



Co-funded by
the European Union

Laserid meditsiinis: kuidas valgus aitab haigusi diagnoosida



BIO4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





SISUKORD

· Sissejuhatus.....	
...2	
· Valgus- ja lasertehnoloogia alused.....	3
· Laseri ja koe interaktsiooni põhimõtted.....	5
· Lasertehnoloogia meditsiinilised diagnostilised rakendused.....	7
· Bioloogiliselt inspireeritud uuendused laserdiagnostikas.....	9
· Laserdiagnostika eelised ja piirangud.....	10
· Laserdiagnostika integreerimine haridusse: reaalse maailma klassiruumi projektid.....	12
· Teaduslikud alused liitreaalsuse integreerimiseks laserdiagnostika haridusse ..	14
· Kokkuvõte.....	15
· Ressursid.....	18





Väli	Sisu
Õppeteo üldine teema	Valgus, laserid ja meditsiiniline diagnostika
Õppeüksuse täpne nimetus	Laserid meditsiinis: kuidas valgus aitab haigusi diagnoosida
Sihtkasutaja vanus	14–18 aastat
Õppija eeltingimused	Põhiteadmised optikast (peegeldus/murdumine), inimese anatoomiast ja üldisest füüsikast/bioloogiast
Õppeüksuse kirjeldus	See interdistsiplinaarne üksus tutvustab õpilastele valguse ja laserite põhiprintsiipe ning uurib, kuidas neid tehnoloogiaid tänapäeva meditsiinis haiguste diagnoosimiseks kasutatakse. Õppeteo toob esile, kuidas laseri ja koe interaktsioone rakendatakse sellistes tehnikates nagu OCT, fluorestsentskuvamine ja mitteinvasiivne skaneerimine. Liitreaalsuse (AR) tööriistu kasutatakse optiliste nähtuste simuleerimiseks, võimaldades õpilastel visualiseerida laserkiire käitumist bioloogilistes süsteemides ja võimaldades praktilist uurimist diagnostiliste kontseptsioonide kohta, mis on inimsilmale tavaliselt nähtamatud.
Kaasatud subjektid	Füüsika, bioloogia, keemia, matemaatika
Märksõnad	Laserid, valguse ja koe interaktsioon, optika, diagnostika, liitreaalsus (AR), visualiseerimine, mitte-invasiivne pildistamine, bioinspiratsioon
Peamised oskused, võimed ja teadmised, mida on võimalik omandada	- Mõista, kuidas laserkiir interakteerub bioloogiliste kudedega (neeldumine, hajumine, fluorestsents)





Sissejuhatus:

Laserite kasutamine meditsiinis on viimastel aastakümnetel dramaatiliselt arenenud, võimaldades mitmesuguseid diagnostilisi ja terapeutilisi protseduure, mis on täpsed, minimaalselt invasiivsed ja sageli tavapärastest meetoditest paremad. Laser, mis on defineeritud kui seade, mis kiirgab valgust elektromagnetkiirguse stimuleeritud emissioonil põhineva optilise võimenduse protsessi abil, tekitab koherentseid, monokromaatilisi ja kõrgelt kollimeeritud valguskiiri. Need omadused võimaldavad erakordset kontrolli energia edastamise üle, muutes laserid ainulaadselt sobivaks bioloogiliste kudede ga suhtlemiseks nii makroskoopilisel kui ka mikroskoopilisel tasandil.

Meditsiinilises diagnostikas kasutatakse lasereid peamiselt nende võime tõttu pakkuda reaalajas, kõrge eraldusvõimega pildistamist ja biokeemilist analüüsi ilma koe eemaldamist nõudmata. Nende rakendused hõlmavad mitmesuguseid valdkondi, sealhulgas oftalmoloogiat, onkoloogiat, dermatoloogiat ja südame-veresoonkonna meditsiini. Näiteks optiline koherentstomograafia (OCT), mis kasutab madala koherentsusega lähiinfrapunalaservalgust, on muutunud oftalmoloogias standardseks pildistamisvahendiks, pakku des võrkkesta mikromeetri skaala ristlõikepilte (Barsom jt, 2016). Samamoodi võimaldab laserindutseeritud fluorestsents (LIF) tuvastada ebanormaalset koemetabolismi, analüüsides fluorestseeruvate molekulide emissioonispektrit, aidates kaasa vähi varajasele avastamisele (Albrecht jt, 2013).

Koe tasandil sõltub laseri ja aine interaktsioon suuresti bioloogiliste kromofooride, näiteks hemoglobiini, melaniini ja vee neeldumisspektritest. Laserlainepikkuse hoolika valiku abil saab sihtida spetsiifilisi koekomponente ümbritsevaid struktuure kahjustamata. Laservalguse mitteioniseeriv olemus muudab selle ka ohutumaks võrreldes ioniseerivate diagnostiliste meetoditega, nagu röntgenikiirgus või kompuutertomograafia, eriti korduva jälgimise või laste kasutamise korral (Zafar jt, 2021). Lisaks arenevad lasertehnoloogiad pidevalt, integreerudes optiliste andurite, fotoonika ja tehisintellektiga täiustatud pildisüsteemidega, et parandada diagnostilist täpsust, kiirust ja andmete tõlgendamist.

Tärkavas uurimistöös keskendutakse laserdiagnostika kombineerimisele spektroskoopiliste tehnikatega, nagu Ramani spektroskoopia, difuusse peegelduse spektroskoopia ja fotoakustiline pildistamine, mis võimaldavad in vivo anda molekulaarsel tasemel teavet. Need hübriidsüsteemid on paljulubavad mitteinvasiivsete "optiliste biopsiate" jaoks, mis võivad teatud kontekstides asendada traditsioonilist histopatoloogiat (De Miguel & Martínez, 2023). Tehnoloogia arenedes eeldatakse, et laserpõhised diagnostikasüsteemid muutuvad kompaktsemaks, taskukohasemaks ja intelligentsemaks, laiendades nende kättesaadavust nii kliinilistes kui ka kaugjuhtimise tingimustes.

Paralleelselt nende tehnoloogiliste edusammudega toimub ka järgmiste integratsioon:**Liitreaalsus (AR)** Biomeditsiinilise hariduse ja simulatsiooni keskkondadesse sisenemine pakub uusi viise keerukate optiliste nähtuste visualiseerimiseks, nendega suhtlemiseks ja nende mõistmiseks. Liitreaalsus võimaldab virtuaalsete objektide, näiteks laserkiirte, kudede, diagnostiliste seadmete või molekulaarsete reaktsioonide, reaalajas reaalsele maailmale kandmist, aidates õpilastel ja praktikantidel saada ruumilist ja funktsionaalset arusaama abstraktsetest protsessidest. Näiteks saab liitreaalsus simuleerida virtuaalset OCT-skannimist, kus kasutajad manipuleerivad lasersondiga inimsilma 3D-mudeli kohal ja jälgivad kiht-kihilt pildi genereerimist. Samamoodi saab fluorestsentsil põhinevaid laserinteraktsioone visualiseerida värviliste kihtide abil, mis näitavad koe metaboolseid või struktuurilisi muutusi. Need kogemused ulatuvad staatilistest illustatsioonidest või videotest kaugemale, võimaldades dünaamilist manipuleerimist, tagasisidet ja reaalajas uurimist – funktsioone, mis on näidanud, et suurendavad oluliselt õpimotivatsiooni ja meeldejätmist (Akçayır & Akçayır, 2017; Bacca jt, 2014).





Lisaks saab liitreaalsus toetada interdistsiplinaarseid seoseid, illustreerides, kuidas loodusest inspireeritud visuaalsed süsteemid, näiteks polarisatsioonitundlikkus mantiskrevettidel või liblikatiibade nanostruktuurid, on mõjutanud laserdiagnostika disaini. Hästi disainitud liitreaalsuse õpikeskkonnas saavad õpilased virtuaalselt uurida nii bioloogilist organismi kui ka selle tehnoloogilist vastet kõrvuti, parandades arusaamist bioinspiratsioonist kui disainipõhimõttest. Selline interaktsioon soodustab mitte ainult kontseptuaalset õppimist, vaid ka süsteemset mõtlemist ja loomingulist probleemide lahendamist. Laserdiagnostika ja liitreaalsusega täiustatud visualiseerimise ühinemine kujutab endast võimsat platvormi hariduseks, koolituseks ja avastamiseks, pakkudes õppijatele võimalust aktiivselt uurida valguse ja elu nähtamatuid, kuid fundamentaalseid vastastikmõjusid.

