2015. URL: <https://gizmodo.com/this-is-how-valve-s-amazing-lighthouse-tracking-technol-1705356768>.
- [75] Adafruit Industries. *Leap Motion Controller with SDK*. 2020. URL: <https://www.adafruit.com/product/2106>.
- [76] *HTC VIVE Tracker*. Prisjakt. 2020. URL: <https://www.prisjakt.no/product.php?p=5279800>.
- [77] *HaptX | Haptic gloves for VR training, simulation, and design*. 2020. URL: <https://haptx.com/>.

- [78] *TESLASUIT | Full body haptic VR suit for motion capture and training*. TESLASUIT. 2020. URL: <https://teslasuit.io/>.
- [79] *Vive Pro AR (SRWorks) vs. ZED Mini Augmented Reality*. Stereolabs. 30. apr. 2018. URL: <https://www.stereolabs.com/blog/vive-pro-ar-zed-mini/>.
- [80] Stereolabs. *ZED Mini - Mixed-Reality Camera | Stereolabs*. 2019. URL: <https://www.stereolabs.com/zed-mini/>.
- [81] *Varjo XR-1 Augmented Reality Headset Hands-On!* 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=hNbTCpURpQs>.
- [82] Jan Harald Alnes. *hermeneutikk*. I: *Store norske leksikon*. 20. feb. 2018.
- [83] Guri Verne og Tone Bratteteig. «Inquiry when doing research and design: wearing two hats». I: *IxD&A* 38 (2018), s. 89–106.
- [84] Christopher Frayling. *Research in Art and Design (Royal College of Art Research Papers, Vol 1, No 1, 1993/4)*. 1993. URL: <https://researchonline.rca.ac.uk/384/>.
- [85] John Zimmerman og Jodi Forlizzi. «Research Through Design in HCI». I: *Ways of Knowing in HCI*. Red. av Judith S. Olson og Wendy A. Kellogg. New York, NY: Springer, 2014, s. 167–189. ISBN: 978-1-4939-0378-8. DOI: 10.1007/978-1-4939-0378-8_8.
- [86] Lars Nyre. «Akademiske prototyper: Ei retning for medieutviklinga på Vestlandet». I: *Festskrift for Sverre Liestøl*. Oslo: Forlag 1, 2015, s. 165–181.
- [87] William Gaver. «What should we expect from research through design?» I: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '12. Austin, Texas, USA: Association for Computing Machinery, 5. mai 2012, s. 937–946. ISBN: 978-1-4503-1015-4. DOI: 10/gfkwdt.
- [88] University of the Witwatersrand. *What is a Titration and how is it performed?* 2018. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YqfvRBJ-iPg>.
- [89] Ali Hayek. *Lab Demonstration | Acid - Base Titration*. 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=HVjvFydM0c8>.
- [90] *Stereolabs Docs: API Reference, Tutorials, and Integration | Stereolabs*. 2019. URL: <https://www.stereolabs.com/docs/>.
- [91] *ArUco: a minimal library for Augmented Reality applications based on OpenCV | Aplicaciones de la Visión Artificial*. 2019. URL: <https://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26>.
- [92] *VIVE Pro Eye Overview | VIVE™*. URL: <https://www.vive.com/eu/product/vive-pro-eye/>.

- [93] *VIVE Cosmos XR | VIVE™*. 2020. URL: <https://www.vive.com/us/product/vive-cosmos-xr/>.
- [94] *Project North Star*. Leap Motion Developer. 2020. URL: <http://developer.leapmotion.com/northstar>.
- [95] *BluetoothForQuest*. GitHub. URL: <https://github.com/EloiStree/CodeAndQuestsEveryday/wiki/BluetoothForQuest>.
- [96] Teresa-Motiv. *Connect to Bluetooth and USB-C devices*. 2020. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/hololens-connect-devices>.
- [97] Enrico Costanza, Andreas Kunz og Morten Fjeld. «Mixed Reality: A Survey». I: *Human Machine Interaction: Research Results of the MMI Program*. Red. av Denis Lalanne og Jürg Kohlas. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, s. 47–68. ISBN: 978-3-642-00437-7. DOI: 10.1007/978-3-642-00437-7_3.
- [98] Dan Saffer. *Designing for interaction: creating innovative applications and devices*. New Riders, 2010. ISBN: 0-321-64339-9.
- [99] *Den relasjonelle teknikkens vesen – ArtScene Trondheim*. URL: <https://artscene.no/2017/03/22/den-relasjonelle-teknikkens-vesen/>.
- [100] Martin Heidegger. *Oikos og Techne: Spørsmålet om teknikken og andre essays*. Aschehoug, 1996. ISBN: 82-03-26122-1.
- [101] *Teknikkens hemmelighet*. morgenbladet.no. 15. mar. 1996. URL: <https://morgenbladet.no/1996/03/teknikkens-hemmelighet>.
- [102] *WebXR Device API*. 2019. URL: <https://www.w3.org/TR/webxr/>.