

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Mattias Avi

Prototüüp happesuse mõõtmiseks kaameraga

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendajad:

PhD Mihkel Pajusalu

MSc Laila Kaasik

Tartu 2023

Resümee

Prototüüp happesuse mõõtmiseks kaameraga

Bakalaureusetöö käigus valmistati prototüüp, mille eesmärk oli mõõta mitme vedeliku piisa happesust samaaegselt. Seade kasutab kahte LED-lampi, et ergastada sensorkilega kaetud klaasi. Happesust mõõdetakse võrreldes mõlema ergastusega saadud pilte omavahel ja võrdlusest avaldub iga tilga pH tase. Prototüübi arenduses seatud eesmärged, nagu lahutusvõime, mõõtmisagedus, mõõtmised ja vastupidavus hapetele, suudeti edukalt täita. Prototüüp suudab tuvastada mitut alates mikromeetri suurust piiska samaaegselt ja määrata lühikese ajaga nende happesuse. Seade laseb Tartu Observatooriumil lihtsamini teostada katsetusi ning annab aimu milline võiks olla seadme arenduse edasine suund.

CERCS: P200 Elektromagnetism, optika, akustika; T111 Pilditehnika; T120 Süsteemitehnoloogia, arvutitehnoloogia; T170 Elektroonika; T320 Kosmosetehnoloogia

Võtmesõnad: pH mõõtmine, happesus, prototüüp, 3D kooste

Abstract

Prototype for measuring acidity with a camera

A prototype of an acidity sensor was developed during this bachelor's thesis. The main goal of the device is to measure the pH levels of multiple droplets of liquid at the same time. Two LEDs are used to illuminate a sensor film on a glass plate and to determine the pH level of every individual droplet. All requirements, such as resolution, measuring frequency, dimensions, and resistance to acid, were fulfilled. The device can quickly detect and measure the acidity of multiple droplets starting at one micrometer. The prototype simplifies experiments at Tartu Observatory and helps determine the future development direction of the device.

CERCS: P200 Electromagnetism, optics, acoustics; T111 Imaging, image processing; T120 Systems engineering, computer technology; T170 Electronics; T320 Space technology

Keywords: measuring pH, acid, prototype, 3D design

Sisukord

Resümee.....	2
Abstract.....	3
Tabelite loetelu.....	6
Jooniste loetelu.....	6
Lühendid, kontsandid, mõisted.....	7
1 Sissejuhatus.....	8
1.1 Probleemi tutvustus.....	8
1.2 Töö eesmärk ja ülevaade.....	9
2 Ülevaade probleemist.....	10
2.1 Teoreetiline taust.....	10
2.2 Prototüübi rakendus	10
3 Metoodika	12
3.1 Nõuded prototüübile	12
3.2 Kaamera ja objektiivi valik.....	14
3.3 Prototüübi kavand	16
3.4 Elektroonika kavand	18
3.5 Prototüübi tootmine ja kokkupanek.....	21
4.1 Valminud prototüüp	24
4.2 Katse	27
5 Tulemuste analüüs ja järeldused	29
5.1 Prototüübi nõuetele vastavus	29

5.2 Piiskade pH taseme määramine	31
Tänuavaldused	33
Viited.....	34
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	36
Lisad.....	37

Tabelite loetelu

Tabel 1. Funktsionaalsed nõuded prototüübile	13
Tabel 2. Mittefunktsionaalsed nõuded prototüübile	14
Tabel 3. Trükkplaadi komponentide nimekiri	21

Jooniste loetelu

Joonis 1. Trükkplaadi elektroonikaskeem.....	19
Joonis 2. Trükkplaadi pealtvaade Altium Designer tarkvaras	20
Joonis 3. 3D prinditud osade ja arvuti kooste külgsuurtõld.....	25
Joonis 4. Valminud prototüübi pealtvaade.....	26
Joonis 5. Lahutusvõime mõõtmine mõlema LED-lambiga valgustades.....	27
Joonis 6. Erineva pH tasemega piiskade omavaheline võrdlus kahe katse jooksul.....	28
Joonis 7. Esimene prototüübi mudel Solidworks keskkonnas	37
Joonis 8. Katseklaasi kinnitus	38
Joonis 9. Prototüübi süsteemi koondsuurtõld	39
Joonis 10. Arduino kood LED-lampide ja kaamera sünkroniseerimiseks	40