1. Valgus- ja lasertehnoloogia põhitõed

1.1 Valguse olemus

Valgus on elektromagnetkiirguse vorm, mis käitub nii lainena kui ka osakesena (footonina). See hõlmab lainepikkuste spektrit, alates suure energiaga gammakiirgusest ja röntgenkiirgusest kuni väikese energiaga raadiolaineteni. **Nähtav spekter**, mis jääb vahemikku ligikaudu 400–700 nanomeetrit (nm), tähistab elektromagnetilise spektri osa, mida inimsilmaga on võimalik tuvastada. Iga lainepikkus vastab teatud värvile, alates violetsest (lühem lainepikkus) kuni punaseni (pikem lainepikkus). Paljude meditsiiniliste diagnostiliste rakenduste puhul **aganähtamatute lainepikkuste**, eriti **lähiiinfrapuna (NIR, 700–1400 nm)** ja **ultraviolet (UV, <400 nm)**, on oma spetsiifilise interaktsiooni tõttu bioloogiliste kudede efektiivsemad (Barsom jt, 2016).

Valguse vastastikmõju ainega, eriti bioloogilise koega, sõltub sellistest omadustest nagu **imendumine, hajumine, peegeldus ja edasikandumine**. Need interaktsioonid mõjutab kudede molekulaarne koostis ja struktuur ning need varieeruvad sõltuvalt lainepikkusest. Näiteks lähiiinfrapunavalgus suudab tungida kudedesse mitu millimeetrit minimaalse neeldumisega, mistõttu on see eriti kasulik **süvakudede pildistamine ja verevoolu analüüs** (Zafar jt, 2021).

1.2 Mis on laser?

Alaser—Valguse võimendamine stimuleeritud kiirguse abil — on seade, mis kiirgab valgust optilise võimendamise teel. Erinevalt tavalistest valgusallikatest, mis kiirgavad mittekoherentset ja laia spektriga valgust, tekitab laser kiire, mis on:

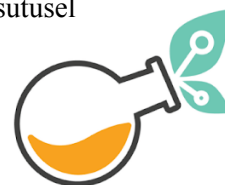
- **Monokromaatiline**: koosneb ühest lainepikkusest või värvist,
- **Sidus**: valguslained on faasis, liikudes samas suunas,
- **Kollimeeritud**: kiir püsib kitsas ja fokuseeritud pikkade vahemaade tagant.

Need omadused võimaldavad laseritel edastada kontsentreeritud energiat täpselt, muutes need eriti kasulikuks nii **diagnostilise** ja **terapeutilise** meditsiinilised rakendused. Laservalgust saab suunata konkreetsetele kudedele ilma külgnevaid piirkondi mõjutamata, võimaldades sihipäraseid sekkumisi rakulisel või subtsellulaarsel tasandil (Akçayır & Akçayır, 2017; Albrecht jt, 2013).

1.3 Meditsiinis kasutatavate laserite tüübid

Laserid erinevad valguse tekitamiseks kasutatava keskkonna poolest, mis mõjutab nende lainepikkust ja energiasisaldust. Peamised tüübid on järgmised:

- **Gaasilaserid** (nt argoon, CO₂): Kasutatakse sageli oftalmoloogias ja dermatoloogias. Argoonlaserid kiirgavad sinakasrohelist valgust, mis on kasulik võrkkesta fotokoagulatsiooniks.
- **Tahkisilaserid** (nt Nd:YAG): Toodavad lähiiinfrapunavalgust, mida kasutatakse laialdaselt kudede ablatsiooniks, koagulatsiooniks ja pildistamiseks.
- **Diodilaserid**: Kompaktne, tõhus ja häälestatav kogu NIR-vahemikus. Üha enam kasutusel kaasaskantavates diagnostikaseadmetes.





- **Eksimerlaserid**(UV-vahemik): Kasutatakse refraktiivsete silmaoperatsioonide, näiteks LASIKi puhul, kuna need eemaldavad sarvkesta kude täpselt ümbritsevad piirkondi kahjustamata. Seelaine pikkus määrab, millise koe või molekuliga laser interakteerub. Näiteks melaniin ja hemoglobiin neelavad nähtavat valgust tugevalt, samal ajal kui vesion infrapunakiirguse peamine neeldaja (Bacca jt, 2014).

1.4 Laseri ja koe interaktsioon diagnostikas

Lasери diagnostiline väärtus põhineb selle interaktsioonil koega. Diagnostilised laserid töötavad tavaliselt väike energiatarveet vältida kahjustusi, maksimeerides samal ajal optiliste signaalide kaudu andmete hankimist. Levinud interaktsioonimehhanismide hulka kuuluvad:

- **Elastne hajumine** Valgus peegeldub kudedelt energiat muutmata, seda kasutatakse sellistes tehnikates nagu hajus optiline pildistamine.
- **Elastne hajumine**(Ramani efekt): Valgus kaotab või saab energiat, paljastades molekulaarse koostise – kasulik järgmistel juhtudel: **Ramani spektroskoopia**.
- **Fluorestsents** Valgus ergastab koemolekule, mis kiirgavad sekundaarset valgust. Seda rakendatakse **Laserindutseeritud fluorestsents (LIF)** ebanormaalse ainevahetusaktiivsuse tuvastamiseks.
- **Häired** Kasutatakse järgmistes kohtades: **Optiline koherentstomograafia (OCT)** sisemiste struktuuride rekonstrueerimiseks peegeldunud laine faasinihete põhjal (Barsom jt, 2016).

Nende interaktsioonide mõistmine võimaldab teadlastel ja arstidel kujundada **mitteinvasiivsed diagnostikavahendid** mis suudab tuvastada selliseid haigusi nagu vähk, kollatähni degeneratsioon ja südame-veresoonkonna haigused ilma kudesid lõikamata või proove võtmata.

1.5 Valguspõhiste meditsiinitehnoloogiate tulevikutrendid

Konvergens **fotoonika, biosensori ja Tehisintellekti** viib laserdiagnostika uutele tasanditele. **Miniaturised optilised kiibid, multimodaalsed pildisüsteemid ja nutikad kantavad lasersensorid** arendatakse süsteeme, mis jälgivad reaajas biomarkereid, näiteks glükoosi, laktaadi või hapniku taset läbi naha (Zafar jt, 2021; De Miguel ja Martínez, 2023). Need süsteemid kasutavad nii lasertäpsust kui ka intelligentset andmetöötlust, et tuua diagnostika lähemale ravile ja isegi kodukeskkonnale.

Paralleelselt **haridus ja koolitus lasertehnoloogiate alal** täiustatakse kaasahaaravate tööriistade abil, näiteks **Liitreaalsus (AR)** Laseri ja koe interaktsioonide, kiire omaduste ja molekulaarmudelite lisamisega 3D-simulatsioonidele saab liitreaalsus anda kogemusliku arusaama keerukatest optilistest põhimõtetest. See on eriti väärtuslik õppijatele, kes puutuvad esimest korda kokku selliste mõistetega nagu hajumine, koherentsus või spektraalne neeldumine (Akçayır & Akçayır, 2017).

2. Laseri ja koe interaktsiooni põhimõtted

2.1 Interaktsioonimehhanismide ülevaade

Kui laserkiir interakteerub bioloogilise koega, võib toimuda mitu füüsikalist protsessi, mis sõltuvad koetüübist, laseri lainepikkusest, energiast, impulsi kestusest ja säritusajast. Neli peamist interaktsioonimehhanismi on:

- **Imendumine**: footonid neelavad koes olevad molekulid (kromofoorid);
- **Hajumine**: valgus suunatakse ümber, kui see läbib kude;
- **Peegeldus** Osa langevast valgusest peegeldub pinnalt tagasi;
- **Edasikandumine** Osa valgusest läbib koe täielikult.





Need interaktsioonid ei välista teineteist ja esinevad sageli samaaegselt, mõjutades laseri tungimise sügavust ja diagnostiliste või terapeutiliste efektide tekkimist. Nende protsesside mõistmine ja kontrollimine on ohutute ja tõhusate laserpõhiste diagnostikavahendite väljatöötamisel hädavajalik (Barsom jt, 2016; Zafar jt, 2021).

