

**SIMULAATIOIDEN KÄYTÖSTÄ LUKION  
FYSIKAALISESSA JA GEOMETRISESSA  
OPTIIKASSA**

Saana Uljas

Pro gradu -tutkielma

Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos

10.5.2017

Ohjaajat: Juha Merikoski ja Jan Sarén



# TIIVISTELMÄ

Tässä Pro gradu -tutkielmassa tutkittiin simulaatioiden käyttämistä fysikaalisen ja geometrisen optiikan opetuksessa ja oppimisessa. Tutkimuksessa haluttiin selvittää, voidaanko simulaatioiden avulla tukea fysikaalisen ja geometrisen optiikan oppimista. Tutkittavaksi valittiin kolme optiikan simulaatiota, joista yksi käsitteli fysikaalista optiikkaa ja kaksi geometrista optiikkaa.

Tutkimuksessa selvisi, että simulaatioiden avulla voidaan ehkäistä joidenkin tavallisten virheksityksien muodostumista. Lisäksi havaittiin, että simulaatiot ovat joissain tapauksissa kokeellista työskentelyä nopeampi ja tehokkaampi opetusmenetelmä. Simulaatioissa eri muuttujien vaikutusta ilmiöihin voidaan tutkia helposti, ja muutoksien vaikutukset ovat välittömästi nähtävissä. Simulaatiot tarjoavat myös visuaalisen mallin niille ilmiössä tapahtuville asioille, joita ei kokeellisessa työskentelyssä voida nähdä.

Tutkimuksessa ilmeni myös opettajan vastuu työtavan valinnassa ja simulaation käytön opetuksessa. Simulaatioilla voidaan edesauttaa virheellisten käsitysten syntymistä, jos niiden käyttö ei ole tarkoituksenmukaista tai niiden rajoitteista ja niiden tarjoamasta mallista ei keskustella riittävästi.

## **ESIPUHE**

Pro Gradu -tutkielmani on jatkoa kandidaatintutkielmalleni ”Opetuksen haasteita lukion fysikaalisessa ja geometrisessa optiikassa”, joka on tehty Jyväskylän yliopiston Fysiikan laitokselle 19.9.2014. Kandidaatintutkielmassani kokosin yhteen eri tutkimuksissa havaittuja fysikaalisen ja geometrisen optiikan virhekäsityksiä ja opetuksen haasteita sekä pyrin vastaamaan siihen, miten näihin haasteisiin voitaisiin opetuksessa vastata. Tässä tutkimuksessa halusin tutkia simulaatioiden käyttämistä fysikaalisen ja kemian opetuksessa. Tutkimuksessa selvitettiin, voitaisiinko simulaatioiden avulla vastata kandidaatintutkielmassa havaittuihin opetuksen haasteisiin sekä ehkäistä tavallisimpien virhekäsityksien muodostumista.

Kiitokset Lassille kaikesta tuesta, Miolle, Edvinille ja Edlalle muusta ajateltavasta, mummo-  
laiden välle kannustuksesta ja lastenhoitoavusta sekä ohjaajilleni kehittävästä palautteesta.

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

ESIPUHE

|  |    |
|--|----|
| SISÄLLYSLUETTELO.....  | 5  |
| 1 JOHDANTO.....  | 1  |
| 2 OPPIMINEN .....  | 2  |
| 2.1 Mitä oppiminen on? .....   | 2  |
| 2.2 Konstruktivistinen oppimiskäsitys .....                                | 2  |
| 2.3 Simulaatiot oppimisen tukena .....                                     | 4  |
| 3 OPETUSSUUNNITELMA .....  | 7  |
| 3.1 Fysiikka lukion opetussuunnitelmassa .....                             | 7  |
| 3.2 Fysikaalinen ja geometrinen optiikka lukion opetussuunnitelmassa ..... | 8  |
| 4 FYSIKAALINEN JA GEOMETRINEN OPTIIKKA .....                               | 10 |
| 4.1 Diffraktio ja interferenssi .....                                      | 10 |
| 4.1.1 Diffraktio .....   | 10 |
| 4.1.2 Interferenssi .....  | 10 |
| 4.1.3 Interferenssi kaksoisraossa .....                                    | 11 |
| 4.1.4 Interferenssi hilassa .....  | 12 |
| 4.2 Linssit .....  | 12 |
| 4.2.1 Kupera linssi.....   | 13 |
| 4.2.2 Kovera linssi.....   | 14 |
| 4.2.3 Linssien kuvausyhtälö, viivasuurennos ja taittovoimakkuus .....      | 15 |
| 4.3 Peilit .....   | 16 |
| 4.3.1 Tasopeili .....  | 17 |
| 4.3.2 Pallopeilit .....  | 18 |
| 4.3.3 Peilien kuvausyhtälö ja viivasuurennos .....                         | 18 |

|  |    |
|--|----|
| 4.4 Opetuksen haasteita.....   | 19 |
| 4.5 Opetusmenetelmistä fysikaalisessa ja geometrisessa optiikassa..... | 21 |
| 5 TUTKIMUSKYSYMYKSET.....  | 24 |
| 6 TUTKIMUSAINEISTO JA TUTKIMUKSEN TULOKSET.....                        | 25 |
| 6.1 Tutkimuksen aineisto .....   | 25 |
| 6.1.1 PhET-simulaatiot.....  | 25 |
| 6.1.2 Aaltojen interferenssi -simulaatio .....                         | 26 |
| 6.1.3 Geometrinen optiikka -simulaatio.....                            | 27 |
| 6.1.4 Taittuva valo -simulaatio.....                                   | 29 |
| 6.2 Tutkimuksen tulokset .....   | 30 |
| 6.2.1 Fysikaalinen optiikka .....                                      | 30 |
| 6.2.2 Geometrinen optiikka.....  | 33 |
| 7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....   | 36 |
| 7.1 Yhteenveto tutkimustuloksista .....                                | 36 |
| 7.2 Jatkotutkimuksen aiheita.....                                      | 38 |
| LÄHTEET.....   | 39 |

# 1 JOHDANTO

Lukion opetussuunnitelman mukaan fysiikan oppimäärään kuuluu aalto-oppia, jossa käsitellään aaltoliikkeen heijastumista, taittumista, diffraktiota ja interferenssiä. Vuoden 2003 opetussuunnitelman mukaan kurssilla käsiteltiin myös muun muassa linssejä ja peilejä. Tässä tutkielmassa käsitellään aalto-oppia niin kuin se on käsitelty vuoden 2003 opetussuunnitelmassa, koska uuden opetussuunnitelman mukaista opetusmateriaalia ei kyseiselle kurssille vielä ole saatavilla. [1, 2]

Aikaisemmissa tutkimuksissa on käynyt ilmi, että monilla yliopistotasollakin optiikan opintoja suorittaneilla on vaikeuksia soveltaa geometrisen ja fysikaalisen optiikan periaatteita annettuun tehtävään. [3, 4, 5] Tässä tutkielmassa haluttiin löytää keinoja näiden vaikeuksien minimoimiseksi. Tutkimuksen mukaan simulaatioiden avulla tapahtuvan tutkimuksellisen oppimisen on huomattu parantavan sen asian oppimista, jota simulaatio käsittelee [6–11]. Tämän takia tutkielman aiheeksi valikoitui simulaatioiden mahdollisuuksien tutkiminen fysikaalisen ja geometrisen optiikan oppimistuloksien parantamisessa.

Tutkielman teoriaosuudessa tutustutaan ensin oppimisen käsitteeseen sekä konstruktivistiseen oppimiskäsitykseen, jonka valossa oppiminen on tilannesidonnaista ja opittavan asian kytkeminen erilaisiin konteksteihin auttaa oppilaita soveltamaan tietoa erilaisissa asiayhteyksissä. [12, 13, 14, 15] Tämän jälkeen perehdytään ensin simulaatioihin, jotka tarjoavat oppimiseen uusia konteksteja, ja sitten tarkastellaan fysikaalisen ja geometrisen optiikan teoriaa sellaisena kuin se on fysiikan kirjasarjojen *Physica* ja *Fysiikka* oppikirjoissa [16, 17] käsitelty. Teoriaosuuden lopuksi käsitellään yleisimpiä fysikaalisen ja geometrisen optiikan opiskelussa kohdattuja virheellisiä käsityksiä ja oppimisen haasteita sekä opetusmenetelmiä, joilla näihin asioihin voisi tarttua.

Tutkielman tutkimusosassa halutaan selvittää, miten simulaatioiden avulla voitaisiin tukea fysikaalisen ja geometrisen optiikan oppimista. Lisäksi tutkitaan, vastaavatko simulaatiot oppimisen haasteisiin ja voivatko ne joissain tapauksissa toimia kokeellista työskentelyä tehokkaampana opetusmenetelmänä.

## **2 OPPIMINEN**

### **2.1 Mitä oppiminen on?**

Oppiminen on koko ihmisen eliniän ajan kestävää tietojen ja taitojen muuttumista. Se on informaation vastaanottamista, muokkaamista, tulkintaa ja käsittelyä sekä taltiointia. [13, 14] Päivi Tynjälä on koonnut teokseensa ”Oppiminen tiedon rakentamisena” oppimisen kokonaisu mallin, jonka mukaan oppimisen voidaan ajatella koostuvan kolmesta osasta: taustatekijöistä, itse oppimisprosessista sekä tuloksista. [13]

Oppijan ympäristöstään ja opittavasta asiasta tekemät havainnot ja niiden tulkinta ovat vahvasti riippuvaisia oppimisen taustatekijöistä [13, 14]. Taustatekijät voidaan jaotella kuuluvaksi joko oppilaan oppimisympäristöön kuuluviin tekijöihin, joihin lukeutuvat muun muassa opetusmenetelmät, opetussuunnitelma ja opettaja, tai oppilaan henkilökohtaisiin tekijöihin, joita puolestaan ovat esimerkiksi aikaisemmat tiedot ja taidot, persoonallisuus ja kotitausta. Nämä taustatekijät yhdessä vaikuttavat oppilaan havaintoihin ja tulkintoihin opittavasta asiasta. [13]

Itse oppimisprosessi perustuu oppilaan aikaisemmille tiedoille, joiden päälle ja rinnalle uusi tieto rakennetaan ja johon se linkitetään ja sopeutetaan. Oppimisprosessissa oppijan motivaatiolla, oppimisen säätelyllä sekä oppijan oppimistavoilla ja toimintamalleilla on suuri merkitys, ja ne määrittävätkin oppimisen lopputulosta. [13, 14]

Oppimistapahtuman lopuksi oppija koostaa näkemyksensä siitä, mitä hän on prosessin tuloksena oppinut, ja tämä oppimistulos vaikuttaa osaltaan niihin havaintoihin ja tulkintoihin, joita oppija tekee uusista asioista. Tuloksiin lukeutuvat opittujen tietojen ja taitojen lisäksi erilaiset opiskelun aikaansaannokset, kuten kirjalliset työt. Tulokset voidaan arvioida ulkopuolisen arvostelijan toimesta sekä tietysti itse oppijan toimesta. [13]

### **2.2 Konstruktivistinen oppimiskäsitys**

Konstruktivistinen oppimiskäsitys on luonnontieteiden opetuksessa vahvasti esillä oleva näkemys. Sen mukaan oppiminen on prosessi, jossa oppilas aktiivisesti rakentaa omat tietorakenteensa. Oppilas ei siis toimi vain passiivisena tiedon vastaanottajana, vaan hän aktiivisesti



konstruoi eli rakentaa tiedon uudelleen. Aiemmat tiedot ja kokemukset vaikuttavat vahvasti oppilaan tekemiin havaintoihin sekä niiden tulkitsemiseen, minkä seurauksena oppimistuloksessa voidaan nähdä oppilaan alkuperäiseen tietoon tekemiä muunnoksia. Oppimisen tulos ei siis ole kopio alkuperäisestä asiasta, joka olisi siirtynyt oppilaan muistiin sellaisenaan, vaan siinä on aina nähtävissä oppijan konstruointiprosessin vaikutukset. [12, 13, 14]

Konstruktivistisen oppimiskäsityksen valossa opettajan on ensin tultava tietoiseksi siitä, miten erilaiset oppilaat hahmottavat ympäristöään. Opetuksen tulee perustua vahvasti oppilaan aiempiin tietoihin, käsityksiin ja uskomuksiin, koska ne luovat perustan sille, miten oppija konstruoi vastaanottamaansa uutta informaatiota. [12, 13, 14] Opettajalla on siis oltava käsitys oppilaidensa jo olemassa olevista tiedollisista rakenteista ja valmiuksista voidakseen mukauttaa opetusta ja oppimisympäristöä niihin sopiviksi. [12, 13] Lisäksi opettajan on varmistettava, että oppilaille on käytössään ne kielelliset keinot, joita kyseisen asian oppiminen edellyttää. Kielellisten keinojen vajuus vaikeuttaa asioiden merkityksellistämistä ja vaikeuttaa tai jopa estää asioiden syvällistä ymmärtämistä. [12, 14] Opiskeltavaan asiaan liittyvien käsitteiden ja kielen puutteellinen ymmärtäminen myös edesauttaa virhekäsitysten syntymistä ja ylläpitää virheellisiä arkikäsityksiä [12].

Konstruktivistisen oppimiskäsityksen mukaan oppiminen tapahtuu aina oppilaan oman toiminnan tuloksena [14, 15]. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että kaikki vastuu oppimisesta olisi oppilaille, vaan opettajan tehtäviin kuuluu kiistattomasti myös tiedon jakaminen. Lisäksi opettajan tärkeänä tehtävänä on toimia tiedon konstruointiprosessin ohjaajana. [13, 15] Opettajan tulee näin ollen myös ohjata oppilaita valitsemaan tarkoituksenmukaisia oppimisstrategioita sekä auttaa oppilaita tulemaan tietoisiksi omasta oppimisestaan ja säätelemään omaa käyttäytymistään sen mukaisesti. Opettajan on opetuksessaan ja ohjauksessaan muistettava huomioida myös oppilaiden erilaiset oppimisen edellytykset ja keinot, joita kukin oppilas käyttää uuden tiedon oppimiseen. [13, 14, 15]

Ymmärtämisen tärkeyttä oppimisprosessissa ei voi liikaa korostaa. Tiedon konstruointi ja merkitysten rakentaminen edellyttävät kokonaisvaltaista ymmärtämistä, eivätkä ne onnistu, jos oppilas opettelee asioita ja kokonaisuuksia ulkoa [13, 14]. Ymmärtämisen ja oman osaamisen tiedostaminen auttavat oppijaa myös etsimään tietoa ja kysymyksiä, jotka edesauttavat oppimisprosessia [14]. Lisäksi ne auttavat oppilasta tarkastelemaan omaa oppimisstrategiaansa kriittisesti ja kehittämään sitä [13, 14].