Lühendid, kontsandid, mõisted

OPIC – Tartu Observatooriumis väljatöötatud kaamera komeetide pildistamiseks (ingl. keeles Optical Persicopic Imager for Comets)

FN – funktsionaalne nõue

MFN – mittefunktsionaalne nõue

LED – valgusdiod

1 Sissejuhatus

Selle lõputöö käigus arendas autor prototüübi happesuse andurist. Töö põhineb varasemalt valminud teadusartiklil, milles demonstreeriti seadme tööpõhimõtte ja seati kõige kriitilisemad nõuded seadme toimimisele. Happesuse anduri tööpõhimõtte on uudne, sest see suudab tuvastada happesust sensorkilega kaetud plaadi kaameraga pildistamise abil. See võimaldab luua hoopis teistsuguse tööpõhimõttega sensori, millega saab mõõta paljude vedelikutilkade happesust paralleelselt. Teadusartiklis, millel prototüüp põhineb on mainitud, et sellise seadme eesmärk on happesuse mõõtmine Veenuse atmosfääris. [1]

1.1 Probleemi tutvustus

Tartu Observatooriumis valminud teadustöös [1] tõestati, et kaamera abil on võimalik mõõta keskkonnas leiduvate piiskade happesust, kui vaadelda fluorestseeruva pigmendiga kaetud klaasplaati hetkel, kui piisad seda tabavad. Selleks kasutati ainet (fluorestseiini), mille fluorestseeruvad omadused sõltuvad keskkonna happesusest. Kui erineva happesusega pigmendilahust valgustada kahe erineva lainepikkusega valgusega, siis saab kahe pildi võrdlusel määrata iga piisa happesuse.

Esialgsed katsed tehti laborikeskkonnas käepäraste vahenditega, et tõestada selle idee võimalikkust. Ergastavalt valgustavaid LED-lampe juhiti käsitsi lüliti abil ja neid toideti toiteploki. Mõõtmiste läbi viimine oli kasutajale tülikas ja keeruline. Mõõtmiste läbiviimiseks kasutati seadet mikroskoobiga, mis muutis selle suureks ja ei võimaldanud katsetust viia läbi vastavas happekindlas kambris. Kosmosemissiooni ja ka edasiste laborikatsete jaoks oli vaja aparati suurusust vähendada ja automatiseerida. [1]

Teadusartikkel pakub välja ka kaks erinevat seadme kontseptsiooni, mida saaks kasutada katsetamise lihtsustamiseks ja edasiseks teadustööks. [1] Selle töö käigus valmistati ühe kontseptsiooni kohandatud variant prototüübina.

1.2 Töö eesmärk ja ülevaade

Töö eesmärk on valmistada Tartu Observatooriumi teadustöö põhjal töötav prototüüp, millega on võimalik mõõta seda tabavate piiskade happesust. Nõuded prototüübile on esitatud varasemas teadustöös.[1] Need nõuded on juhiseks, kuhu seade peaks jõudma. Prototüübi eesmärk on olla funktsionaalne ja mugav kasutada. Seda peaks olema võimalik edasi arendada nõuetele vastavaks seadmeks. See lõputöö käsitleb ainult prototüübi kavandamist, tootmist ja esmast katsetamist.

Kui töös valminud prototüüp ja edasised arendused suudavad tõestada kasutatud happesuse mõõtmise meetodi edukust, siis võib sellist seadet kasutada teistel planeetidel atmosfääri happesuse määramiseks. Veenus on meile lähim planeet, kus on vaja just sellist seadet. Elu Veenuse pinnal pole kõrge temperatuuri tõttu võimalik, kuid kõrgel pilvedes võib selleks sobiv keskkond olemas olla [2]. See andur võimaldaks mõõta happesust ja teha sellest järeldusi.