2.2 Kromofooride roll ja sõltuvus lainepikkusest

Kudede reaktsioon laserkiirele sõltub suuresti järgmiste tegurite olemasolust: **kromofoorid**—molekulid, mis neelavad teatud lainepikkusi. Bioloogilises koes leiduvate peamiste kromofooride hulka kuuluvad:

- **Hemoglobiin**(neeldub nähtavas vahemikus),
- **Melaniin**(lai neeldumine UV-st NIR-kiirguseni),
- **Vesi**(tugev neeldumine keskmises ja kaug-infrapunas).

Seega on laserlainepikkuse valik kriitilise tähtsusega. Näiteks rohelised ja sinised laserid (lainepikkused umbes 488–532 nm) neelduvad hemoglobiini poolt kergesti, mistõttu sobivad need ideaalselt veresoonte visualiseerimiseks ja sihtimiseks. Lähiiinfrapunavalgus (700–1400 nm) tungib madalama neeldumise ja hajumise tõttu sügavamale kudedesse, mistõttu sobib see hästi nahaaluste struktuuride, näiteks **Optiline koherentstomograafia (OCT)**või **Laser-Doppleri voolumõõtmine (LDF)**(Albrecht et al., 2013; De Miguel & Martínez, 2023).

2.3 Diagnostilise ja terapeutilise koostoime läved

Laseri ja koe interaktsioonis **energiatasemäng**ib määravat rolli selle kindlaksmääramisel, kas toime on diagnostiline või terapeutiline. Diagnostilised rakendused nõuavad **madala energiatarbega, mittepurustav** interaktsioonid, mis annavad optilisi signaale ilma rakke või kude kahjustamata. Need signaalid võivad hõlmata järgmist:

- **Elastne hajumine**, kasutatakse hajusa peegelduse ja OCT-i puhul;
- **Fluorestsents**, mida kasutatakse LIF-is ainevahetuse või vähi avastamiseks;
- **Ramani hajumine**, mida kasutatakse molekulaarsete koostiste tuvastamiseks mitteelastse footoni nihke abil.

Seevastu terapeutilised toimed, näiteks **fotokoagulatsioon**, **ablatsioon** või **fotomehaaniline häire** toimuvad kõrgematel energiatasemetel ja sõltuvad sageli koe termilistest või mehaanilistest muutustest (Zafar jt, 2021).

2.4 Valguse hajumine ja kujutise sügavus

Hajumine toimub siis, kui footonid muudavad suunda koe mikrostruktuuridega, näiteks rakumembraanide või organellidega, interaktsiooni tõttu. **hajumistegur** Sõltub lainepikkusest ja koe heterogeensusest. Lühemad lainepikkused (nt sinine valgus) hajutavad rohkem, vähendades pildi sügavust, kuid parandades eraldusvõimet pinna lähedal. Vastupidi, **pikemad lainepikkused** (nt lähiiinfrapunakiirgus) hajuvad vähem ja tungivad sügavamale, ehkki väiksema ruumilise eraldusvõimega.

See kompromiss on optilise diagnostika puhul oluline disainiväljakutse. Sellised tehnoloogiad nagu **ajaliselt lahendatud spektroskoopia**, **sagedusdomeeni pildistamine** ja **multifootonmikroskoopia** kasutavad hajumiskäitumist kasulike diagnostiliste signaalide eraldamiseks kudedest erinevatel sügavustel (Barsom jt, 2016).

2.5 Rakendused optilises biopsias ja reaajas jälgimises

Laseri ja koe interaktsioon on samuti aluseks järgmiste ravimite väljatöötamisele: **mitteinvasiivsed optilised biopsiad**—tehnikad, mis annavad molekulaarset või struktuurilist teavet ilma kude lõikamata või eemaldamata. Nende hulka kuuluvad:





- **Ramani spektroskoopia**, mis jäädvustab kudede keemilisi sõrmejälgi in vivo;
- **Fotoakustiline pildistamine**, mis kasutab laserindutseeritud ultrahelilaineid hübriidsete optilis-akustiliste kujutiste loomiseks;
- **Laser-Doppleri voolumõõtmine**, mis tuvastab mikrovaskulaarset verevoolu, kasutades Doppleri nihkeid tagasihajunud valguses.

Selliseid tööriistu kasutatakse üha enam onkoloogias, neuroloogias ja dermatoloogias ning neid uuritakse reaajas voodiäärse diagnostika jaoks (De Miguel & Martínez, 2023).

2.6 Ohutuskaalutlused ja doosimeetria

Laseri ja koe interaktsiooni oluline aspekt on ohutute kiirgustasemete säilitamine. **Dosimeetria**, koe poolt neeldunud energia arvutamine ja mõõtmine on diagnostilistes rakendustes oluline, et vältida tahtmatuid termilisi või mehaanilisi kahjustusi. Ohutusstandardid on määratletud selliste asutuste poolt nagu **Ameerika Riiklik Standardiinstituut (ANSI)** ja **Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon (IEC)**. Need standardid liigitavad laserid ohutusklassidesse vastavalt võimsusele ja riskitasemele, juhendades nende kasutamist kliinilistes ja hariduslikes keskkondades.

Silmade ja naha kaitsmine, täpne lainepikkuse valik ja säriaja kontroll on nii kliinilises praktikas kui ka üliõpilaste koolituskeskkondades üliolulised. Tärkavad AR-põhised simulatsiooniplatvormid võimaldavad kasutajatel nüüd neid interaktsioone ohutult virtuaalses ruumis uurida, tugevdades doosimeetria põhimõtteid ilma füüsilise riskita (Akçayır & Akçayır, 2017).

3. Lasertehnoloogia meditsiinilised diagnostilised rakendused

3.1 Laserpõhise diagnostika ülevaade

Laserpõhine diagnostika rakendab valguse täpset, lainepikkusepõhist interaktsiooni kudedega, et tuvastada, kuvada ja analüüsida füsioloogilisi ja patoloogilisi seisundeid. Need meetodid on **mitte-invasiivne**, pakkumine **kõrge ruumiline eraldusvõime** ja saab pakkuda **reaajas funktsionaalsed ja struktuurilised andmed** Koekromofooride sihtimise ja selliste optiliste nähtuste nagu hajumine, fluorestsents ja Doppleri nihked ärakasutamise abil võimaldavad need tehnoloogiad arstidel jälgida haiguse progresseerumist, suunata kirurgilisi protseduure ja panna varajane diagnoos patsientidele minimaalse ebamugavusega (Barsom jt, 2016; Zafar jt, 2021).

3.2 Optiline koherentstomograafia (OCT)

ÜMT on üks enimkasutatavaid laserpõhiseid diagnostikavahendeid, eriti oftalmoloogias. See kasutab madala koherentsusega lähiinfrapunavalgust, et luua kudede mikrostruktuuridest kõrge eraldusvõimega ristlõikepilte. Tehnika põhineb **interferomeetria**, kus erinevatest koe sügavustest pärinevat tagasihajunud valgust võrreldakse võrdluskiiirega, genereerides detailseid kujutisi, mis on struktuurilt sarnased ultraheliga, kuid kasutavad heli asemel valgust. OCT abil saab visualiseerida võrkkesta kihte, tuvastada kollatähni degeneratsiooni ja jälgida glaukoomi progresseerumist mikromeetri täpsusega.

Lisaks oftalmoloogiale kasutatakse OCT-d üha enam ka teistes haigustes. **kardioloogia** (nt koronaarterite naastude pildistamine) **dermatoloogia** (nahavähi sõeluuring) ja **hambaravi** (emaili hindamiseks või kaariese tuvastamiseks) (Albrecht jt, 2013). Selle **kontaktivab** aikiire pildistamine muudab selle eelistatud tööriistaks õrnade või tundlike anatoomiliste piirkondade jaoks.

3.3 Laserindutseeritud fluorestsents (LIF)

Laserindutseeritud fluorestsents (LIF) on diagnostiline meetod, mis hõlmab koe ergastamist laseriga fluorestsentsi esilekutsumiseks. See emissioon võib pärineda looduslikult esinevatest ainetest (endogeensetest fluorofooridest), näiteks **NADH**, **FAD** või **porfüriinid** või väliselt pealekantud





fluorestseeruvatest markeritest. **fluorestsentsi intensiivsus ja spektraalne nihe** peegeldavad koe biokeemilist koostist, võimaldades tuvastada **metaboolne aktiivsus, kasvaja piirid** või **bakteriaalsed biokiled**.