Konstruktivistisen oppimiskäsityksen esiin tuoma yksilöllinen oppiminen korostaa oppijan omaa toimintaa. Tämä ei kuitenkaan sulje pois yhteisöllisen oppimisen merkitystä, vaan oppimiskäsitys korostaa myös sosiaalisen vuorovaikutuksen ja yhteisöllisyyden merkitystä oppimisprosessissa. Sosiaalinen vuorovaikutus, yhteisöllisyys ja yhteistyö edesauttavat yksilön tiedon konstruointiprosessia auttamalla yksilöitä refleктоimaan omaa oppimista itsekseen sekä toisten oppilaiden kanssa. Oppilas pystyy arvioimaan omien käsityksiensä oikeellisuutta kriittisemmin joutuessaan perustelemaan omia käsityksiään ja kuunnellessaan toisten oppilaiden perusteluita. Tämä helpottaa myös käsitysten muokkaamista tarvittaessa. Jokainen oppilas on muodostanut oman tietorakenteensa aikaisempien tietojensa ja kokemuksiensa pohjalta, joten tuomalla omia opittuja tietojaan yhteiseen keskusteluun oppilaat myös auttavat toisiaan laajentamaan tietorakenteitaan. [12, 13, 14]

Oppiminen on aina tilannesidonnaista, minkä takia opittava asia tulee kytkeä mahdollisimman monenlaisiin konteksteihin. Tämä on mahdollista toteuttaa käyttämällä erilaisia opetusmenetelmiä ja opetustilanteita sekä käsittelemällä asiaa erilaisista näkökulmista. Asian kytkeminen erilaisiin konteksteihin auttaa oppilaita soveltamaan tietoa erilaisissa asiayhteyksissä, jolloin tiedon käyttäminen ei rajoitu vain siihen kontekstiin, jossa se on opittu tai jossa sitä on aikaisemminkin käytetty. [13, 14, 15]

### **2.3 Simulaatiot oppimisen tukena**

Simulaatiot ovat sovelluksenomaisia oppimisympäristöjä, jotka tarjoavat visuaalisen mallin simuloitavalle ilmiölle. Simulaatioiden erityispiirteenä on niiden vuorovaikutuksellisuus, joka mahdollistaa oppilaille tutkimuksellisen otteen oppimiseen: Oppilaat voivat oppia tekemisen ja oppimisen kautta, ja heillä on mahdollisuus nähdä erilaisten muuttujien vaikutus simuloituun ilmiöön välittömästi. Simulaatioita voidaan käyttää onnistuneesti erilaisissa oppimistilanteissa; apuvälineenä luentomaisessa opetuksessa, osana kotitehtäviä tai laboratoriotöitä sekä erilaisissa yksilö- tai ryhmätyötilanteissa. [18, 19] Simulaatioiden onnistuneen käytön edellytyksenä on huolellisesti suunniteltu ja tutkittu simulaatio sekä simulaation suunnitelmalinen ja perusteltu käyttö [6]. Tutkimuksen mukaan myös oppilaat itse ovat kokeneet simulaatioiden edistäneen heidän oppimistaan [8]. Simulaatioiden on havaittu vaikuttavan positiivisesti oppilaiden asenteisiin sekä opiskeltavaa aihetta että ainetta kohtaan, ja sitä kautta parantavan oppimista. [20, 21].

Simulaatioiden positiiviset vaikutukset oppimistuloksiin on pystytty osoittamaan hyvin yksiselitteisesti, kun on verrattu niitä hyödyntävää opetusta perinteisiin opetusmenetelmiin [22]. Niiden avulla tapahtuvan tutkimuksellisen oppimisen on huomattu parantavan sen asian ymmärtämistä, jota simulaatio käsittelee, ja jota opiskelijat sen kautta pystyvät havainnoimaan [8]. Lisäksi niiden vuorovaikutuksellisuus auttaa osallistamaan oppilaita opetukseen. Muihin opetusmateriaaleihin verrattuna simulaatiot kannustavat oppilaita tutkimaan opittavaa asiaa syvällisemmin. Ne on suunniteltu herättämään oppilaissa simuloitavaan ilmiöön liittyviä kysymyksiä sekä etsimään vastauksia esiin tulleisiin kysymyksiin. Oppilaat myös pyrkivät simulaatioiden avulla selittämään sekä itse simuloitavaa ilmiötä että oman toimintansa aiheuttamia muutoksia simulaatioon ja sitä kautta ilmiöön. [6, 7]

Simulaatioilla voidaan mallintaa tarkasti erilaisia asioita ja ilmiöitä, ja ne ovatkin erittäin hyödyllisiä muuten vaikeasti havainnoitavien ilmiöiden esittämiseen [19]. Muihin opetusmateriaaleihin verrattuna simulaatioiden on havaittu vastaavan parhaiten erilaisia tietorakenteita omaavien oppilaiden tarpeisiin. Ne tarjoavat monia erilaisia konteksteja oppimiselle, minkä on havaittu sekä edesauttavan oppimista että tiedon myöhempää soveltamista erilaisissa asiayhteyksissä. Lisäksi simulaatioiden tarjoama oppimisympäristö ja kieli auttavat oppilaita keskustelemaan simulaation esittämästä ilmiöstä. Simulaatioita voidaan hyödyntää arvioitaessa oppilaiden tasoa jossakin tietyssä aiheessa: simulaation avulla on helppo määrittää, mitkä asiat oppilaat kokevat vielä vaikeiksi. [6, 13, 14]

Reamondin ja Sheppardin mukaan simulaatiot eivät sellaisenaan paranna oppilaiden oppimistuloksia, vaan ne tarvitsevat tuekseen ilmiön analysointia [10]. Onkin huomattu, että simulaatiot, jotka sisältävät pienimuotoisia tehtäviä tai vaiheittain ratkaistuja esimerkkejä, edesauttavat oppimista sekä lisäämällä mielenkiintoa opiskeltavaa asiaa kohtaan että auttamalla oppilaita konstruoimaan simulaation esittämiä asioita. Tehtävien avulla heidän on helpompi poimia simulaatiosta olennainen tieto, muodostaa hypoteeseja simuloitavasta ilmiöstä sekä tehdä tarkoituksenmukaisia johtopäätöksiä ja tulkintoja. [11, 23] Lisäksi tutkimuksissa on tullut ilmi, että hypoteesin muodostamisella on merkittävä vaikutus oppilaan oppimiselle, ja siksi onkin tärkeää auttaa oppilaita muodostamaan jonkinlainen hypoteesi – on se sitten oikea tai väärä [9].

Simulaatioiden yhdistämisen opetukseen on oltava harkittua. Asian esittely ja asiaan johdattelu ennen simulaation aloittamista on havaittu hyödylliseksi, kun simulaatio esittää monimut-

kaista prosessia tai sisältää paljon erilaisia parametreja. Tutkimuksissa on huomattu, että merkittävä osa oppilaista jättää simulaatiossa olevat ohjeet lukematta, joten opettajan antama alustava ohjeistus auttaa vähentämään simulaation aiheuttamaa hämmennystä. [6, 8, 19, 24] On kuitenkin tärkeää pidättäytyä antamasta oppilaille vaihteittaisia ohjeita simulaation tutkimiseen. Liian tarkkojen ohjeiden on havaittu rajoittavan oppilaiden tutkimuksellista oppimista ja sen kautta heikentävän oppimistuloksia. Oppilaille on annettava aito mahdollisuus simulaation tarjoaman tiedon vastaanottamiseen ja käsittelyyn, sekä sen ymmärtämiseen ja oivaltamiseen, jotta he pystyvät muodostamaan omat ajatusmallinsa simulaation sisältämän informaation pohjalta. [9, 19]

Simulaatiot on pyrittävä pitämään mahdollisimman selkeinä, eivätkä ne saa sisältää liikaa tietoa. Simulaation kehittyminen yksinkertaisesta mallista vaihteittain monimutkaisemmaksi ja informatiivisemmaksi edellyttää oppilailta aktiivista päättelyä välttämällä kuitenkin liian monien uusien asioiden esittelemisen aikaansaavan turhautumisen. Lisäksi aktiivisen päättelyn edellyttäminen kehittää oppilaiden oivalluskykyä ja parantaa siten oppimistuloksia. [11, 24] Selkeyden lisäksi simulaatioiden suunnittelussa on huomioitava tarkasti simulaation kohderyhmä ja kohderyhmän oppilaiden abstraktin päättelyn taidot. Kehittymättömät abstraktin päättelyn taidot omaavat oppilaat tarvitsevat oppimisensa tueksi tarkemmat visuaalisesti havaittavat komponentit. Hyvin paljon yksinkertaistetut simulaatiot ylittävät tällaisten oppilaiden abstraktin käsittelykyvyn, mikä johtaa huonompiin oppimistuloksiin. [9]

Simulaatioiden on oltava helppokäyttöisiä, jotta niitä voitaisiin hyödyntää opetuksessa mahdollisimman tehokkaasti. Liian hankalasti käytettävä ja liian monia työkaluja sisältävä simulaatio pakottaa oppilaat opiskelemaan ensin simulaation käyttöä ja vasta sitten paneutumaan itse opiskeltavaan ja simuloitavaan asiaan. [24]

Simulaatioiden käytön eduksi opetuksessa on katsottava niiden helppo saatavuus. Monia simulaatioita on mahdollista käyttää opetuksessa ilmaiseksi, jos niille soveltuvat laitteet – tietokoneet tai tablettitietokoneet – ovat jo olemassa. Simulaatioiden valikot sisältävät usein paljon erilaisia muutettavia parametreja ja työvälineitä, joiden käyttö esimerkiksi älypuhelimella on vaikeaa. Tutkimusten perusteella simulaatioita voidaan käyttää ilmiöiden opiskelun lisäksi myös laboratoriotyöskentelyssä: Niitä voidaan käyttää laboratoriotyöskentelyä harjoitellessa ja osin korvaamaan laboratoriotöitä. Lisäksi simulaatioiden ja laboratoriotöiden yhdistämisellä on saavutettu merkittäviä hyötyjä oppimistuloksiin. [9, 21, 25, 26]

### **3 OPETUSSUUNNITELMA**

Uusin Lukiokoulutuksen opetussuunnitelman perusteet on Opetushallituksen laatima ja Opetushallituksen johtokunnan vuonna 2015 hyväksymä ja toistaiseksi voimassa oleva määräys [2], joka määrää lukio-opetuksen toteuttamisesta. Lukiokoulutuksen opetussuunnitelman perusteet määrittää lukiokoulutukselle yleiset tavoitteet ja aihekokonaisuudet. Siihen on kirjattu keskeiset sisällöt ja opetuksen tavoitteet oppiaineittain ja kursseittain. Lisäksi opetussuunnitelman perusteisiin on oppiaineittain kirjattu oppiaineessa arvioitavat asiat.

Vuonna 2015 hyväksytty opetussuunnitelma on otettu käyttöön lukion ensimmäisellä vuosiluokalla syksyllä 2016. Tässä tutkielmassa käsiteltävät aihekokonaisuudet sisältyvät lukion toisen vuosiluokan opintoihin eli niitä käsitteleviä oppikirjoja ei ole vielä saatavilla. Tämän takia tutkielmassa keskistytään tutkimaan näiden aiheiden käsittelyä vuoden 2003 opetussuunnitelman [1] mukaisesti.

#### **3.1 Fysiikka lukion opetussuunnitelmassa**

Fysiikan opetussuunnitelman mukaan opetuksessa tulee huomioida fysiikan kokeellinen luonne ja hyödyntää kokeellista työskentelyä fysiikan oppimisessa. Opetus perustetaan luonnontieteelliseen tapaan konstruktivistiseen oppimiskäsitykseen; uusi tieto rakennetaan jo aiemmin opitun tiedon pohjalta ja aiempia käsityksiä pyritään muokkaamaan uuden tiedon perusteella. Lisäksi opetuksessa tulee ottaa huomioon luonnontieteen työskentelytavat ja opettaa oppilaille tiedon hankkimisen menetelmiä, kokeellisten töiden suunnittelua, luonnontieteellistä keskustelua ja tiedon jakamista, aineiston ja tulosten käsittelyä sekä arviointia ja mallintamista.

Fysiikan opetuksen keskeiset tavoitteet on kirjattu opetussuunnitelmaan. Niiden mukaan tavoitteena on, että opiskelija ymmärtää fysiikan arvon luonnon ilmiöiden selittämisessä ja mallintamisessa sekä oppii fysiikan avulla muokkaamaan omaa käsitystään ympäröivästä luonnosta ja sen ilmiöistä. Opiskelijan tulee myös oppia ratkaisemaan luonnontieteen ongelmia fysiikan avulla. Opetuksen tavoitteena on myös, että oppilas oppii suunnittelemaan ja toteuttamaan yksinkertaisen fysikaalisen tutkimuksen, tulkitsemaan, arvioimaan ja raportoimaan tutkimuksen tuloksia sekä hankkimaan tarvittavaa lisätietoa tutkittavasta aiheesta. Lisäksi oppilaan tulisi oppimäärän suoritettuaan ymmärtää fysiikan vaikutus ympäröivään yhteiskuntaan

ja kulttuuriin sekä pystyä osaltaan vaikuttamaan terveellisen ja turvallisen ympäristön luomiseen. Fysiikan opetuksen tulisi myös tutustuttaa opiskelijoita fysiikan sovelluksiin ja niiden merkitykseen ympäröivässä yhteiskunnassa. Syventävillä kursseilla opettajan täytyy lisäksi valmistella opiskelijoita mahdollisiin tuleviin luonnontieteen opintoihin sekä opettaa opiskelijoille luonnon ilmiöiden mallintamista ja mallien tulkitsemista. [1]

Uudessa, vuonna 2015 hyväksytyssä opetussuunnitelmassa fysiikan opetuksen tavoitteisiin on kirjattu lisäksi kokeellisten tutkimuksien suunnittelun ja toteuttamisen taitojen kehittäminen sekä tutkimusprosessin ja tulosten käsittelytaidot. Tavoitteisiin on kirjattu myös taitojen kehittäminen mallien muodostamisessa, tutkimisessa, arvioinnissa ja käyttämisessä. Uudessa opetussuunnitelmassa on huomioitu tieto- ja viestintäteknologian käytön mahdollisuudet mallintamisessa, tutkimuksen tekemisessä sekä opiskelijan tuotosten laatimisessa ja esittämisessä. Jaksollinen liike ja aallot -kurssin sisällöissä mainitaan erikseen mallit ja simulaatiota sekä niiden suhde todellisuuteen, mikä osoittaa simulaatioiden tulleen keskeiseksi fysiikan tutkimisen ja oppimisen menetelmäksi. [2]

Fysiikan kurssien arvioinnissa huomioidaan se, kuinka hyvin oppilas on oppinut opetussuunnitelman mukaisen kurssisisällön ja kuinka hyvin hän on saavuttanut opetussuunnitelman kurssille asettamat tavoitteet. Lisäksi kurssiarvioinnissa huomioidaan fysiikan opiskelun yleiset tavoitteet sekä se, miten oppilas on nuo tavoitteet kyseisellä kurssilla saavuttanut. Näitä yleisiä tavoitteita ovat muun muassa kokeelliseen työskentelyyn tai tiedon käsittelyyn liittyvät tavoitteet. [1, 2] Uudessa opetussuunnitelmassa on painotettu erilaisia arvioinnin tapoja ja kohteita – opiskelija voi suunnitelman mukaan osoittaa osaamistaan esimerkiksi mallintamalla ja selittämällä. Uuteen opetussuunnitelmaan on kirjattu myös opiskelijoiden oikeus arviointiin ja palautteeseen jo oppimisprosessin aikana. Tämän ansiosta ei enää arvioida vain lopputulosta ja valmista tuotosta, vaan myös prosessin eri vaiheita, joita ovat opetussuunnitelman mukaan muun muassa kysymysten muodostaminen, ongelmaratkaisuprosessin jäsennetty kuvaaminen sekä tutkimisen taidot. [2]

### **3.2 Fysikaalinen ja geometrinen optiikka lukion opetussuunnitelmassa**

Fysikaalisen ja geometrisen optiikan sisältöjä ja tavoitteita tarkastellaan niin kuin ne on vuonna 2003 hyväksytyssä lukion opetussuunnitelmassa esitetty. Suunnitelman mukaisesti fy-

sikaalinen ja geometrinen optiikka käsitellään fysiikan Aallot-nimisessä kolmannessa kurssissa. Kurssin keskeisiin sisältöihin on kirjattu muun muassa aaltoliikkeen interferenssi ja diffraktio sekä peilit ja linssit. Lisäksi kurssiin kuuluu näitä asioita pohjustavia tai näiden asioiden oppimiseen keskeisesti liittyviä sisältöjä, esimerkiksi aaltoliikkeen synty ja aaltojen eteneminen tai heijastuminen ja taittuminen. [1]

Opetussuunnitelman mukaan fysiikan kolmannen kurssin tavoitteena on, että opiskelija ”saa yleiskuvan luonnon jaksollisista ilmiöistä ja perehtyy niitä selittäviin keskeisiin periaatteisiin” sekä ”perehtyy värähdys- ja aaltoliikkeen perusteisiin tutkimalla mekaanista värähtelyä, ääntä tai sähkömagneettisia aaltoja”. [1] Fysikaalisen optiikan puolella diffraktioon ja interferenssiin perehdytään yleensä vesiaaltojen avulla, geometrisen optiikan ilmiöitä sen sijaan tutkitaan usein näkyvän valon avulla.