LIF on näidanud paljulubavaid tulemusi **eelvähilised kahjustused**, näiteks suuõõnes või emakakaelas, ja seda kasutatakse intraoperatiivselt kasvaja resektsooni juhtimiseks. Selle peamised eelised on **kiire signaali omandamine, kõrge tundlikkus** ja võime **jälgida ainevahetuse dünaamilisi muutusi** (Zafar et al., 2021; De Miguel & Martínez, 2023).

3.4 Laser-Doppler voolumõõtmine (LDF)

Laser-Doppleri voolumõõtmine mõõdab mikrovaskulaarset verevoolu Doppleri efekti abil. Kui väikese võimsusega laser valgustab liikuvaid punaseid vereliblesid, siis hajunud valguse sagedus muutub proportsionaalselt verevoolu kiiruse ja mahuga. Seejärel töödeldakse neid andmeid, et luua kaarte. **koe perfusioon, põletik** või **haavade paranemise dünaamika**.

LDF-i kasutatakse laialdaselt **põletuse hindamine, perifeersete arterite haiguse jälgimine** ja **diabeetilise jala skriining**, pakkudes kliinikutele mitteinvasiivset meetodit mikrotsirkulatsiooni funktsiooni hindamiseks reaalajas (Barsom jt, 2016). Hiljutised edusammud on parandanud LDF-i ruumilist eraldusvõimet ning hübriidsüsteemid ühendavad nüüd LDF-i termopildistamise või lähiinfrapunaspektroskoopiaga multimodaalse diagnostika jaoks.

3.5 Ramani spektroskoopia

Kuigi see on alles kliinilises arendusjärgus, **Ramani spektroskoopia** on kujunemas väärtuslikuks laserpõhiseks tööriistaks **molekulaarsel tasemel diagnostika**. See tugineb laserkiire mitteelastsele hajumisele, kus hajutatud footonite energia nihked paljastavad koos olevate molekulide vibratsioonirežiimid. Kuna iga molekul tekitab unikaalse spektraalse sõrmejälje, suudab Ramani spektroskoopia eristada terveid ja vähikoed isegi varajases staadiumis.

Tehnikat on testitud **ajukasvaja piiritlemine, nahavähi avastamine** ja **suuõõne sõeluuring**, pakkudes kõrget keemilist spetsiifilisust ilma värvainete või kontrastainete vajaduseta. Koos fiiberoptiliste sondide ja miniatuursete seadmetega integreeritakse Ramani süsteeme **voodi diagnostika platvormid** ja **robotkirurgia** keskkonnad (De Miguel & Martínez, 2023).

3.6 Fotoakustiline pildistamine

Fotoakustiline pildistamine on hübriidtehnika, mis ühendab laseroptika ja ultraheli. Lühikesed laserimpulsid neelduvad koekromofoorides, põhjustades **kiire soojuspaisumine** ja põlvkond **akustilised lained**. Seejärel tuvastavad ultraheliandurid need lained, et rekonstrueerida selliste struktuuride suure kontrastsusega kujutisi nagu **veresooned, kasvaja** või **hapniku küllastuse mustrid**.

See meetod võimaldab süvakudede pildistamist optilise kontrastiga ja on eriti kasulik järgmistel juhtudel: **onkoloogia** ja **veresoonte pildistamine**, sealhulgas varajane avastamine **rinnavähk, melanoom** ja **aterosklerootilised naastud**. Fotoakustilisi süsteeme arendatakse ka pihuarvutite diagnostikavahendite ja kantavate andurite jaoks (Zafar jt, 2021).

3.7 Laserdiagnostika eelised kliinilises keskkonnas

Laserdiagnostikal on mitmeid eeliseid:

- **Kõrge eraldusvõime ja tundlikkus** võimeline avastama haigust varajases staadiumis,
- **Mitteinvasiivne ja valut**, parandades patsientide ravijärgimist,
- **Reaalajas jälgimine** kasulik kirurgiliste sekkumiste ajal,
- **Ei ioniseerivat kiirgust**, muutes need korduval kasutamisel ohutumaks,
- **Kaasaskantav ja skaleeritav**, potentsiaaliga kaug- ja kohapealsete rakenduste jaoks.





Lisaks täiustatakse paljusid neist süsteemidest järgmiste funktsioonidega: **masinõppe algoritmid**, mis võimaldab automatiseeritud mustrituvastust ning kiiremat ja täpsemat diagnostikat. Need intelligentised lasersüsteemid kujutavad endast nihet **personaalmeditsiin**, kus diagnostika on kiirem, täpsem ja kohandatud individuaalsetele bioloogilistele profiilidele (Albrecht jt, 2013).

4. Bioinspireeritud uuendused laserdiagnostikas

4.1 Sissejuhatus bioinspireeritud disaini

Bioinspiratsioon, mida nimetatakse ka biomimikriaks, on bioloogiliste süsteemide, protsesside ja organismide uurimise praktika, et inspireerida uute materjalide, tehnoloogiate ja lahenduste väljatöötamist inimkonna ees seisvatele probleemidele. Meditsiinilise diagnostika, eriti laserpõhiste tehnoloogiate valdkonnas on loodus osutunud hindamatuks eeskujuks. Paljud loomad on välja töötanud spetsiaalsed optilised süsteemid valguse tuvastamiseks, manipuleerimiseks ja tõlgendamiseks ellujäämise, navigeerimise, jahipidamise või kamuflaazi eesmärgil. Need evolutsioonilised kohandused pakuvad uusi lähenemisviise valguse tuvastamisele, pildistamisele ja juhtimisele, mida saab konstrueeritud süsteemides korrata ja täiustada (Vincent et al., 2006).

4.2 Mantis-krevett ja polarisatsioonitundlik pildistamine

Seemantis krevettomab üht looduses teadaolevalt arenenumat nägemissüsteemi. See suudab tuvastada lineaarset ja ringpolariseeritud valgust ning ultraviolettkiirgust. Selle liitsilmad sisaldavad kuni **16 tüüpi fotoretseptorirakke**, võrreldes inimestega, kus see on vaid 3. See polarisatsioonitundlikkus võimaldab krevettidel tuvastada peeneid erinevusi pinna struktuuris ja varjatud saaki või kiskjaid sogases vees. Insenerid ja füüsikud on seda võimet jäljendanud, et arendada **polarisatsioonitundlikud optilised seadmed**, eriti vähidiagnostikas. Kasvajakoed hajutavad ja polariseerivad valgust sageli erinevalt kui terved koed, mis on tingitud rakkude paigutuse ja tiheduse erinevustest. Inspireerituna palverännaku silmastruktuurist on teadlased loonud **kompaktsed, polarisatsioonipõhised pildisensorid**...võimelised tuvastama varajases staadiumis vähki parema kontrastsuse ja spetsiifilisusega (Pang jt, 2016; Zafar jt, 2021). Neid andureid saab integreerida endoskoopidesse või pihuarvutitesse diagnostikavahenditesse, mis võimaldab kliinilistes tingimustes kudede mitteinvasiivset uurimist.

4.3 Liblikatiivad ja nanostruktuuriga biosensorid

Liblikad, näiteks **Morfo** perekonda kuuluvad liigid on erksate, metallikvärvidega, mis pole tingitud pigmentatsioonist, vaid hoopis...**nanostruktuurid**nende tiivasoomustel, mis peegeldavad ja hajutavad valgust. Need mikrostruktuurid interakteeruvad valgusega interferentsi, difraktsiooni ja selektiivse peegelduse kaudu. Nende võime muuta valgust nanoskoopilisel tasandil on inspireerinud disaini **optilised biosensorid** ja **footonkristallid**.

Need bioloogiliselt inspireeritud materjalid suudavad tuvastada väikseid muutusi **murduisnäitajapinnast**, mis sageli tekib siis, kui biomolekulid, näiteks glükoos, antikehad või vähi markerid, seonduvad andurite pindadega. Liblikate nanostruktuure jäljendades on teadlased välja töötanud **kolorimeetrilised biosensorid** mis muudavad värvi vastusena bioloogilisele seondumisele, võimaldades reaajas visuaalset diagnostikat ilma elektrienergia või keerukate näidikuteta (Kolle jt, 2010). Sellised süsteemid sobivad ideaalselt ravikohaseks testimiseks väheste ressursse vajavates keskkondades.