## 4 FYSIKAALINEN JA GEOMETRINEN OPTIIKKA

Tässä luvussa esitellään diffraktion, interferenssin, linssien ja peilien teoriaa sellaisena kuin se koulukirjoissa käsitellään. Lähteinä on käytetty lukion Physica- ja Fysiikka-sarjan kolmannen kurssin oppikirjoja [16, 17]. Physica 3 -kirjan luvuista tutkittiin linseistä ja peileistä kertovia kappaleita 8 ja 9 sekä diffraktiota ja interferenssiä käsittelevää kappaletta 10. Fysiikka 3 -kirjan luvuista perehdyttiin kappaleisiin 4.1–4.3. Fysikaalisen ja geometrisen optiikan teorian lisäksi tässä luvussa käsitellään näiden opetuksessa kohdattuja haasteita. Fysikaalisessa optiikassa tarkastellaan valon etenemiseen liittyviä ilmiöitä aaltoliikkeen avulla ja geometrisessa optiikassa valonsäteen mallin avulla.

### 4.1 Diffraktio ja interferenssi

#### 4.1.1 Diffraktio

Käsitteellä diffraktio tarkoitetaan aallon taipumista ja näin aaltorintaman muuttumista esteen vaikutuksesta. Diffraktion aiheuttava este on oppikirjoissa useimmiten yksittäinen este, kaksoisrako tai useamman raon muodostama hila. Diffraktiota tapahtuu kuitenkin myös reunoissa. Diffraktio on kaikelle aaltoliikkeelle tapahtuva interferenssi-ilmiö eli sitä voidaan havaita valon lisäksi myös ääni- ja vesiaalloilla.

Suora aaltorintama taipuu esteessä niin, että esteen jälkeen aaltorintamat ovat kaareutuneita. Diffraktion voimakkuus raossa riippuu raon leveydestä suhteessa aallonpituuteen – mitä kaapeampi rako, sitä voimakkaammin aallot taipuvat.

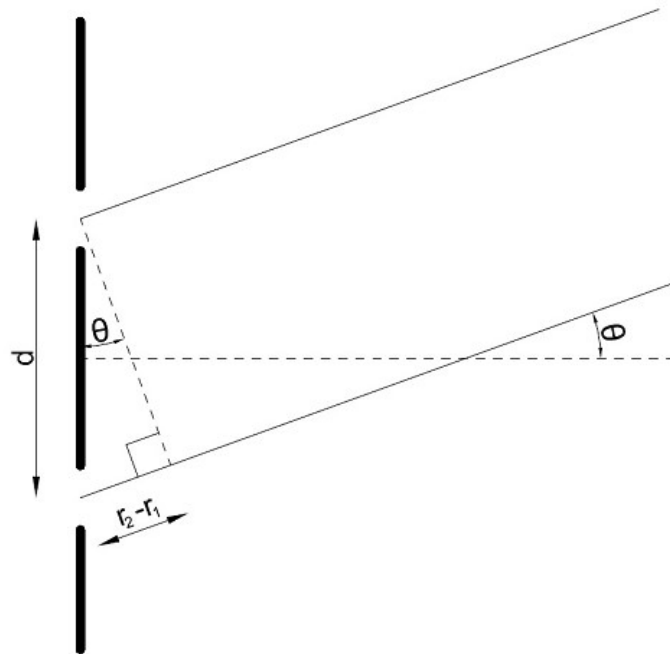
#### 4.1.2 Interferenssi

Aaltorintaman saapuessa useamman raon muodostamaan systeemiin ja rakojen ollessa pienempiä kuin tulevan aallon aallonpituus raot toimivat pistelähteinä ja diffraktio tapahtuu Huygensin periaatteen mukaisesti kaikissa raoissa. Raoissa diffraktoituneet aallot yhdistyvät ja syntyy joko vahvistava tai heikentävä interferenssi superpositioperiaatteen mukaisesti. Ideaalinen interferenssi voidaan havaita vain, jos rakoon saapuvat aallot ovat keskenään koherentteja eli niiden vaihe-ero on vakio.



### 4.1.3 Interferenssi kaksoisraossa

Kaksoisraolle voidaan muodostaa interferenssiyhtälöt silloin, kun rakojen välimatka  $d$  on hyvin pieni varjostimen etäisyyteen nähden. Tällöin rakojen jälkeiset aallot etenevät lähes yhdensuuntaisesti. Kuvassa 1 on esitetty matka- ja vaihe-eron syntyminen kaksoisraossa, kun varjostin on kaukana.



Kuva 1: Matka- ja vaihe-eron syntyminen kaksoisraossa

Kuvan 1 mukaisesti kuviosta saadaan

$$\sin\theta = \frac{r_2 - r_1}{d},$$

josta matkaero

$$r_2 - r_1 = d \sin\theta. \quad (1)$$

Vahvistava interferenssi syntyy, kun aaltojen matkaero (1) on aallonpituuden monikerta,  $k\lambda$ . Tällöin täydellisen konstruktivisen interferenssin ehdoksi saadaan

$$d \sin\theta = k\lambda, \quad (2)$$

jossa

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Heikentävä interferenssi puolestaan syntyy aaltojen matkaeron ollessa  $(k + \frac{1}{2})\lambda$ , ja tällöin täydellisen destruktiivisen interferenssin ehdoksi saadaan

$$d\sin\theta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda,$$

jossa

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Yhtälöissä  $d$  on rakojen välimatka,  $\theta$  taipumiskulma,  $k$  kertaluku ja  $\lambda$  aallonpituus.

Vahvistavaa interferenssiä arvolla  $k = 0$  kutsutaan päämaksimiksi tai nollannen kertaluvun diffraktiomaksimiksi ja arvoja  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  vastaavia maksimeita kutsutaan sivumaksimeiksi tai vaihtoehtoisesti ensimmäisen, toisen, kolmannen, jne. kertaluvun diffraktiomaksimeiksi. Päämaksimi havaitaan suoraan rakojen edessä ja sivumaksimit päämaksimin molemmin puolin.

Monokromaattisten valoaaltojen eteneminen kaksoisraossa synnyttää rakojen takana olevalle varjostimelle tummia ja vaaleita kohtia. Vaaleat kohdat kertovat vahvistavasta interferenssistä ja tummat kohdat heikentävästä interferenssistä.

#### 4.1.4 Interferenssi hilassa

Hilaksi kutsutaan levyä, jossa on yhdensuuntaisia ja yhtä etäällä toisistaan olevia uurteita tai rakoja. Interferenssille hilassa pätevät samat yhtälöt kuin kaksoisraon tapauksessa. Vahvistavan interferenssin yhtälöä (2) kutsutaan hilayhtälöksi ja rakojen etäisyyttä  $d$  kutsutaan hilavakioksi.

## 4.2 Linssit

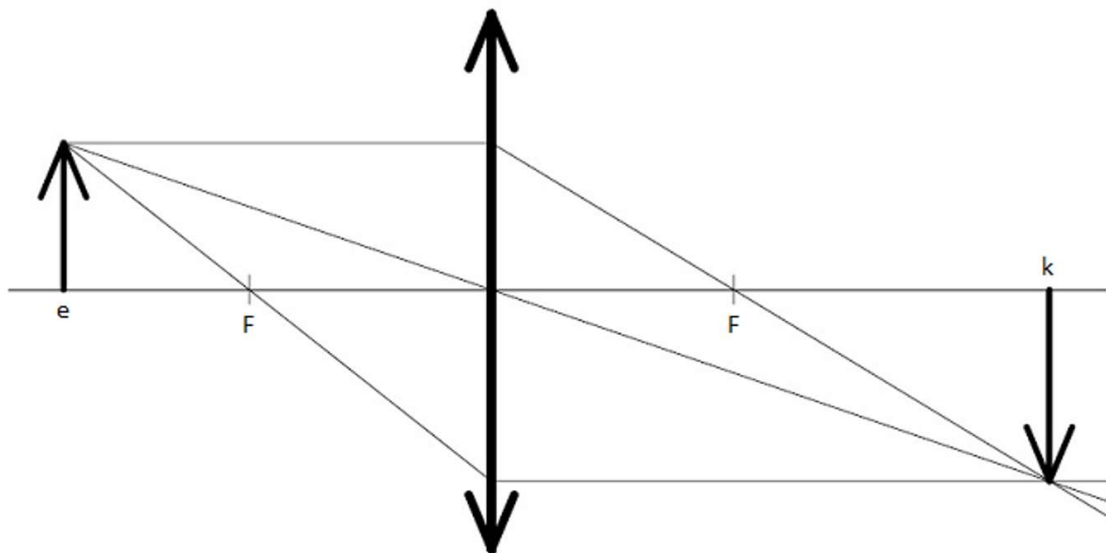
Linssi on läpinäkyvä kahdesta kaarevasta pinnasta tai kaarevasta pinnasta ja tasosta muodostuva kappale. Linssejä on kahdenlaisia: kuperia ja koveria linssejä. Kupera linssi on keskeltä

paksumpi kuin reunoilta ja kovera linssi taas keskeltä ohuempi kuin reunoilta. Jos linssi on ohut, sen muodostamien pintojen välimatka voidaan approksimoida nolllaksi, ja näin ollen valonsäteiden taittumisen voidaan olettaa tapahtuvan vain yhdellä aineiden välisellä rajapinnalla. Tämän ansiosta linssiä voidaan mallintaa hyvin yksinkertaisella mallilla, jossa linssin muodostama kuva piirretään niin kutsuttujen erityisten valonsäteiden avulla. Erityisiä valonsäteitä on määritelty kolme, mutta kuvan paikan hakemiseksi riittää piirtää niistä vain kaksi.

Linssihin liittyvistä käsitteistä tärkeimpiä ovat polttopiste, valepolttopiste sekä polttoväli. Polttopiste on pääakselilla oleva piste, jonka kautta kaikki pääakselin suuntaiset valonsäteet kulkevat, ja valepolttopiste on linssin takana oleva polttopiste. Polttoväliksi sanotaan polttopisteen tai valepolttopisteen etäisyyttä linssin keskipisteestä.

#### 4.2.1 Kuperan linssi

Kuperasta linssistä käytetään myös nimeä kokoava linssi. Nimensä mukaisesti se kokoaa pääakselin suuntaiset valonsäteet nipuksi linssin taakse. Kuvassa 2 on esitetty kuperan linssin muodostama kuva esineen ollessa linssin polttovälin ulkopuolella.



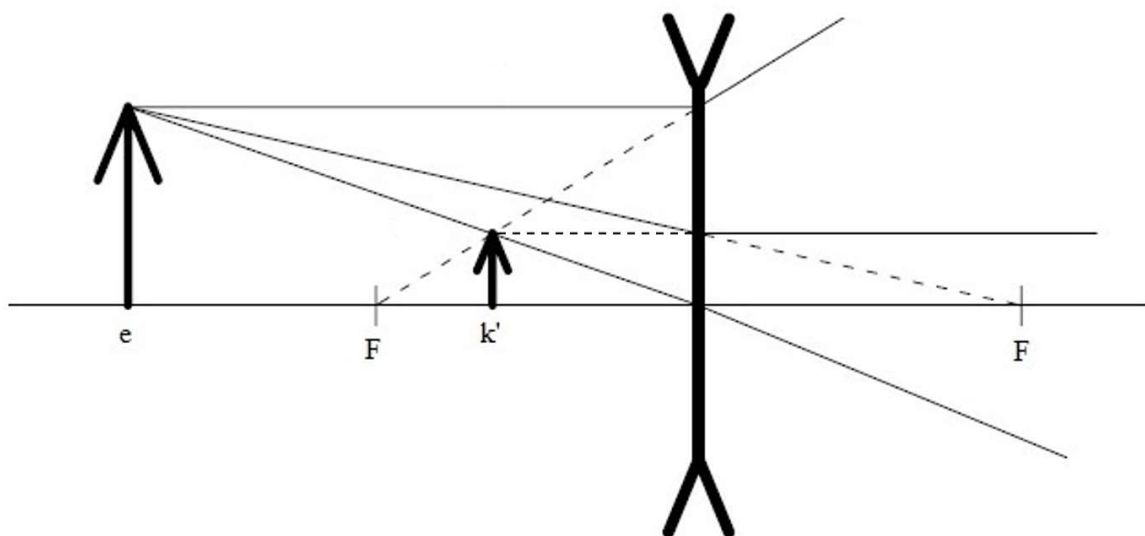
Kuva 2: Kuperan linssin muodostama kuva esineen ollessa linssin polttovälin ulkopuolella. Merkinät:  $e$  on esine,  $k$  on kuva,  $F$  on polttopiste.

Kuvan muodostuminen kuperassa linssissä voidaan hahmottaa erityisten valonsäteiden avulla kuvan 2 mukaisesti. Ensimmäinen erityisistä valonsäteistä lähtee esineestä ja kulkee pääakselin suuntaisesti linssin keskiakselille, minkä jälkeen se taittuu kulkemaan linssin takana olevan polttopisteen kautta. Toinen valonsäde kulkee esineestä linssin keskiakselin ja pääakselin leikkauskohtaan – linssin keskipisteeseen – ja jatkaa kulkuaan samansuuntaisena myös linssin jälkeen. Kolmas valonsäde kulkee linssin edessä olevan polttopisteen kautta ja taittuu linssin keskiakselilla pääakselin suuntaiseksi. Kuva muodostuu siihen kohtaan, jossa nämä erityiset valonsäteet kohtaavat.

Kupera linssi muodostaa esineestä ylösalaisin olevan, todellisen kuvan, jos esine on polttopisteen ja linssin välissä. Jos esine on kuperan linssin polttovälin sisällä, kupera linssi muodostaa esineestä valekuvan. Todellinen kuva tarkoittaa säteiden muodostamaa kuvaa ja valekuva säteiden jatkeiden näennäisesti muodostamaa kuvaa (esimerkki jälkimmäisestä kuvassa 3). Polttopisteessä olevasta esineestä kupera linssi ei muodosta kuvaa.

#### 4.2.2 Kovera linssi

Koverasta linssistä käytetään myös nimeä hajottava linssi. Se hajottaa pääakselin suuntaiset säteet niin, että ne eivät enää linssin jälkeen kohtaa. Valonsäteiden jatkeet sen sijaan kulkevat samasta pisteestä linssin etupuolelta.



Kuva 3: Koveran linssin muodostama kuva. Kuvassa  $k'$  on valekuva.

Kuvan muodostuminen koverassa linssissä on esitetty kuvassa 3. Erityisistä valonsäteistä ensimmäinen lähtee esineestä ja kulkee pääakselin suuntaisesti linssin keskiakselille. Tämän jälkeen valonsäde taittuu kulkemaan samansuuntaisesti kuin sen jatke, joka kulkee linssin etupuolella olevan valepolttopisteen kautta. Toinen erityinen valonsäde kulkee esineestä linssin keskiakselin ja pääakselin leikkauskohtaan eli linssin keskipisteeseen ja jatkaa kulkuaan samansuuntaisena myös linssin jälkeen – aivan kuten kuperan linssin tapauksessa. Kolmas valonsäde kulkee kohti linssin takana olevaa polttopistettä ja taittuu linssin keksiakselilla kulkemaan pääakselin suuntaisesti. Kuva muodostuu siihen kohtaan, jossa valonsäteet tai niiden jatkeet kohtaavat. Koveran linssin muodostama kuva on aina oikein päin oleva pienennetty valekuva.