4.4 Öised loomad ja valguse võimendamise süsteemid

Paljud ööloomad, näiteks **kassid, öökullid ja süvamere kalad**, on välja arendanud anatoomilised kohandused, mis parandavad nägemist hämaras. Selliste loomade nagu kasside peamine omadus on **läikiv**





vaip, võrkkesta taga asuv peegeldav kiht, mis peegeldab valgust tagasi läbi fotoretseptorite, suurendades footonite neeldumise tõenäosust ja parandades öist nägemist.

See põhimõte on kantud ka toote disaini. **valgusefektiiivsed võrkkesta pildistamissüsteemid**, näiteks need, mida kasutatakse hämaras valguses **silmapõhja fotograafiajaadaptiivne optika skaneeriv laseroftalmoskoopia**. Need instrumendid maksimeerivad hajutatud ja peegeldunud valguse kogumist võrkkesta kihtidest, vähendades intensiivse valgustuse vajadust ning parandades seeläbi patsiendi mugavust ja ohutust diagnostilise pildistamise ajal (Barsom jt, 2016).

4.5 Bioloogiliselt inspireeritud optilised katted ja valguse manipuleerimine

Loodus on inspireerinud uuendusi ka optiliste katete ja valguse juhtimise valdkonnas. **peegeldusvastased katted** Näiteks ööliblikate silmades leiduvad valgud moodustuvad mikroskoopilistest pinnamustritest, mis summutavad peegeldust laias lainepikkuste vahemikus. Seda omadust on kopeeritud, et toota **biomimeetilised peegeldusvastased kiled**. Kasutatakse lasersensorsüsteemides, parandades signaali selgust, vähendades taustvalguse interferentsi.

Samamoodi **kapeajalgsete perekond**(nt kalmaarid ja kaheksajalad) kasutab **aktiivne kamuflaaz** dünaamiliselt muutes peegeldavate valkude paigutust nahas. Need bioloogilised footonsüsteemid on inspireerinud **häälestatavad laserkomponendid**, nutikad filtrid ja andurid, mis suudavad kohaneda erinevate keskkonna- või diagnostiliste tingimustega (Tian jt, 2019).

4.6 Hariduslik integratsioon ja AR visualiseerimine

Bioinspiratsiooni kaasamine laserdiagnostika õppesse pakub ainulaadset interdistsiplinaarset sild **bioloogia, füüsika, inseneriteadus ja disaini mõtlemine**. Liitreaalsus (AR) pakub võimsat platvormi nende seoste visuaalseks uurimiseks. Näiteks saavad õpilased suhelda **3D-mudelid** palverännaku silmast ja näha kohe, kuidas polarisatsioonitundlikud andurid seda võimet kasvaja tuvastamisel jälgendavad. Samamoodi saavad AR-keskkonnad simuleerida **valguse hajumine liblika tiiva soomustel** või demonstreerida valguse peegeldumist läbi tapetum lucidum kihi, võimaldades õppijatel mehhanisme ise kogeda (Akçayır & Akçayır, 2017; De Miguel & Martínez, 2023).

Selline integratsioon mitte ainult ei süvenda kontseptuaalset mõistmist, vaid stimuleerib ka loomingulist probleemide lahendamist ja süsteemset mõtlemist – oskusi, mis on biomimeetiliste tehnoloogiate ja meditsiinitehnika innovatsiooni jaoks kriitilise tähtsusega.

5. Laserdiagnostika eelised ja piirangud

5.1 Laserpõhise diagnostika eelised

Laserpõhisel diagnostikal on traditsiooniliste pildistamis- ja sensoritehnoloogiate ees lai valik eeliseid. Nende peamine eelis seisneb selles, **ettäpsus ja selektiivsus** valguse ja koe interaktsioonist, mille võimaldab laser **monokromaatiline, koherentne ja kollimeeritud** loodus. Need omadused võimaldavad väga fokuseeritud kiirtel sihtida spetsiifilisi bioloogilisi struktuure minimaalse difusiooniga, mis võimaldab analüüsida või pildistada kudesid kohapeal. **mikroskoopilisel või molekulaarsel tasandil** (Barsom jt, 2016).

Üks suur eelis on **mitteinvasiivsus**. Sellised meetodid nagu optiline koherentstomograafia (OCT), laser-Doppler voolumeetria (LDF) ja laserindutseeritud fluorestsents (LIF) ei nõua koe eemaldamist ega kokkupuudet nahaga, vähendades nakkusohtu ja patsiendi ebamugavustunnet. Need vahendid on eriti kasulikud tundlikes piirkondades nagu silm, aju ja limaskestad (Zafar jt, 2021).

Laserdiagnostika on tuntud ka järgmiste omaduste poolest: **kõrge ruumiline ja ajaline lahutusvõime**. Näiteks OCT pakub mikromeetri tasemel ristlõikekujutist kiirusel, mis on piisavalt suur reaajas visualiseerimiseks, mis on kriitilise tähtsusega sellistes rakendustes nagu võrkkesta skaneerimine ja intraoperatiivne juhtimine (Albrecht jt, 2013). Lisaks töötavad lasersüsteemid sageli ilma **ioniseeriv**



kiirguserinevalt röntgen- või kompuutertomograafiast, mistõttu needohutum korduvaks kasutamiseks, eriti laste ravis või krooniliste haiguste jälgimisel.

Kaasaegsed laserpõhised seadmed muutuvad ühase, mobiilne ja automatiseeritud tänu edusammudele pooljuhtlaserid, fiiberoptikajamasinõppe algoritmid. Need uuendused avavad uks ravikoha diagnostikaisegi väheste ressursse nõudvates või kaugjuhtimisega keskkondades (Le jt, 2023). Kaasaskantavad Ramani süsteemid ja käeshoitavad OCT-seadmed on näited sellest, kuidas laserdiagnostika liigub laboritest välja reaalsesse kliinilisse keskkonda.

Lisaks integreerub laserdiagnostika hästi järgmistesse valdkondadesse: liitreaalsus (AR) ja arvutipõhised pildisüsteemid, mis veelgi parandab nende hariduslikku ja kliinilist kasutatavust. AR-kihtide abil saab reaajas skaneerimise ajal visuaalselt esile tõsta probleemseid valdkondi või suunata kasutajaid optimaalsete lasersätete osas, parandades nii arstide kui ka praktikantide kasutatavust (Akçayır & Akçayır, 2017).

5.2 Piirangud ja tehnilised väljakutsed

Vaatamata paljudele eelistele on laserpõhistel diagnostikasüsteemidel katehnilised, bioloogilised ja praktilised piirangud.

Üks peamine piirang on kudede penetratsiooni sügavus, mida piirab põhimõtteliselt valguse hajumine ja neeldumine. Kuigi lähiinfrapunalaaserid suudavad tungida pehmetesse kudedesse mitu millimeetrit, on need sügavate organite või tihedate struktuuride, näiteks luude, pildistamisel vähem efektiivsed. See muudab need vähem sobivaks terviklikuks sisemiseks pildistamiseks võrreldes selliste meetoditega nagu MRI või KT (Barsom jt, 2016).

Lisaks, kudede heterogeensus võib tõlgendamist keerulisemaks muuta. Erinevad koetüübid, hüdratsioonisemed või pigmentatsioon võivad muuta hajumis- ja neeldumismadusi, mis nõuab hoolikat kalibreerimist ja mõnikord viib vastuoluliste tulemusteni. Fluorestsentsil põhinevas diagnostikas võivad esineda sellised probleemid nagu fotovalgendamine või autofluorestsents, mis võib signaali kvaliteeti halvendada või tulemusi segadusse ajada (Zafar jt, 2021).

Maksumus ja keerukus on samuti olulised takistused laialdasele rakendamisele. Kvaliteetsed laserid, optilised detektorid ja jahutussüsteemid võivad olla kallid ning täpse joonduse ja kalibreerimise säilitamine nõuab tehnilist oskusteavet. Kuigi miniaturiseerimine edeneb, vajavad paljud süsteemid endiselt kontrollitud keskkondi või koolitatud personali, mis piirab nende kasutuselevõttu maapiirkondades või alarahastatud tervishoiusüsteemides (Ibrahim jt, 2022).