#### 4.2.3 Linssien kuvausyhtälö, viivasuurennos ja taittovoimakkuus

Linsseille on johdettu seuraavanlainen kuvausyhtälö, jonka avulla voidaan tehtävänannosta riippuen laskea linssin polttoväli, esineen tai kuvan etäisyys linssistä:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (3)$$

Kuvausyhtälössä  $a$  on esineen etäisyys linssistä,  $b$  on kuvan tai valekuvan etäisyys linssistä ja  $f$  on linssin polttoväli. Linssin kuvausyhtälöä käytettäessä on muistettava seuraavat merkisäännöt:

- $a > 0$  jos esine on linssin edessä eli sillä puolella linssiä, josta valo linssiin tulee. Näin ollen  $a < 0$  jos esine on sillä puolella linssiä, jonne valo linssin läpi etenee.
- $b > 0$  jos kuva on linssin takana eli sillä puolella linssiä, jonne valo etenee. Tällöin kuva on todellinen kuva. Jos  $b < 0$ , kuva on valekuva ja se muodostuu linssin eteen.
- Kuperille linsseille  $f > 0$  ja koverille  $f < 0$ .

Linssien viivasuurennos on määritelmän mukaan

$$m = \frac{k}{e} = \frac{|b|}{|a|}, \quad (4)$$

missä  $k$  on kuvan korkeus ja  $e$  on esineen korkeus. Suhde  $\frac{|b|}{|a|}$  seuraa geometriasta ja voidaan johtaa esimerkiksi kuvasta 2.

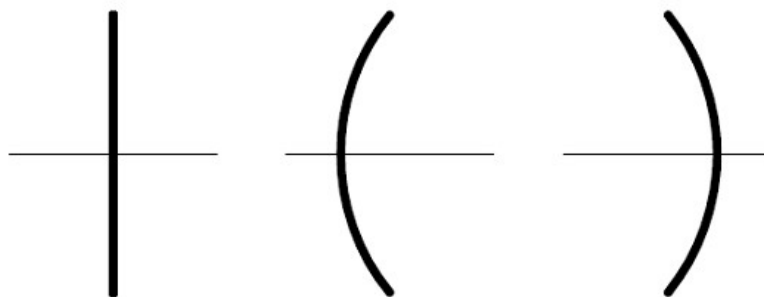
Linssille on määritelty myös taittovoimakkuus

$$D = \frac{1}{f},$$

jossa  $f$  on linssin polttoväli. Linssin taittovoimakkuuden yksikkö on dioptria:  $1 \text{ } 1/m = 1 \text{ } d$ . Linssin taittovoimakkuus on positiivinen kuperalle linssille ja negatiivinen koveralle linssille.

### 4.3 Peilit

Peilit jaetaan tasopeileihin ja kaareviin peileihin, joihin kuuluvat pallopeilit. Kuperassa pallopeilissä peilin heijastava osa on pallon ulkopintaa ja koverassa peilissä pallon sisäpintaa. Näiden lisäksi sovelluksissa käytetään esimerkiksi parabolisia peilejä. Kuvassa 4 on esitetty erilaisia peilejä.

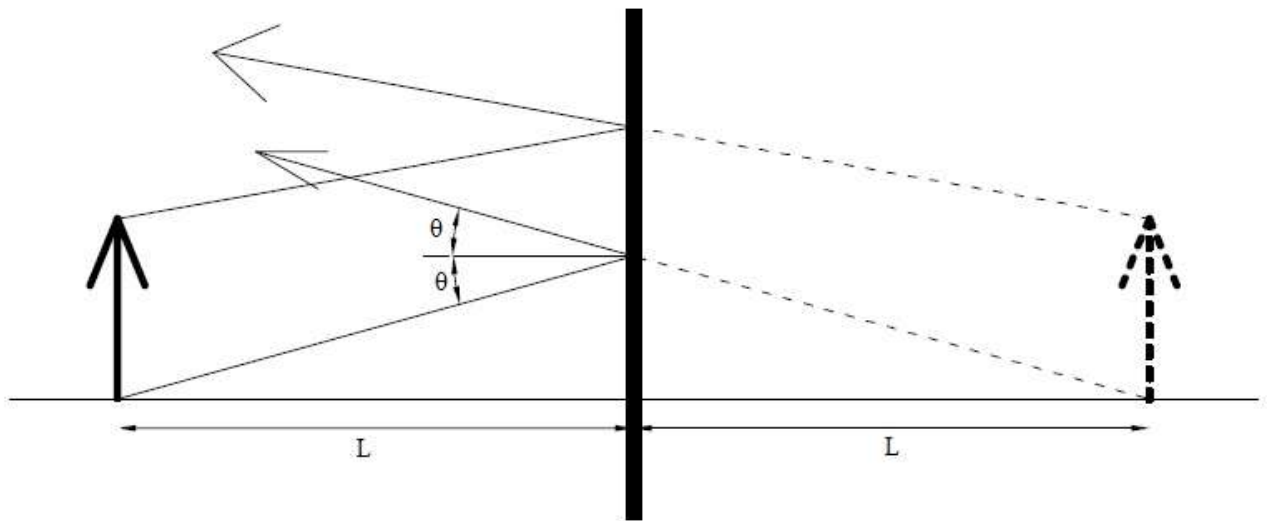


Kuva 4: Tasopeili, kupera pallopeili ja kovera pallopeili valon tullessa vasemmalta

Pallopeileihin ja niiden optiikkaan liittyvistä käsitteistä merkittäviä ovat kaarevuuskeskipiste, kaarevuussäde, peilin polttopiste sekä polttoväli. Peilin kaarevuuskeskipiste on pallopeilin muodostavan pallon keskipiste ja kaarevuussäde on peilin muodostavan pallon säde. Peilin polttopiste on kaarevuuskeskipisteen ja peilin keskipisteen puolivälissä sijaitseva piste, jonka kautta pääakselin suuntaiset säteet heijastuvat. Polttoväli on polttopisteen etäisyys peilin ja pääakselin leikkauspisteestä eli peilin keskipisteestä.

### 4.3.1 Tasopeili

Tasopeili muodostaa esineestä kuvan, joka näyttää olevan peilin takana. Todellisuudessa säteet eivät voi jatkua peilipinnan taakse, joten kyseessä on aina säteiden jatkeiden muodostama valeskuva. Esineestä lähtevät säteet kulkevat peiliin ja heijastuvat siitä heijastumislain mukaisesti, jolloin säteen tulo- ja heijastumiskulma ovat yhtä suuret. Tulo- ja heijastumiskulmat ovat säteen ja pinnan normaalin välisiä kulmia. Tasopeilin kuvan muodostuminen esitetään kuvassa 5.



Kuva 5: Tasopeilin esineestä muodostama kuva

### 4.3.2 Pallopeilit

Pallopeilien muodostama kuva voidaan piirtää erityisten valonsäteiden avulla. Erityisiä valonsäteitä on pallopeilien tapauksessa neljä, mutta kuvan paikan hakemiseksi riittää piirtää niistä vain kaksi. Ensimmäinen erityisistä valonsäteistä lähtee esineestä ja tulee peiliin pääakselin suuntaisesti. Tämän jälkeen se heijastuu peilistä polttopisteen kautta. Toinen säde tulee peiliin kaarevuuskeskipisteen kautta ja heijastuu samaa tietä takaisin. Kolmas erityisistä valonsäteistä kulkee peilin edessä olevan polttopisteen kautta ja heijastuu peilistä takaisin pääakselin suuntaisena. Neljäs valonsäde kulkee suoraan peilin keskipisteeseen ja heijastuu pois samassa kulmassa kuin peiliin tulikin. Valonsäteen tulo- ja heijastuskulmat ovat siis samat. Kuva muodostuu näiden erityisten valonsäteiden leikkauspisteeseen. Kuperan peilin muodostama kuva on aina oikein päin oleva pienennetty valekuva. Kovera peili muodostaa kuvan tai valekuvan aina, kun esine ei sijaitse polttopisteessä. Polttopisteessä olevasta esineestä kovera peili ei muodosta kuvaa.

Koverassa peilissä kaikki pääakselin suuntaiset säteet eivät taitu täsmälleen polttopisteeseen. Tätä ilmiötä sanotaan pallopoikkeamaksi, ja se aiheuttaa kuvan reunojen sumenemista. Sädekimppun optimoimiseksi esimerkiksi valaisimissa käytetään muita kuin pallonmuotoisia kaarevia pintoja. Pallopeilien tapauksessa geometrisissa tarkasteluissa tehdään tavallisesti approksimaatio, jossa oletetaan käytössä olevan vain pieni osa pallopinnasta. Tämä approksimaatio vastaa linssien tapauksessa tehtyä ohuiden linssien approksimaatiota.

### 4.3.3 Peilien kuvausyhtälö ja viivasuurennos

Peilien kuvausyhtälö

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

on samanmuotoinen kuin linssien kuvausyhtälö (3). Kuvausyhtälössä  $a$  on esineen etäisyys peilistä,  $b$  on kuvan etäisyys peilistä ja  $f$  on polttoväli. Pallopeilien kuvausyhtälölle pätevät seuraavat merkkisäännöt:



- $a, b > 0$  jos ne ovat peilin edessä eli sillä puolella peiliä, josta valo peiliin tulee, ja  $a, b < 0$  jos ne ovat peilin takana eli sillä puolella peiliä, jonne valo etenee
- $f > 0$  koveralle peilille ja  $f < 0$  kuperalle peilille

Peileille viivasuurennos on sama kuin linsseille eli yhtälö (4) pätee.

#### 4.4 Opetuksen haasteita

Oppilailla on havaittu vaikeuksia fysikaalisen ja geometrisen optiikan ymmärtämisessä ja soveltamisessa. Oppilaat eivät erota tilanteita, joissa valon aaltoluonteella on olennainen merkitys, niistä tilanteista, joissa riittää tarkastella asiaa sädeoptiikan kannalta. Tämä johtaa siihen, että he eivät osaa arvioida, kumpaa mallia annetussa tehtävässä pitäisi käyttää. Oppilaat myös sekoittavat fysikaalisen ja geometrisen optiikan toisiinsa ja yrittävät soveltaa jommankumman optiikan perusteita ja käsitteitä toiseen. Lisäksi he virheellisesti käyttävät kumpaakin samanaikaisesti. [3, 27]

Tutkimusten mukaan fysikaalisessa optiikassa voidaan havaita kolme kokonaisuutta, jotka aiheuttavat oppilaille eniten ongelmia ja joista oppilailla on eniten virhekäsityksiä. Näistä ensimmäinen on diffraktion käsitteen syvälinen ymmärtäminen. Oppilailla on havaittu useita erilaisia virhekäsityksiä diffraktiosta raoissa; moni oppilaista piti esimerkiksi diffraktion aiheuttajana sitä, että valo ei ”mahdu” raon läpi. Tutkimuksessa he väittivät, että valo ei mene raon läpi, jos raon leveys on pienempi kuin valon aallonpituus. [3, 27] Nämä oppilaat eivät siis ymmärtäneet myöskään aallonpituuden käsitettä eivätkä sitä, että aallonpituus mitataan aallon etenemissuunnassa, ja näin ollen raon leveys ei mitenkään vaikuta siihen, pääseekö valo raosta läpi [3]. Oppilailla on myös havaittu vaikeuksia jaksollisen aallon aallonpituuden mittaamisessa, mikä osaltaan vaikeuttaa huomattavasti interferenssin ymmärtämistä [28]. Toinen ongelmia aiheuttava kokonaisuus on matkaeron ja vaihe-eron syvälinen ymmärtäminen. Nämä asiat kytkeytyvät yleensä vahvistavaan ja heikentävään interferenssiin sekä virheellisiin käsityksiin siitä, miten interferenssi määritetään tai mistä asioista interferenssi riippuu. [3, 27] Nämä kaksi vaikeaa kokonaisuutta yhdistävä diffraktio- ja interferenssikuvio on oppilaille

haastava tulkittava. Tulkinnessa onnistuminen edellyttää oppilailta selkeää käsitystä siitä, miten raon leveys ja rakojen välinen etäisyys kuvioon vaikuttavat. [27] Kolmas kokonaisuus liittyy matemaattisiin yhtälöihin. Oppilaat opettelevat yhtälöt ulkoa ymmärtämättä niitä, mikä johtaa helposti tilanteeseen, jossa yhtälöitä käytetään väärin [3].

Geometrisessa optiikassa oppilaille haastavat kohdat liittyvät usein tilanteisiin, joissa olennaista on ymmärtää varjostimen tehtävä tai silmän rooli kuvan havaitsemisessa. Tutkimuksessa on havaittu monien oppilaiden virheellisesti luulevan, että siirtämällä varjostinta lähemmäs linssiä kuva pysyy kirkkaana ja vain sen koko muuttuu, vaikka todellisuudessa varjostinta siirrettäessä kuva muuttuu heti epäselväksi ja häviää nopeasti kokonaan näkyvistä. [5] Eräessä saman tutkimuksen tehtävässä havaittiin myös, että lähes kaikki oppilaat ajattelivat varjostimen olevan välttämätön kuvan muodostumiselle. Ne oppilaat, jotka lisäohjeistuksen jälkeen ymmärsivät, että kuvan voisi nähdä myös ilman varjostinta, eivät osanneet sijoittaa havainnoijan silmää paikkaan, jossa havainnoija näkisi muodostuvan kuvan. [5] Havainnoijan silmän sijoittamisessa on havaittu vaikeuksia myös tasopeilejä koskevassa tutkimuksessa [4]. Siihen myös liitetään paljon virhekäsityksiä; tutkimus on esimerkiksi osoittanut monen oppilaan luulevan, että tilanteessa, jossa kappale nähdään, silmä lähettää kappaleeseen osuvan säteen [29].

Todellisen kuvan ja valekuvan käsitteiden on havaittu sekoittavan oppilaita. Toteutettuun tutkimukseen osallistuneista oppilaista lähes kolmasosa väitti tasopeilin tuottaman kuvan olevan todellinen kuva [29]. Lisäksi kuvan sijainnin määrittämisessä on havaittu vaikeuksia. Tutkimuksessa oppilaita myös pyydettiin laittamaan sormi siihen kohtaan, jonne tasopeilin muodostama kuva muodostuu. Kolmasosa tutkimukseen osallistuneista oppilaista laittoi sormensa peilipinnan päälle sen sijaan, että olisi laittanut sen samalle etäisyydelle peilin taakse kuin esine peilin edessä oli. [4] Moni oppilaista ei myöskään huomannut, että peilistä näkyvän kuvan sijainti ei riipu havainnoijasta, vaan ainoastaan esineen sijainnista peilin tai linssin suhteen. Oppilaat eivät ymmärtäneet, että vaikka kuvan näennäinen sijainti taustan suhteen muuttuu havainnoijan paikan muuttuessa, itse kuvan sijainti pysyy samana. [4, 5]

Oppilailla on havaittu vaikeuksia ymmärtää linssin ja pallopeilin tehtävää kuvan muodostumisessa. Osa oppilaista ajattelee, että niiden ainoa tehtävä on kääntää kuva, jolloin kuva muodostuisi myös ilman linssiä tai pallopeiliä. Joidenkin oppilaiden on myös huomattu luulevan, että jos puolet linssistä peitetään, kuvasta näkyy varjostimella vain puolet. Tätä selitetään sillä, että nämä oppilaat käsittävät kuvan siirtymisen ilmiönä, jossa kuva siirtyy kokonaisuena

ja menee linssin sisälle sekä kääntyy siellä niin päin kuin se varjostimella näkyy. Puolikkaan kuvan katoamista on perusteltu myös sillä, että puoliksi peitettyyn linssiin pääsee vain puolet mahdollisesta valosta. [5] Oppilaat virheellisesti ajattelevat, että jokainen säde kuljettaa mukanaan tiedon jonkin pisteen paikasta. Tämän ajatuksen pohjalta he perustelevat puolikkaan kuvan katoamisen – kuvahan ei näin ollen voi näkyä kokonaan, jos yhdenkin säteen kulku estetään. [30]

Kuvan paikan määrittämisen kuvaussäteiden piirtämisen tai linssiyhtälön avulla ei ole havaittu tuottavan oppilaille vaikeuksia. Oppilaat eivät kuitenkaan aina osaa soveltaa teoriaa käytäntöön, ja samojen tietojen käyttäminen laboratoriotilanteessa saattaa aiheuttaa ongelmia. Aina ei myöskään enää linssi- tai peilikuvan piirtämisen jälkeen osata lukea piirrettyä kuvaa ja löytää siitä tarvittavia tietoja. Kuvaussäteiden piirtämistä tutkimalla on huomattu myös, että oppilaat eivät osaa ajatella erityisiä valonsäteitä vain eräänlaisena mallina. Näin ollen he eivät ymmärrä, että mitkä tahansa kaksi sädettä riittävät kuvan paikan määrittämiseen. Myös tämä selittää sitä, että oppilaat ajattelivat osan kuvasta katoavan tilanteessa, jossa osa linssistä peitetään. [5]

Arkielämän kokemusten on havaittu vaikuttavan oppilaiden virhekäsityksiin. Oppilaiden on esimerkiksi huomattu luulevan, että linssin muodostama kuva näkyy varjostimella riippumatta siitä, kuinka kauas linssistä varjostin pääakselilla sijoitetaan. [5, 31] Tutkimuksen mukaan tämä virhekäsitys juontaa juurensa diaprojektorin käyttämiseen arjessa. Oppilaat ovat huomanneet, että kuvan kokoa saadaan muutettua varjostinta siirtämällä, mutta he eivät muista, että samalla kuvaa täytyy tarkentaa uudelleen. [5] Toisena esimerkkinä arkielämän kokemusten virheellisestä tulkinnasta ja niiden sekoittamisesta tilanteeseen mainittakoon tutkimuksessa esille tullut tilanne, jossa oppilaat ajattelivat, että näkisivät itsensä kokonaan seinään kiinnitetystä pienestä peilistä siirtyessään kauemmas. [4]

## **4.5 Opetusmenetelmistä fysikaalisessa ja geometrisessa optiikassa**

Optiikan opetuksessa on tärkeää ottaa huomioon jo ennalta tutkimuksessa tai aiemmassa opetuskokemuksessa esille tulleet virhekäsitykset ja päättelyvaikeuksia aiheuttavat kohdat sekä keskittyä näiden asioiden opettamiseen [3]. Opettajan tulee laittaa oppilaat kohtaamaan virhekäsityksiä ja keskustelemaan niistä. Käsitusten kohtaaminen ja niistä keskusteleminen auttaa niiden muokkaamisessa, jolloin ennakkokäsitys epätodennäköisemmin jää vaikeuttamaan

myöhempää oppimista [4, 5]. Tutkimuksessa on myös hyväksi opetuskeinoksi havaittu se, että oppilasta pyydetään perustelevaan vastauksensa – olkoon se sitten oikea tai väärä. Opettajan antaessa oppilaan avata omaa päättelyketjuaan, hän pystyy tarvittaessa tarttumaan suoraan virheellisen käsityksen aiheuttavaan tekijään. Näin pystytään ehkäisemään virhekesitysten takaisin ilmaantumista tilanteessa, joka poikkeaa hiukankin alkuperäisestä [4].

Tutkimuksissa oppilaille havaittiin vaikeuksia teorian soveltamisessa käytäntöön. Lisäksi joidenkin arkielämän asioiden havaittiin aiheuttavan oppilaille virhekesityksiä. On siis tarpeellista auttaa oppilaita yhdistämään teoriassa opittua asiaa todelliseen kokemukseen ja todelliseen tilanteeseen. Konkreettisen opetuksen kautta oppilaat hyötyvät opiskelusta eniten [5, 29]. Tähän asiaan voidaan tarttua erilaisilla demonstraatioilla, laboratoriossa toteutettavilla tehtävillä sekä simulaatioilla. Simulaatioiden ja laboratoriotyöskentelyn avulla oppilaat pääsevät kokeilemaan teoriassa opittuja asioita käytäntöön sekä mallintamaan opetuksessa esille tulleita tilanteita. Ne tarjoavat oppilaille myös mahdollisuuden tarkistaa omat teorian perusteella tehdyt päätelmänsä.

Opettajan pienimuotoisenkin ohjauksen on havaittu parantavan oppimistuloksia [5, 32]. Opettajan on suositeltavaa rohkaista oppilaita ajattelemaan asioita, joita he eivät ajattelisi ilman opettajan aktiivista osallistumista ajatusprosessiin [5]. Opettajan tulee siis kysyä kysymyksiä, jotka auttavat oppilaita kehittämään omaa ajatteluaan. Ohjauksella voidaan myös auttaa oppilaita yhdistämään asioita toisiinsa ja näin suorittamaan myös tehtäviä, jotka ovat tiedollisesti aiempaa haastavampia, mutta joissa on yhteneväisyyksiä jo aiemmin opittuun asiaan [28]. Oppilaat, jotka eivät saaneet ohjausta simulaation käyttöön ja sen avulla oppimiseen, eivät tutkimuksen mukaan käyttäneet simulaatiota tehokkaasti hyödyksi ja pohtineet opittavaa asiaa. Tutkimuksen mukaan ohjausta saaneet oppilaat myös kokivat simulaation parantaneen oppimistuloksiaan kolme kertaa todennäköisemmin kuin ne oppilaat, jotka työskentelivät itsenäisesti. [32] Ohjauksen lisäksi opettajan on tärkeää käsitellä oppilaiden kanssa simulaation ja simuloitavan asian välisiä eroja sekä puhua simulaatioiden rajoitteista [25].

Opetusta suunniteltaessa kannattaa miettiä myös, mihin kohtiin tehtävässä oppilaiden tulisi kiinnittää huomiota. Oppilaita tulee esimerkiksi rohkaista ajattelemaan edessä olevaa tehtävää – demonstraatiota, simulaatiota tai kokeellista työtä – ennen sen suorittamista, jotta he osaisivat kiinnittää huomioita oikeisiin asioihin ja asioihin, jotka heiltä voisi muuten jäädä huomaamatta. Opettaja voi etukäteen mietityillä kysymyksillä auttaa herättämään ryhmässä

keskustelua tai pyytää jokaista oppilasta itsenäisesti kirjoittamaan vastaukset omiin muistiinpanoihinsa. Kysymysten tarkoitus on saada oppilaat tekemään jonkinlaisia ennusteita työssä eteen tulevista asioista ja miettimään perusteita näihin ennusteisiin. Tällainen etukäteen tehtävä ajatustyö laittaa oppilaat kohtaamaan omia virhekäsityksiään ja korjaamaan niitä. [4]

Opettajan tulee miettiä tarkkaan käyttämiään kuvia ja malleja. Jopa kirjan kuvitukset voivat aiheuttaa virheellisiä käsityksiä. Opettajan tulee tiedostaa mahdolliset harhaanjohtavat mallit ja huomioida ne opetuksessaan [31]. Opettajan on myös opetuksessaan huomioitava oppilaiden erilaiset oppimistavat ja tarjottava oppilaille erilaisia opetus- ja oppimismenetelmiä [29, 30].

## 5 TUTKIMUSKYSYMYKSET

Tutkimuksessa perehdytään siihen, miten lukion oppikirjat ja valitut simulaatiot käsittelevät luvussa 5.4 esiteltyjä fysikaalisen ja geometrisen optiikan opetuksessa havaittuja vaikeita asioita. Tarkoituksena on selvittää, voitaisiinko simulaatioita hyödyntävällä opetuksella vastata optiikan ymmärtämisessä ja soveltamisessa kohdattaviin haasteisiin tehokkaammin kuin pelkästään oppikirjojen varaan nojautuvalla opetuksella.

Tutkimuksessa pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Miten simulaatio voi tukea valitun aiheen oppiaineen oppimista oppitunneilla?
2. Tarjoaako simulaatio vastauksia kyseisen aiheen oppiaineeseen liittyviin kysymyksiin helpommin ja nopeammin kuin kokeellinen työskentely?
3. Vastaako simulaatio opetuksen haasteisiin ja auttaako se ehkäisemään tavallisimpien virhekäsityksien muodostumisen?
4. Voidaanko simulaatiota käyttää oppimisen tukena itsenäisesti opiskellessa?

## 6 TUTKIMUSAINEISTO JA TUTKIMUKSEN TULOKSET

Tässä luvussa tarkastellaan fysikaalisen ja geometrisen optiikan oppiaineksen oppimista kirjan ja simulaatioiden avulla. Luvussa esitellään ensin tutkimuksen aineisto, minkä jälkeen siirrytään käsittelemään tutkimuksen tulokset.

### 6.1 Tutkimuksen aineisto

Tutkimuksessa perehdytään Physica- ja Fysiikka-sarjojen vuoden 2003 opetussuunnitelmaa vastaaviin kolmannen kurssin kirjoihin [16, 17].

Tutkittavat kirjasarjat Physica ja Fysiikka käsittelevät optiikan aiheet eri järjestyksessä. Fysiikka-sarjassa aloitetaan fysikaalisen optiikan käsittelyllä, minkä jälkeen siirrytään opiskelemaan sädeoptiikan eli geometrisen optiikan perusteita. Physica taas aloittaa geometrisella optiikalla ja siirtyy siitä käsittelemään diffraktiota ja interferenssiä. Myös geometrisen optiikan kappaleiden järjestys on kirjoissa eri: Fysiikka 3 -kirjassa opiskellaan ensin peilit, viivasuurenno sekä pallopeilien kuvausyhtälö ja vasta tämän jälkeen linssit, kuvan muodostuminen linssissä, linssien kuvausyhtälö sekä linssisysteemit. Physica 3 käsittelee ensin linssit ja niihin liittyvän teorian ja siirtyy vasta sitten peileihin.

Simulaatiot, joihin tutkimuksessa perehdytään, ovat saatavilla PhET-projektin Internet-sivuilla. Tutkimukseen valitut simulaatiot ovat nimeltään ”Aaltojen interferenssi” (<https://phet.colorado.edu/fi/simulation/wave-interference>), ”Geometrinen optiikka” (<https://phet.colorado.edu/fi/simulation/geometric-optics>) ja ”Taittuva valo” (<https://phet.colorado.edu/fi/simulation/bending-light>).

#### 6.1.1 PhET-simulaatiot

Tässä Pro gradu -tutkielmassa tutkitaan PhET-simulaatioiden mahdollisia hyödyntämistä lukion fysiikan fysikaalisessa ja geometrisessa optiikan opettamisessa ja oppimisessa. PhET-simulaatiot ovat nobelisti Carl Wiemanin vuonna 2002 aloittaman ”The Physics Education Technology” -projektin tuotoksena syntyneitä yläkoulun ja lukion opiskelijoille suunnattuja simulaatioita.

Simulaatiot on luotu PhET-projektiin kuuluvan tutkimuksen pohjalta ja niiden käytettävyys ja tehokkuus oppimisen edistämässä on testattu. Simulaatioiden tavoitteena on visuaalisen ja interaktiivisen mallin avulla helpottaa fysiikan periaatteiden oppimista. Yksi niiden päätehtävä on myös tarjota oppilaille avoin, tutkimuksellinen ympäristö, jonka avulla he voivat tutkia asioita mahdollisimman tieteelliseen tapaan. Tällainen tutkimuksellinen ja fysiikan yhteyttä arkipäivän elämään korostava lähestymistapa paitsi auttaa oppimista, vaikuttaa myös asenteisiin, joita oppilailla on fysiikkaa ja sen opiskelua kohtaan.

PhET-projektin simulaatiot ovat ilmaisia, kaikille saatavissa olevia simulaatioita. Vaikka projekti alkoikin fysiikan simulaatioiden tutkimisena ja kehittämisenä, nykyisin saatavilla on runsaasti myös biologian, kemian, maantieteen ja matematiikan simulaatioita. Simulaatiot ovat saatavilla ja niihin voi tutustua Internetissä osoitteessa <https://phet.colorado.edu/fi/simulations>. [33]

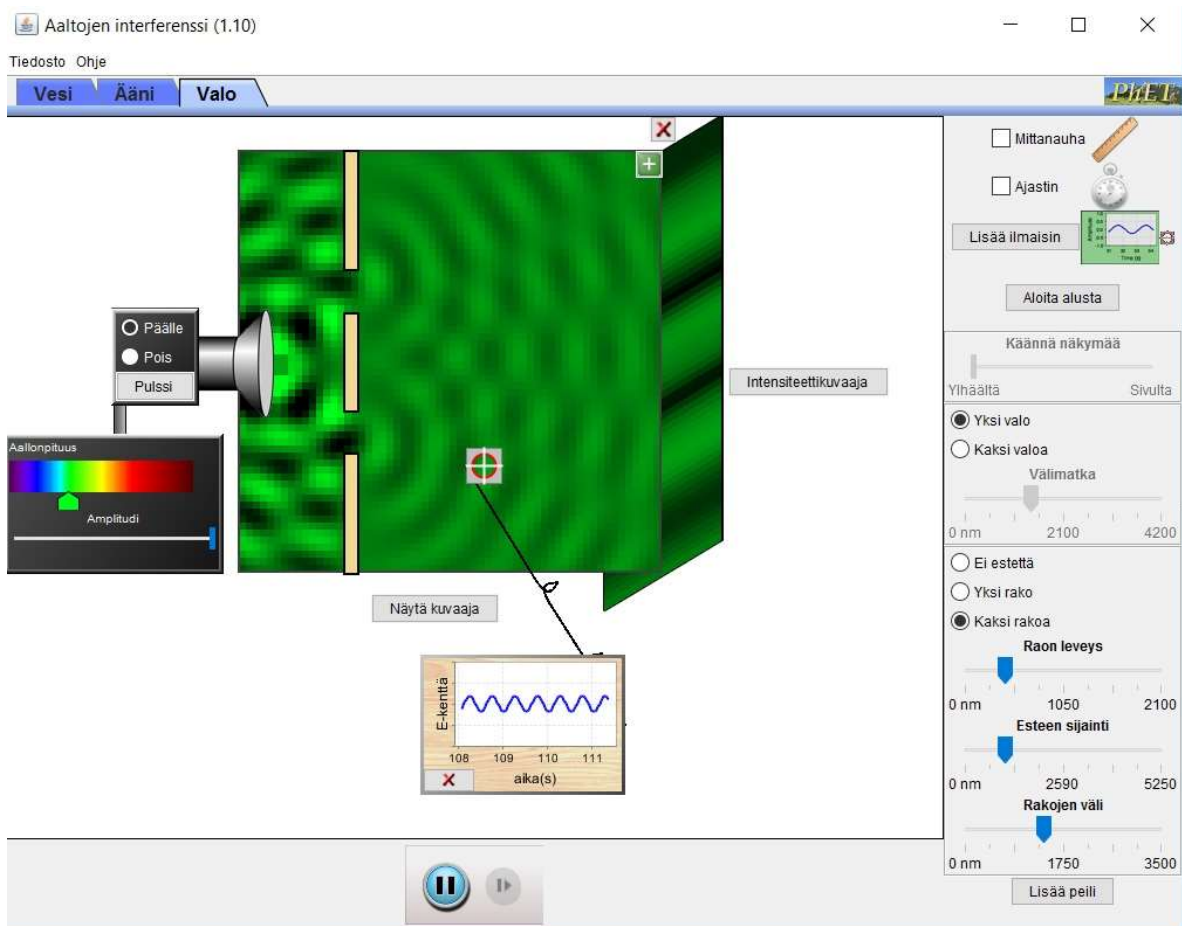
### **6.1.2 Aaltojen interferenssi -simulaatio**

Aaltojen interferenssi -simulaation avulla voidaan tutkia aaltoliikkeen taipumista eli diffraktiota sekä aaltojen interferenssiä. Simulaatiosta voidaan valita tutkimuksen kohteeksi vesi-, ääni- tai valoallot. Jokaisen aaltotyypin tapauksessa aallon amplitudia voidaan muuttaa. Lisäksi vesi- ja ääniaaltojen taajuutta sekä valoaltojen aallonpituutta voidaan muuttaa. Kuvassa 6 simulaatioon on valittu tutkittavaksi vesiaallot.