Lisaks, ohutusprobleemid tuleb hoolikalt hallata. Kokkupuude suure intensiivsusega laserkiirtega, eriti nähtava või lähiinfrapunakiirguse vahemikus, võib kujutada endast ohtu silmad ja nahk. Regulaatiivsed standardid alates IEC (Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon) ja ANSI (Ameerika Riiklik Standardiinstituut) klassifitseerida lasereid riski alusel ja määrata kindlaks kliiniliseks kasutamiseks vajalikud ohutusmeetmed, sh kaitseprillid, märgistus ja laserkiire ohjeldamine (Albrecht jt, 2013).

5.3 Eetilised ja ligipääsetavuse kaalutlused

Täiustatud laserdiagnostika kasutamine tõstatab kaeetilised küsimused, eriti seoses andmekaitse, algoritmiline tõlgendamine ja tervishoiu võrdsus. Tehisintellektiga täiustatud lasersüsteemide kasutuselevõtul on oluline tagada, et automatiseeritud diagnostika on valideeritud erinevate populatsioonide seas ja etotsuste tegemise läbipaistvus säilitatakse.

Ligipääsetavus on veel üks kriitiline küsimus. Kuigi laserdiagnostika võib teoreetiliselt vähendada tervishoiukulusid, võimaldades varasemat avastamist ja invasiivsete protseduuride vähendamist, alginvesteering ja hooldustehnoloogia kasutamine võib olla takistuseks. Pingutused selle nimel, et arendada avatud lähtekoodiga riistvara, odavad laserdiodid ja haridusprogrammid on olulised tagamaks, et need tööriistad toodsid kasu paljudele kogukondadele kogu maailmas.





6. Laserdiagnostika integreerimine haridusse: reaalse maailma klassiruumi projektid

6.1 Laserite õpetamine keskkoolides STEM-ainetes

Lasertechnoloogia õpetamine keskkoolides annab õpilastele sissejuhatuse reaalse maailma füüsikasse, biomeditsiini rakendustesse ja insenerisaini. Kuigi lasereid peetakse sageli keerukateks või abstraktseteks, on paljud edukad haridusalgatused näidanud, et noored õppijad suudavad laserpõhimõtetest aru saada ja nendega tegeleda, kui neid toetavad praktilised, uurimuslikud ja visuaalsed vahendid.

Teemad, näiteks **kerge käitumine, optilised süsteemid ja laser-koe interaktsioon** on klassides uuritud interdistsiplinaarsete STEM-moodulite kaudu, mis ühendavad **bioloogiat, füüsikat ja tehnoloogiat**. Mõnes õppekavas ehitavad õpilased ohutute väikese võimsusega dioodlaserite abil lihtsaid optilisi seadmeid, et uurida peegeldust, murdumist ja laserkiire joondamist. Teised tegelevad simulatsioonidega, mis demonstreerivad laserkiire interaktsiooni bioloogiliste materjalidega – eriti liitreaalsuse või digitaalsete visualiseerimisvahendite abil.

6.2 Näide 1: Projekt „Valgus ja elu” – Saksamaa

Saksamaal osalevad koolid **MINT-EC (STEMi tippkeskus)** võrgustik rakendas temaatilise üksuse nimega „*Valgus ja elu*”, mis integreeris bioloogiat, füüsikat ja meditsiini 14–18-aastastele õpilastele. Õpilased õppisid inimese ja diagnostiliste pildistamistehnikate kohta katsetades **väikese võimsusega lasereid ja läätsed** optilise koherentstomograafia (OCT) simuleerimiseks. Samuti uurisid nad, kuidas valgus tungib bioloogilisse koesse, luues želatiinist fantoome, mis olid ümbritsetud erinevate materjalidega (kasvajate või veresoonte simuleerimiseks) ja kasutades punaseid laserpointereid hajumise ja neeldumise jälgimiseks.

Projekt kulmineerus õpilaste esitlustega, kus nad pakkusid välja omaenda bioinspireeritud pilditööstööriistu, sidudes oma optilise arusaama reaalsete tervishoiuprobleemidega. Mõned koolid kasutasid CoSpaces Edu platvormi, et õpilased saaksid neid seadmeid liitreaalsuses simuleerida (MINT-EC, 2022).

6.3 Näide 2: BIOS4You projekt – lasernägemise simulatsioon liitreaalsuses

Selle piires **BIOS4You Erasmus+ projekt** osalesid mitme Euroopa riigi tudengid moodulites, mis kasutasid **Liitreaalsust** uurida, kuidas loomad valgust tajuvad ja kuidas seda teadmist laserpõhisesse diagnostikasse üle kantakse. Üks üksus keskendus **mantis kreveti polariseeritud nägemine**, kus õppijad vaatasid looma 3D-mudelit ja seejärel lülitasid polarisatsioonipõhise vähi tuvastamise tööriista virtuaalsele simulatsioonile.

Õpilased said teada, kuidas **polariseeritud laservalgus** kasutatakse vähirakkude eristamiseks tervetest kudedest, suheldes virtuaalsete diagnostiliste liidestega, reguleerides laserlainepikkusi ja tõlgendades värvikoodiga AR-kihte. Tegevus aitas muuta abstraktsed biomeditsiinilised kontseptsioonid konkreetseks, demonstreerides samal ajal ka bioinspiratsiooni reaalsel tõlkimisel tehnoloogiaks. Õpetajate tagasiside näitas paremat kaasatust ja arusaamist, eriti visuaalsete õppijate seas.

6.4 Näide 3: iLASER – Iirimaa riiklik fotoonikahariduse algatus

See **iLASER (Laserteadlikkuse edendamine koolides haridusressursside kaudu)** Iirimaa teadlaste juhitud algatus töötas välja keskkooli loodusõpetuse õpetajatele mõeldud tööriistakomplekti laserfüüsika ja rakenduste tutvustamiseks. Õpilased õppisid tundma elektromagnetilist spektrit, ehisid oma lihtsaid laserseadmeid, kasutades ohutuid infrapuna-LED-e ja plastooptikat, ning uurisid **laserohutust, fiberoptikajameditiinilist pildistamist**.

Üks iLASERi õppekava tipp hetki oli väljakutse „Laser meditsiinis“, kus õpilastel oli ülesandeks kujundada mitteinvasiivne diagnostikavahend. Nad kasutasid liitreaalsuse simulatsioone ja digitaalseid





skeeme selliste tööriistade kujundamiseks nagu kantavad glükoosimonitorid või kontaktivabad nahavähi detektorid. Programm rõhutas **uurimuslik õpe**, eakaaslaste koostöö ja reaalse maailma probleemide lahendamine. (iLASER, 2021).

6.5 Õpiväljundid ja pedagoogiline mõju

Need reaalsed näited toovad esile, kuidas laserõpet saab koolidesse tõhusalt integreerida, kui sellega kaasneb:

- **Ohutud ja praktilised katsed** mis demüstifitseerivad lasereid;
- **AR-simulatsioonid** mis visualiseerivad valguse ja koe interaktsiooni;
- **Bioinspiratsiooni tegevused** mis ühendavad bioteadusi inseneriteadustega;
- **Õpilaskesksed disainiprojektid** mis edendavad loovust ja probleemide lahendamise oskust.

Uuringud näitavad, et füüsilise manipuleerimise (nt läätsede ja laserite) kombineerimine digitaalse täiustamisega (nt AR-kihtidega) viib **tugevam kontseptuaalne säilitamine** jasuurenenud **motivatsioon** (Bacca jt, 2014; De Miguel ja Martínez, 2023). Need programmid julgustavad õpilasi mõtlema ka sellele, **STEM-karjäärid**, sealhulgas meditsiinifüüsika, biomeditsiinitehnika ja fotoonika.

7. Liitreaalsuse integreerimise teaduslikud alused laserdiagnostika hariduses

7.1 Kognitiivne põhjendus: nähtamatu visualiseerimine optikas ja biofotoonikas

Laserdiagnostika hõlmab oma olemuselt **nähtamatud või submikroskoopilised nähtused**: kudede hajumine, footonite neeldumine, koherentsed lainefrondid ja murdumisnäitaja muutused. Neid protsesse on keskkooliõpilastel raske traditsiooniliste 2D-diagrammide või staatiliste meediumite abil kontseptualiseerida. AR täidab selle lünka, võimaldades **kehastunud, ruumiline ja reaajas visualiseerimine** valguse ja koe vastastikmõjudest.