Simulaatiossa on vakiona yksi aaltolähde, mutta toinen aaltolähde voidaan lisätä manuaalisesti halutulle etäisyydelle ensimmäisestä aaltolähteestä. Simulaatioon on myös mahdollista sijoittaa rako tai kaksoisrako, jolloin rakojen leveyttä, etäisyyttä aaltolähteestä sekä rakojen etäisyyttä toisistaan voidaan säätää.

Simulaation valikossa on tarjolla mitta, sekuntikello sekä ilmaisimien avulla voidaan havainnoida aallon amplitudia ja amplitudin muutosta, kun lisätään simulaatioon diffraktiota ja interferenssiä aiheuttavia esteitä tai rakoja. Lisäksi simulaatioon voidaan asettaa varjostin, josta voidaan nähdä valomaksimien sijainnit ja sijaintien muuttuminen muiden parametrien muuttuessa.

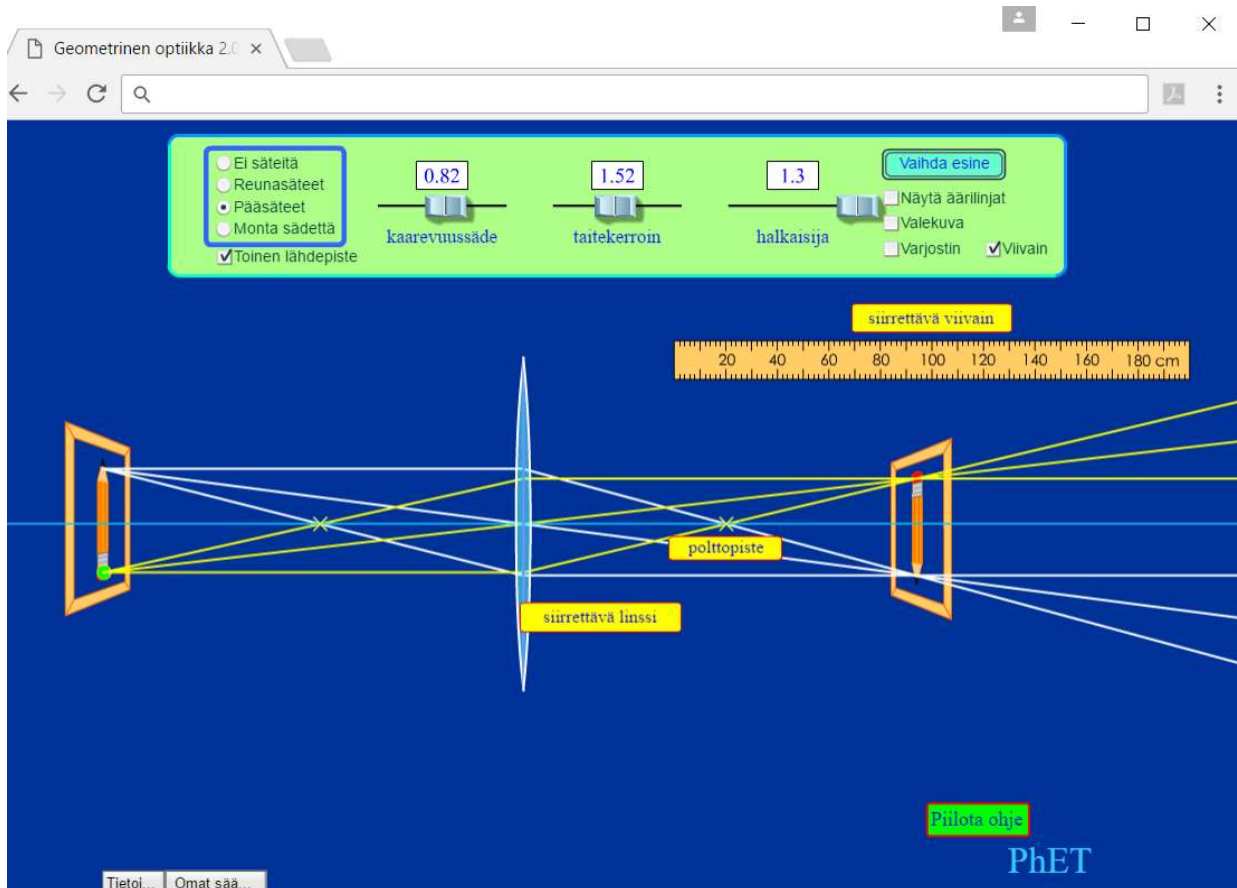




Kuva 6: PhET-simulaatio “Aaltojen interferenssi”

### 6.1.3 Geometrinen optiikka -simulaatio

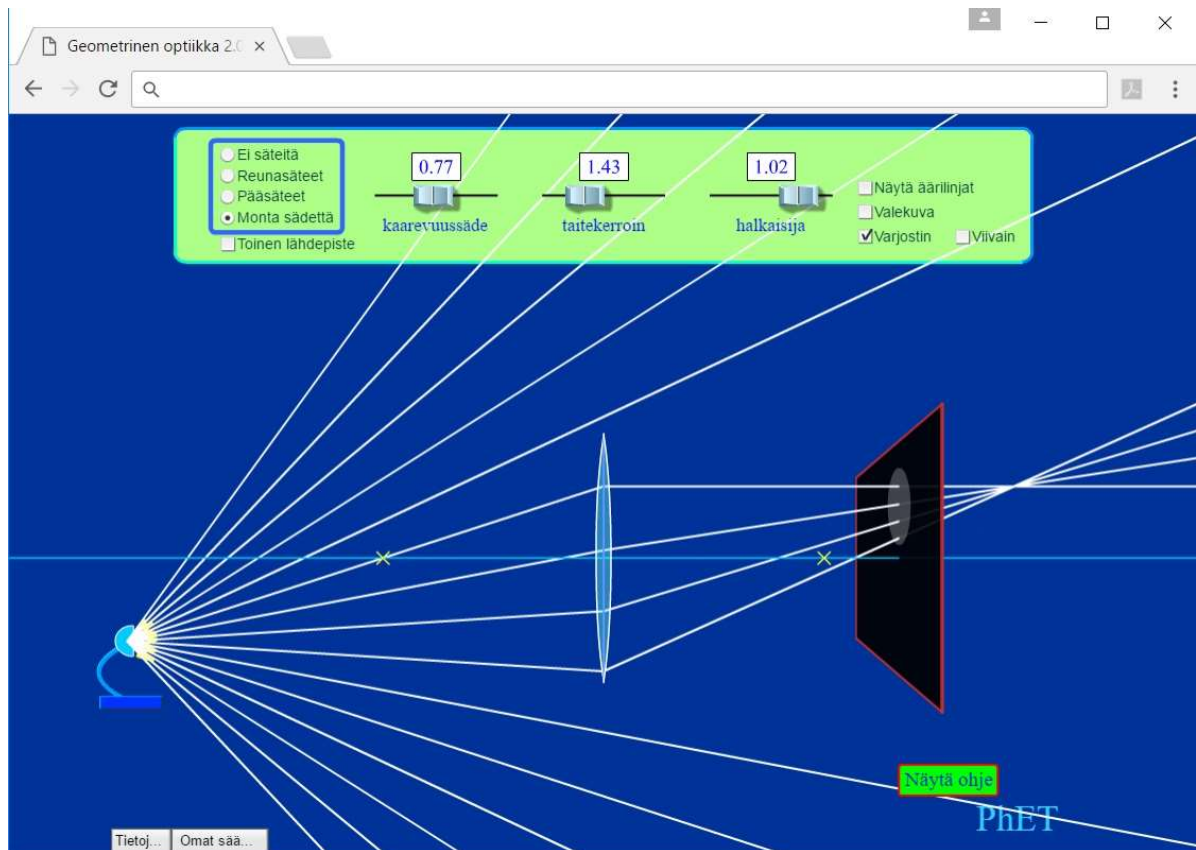
Geometrinen optiikka -simulaation avulla päästään tutkimaan kuperan linssin muodostamaa kuvaa. Simulaatiossa voidaan tietokoneen hiirellä raahaamalla siirtää sekä esinettä että linssiä. Lisäksi simulaation valikosta voidaan muuttaa linssin kaarevuussädettä, taitekerrointa ja halkaisijaa. Näkyviin valitut säteet – reunasäteet, pääsäteet tai useat säteet – muuttuvat välittömästi tehtyjen muutoksien mukaisesti. Kuvassa 7 simulaatioon on valittu nähtäväksi pääsäteet ja kuvassa 8 monta sädettä.



Kuva 7: PhET-simulaatio “Geometrisen optiikka”

Simulaatiossa on oletuksena näkyvillä vain yksi lähdepiste. Valikosta saadaan kuitenkin valittua myös toinen lähdepiste, joka on esitetty kuvassa 7 vihreällä pallolla. Toisesta lähdepisteestä lähtevät säteet on kuvassa esitetty myös vihreällä.

Valikosta voidaan valita näkyville myös valekuva sekä raahaamalla siirrettävissä oleva varjostin. Etäisyyksiä simulaatiossa voidaan mitata siirrettävällä viivaimella.



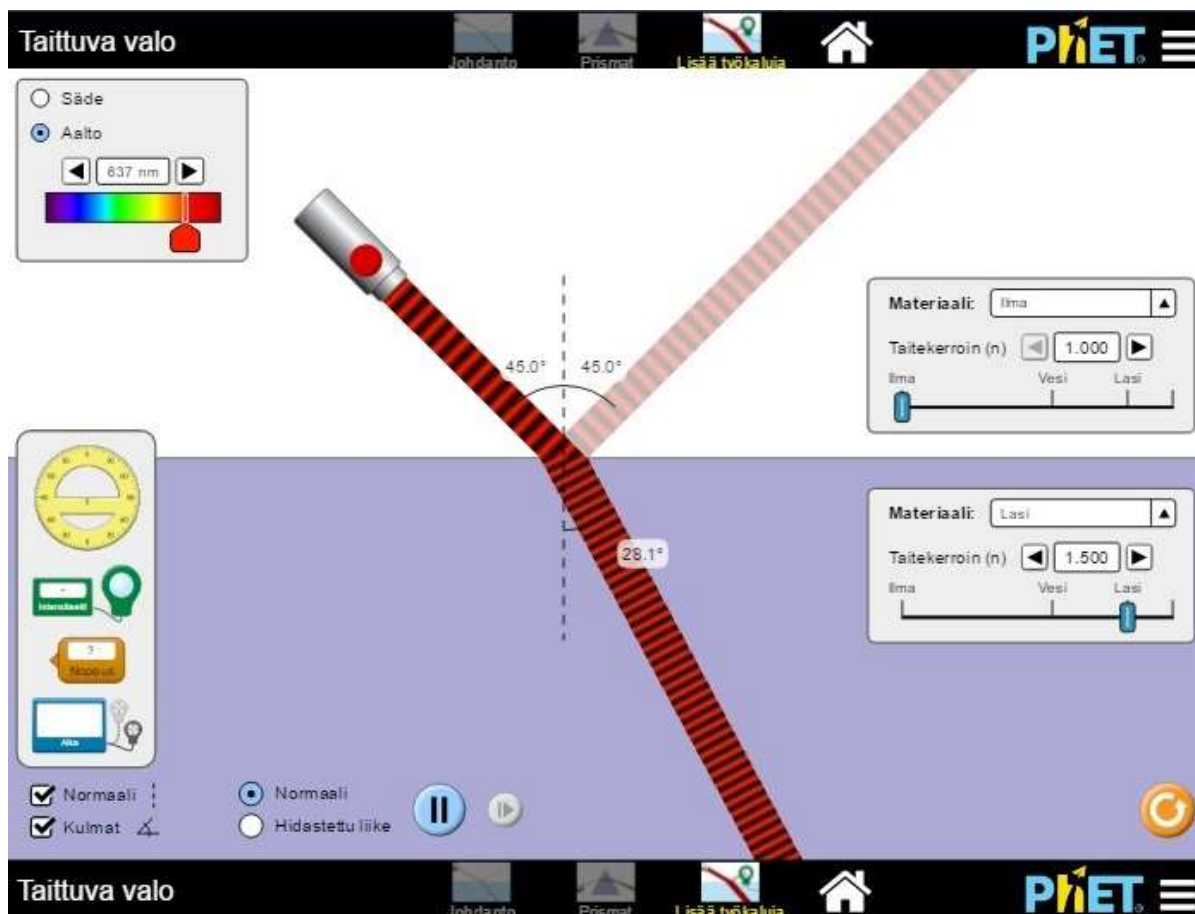
Kuva 8: Varjostin ja monta sädettä Geometrinen optiikka -simulaatiossa

#### 6.1.4 Taittuva valo -simulaatio

Taittuva valo -simulaatiolla voidaan tutkia valon taittumista kahden aineen rajapinnassa. Simulaatiossa aineiksi voidaan määrittää ilma, vesi, lasi, tuntematon aine tai oma aine, jonka taitekertoimen arvo voidaan itse asettaa. Tuntemattomia aineita on valittavissa kaksi, ja niiden taitekertoimet on jätetty oppilaalle simulaatiosta saatujen tietojen avulla laskettavaksi.

Simulaatiossa valon malliksi voidaan valita joko säde tai aalto. Kuvassa 9 simulaatioon on valittu näkyville valon aaltomalli. Valolle voidaan määrittää myös haluttu aallonpituus. Simulaation valikosta saadaan näkyviin rajapinnan normaali sekä tulo- ja taitekulmat rajapinnan normaalin suhteen. Valikossa on myös erilaisia mittalaitteita: kulmien mittaamiseen tarkoitettu kulmaviivain, sekä laitteet, joilla voidaan mitata valon intensiteettiä ja nopeutta halutuissa kohdissa. Lisäksi simulaatiossa voidaan mitata aikaa, jossa valo kulkee kahden käyttäjän valitseman pisteen välin.

Taittuva valo -simulaatiossa voidaan tutkia myös valon taittumista erilaisissa prismoissa.



Kuva 9: Taittuva valo -simulaatio

## 6.2 Tutkimuksen tulokset

### 6.2.1 Fysikaalinen optiikka

Kummassakin kirjassa fysikaalisen optiikan johdannoksi on luvun alussa asiaan johdattelevat kappaleet, joissa pyritään yhdistämään käsiteltävä ilmiö arkielämään ja sen kokemuksiin. Kirjat eroavat hieman asioiden esittelyjärjestyksessä: Physica keskittyy ensin käsittelemään diffraktion perusteellisesti, kun taas Fysiikka-sarjan kirjan johdannossa puhutaan diffraktion lisäksi myös jo interferenssistä. Kummassakin kirjassa käsitellään kuitenkin lopulta samat asiat: diffraktio, vahvistava ja heikentävä interferenssi sekä interferenssi kaksoisraossa ja hiilassa.