Vastavalt **kahekordse kodeerimise teooria** (Paivio, 1991) ja **kognitiivse koormuse teooria** (Sweller jt, 1998) on keerulisi teaduslikke protsesse parem mõista, kui verbaalne teave on seotud dünaamiliste visuaalsete esitustega. AR võimaldab **tähelepanu hajumise minimeerimist** manustades visualiseeringuid otse kasutaja tajuvälja, näiteks projitseerides, kuidas laserkiir murdub läbi kihiliste kudede või näidates, kuidas polariseeritud valgus pöörleb, kui see puutub kokku kasvajate joondatud kollageenikiududega. **Seeruumilise ja kontseptuaalse teabe kontekstuaalne sidumine** parandab oluliselt teadmiste säilitamist ja edasiandmist (Cheng & Tsai, 2013).

7.2 Teaduslik põhjendus: laseri ja koe interaktsioon ning optilised simulatsioonid liitreaalsuses

Hiljutised edusammud **optilise füüsika reaajas renderdamine** muuta laseri ja koe interaktsioonide täpne simuleerimine AR-is tehniliselt teostatavaks. See hõlmab järgmist:

- **Kiirte jälgimise algoritmid** kohandatud mobiilsete liitreaalsuse platvormide jaoks, mis suudavad näidata laserkiirte käitumist mitmekihilises bioloogilises keskkonnas, sealhulgas peegeldumist, murdumist ja hajumist piiridel (nt sarvkest-võrkkest, nahk-rasvkude-lihas).
- **Monte Carlo kergtranspordi mudelid**, mida traditsiooniliselt kasutatakse meditsiinilise pildistamise uuringutes, saab nüüd lihtsustada ja integreerida liitreaalsuse mootoritesse simuleerimiseks **footoni neeldumissügavus, fluentsi määrja** optilise tee pikkuserinevate lainepikkuste all (Jacques, 2013).





- Simuleeritud diagnostikas, näiteks **ÜMT** või **fotoakustiline pildistamine**, õpilased saavad visualiseerida kiire fokuseerimist, koherentsussünkroonimist ja koesignaali tagasipöördumist, toetades sügavamalt arusaamist **signaali moodustumine ja pildi eraldusvõime**.

AR-i kasutamine nende interaktsioonide visualiseerimiseks võimaldab õpilastel katsetada muutujatega (nt lainepikkus, koetüüp, kiirgusnurk) viisil, mis oleks koolilaborites võimatu – pakkudes **virtuaalne, aga teaduslikult kehtiv mudelsellest**, kuidas valgus bioloogiliste süsteemidega interakteerub.

7.3 Empiirilised tõendid: liitreaalsus optikas ja biomeditsiinilises õppes

Üha suurem hulk empiirilisi uuringuid toetab liitreaalsuse tõhusust valgusega seotud sisu õpetamisel:

- **Dünser jt (2012)** leiti, et AR-moodulite abil optikat õppivad keskkooliõpilased näitasid traditsioonilisi materjale kasutavate õpilastega võrreldes oluliselt paremat ruumilist mõtlemist ja kontseptuaalset täpsust.
- **Ibáñez jt (2014)** näitas, et liitreaalsuse integreerimine füüsikaõpetusse, eriti laine- ja interferentsimustrite puhul, parandas õpilaste võimet visualiseerida abstraktseid põhimõtteid ja rakendada neid reaalsetes biomeditsiinilistes kontekstides.
- Uuring, mille autor on **Ferrer-Torregrosa et al. (2016)** Biomeditsiinitehnika hariduses näitas, et AR-põhised optiliste tehnikate, näiteks konfokaalmikroskoopia ja laserskaneerimise simulatsioonid suurendasid diagnostilise tõlgendamise täpsust ja kaasatust, eriti väheste eelteadmistega õpilaste puhul.
- Hiljutised uuringud **STEM-i mängustamine ja XR-haridus** (De Miguel & Martínez, 2023) toob esile, kuidas **diagnostiliste seadmete interaktiivsed AR-simulatsioonid** – nagu need, mida kasutatakse BIOS4You-s – suurendavad õpilaste motivatsiooni ja viivad sügavama kontseptuaalse integratsiooni füüsika, bioloogia ja tehnoloogia vahel.

7.4 Rakendamise kaalutlused: täpsus ja pedagoogiline kooskõla

Selleks, et AR-i integreerimine oleks laserdiagnostika õppes teaduslikult efektiivne, tuleb järgida kahte peamist põhimõtet:

1. **Mudeli täpsus** Simulatsioonid peavad täpselt kajastama füüsikalist optikat – st kiire hajumist, nurklangemist, koeanisotroopiat – isegi lihtsustatult. Madala täpsusega visualiseeringud võivad tekitada väärarusaamu (nt konstantne kiire läbitungimissügavus või vale valguse levik heterogeensetes kudedes).
2. **Pedagoogiline joondamine** AR-tegevused peavad olema seotud uurimusliku õppega, kus õpilased **hüpoteese moodustama, testmuutujate muutused ja diagnostiliste tulemuste tõlgendamine**, selle asemel, et animatsioone passiivselt vaadata.

Näiteks AR-i kasutamine simuleerimiseks **laseri tungimine tervesse vs. vähilise naha sisse** võimaldab õppijatel lainepikkust reguleerida ja erinevusi jälgida **sügavus ja hajumine**, tugevdades arusaamist **optilise biopsia põhimõtte**.

Kokkuvõte

Valguse ja bioloogilise koe vastastikmõju mõistmine avab akna ühte tänapäeva meditsiini kõige arenenumasse ja mõjukamasse valdkonda: laserpõhisesse diagnostikasse. See õppeüksus on tutvustanud keskkooliõpilastele laserfüüsika, biomeditsiinilise optika ja diagnostiliste tehnoloogiate, näiteks optilise koherentstomograafia (OCT), laserindutseeritud fluorestsentsi (LIF) ja fotoakustilise pildistamise teaduslikke põhimõtteid. Uurides, kuidas teatud valguse lainepikkused võivad paljastada kriitilist füsioloogilist ja patoloogilist teavet, saavad õpilased ülevaate STEM-teadmiste reaalsetest rakendustest füüsika, bioloogia ja meditsiinilise innovatsiooni ristumiskohas.

Integratsioon **Liitreaalsus (AR)** Tööriistad mängivad olulist rolli keeruliste nähtuste nähtavaks, interaktiivseks ja kaasahaaravaks muutmisel. AR-simulatsioonid võimaldavad õpilastel visualiseerida





nähtamatuid protsesse, näiteks kuidas laserkiired kudedes hajuvad, kuidas pildisignaale genereeritakse ja kuidas diagnostiline täpsus sõltub optilistest parameetritest. Need tööriistad mitte ainult ei toeta sügavamalt arusaamist kogemusliku õppimise kaudu, vaid soodustavad ka loovust ja uurimist, võimaldades õpilastel testida muutujaid, kujundada stsenaariume ja tegeleda diagnostiliste väljakutsetega. Lisaks sellele, **bioinspireeritud disainmõtlemine**, julgustatakse õppijaid ammutama inspiratsiooni looduse optilistest lahendustest, näiteks mereloomade polarisatsioonitundlikkusest, et inspireerida uudsete diagnostikavahendite loomist. See soodustab interdistsiplinaarset mõtlemist ja seob klassiruumis teadmisi meditsiinitehnoloogiate taga oleva tipptasemel uurimistööga.

Selle üksuse lõpuks ei arenda õpilased mitte ainult tugevat kontseptuaalset arusaama laseri ja koe interaktsioonist, vaid tugevdavad ka oma probleemide lahendamise oskusi, teaduslikku arutluskäiku ja digitaalset kirjaoskust liitreaalsusega täiustatud keskkondade kasutamise kaudu. See õppete näitab, kuidas keerulist teaduslikku sisu saab muuta ligipääsetavaks, interaktiivseks ja tulevikku suunatud, valmistades õpilasi ette kriitiliselt ja loovalt mõtlema valguse ja tehnoloogia rolli üle inimeste tervise parandamisel.