Fysiikka 3 -kirjan teksti, esimerkit, kuvat ja tehtävät käsittelevät ainoastaan valon diffraktiota. Kirjassa on aikaisemmassa luvussa mainittu diffraktio, ja se, että diffraktiota esiintyy valon

lisäksi myös vesi- ja ääniaalloilla. Physica 3 -kirjassa puolestaan käsitellään diffraktio yhtenä kokonaisuutena valon, äänen ja vesiaaltojen diffraktiona. Kirjan kuvissa ja tekstissä esitellään siis kaikki nämä diffraktiotyypit. Tämäkin kirja kuitenkin painottuu valon tutkimiseen – kirjan 16:sta tehtävästä 13 käsittelee juuri optiikkaa.

Diffraktion käsittelyn jälkeen kirjasarjoissa käsitellään aaltojen taipuminen kaksoisraoissa, mistä puolestaan siirrytään interferenssiin sekä matka- ja vaihe-erojen määrittelemiseen. Kirjoissa käsitellään interferenssi kaksoisraon ja useamman raon systeemin eli hilan avulla.

Kummassakin kirjassa mainitaan rakojen toimivan alkeisaaltojen lähteinä. Fysiikka 3 -kirjassa kaksoisraossa tapahtuva interferenssi esitetään vain yhden, vahvistavaa interferenssiä esittävän aaltokuvan avulla. Physica 3-kirjassa interferenssistä on kolme erillistä kuvaa: kahdessa käsitellään vahvistavaa interferenssiä eri matkaeroilla ja yhdessä heikentävää interferenssiä. Kirjan kuvat ovat informatiivisia ja niihin on lisätty kirjoittamalla myös tieto siitä, syntykö varjostimelle kuvan tapauksessa kirkas vai tumma kohta. Kummassakin kirjasarjassa johdetaan yhtälö valon taipumiselle kaksoisraossa ja kerrotaan, millaisella matkaerolla saadaan vahvistava ja millaisella heikentävä interferenssi. Kirjoissa käsitellään myös hilayhtälö sekä siinä esiintyvät muuttujat.

Kirjasarjat eroavat toisistaan oppilastöiden suhteen. Fysiikka 3 -kirjassa tarjotaan diffraktiota ja interferenssiä käsitteleviksi oppilastöiksi kahta eri työtä. Ensimmäisessä työssä tutkitaan valon diffraktiota esineen reunassa, yhdessä raossa ja kaksoisraossa sekä havainnoidaan varjostimella näkyvää kuviota ja sen muuttumista. Toisessa oppilastyössä tutkitaan varjostimella näkyvää kuviota, kun laserin valo läpäisee hilan. Physica-sarjan oppilaan kirja ei tarjoa yhtäkään oppilastyötä. Vastuu kokeellisista töistä jätetään siis opettajalle. Kirjassa on kuitenkin esimerkki, jota voisi käyttää hyödyksi oppilastyöskentelyssä niin, että oppilaat saisivat ensin tutkia aaltorintaman käyttäytymistä eri levyisissä raoissa sekä kaksoisraossa, ja tämän jälkeen vasta tarkistettaisiin kirjasta oikeat vastaukset kysymyksiin.

Aaltojen interferenssi -simulaation avulla voidaan tukea fysikaalisen optiikan opiskelua. Kirjoissa keskitytään käsittelemään diffraktiota valoaaltojen taipumisena. Valoaaltojen diffraktiossa itse aaltorintamaa ei nähdä esteen toisella puolella, ja tämän takia kirjoissa on havainnoitu lähinnä varjostimelle muodostuvassa kuvassa tapahtuvia muutoksia. Aaltojen interferenssi -simulaation avulla voidaan havainnoida valoaaltorintaman käyttäytymistä sen kohdassa jonkinlaisen esteen: raon tai kaksoisraon. Simulaatiossa oppilas voi tutkia esteen toisella puolella tapahtuvan aaltorintaman diffraktion ja interferenssin lisäksi samanaikaisesti myös

varjostimella tapahtuvia muutoksia. Simulaation avulla oppilas pystyy näkemään konkreettisesti, mitä diffraktiossa tapahtuu. Aaltorintamassa tapahtuvien muutosten näkeminen samanaikaisesti varjostimella näkyvien muutosten kanssa mahdollistaa kokonaisvaltaisemman ilmiön hahmottamisen. Simulaatiota vastaavalla laboratoriotyöllä on täsmälleen sama rajoite kuin kirjalla: laservalon, rakosysteemin ja varjostimen avulla työskennellessä valon interferenssikuvioita ei voida nähdä, vaan joudutaan tyytymään varjostimella tapahtuvien muutosten havainnointiin, ja niiden avulla päättelemään, mitä valolle esteen jälkeen tapahtui.

Oppilailla havaittuihin vaikeuksiin simulaatiolla pystytään vastaamaan tehokkaasti. Laboratoriotyön koejärjestelyä ja simulaatiota verratessa simulaatio päihittää rakennetun koejärjestelyn. Sen lisäksi, että se mahdollistaa interferenssikuvion havainnoinnin esteen toisella puolella, se tarjoaa myös vaivattomamman käyttökokemuksen ja mahdollisuuden saada vastaukset kysymyksiin nopeammin. Laboratoriotyöskentelyssä koejärjestelyn järjestäminen sellaiseksi, että raon ja aaltorintaman lähteen etäisyyden, raon leveyden, rakojen määrän sekä rakojen välisen etäisyyden muuttaminen olisivat kaikki helposti tehtävissä, on vaikeaa. Simulaatiossa erilaisten variaatioiden kokeileminen on nopeaa ja niiden aikaansaamat muutokset ovat välittömästi nähtävissä.

Jaksollisen aallon aallonpituuden mittaamisessa simulaatio tarjoaa kirjaa monipuolisemman oppimiskokemuksen. Simulaatiossa voidaan avata näkyville kuvaaja, jossa kuvataan sähkökentän muutos sijainnin funktiona. Tästä voidaan määrittää aallonpituus esimerkiksi aallonharjojen välisenä etäisyytenä. Simulaatiossa voidaan lisäksi mittanauha-työkalun avulla määrittää aallonpituus myös aaltorintamasta, jota ei kirjasarjojen kuvissa ole esitetty. Tämä voitaisiin tehdä myös kokeellisesti oppilastyössä, mutta sen toteuttaminen olisi selvästi simulaation käyttämistä monimutkaisempaa ja hitaampaa. Aaltorintamasta mittaaminen auttaa hahmottamaan sitä tosiasiaa, että aallonpituus mitataan aallon etenemissuunnassa. Tällöin oppilaille ei niin helposti synny aiemmin tutkimuksissa havaittua virheellistä käsitystä, jonka mukaan raon leveys vaikuttaisi jotenkin siihen, mahtuuko valo raosta läpi vai ei [3, 27].

Matka- ja vaihe-eron ymmärtämisen haasteisiin simulaatiolla ei pystytä vastaamaan oppikirjaa paremmin. Eroja ei pysty simulaatiossa mittaamaan, toisin kuin oppikirjassa olevista kuvista. Matemaattisten yhtälöiden käytön opetteluun simulaatio ei myöskään sovellu kirjaa paremmin. Simulaation ja interferenssiehdon avulla voidaan laskea valomaksimien sijainti. Simulaatiossa ei kuitenkaan voida määrittää tarkasti esimerkiksi yhtälössä tarvittavaa aallonpituutta, jolloin laskuihin tuleva suuri virhe saattaa synnyttää oppilaille lisää virhekäsityksiä.

Tämän takia laskeminen ilman asianmukaista pohdintaa voi ennemminkin haitata kuin tukea oppimista. Kirja siis tarjoaa sisällöltään paremman pohjan näiden haastaviksi koettujen asioiden opiskeluun kuin saman tyyppiset oppimiskokemukset tarjoavat simulaatio ja kokeellinen työskentely, joita voidaan käyttää lähinnä havainnollistamiseen.

Simulaatio tarjoaa mahdollisuuden opiskella diffraktiota ja interferenssiä kotona monipuolisemmin. Simulaatiosta voidaan hyötyä erityisesti tehtävissä, jossa pohditaan erilaisten muuttujien – esimerkiksi rakojen etäisyyden, valon aallonpituuden, esteen sijainnin tai raon leveyden – vaikutusta diffraktioon tai interferenssiin. Tarkkojen lukuarvojen asettaminen simulaatioon on aikaa vievää ja riittävän tarkkuuden saavuttaminen epävarmaa, joten laskemista vaativiin tehtäviin simulaatiota ei kannata käyttää. Simulaation avulla oppilaat voivat suorittaa ja toistaa kotona diffraktio- ja interferenssitutkimuksia, joita on perinteisesti suoritettu koulussa kokeellisesti.

### **6.2.2 Geometrinen optiikka**

Kummassakin tutkitussa kirjasarjassa geometrinen optiikka on jaettu selkeästi kahteen eri lukuun: linssihin ja peileihin. Linssejä käsittelevä luku on jaoteltu vielä kuperia ja koveria linssiejä, linssien kuvausyhtälöä ja viivasuurennosta, taittovoimakkuutta sekä linssisysteemeitä käsitteleviin kappaleisiin. Peilit puolestaan käsitellään tasopeileistä, kuperista ja koverista pallopeileistä, peilien kuvausyhtälöstä ja viivasuurennosta sekä peilisysteemeistä kertovissa kappaleissa.

Kirjoissa käydään analyttisesti läpi kuvan muodostumisen periaatteet linseissä ja peileissä sekä tarjotaan esimerkkejä, joissa määritetään piirtämällä ja laskemalla annettujen tietojen pohjalta kuvan paikkaa, lasketaan viivasuurennosta ja selvitetään kuvan laatua. Kumpikin kirjasarja sisältää kattavasti tietoa kuvausyhtälöstä sekä erilaisten linssien ja peilien kuvanmuodostuksesta ja kuvan laadusta. Kirjoissa on sekä piirrettyjä esimerkkikuvia että valokuvia kuvan muodostumisesta erilaisissa tilanteissa. Lisäksi kirjojen tehtävissä määritetään kuvan, esi-neen, linssin ja peilin paikkaa sekä linssin polttoväliä, peilin kaarevuussädettä ja viivasuurennosta annettujen tietojen perusteella. Tehtävissä myös pohditaan kuvan laatua eli sitä, onko kuva oikein vai väärin päin ja onko se todellinen kuva vai valekuva. Kuten jo luvussa 4.4 todettiin, näissä asioissa ei tutkimuksissa havaittu oppilailla vaikeuksia. Simulaatio ei pystykään

tarjoamaan mitään parempaa korvaavaa tai täydentävää oppimateriaalia linssi- tai peilisysteemin osien sijaintien tai kuvan laadun määrittämisen opiskeluun.

Simulaation eduksi kokeelliseen työskentelyyn verrattuna voidaan kuitenkin laskea säteiden konkreettinen havaitseminen. Kokeellisessa työskentelyssä meidän on mahdollista havainnoida vain ns. lopputulosta eli peilistä heijastuvaa tai linssin avulla muodostuvaa kuvaa. Simulaation avulla voidaan lisäksi nähdä valonsäteet ja sitä kautta yhdistää teoria ja käytäntö sekä nähdä konkreettisesti syy kuvan paikan määräytymiselle.

Kuten jo luvussa 4.4 todettiin, oppilaat sekoittavat fysikaalisia ilmiöitä kuvaavat mallit todelliseen elämään. Taittuva valo -simulaation laserin lähettämä valo voidaan valita nähtäväksi joko valoaaltona tai valon säteenä. Valinnan mahdollisuus korostaa sitä asiaa, että kyseessä on vain malli, jonka avulla valon taittumista voidaan mallintaa. Oppilaat eivät tutkimuksen mukaan myöskään ymmärrä, että mitkä tahansa kaksi sädettä riittävät kuvan paikan määrittämiseen, vaan he ajattelevat, että siihen tarvitaan juuri erityisiksi valonsäteiksi määritellyt säteet. Geometrinen optiikka -simulaatiossa kuvan määrittämisen apuna käytetyt säteet voidaan valita kolmesta vaihtoehdosta: erityisistä valonsäteistä, reunasäteistä tai satunnaisista linssiin osuvista säteistä. Satunnaiset säteet saadaan simulaatioon näkyville monta sädettä -valinnan takaa, jossa linssiin osuvat säteet määräytyvät sen mukaan, missä esine ja siitä lähtevät säteet ovat linssin paikkaan nähden.

Geometrinen optiikka -simulaation avulla voidaan tutkia todellisen kuvan ja valeskuvan muodostumista kuperalla linssillä. Kuten jo aikaisemmin todettiin, todellisen kuvan ja valeskuvan käsitteet sekoittavat oppilaita. Simulaatiolla voidaan havaita selvästi, miten valeskuvan muodostuu – kuten oppikirjoissakin on selkeästi todettu – kohtaan, jossa säteiden jatkeet leikkaavat toisensa.

Kummankaan kirjasarjan geometrisen optiikan teoriaosuudessa ei käsitellä varjostinta tai silmän roolia kuvan havaitsemisessa erikseen. Fysiikka 3 -kirjassa varjostin mainitaan ainoastaan, kun puhutaan valeskuvan näkymisestä. Physica 3 -kirja ei teoriaosuudessaan mainitse varjostinta lainkaan, mutta tehtävissä varjostimen paikan ja kuvan muodostumisen yhteyttä pohditaan kolmessa tehtävässä 17:sta. Erään tehtävän alakohdassa esimerkiksi kysytään, mitä kuvalle tapahtuu, kun varjostinta siirretään. Nämä tehtävät tarjoavat tilaisuuden varjostimen tehtävän pohtimiselle. Geometrinen optiikka -simulaatiosta on mahdollista valita käyttöön



varjostin. Sen varjostimella ei kuitenkaan ole mahdollista nähdä kuvan muodostumista varjostimelle tai varjostimen siirtämisen vaikutusta kuvan näkymiselle ja tarkkuudelle. Silmän paikan määrittämiseen kuvan näkymiseksi simulaatiolla ei ole tarjota työkaluja. Simulaatiolla ei pystytä myöskään kokeilemaan kuvan näkymistä tilanteessa, jossa osa linssistä peitetään. Näiden asioiden tutkimisessa kokeellinen työskentely siis tarjoaa simulaatiota paremman tuen oppimiseen.

Sekä Geometrinen optiikka että Taittuva valo -simulaatiolla pystytään tutkimaan linssin taitekertoimen vaikutusta valonsäteen taittumiseen. Geometrinen optiikka -simulaation avulla voidaan tutkia taitekertoimen ja kuvan muodostumisen välistä yhteyttä. Taittuva valo -simulaatio puolestaan antaa selityksen sille, miksi valonsäteet taittuvat linssissä ja miten lasin taitekero-roin valonsäteen taittumiseen vaikuttaa. Simulaation tutkimisen yhteyteen voidaan lisätä vielä kirjojen aiemmissa kappaleissa käsitelty Snellin laki, jotta saadaan matemaattinen yhtälö taitekertoimen vaikutukselle. Taitekertoimen vaikutuksen tutkimiseen simulaatiot antavat paremman oppimisympäristön kuin kirja. Asiaa voisi tutkia myös laboratoriotyöskentelyllä tai niin, että simulaatiolla täydennetään ja tuetaan laboratoriotyössä opittuja asioita.