Faas	Kirjeldus
Ava sta	-Teaduslik avastusÕpilastele tutvustatakse juhendatud uurimistöö kaudu valguse ja laseri ning koe interaktsiooni põhitõdesid, sealhulgas seda, kuidas laserdiagnostikat meditsiinis kasutatakse (nt OCT, fluorestsentskuvamine). -Bioinspiratsiooni uurimineÕpilased uurivad looduslike nägemissüsteeme (nt mantiskrevett, liblikatiivad) ja nende mõju tänapäevastele diagnostikavahenditele. -Vajaduste ja konteksti analüüsÕpetajad hindavad õpilaste eelnevaid teadmisi optikas ja bioloogias ning tuvastavad valguse, murdumise või bioloogilise pildistamisega seotud väärarusaamu.
Käi vita	-Tunni rakendaminePõhitunnid antakse läbi bioloogiat ja füüsikat kombineerides, käsitledes laserite põhitõdesid, diagnostika põhimõtteid ja kudede interaktsiooni. -AR-põhised tegevusedÕpilased osalevad liitreaalsuse simulatsioonides, et uurida, kuidas laserkiir käitub koekihitides, jäljendades diagnostilisi protseduure (nt lainepikkuse reguleerimine teatud kudede sihtimiseks). -Tagasiside tsükelÕpetajad koguvad kujundavat tagasisidet refleksioonipäevikute, liitreaalsuses tehtavate viktoriinide ja vastastikusete arutelude kaudu, et jälgida kontseptuaalset arusaamist.





Täiustama	-Täiustatud visualiseerimineAR-tööriistad simuleerivad hajumist, neeldumist ja laserkiire käitumist virtuaalsetes koemudelites, võimaldades õpilastel diagnostiliste seadistustega suhelda ja neid manipuleerida. -Disain ja innovatsioonÕpilased kavandavad või prototüübivad laseril põhinevat diagnostikavahendit, mis on inspireeritud loomade nägemisest, rakendades liitreaalsuses õpitut. -Interdistsiplinaarsed lingidÕpilased mõtisklevad selle üle, kuidas bioloogia, füüsika ja inseneriteadus on ühendatud reaalses meditsiinilistes tööriistades. -Mängustatud elemendid õpilaste kaasamiseks (laserkontekst) • Punktid ja märgidÕpilased teenivad punkte liitreaalsuse tegevuste eduka läbimise eest, näiteks OCT simuleerimise või laserkoemudeli parameetrite kohandamise eest. Märke antakse selliste versta-postide eest nagu „Täpne diagnoos“ või „Optikameister“. • EdetabelidÕpilased või meeskonnad järjestatakse diagnostilise täpsuse, laserskaneerimise ülesannete täitmiseks kuluva aja või AR-skaneeringutes kudede tuvastamise edukuse alusel. • Ülesanded ja tasemedTudengid läbivad AR-võimendatud diagnostilisi „juhtumeid“, liikudes edasi lihtsatest laserkoemudelites simulatsioonidest keerukate mitmekihiliste pildistamisstsenariumiteni. • UurimispreemiadLisatud reaalsuse mudelisse on peidetud boonusobjektid või meditsiinilised andmed. Näiteks võivad õpilased virtuaalses naha ristlõikes avastada peidetud kihte, et laserpeegelduse abil varajases staadiumis melanoomi paljastada. • Koostöös tekkinud väljakutsedMeeskonnad töötavad koos diagnostiliste mõistatuste lahendamiseks, nt simuleeritud koemudelites laserkiire levikut ja neeldumist mõistmist märgistatud AR-koemudelite abil. AR-põhised hindamisvahendid (laserõppe fookus) • Interaktiivsed kontrollpunktidÕpilased tõlgendavad AR-simulatsiooniga saadud diagnostilisi tulemusi (nt värvikoodiga fluorestsentskuvamine) ja põhjendavad oma otsuseid. • Stsenariumipõhised ülesandedVälja antud selleks, et täpselt selgitada, kuidas laserlainepikkus mõjutab kudede läbitungimist või kuidas polarisatsiooni kasutatakse haiguste tuvastamiseks.
-----------	--

Viited

Akçayır, M. ja Akçayır, G. (2017). Liitreaalsusega seotud eelised ja väljakutsed hariduses: süstemaatiline ülevaade.*Haridusuuringute ülevaade*, 20, 1–11.





Albrecht, U. V. jt (2013). Mobiilse liitreaalsuse õppe mõjud võrreldes õpikute õppega meditsiinitudengitele: pilootuuring –*Meditsiinilise internetiuuringute ajakiri*, 15(8), lk 182.

Arvanitis, T. N. jt (2009). Inimfaktorid mobiilses liitreaalsuses, mida puuetega õppijad kasutavad loodusteaduste õpetamisel. *Personaal- ja kõikjalolev andmetöötlus*, 13(3), 243–250.

Bacca, J. jt (2014). AR-trendid hariduses: süstemaatiline ülevaade. *Haridustehnoloogia ja ühiskond*, 17(4), 133–149.

Barsom, E. Z., Graafland, M. ja Schijven, M. P. (2016). AR-rakendused meditsiiniõppimises: süstemaatiline ülevaade. *Kirurgiline endoskoopia*, 30(10), 4174–4183.

Cheng, K. H. ja Tsai, C. C. (2013). Liitreaalsuse võimalused loodusteaduste õppimisel: ettepanekud edasiseks uurimistööks. *Teaduse, hariduse ja tehnoloogia ajakiri*, 22(4), 449–462.

De Miguel, M. ja Martínez, A. (2023). Liitreaalsus STEM-hariduses: õpilaste kaasatus ja õppimine. *Haridusteadused*, 13(1), 84. <https://www.mdpi.com/2227-7102/13/1/84>

Dünser, A., Walker, L., Horner, H. ja Bentall, D. (2012). Interaktiivsete füüsikaõpetuse õpikute loomine liitreaalsuse abil. *24. Austraalia arvuti-inimese interaktsiooni konverentsi materjalid*.

Ferrer-Torregrosa, J., Jimenez-Rodriguez, M. A., Torralba-Estelles, J. jt (2016). Kaugõppe e-õppe platvormid biomeditsiini ja terviseteaduste valdkonnas: e-õppe simulatsioon laserpõhise diagnostika jaoks. *BMC meditsiiniharidus*, 16, 274.

Ibrahim, A., Awooda, E. ja Elnour, A. (2022). Laseripõhiste diagnostikasüsteemide kulubarjäär Sahara-taguses Aafrikas: väljakutse uutele meditsiinitehnoloogiatele. *Tervisetehnoloogia*, 12(3), 225–233.

Ibáñez, M. B., Di Serio, Á., Villarán, D. ja Kloos, C. D. (2014). Elektromagnetismiga katsetamine liitreaalsuse abil: mõju õpilaste voogedastuskogemusele ja hariduslikule tõhususele. *Arvutid ja haridus*, 71, 1–13.

Jacques, S. L. (2013). Bioloogiliste kudede optilised omadused: ülevaade. *Füüsika meditsiinis ja bioloogias*, 58(11), R37–R61.

Le, T., Chen, Y. ja Chang, J. (2023). Miniatuursed laserbiosensorid ravikoha diagnostikaks: edusammud ja tulevikutrendid. *Andurid ja ajamid B: Keemilised*, 383, 134648.

Paivio, A. (1991). Kahekordse kodeerimise teooria: tagasisaade ja praegune olukord. *Kanada psühholoogia ajakiri*, 45(3), 255–287.

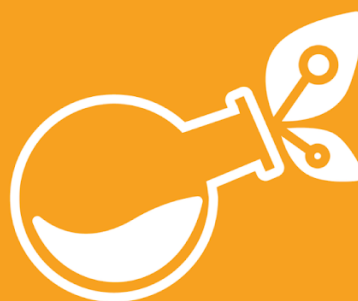
Sweller, J., van Merriënboer, J. J. ja Paas, F. G. (1998). Kognitiivne arhitektuur ja õppedisain. *Hariduspsühholoogia ülevaade*, 10(3), 251–296.

Zafar, S., Awais, M. ja Zafar, A. N. (2021). Liitreaalsus meditsiinihariduses: süstemaatiliste ülevaadete metaülevaade. *Rahvatervise piirid*, 9, 638259.





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.