Simulaatioiden vahvuus kokeelliseen työskentelyyn nähden on niiden visuaalisuus. Kokeellisessa työssä voidaan nähdä työssä esiintyvien muuttujien vaikutus kuvan tai heijastumisen muodostumiselle, mutta valonsäteitä laboratoriotyöskentelyssä ei voi nähdä. Säteet itse piirtämällä voisi tietysti saada vastaavanlaisen mallin, mutta simulaatio antaa mallin nopeammin ja helpommin. Geometrinen optiikka -simulaation heikkoutena on kuitenkin sen yksipuolisuus: se sisältää vain yhden kuperan linssin – ei siis koveraa linssiä eikä peilejä. Yhdellä linssillä ei pystytä mallintamaan tärkeitä sovelluksia, kuten mikroskooppia tai kaukoputkea. Simulaatiossa ei myöskään pääse muuttamaan linssin polttoväliä, joten sen käyttäminen esimerkiksi kirjassa esitettyjen tehtävien tarkistamiseksi tai tueksi on lähes mahdotonta. Simulaatiota voidaan kuitenkin käyttää materiaalina aiheen johdatteluun, jolloin oppilaat voivat tutustua kuvan muodostumisen periaatteisiin simulaation ja esimerkiksi PhET-projektin Internet-sivuilla simulaation alapuolella esitettyjen kysymysten ja opettajan ohjeistuksen avulla ennen varsinaista teoriaa.

# 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

## 7.1 Yhteenveto tutkimustuloksista

Tutkimuksessa perehdyttiin simulaatioiden hyödyntämiseen fysikaalisen ja geometrisen optiikan osa-alueiden opetuksessa. Tutkielmassa koottiin ensin yhteen eri tutkimuksissa havaittuja fysikaalisen ja geometrisen optiikan sisältöihin liittyviä virhekäsityksiä sekä kohtia, jotka on tutkimuksissa havaittu haastaviksi. Lisäksi käsiteltiin yleisesti opetusmenetelmiä, joiden avulla optiikkaan liittyviin opetuksen haasteisiin voitaisiin tarttua, ja tämän jälkeen perehdyttiin syvällisemmin näistä menetelmistä simulaatioihin. Käsiteltäväksi oli valittu kolme simulaatiota, joiden avulla pyrittiin vastaamaan tutkimuskysymyksiin.

Tutkimuksessa selvisi useita fysikaalisen ja geometrisen optiikan asioita, joiden oppimista simulaatioilla ja niiden tarjoamilla ilmiöiden visuaalisilla malleilla voidaan tukea ja tehostaa. Lisäksi havaittiin, että simulaatioiden avulla voidaan havainnoida erilaisten muuttujien vaikutusta ilmiöihin, kun taas kirjassa ei ole mahdollista esittää visuaalisesti kaikkia variaatioita. Simulaatioiden avulla on myös mahdollista nähdä optiikan ilmiöiden kaikki vaiheet toisin kuin kokeellisessa työskentelyssä, jossa valoallot jäävät näkemättä ja voidaan nähdä vain niiden varjostimelle muodostava kuva. Kokonaisuuden samanaikainen näkeminen auttaa muodostamaan selkeän kuvan koko ilmiöstä, kun oppilaiden ei tarvitse yhdistää näkemäänsä ilmiötä siihen ilmiön osaan, jota he eivät pysty havaitsemaan.

Tutkielmassa havaittiin, että simulaatioiden avulla on mahdollista saada vastauksia opiskeltavaan aiheeseen liittyviin kysymyksiin nopeammin kuin kokeellisella työskentelyllä. Korvaamalla osa kokeellisesta työskentelystä simulaatioilla voidaan saada siis aikaa muun oppiaineksen oppimiseen. Tutkielmassa huomattiin myös, että Aaltojen interferenssi -simulaatio tarjosi interferenssi-ilmiöiden opiskeluun vaivattomamman käyttökokemuksen. Siihen oli helpompaa tehdä erilaisia muutoksia kuin monimutkaiseen koejärjestelyyn. Kokeellisen työskentelyn eduksi on kuitenkin luettava sen muunneltavuus omaan käyttöön sopivaksi. Simulaatio on valmis alusta, jota voidaan sellaisenaan hyödyntää opetuksessa, mutta siihen ei pysty itse lisäämään haluttuja elementtejä. Esimerkkinä mainittakoon tässä tutkielmassa tutkittu Geometrisen optiikka -simulaatio, joka sisälsi vain yhden kuperan linssin – kahden kuperan linssin muodostaman linssisysteemin tutkiminen kyseisellä simulaatiolla on siis mahdotonta, jolloin joudutaan lopulta turvautumaan johonkin muuhun työtapaan. Simulaatiot eivät siis yksiselitteisesti ole kokeellista työskentelyä parempia tai tehokkaampia, vaan käsiteltävästä aiheesta ja

saatavilla olevista simulaatioista riippuen on punnittava kummankin työskentelytavan edut ja haitat ja valittava työtapa sen mukaan.

Tutkimusten mukaan geometrisessa ja fysikaalisessa optiikassa eniten vaikeuksia aiheuttavat käsitteelliset asiat, optiikoiden sekoittaminen sekä teorian soveltaminen käytäntöön. Fysikaalisessa optiikassa vaikeuksia tuottivat muun muassa aallonpituuden mittaaminen sekä matka- ja vaihe-eron käsitteet. Geometrisessa optiikassa valonsäteen käsite sekä varjostimen ja linsin tehtävät olivat osalle oppilaista epäselviä. Tässä tutkimuksessa havaittiin simulaatioiden ehkäisevän joidenkin tavallisimpien virhekäsityksien muodostumista: Aaltojen interferenssi -simulaatioissa voitiin esimerkiksi opiskella aallonpituuden mittaamista ja Geometrinen optiikka sekä Taittuva valo -simulaatiot kumpikin painottivat valonsäteiden olevan vain malli. Kaikkiin virhekäsityksiin ja opetuksen haasteisiin ei tutkituilla simulaatioilla voitu vastata olenkaan. Simulaatiot eivät sisältäneet esimerkiksi keinoa määrittää matka- ja vaihe-eroa tai tutkia varjostimen paikan vaikutusta kuvan muodostumiselle. Toisaalta tutkielmassa havaittiin, että simulaatioiden huolimaton opetukseen sisällyttäminen sisältää riskin virhekäsityksien muodostumisesta. Tämän takia onkin tärkeää, että opettaja on miettinyt tarkkaan, miten ja millaisiin tehtäviin simulaatiota oppitunnilla käytetään sekä millaista pohdintaa ja keskustelua oppilaiden kanssa on käytävä, jotta he muodostavat ilmiöstä oikeanlaisen käsityksen.

Tutkitut simulaatiot sopivat oppilaiden itsenäiseen käyttöön. Niitä voidaan käyttää aiheen johdatteluun tai kertaukseen koulun lisäksi myös kotona. Mikään simulaatioista ei kuitenkaan soveltunut suoraan kotitehtävien tarkastamiseen. Tutkitut simulaatiot sisältävät niin monia erilaisia työkaluja ja muuttujia, että oppilaiden on todennäköisesti vaikea käyttää niitä tehokkaasti oppimisensa tukena, jos heille ei ole tarjottu jonkinlaista ohjausta ja tietoa siitä, mitä niiden avulla olisi tarkoitus tehdä, nähdä ja tutkia. Opettajan tehtäväksi jää siis tarjota ohjeistus ja teoriakehys simulaation käyttöön.

Tutkimuksista selvisi erilaisia opetusmenetelmiä, joiden avulla optiikkaan liittyviä hankaluuksia voidaan selventää ja joiden avulla virhekäsityksiä voidaan korjata tai estää. Pohjaksi opetuksen kehittämiseksi todettiin, että opettaja tiedostaa jo esille tulleet vaikeat kohdat ja ennakkokäsitykset sekä pyrkii huomioimaan ne opetuksessaan. Opettajan on tärkeää tunnistaa virhekäsitykset ja auttaa oppilaita korjaamaan niitä. Tutkimuksessa havaittiin, että virhekäsitysten korjaamista ja niiden syntymisen estämistä voidaan auttaa keskusteluiden, ohjaavan opetuksen sekä kokeellisen työskentelyn lisäksi tehokkaasti myös hyvin valituilla simulaatioilla.

## 7.2 Jatkotutkimuksen aiheita

Luonnollisena jatkona tälle tutkielmalle voitaisiin tutkia näiden simulaatioiden vaikutusta oppilaiden oppimistuloksiin käytännön opetustilanteissa. Jatkotutkimuksen aiheeksi sopisi myös fyysikaalisen ja geometrisen optiikan simulaatioiden käyttöön tarjottavan ohjauksen oppimistuloksiin. Lisäksi voitaisiin kehittää olemassa olevia tai luoda uusia simulaatioita, jotta niiden avulla voitaisiin paremmin vastata optiikan oppimisessa havaittuihin haasteisiin ja ennakkokäsityksiin. Erityisesti geometrisessa optiikassa kaivataan simulaatioita, joissa olisi mahdollista tutkia myös koveria linsejä sekä erilaisia linssisysteemejä ja peilejä. Geometrisen optiikan simulaatiota voitaisiin myös kehittää niin, että varjostimella olisi siinä selkeä, todenmukainen tehtävä.

## LÄHTEET

- [1] Opetushallitus. Lukion opetussuunnitelman perusteet, 2003.  
[http://www.oph.fi/download/47345\\_lukion\\_opetussuunnitelman\\_perusteet\\_2003.pdf](http://www.oph.fi/download/47345_lukion_opetussuunnitelman_perusteet_2003.pdf)  
Viitattu 29.1.2017.
- [2] Opetushallitus. Lukion opetussuunnitelman perusteet, 2015.  
[http://www.oph.fi/download/172124\\_lukion\\_opetussuunnitelman\\_perusteet\\_2015.pdf](http://www.oph.fi/download/172124_lukion_opetussuunnitelman_perusteet_2015.pdf)  
Viitattu 29.1.2017.
- [3] B.S. Ambrose, P.S. Shaffer, R.N. Steinberg and L.C. McDermott. An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67 (2), 1999, pages 146–155.
- [4] F.M. Goldberg and L.C. McDermott. Student Difficulties in Understanding Image Formation by a Plane Mirror. *The Physics Teacher*, 24 (8), November 1986, pages 472–480.
- [5] F.M. Goldberg and L.C. McDermott. An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal of Physics*, 55 (2), February 1987, pages 108–119.
- [6] C.E. Wieman, K.K. Perkins, and W.K. Adams. Oersted Medal Lecture 2007: Interactive simulations for teaching physics: What works, what doesn't, and why. *American Journal of Physics*, 76 (4&5), 2008, pages 393–399.
- [7] W.K. Adams, S. Reid, R. LeMaster, S.B. McKagan, K.K. Perkins, M. Dubson and C.E. Wieman. A Study of Educational Simulations. Part I - Engagement and Learning. *Journal of Interactive Learning Research*, 19 (3), 2008, pages 397–419.
- [8] K.L. Duffin, W. Luo and J.A. Stravers. Lessons learned from using a web-based interactive landform simulation model (WILSIM) in a general educational physical geography course. *Journal of Geoscience Education*, 53 (5), 2005, pages 489–493.
- [9] K.-E. Chang, Y.-L. Chen, H.-Y. Lin and Y.-T. Sung. Effects of learning support in simulation-based physics learning. *Computers & Education*, 51 (4), 2008, pages 1486–1498.

- [10] D.T. Reamon and S.D. Sheppard. The role of simulation software in an ideal learning environment. In Paper presented at the ASME design engineering technical conferences, Sacramento, CA, 1997.
- [11] J. Swaak, W.R. van Joolingen and T. de Jong. Supporting simulation-based learning; the effects of model progression and assignments on definitional and intuitive knowledge. *Learning and Instruction*. 8 (3), 1998, pages 235–252.
- [12] Tapio Puolimatka. *Opetuksen teoria konstruktivismista realismiin*. Kustannusosakeyhtiö Tammi, 2002.
- [13] Päivi Tynjälä. *Oppiminen tiedon rakentamisena: Konstruktivistisen oppimiskäsityksen perusteita*. Kustannusosakeyhtiö Tammi, 2000.
- [14] Maijaliisa Rauste-von Wright, Johan von Wright ja Tiina Soini. *Oppiminen ja koulutus*. WSOY, 9. uudistettu painos, 2003.
- [15] Kari Uusikylä, Päivi Atjonen. *Didaktiikan perusteet*. WSOY, 1.-2. painos, 1999.
- [16] Jukka Hatakka, Heikki Saari, Jarmo Sirviö, Jouni Viiri. *Physica 3, Aallot*. SanomaPro, 4. uud. painos, 2013.
- [17] Heikki Lehto, Raimo Havukainen, Jukka Maalampi, Janna Leskinen. *Fysiikka 3, Aallot*. Kustannusosakeyhtiö Tammi, 2009.
- [18] K. Perkins, W. Adams, M. Dubson, N. Finkelstein, S.Reid, C. Wieman and R. LeMaster. PhET: Interactive Simulations for Teaching and Learning Physics. *The Physics Teacher*, 44 (1), 2006, pages 18–23.
- [19] C.E. Wieman, W.K. Adams, P. Loeblein, and K.K. Perkins. Teaching Physics Using PhET Simulations. *The Physics Teacher*, 48 (4), April 2010, pages 225–227.
- [20] E. Bozkurt and A. Ilik. The effect of computer simulations over students' beliefs on physics and physics success. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2 (2), 2010, pages 4587–4591.

- [21] K.B. Baltzis and K.D. Koukias. Using laboratory experiments and circuit simulation IT tools in an undergraduate course in analog electronics. *Journal of Science Education and Technology*, 18 (6), 2009, pages 546–555.
- [22] N. Rutten, W.R. van Joolingen, J.T. van der Veen. The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58 (1), 2012, pages 136–153.
- [24] W.K. Adams, S. Reid, R. Lemaster, S.B. McKagan, K.K. Perkins, M. Dubson and C.E. Wieman. A Study of educational simulations Part II – Interface design. *Journal of Interactive Learning Research*, 19 (4), 2008, pages 551–577.
- [23] M. Yaman, C. Nerdel and H. Bayrhuber. The effects of instructional support and learner interests when using computer simulations. *Computers & Education*, 51 (4), 2008, pages 1784–1794.
- [25] T. Jaakkola, S. Nurmi and K. Veermans. A Comparison of Students' Conceptual Understanding of Electric Circuits in Simulation Only and Simulation-Laboratory Contexts. *Journal of research in science teaching*, 48 (1), 2011, pages 71–93.
- [26] N.D. Finkelstein, W.K. Adams, C J. Keller, P.B. Kohl, K.K. Perkins, N.S. Podolefsky, and S. Reid. When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research* 1, 1 (1), 2005.
- [27] K. Wosilait, P.R.L. Heron, P.S. Shaffer and L.C. McDermott. Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. *American Journal of Physics Supplement*, 67 (7), 1999, pages S5–S15.
- [28] M. Kryjevskaja, M.R. Stetzer and P.R.L. Heron. Student difficulties measuring distances in terms of wavelength: Lack of basic skills or failure to transfer?. *American Physical Society*, 1 (1), (2013).
- [29] F.J.P. Palcious, F.N. Cazorla and A.C. Madrid. Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. *International Journal of Science Education*, 11 (3), July-September 1989, pages 273–286.

- [30] I. Galili, S. Bendall and F. Goldberg. The effects of prior knowledge and instruction on understanding image formation. *Journal of Research in Science Teaching*, 30 (3), 1993, pages 271–301.
- [31] P. Colin, F. Chauvet and L. Viennot. Reading images in optics: students' difficulties and teachers' views. *International Journal of Science Education*, 24 (3), 2002, pages 313–332.
- [32] J.A. Bryan and S.W. Slough. Converging lens simulation design and image predictions. *Physics Education*, 44 (3), 2009, pages 264–275.
- [33] "The Physics Education Technology" -projekti. Viitattu 25.1.2017.  
<https://phet.colorado.edu/>