2 Ülevaade probleemist

2.1 Teoreetiline taust

Uuringute ja kosmosemissioonide käigus on kindlaks tehtud, et Veenuse atmosfäär koosneb peamiselt süsihappegaasist ja pilved on kõige tõenäolisemalt kontsentreeritud väävelhapest. Veenuse keskmine temperatuur planeedi pinnal on 740 K, mis välistab vedela vee olemasolu ja seega ka elu olemasolu. [3] Pilvedes võib siiski leiduda mikroskoopilisele elule sobiv keskkond, sest analüüsid vihjavad sobivale temperatuuri, õhurõhu ja happesuse vahemikule [2]. Seadet disainitakse kosmosemissiooniks, kus soovitakse koguda täpsemaid andmeid ja happesuse andur võimaldaks kindlaks teha pilvede täpse happesuse taseme [4].

Prototüübist arendatav happesuse andur peaks olema osa kosmosemissioonist nimega Morning Star või endise nimega Venus Life Finder, mille eesmärk on koguda piisavalt andmeid, et teha kindlaks elu olemasolu Veenusel [5]. Ühe missiooni stsenaariumi alusel saadetakse Veenusele kosmosesond, mis püsib langevarju abil 40 - 60 kilomeetri kõrgusel ühe tunni. [4] Selle aja jooksul puutuvad happesuse anduriga kokku piisad, mille happesust mõõdetakse.

2.2 Prototüübi rakendus

Tartu Observatoorium võtab osa kosmosemissioonist Morning Star ja selle missiooni käigus on eesmärk välja selgitada elu sobilike tingimuste võimalikkus Veenusel [5]. Tartu Observatooriumi vastutus on valmistada missioonile pH mõõtmise seade (ingl. keeles Tartu Observatory pH sensor lühendiga TOPS). See oleks ühekordse kasutusega seade, mille kaamera vaatevälja küllastudes muutub seade kasutuks. Erinevatel kõrgustel happesuse mõõtmiseks tuleks kasutada mitut seadet. [4]

Lõputöö käigus valminud prototüübi edasiarendus võiks aidata sellisel missioonil happesust mõõta ja see näitaja on oluline eluks sobiva keskkonna tuvastamisel. Selline happesuse mõõtmise seade võib saada odavaks ja töökindlaks seadmeks, et mõõta happesust ka mujal.

3 Metoodika

Metoodika saab jagada viieks osaks:

1. Nõuete määramine
2. Kriitiliste komponentide valik
3. Prototüübi kavandamine
4. Elektroonika kavandamine
5. Prototüübi tootmine ja kokkupanek

3.1 Nõuded prototüübile

Prototüübi efektiivseks valmistamiseks on esmalt vaja välja selgitada, mida see tegema peab. Selleks määratakse olulised funktsionaalsed ja mitte-funktsionaalsed nõuded. Funktsionaalsed nõuded kasutaja vaatepunktist. Funktsionaalsete nõuete kirjeldus on enamasti, mida süsteem peab tegema või ei tohi teha. Mitte-funktsionaalsed nõuded on üldisemad ja neid on keerulisem kirjeldada. Nende alla käivad näiteks maksumus, kvaliteet ja veakindlus.

Enamus funktsionaalseid nõudeid pärinevad L. Kaasiku teadusartiklist „Sensor for determining single droplet acidities in the Venusian atmosphere“. Teadusartiklis uuriti ka võimalusi, kuidas valmistada seade. Seal pakuti välja kooste, kus kasutatakse arenduses olevat OPIC kaamerat, mis on piisavalt võimekas käesoleva ülesande täitmiseks. Prototüüp proovib võimalikult täpselt jäljendada sama funktsionaalsust ilma OPIC kaamerat kasutamata. [1]

Ideaalses olukorras peaks seade tuvastama 1 mikromeetri suurust happepiiska. See nõue oleks siht, mille poole pürgida. Siiski peab määrama ülempiiri, et tagada prototüübi piisav kvaliteet. Seetõttu on karmilt kirja pandud nõue, et tuvastada tuleb 10 mikromeetri suurust happepiiska. Need nõuded on toodud tabelis 1 viitega funktsionaalne nõue 1, mille lühend on FN1 ja funktsionaalne nõue 2 lühendiga FN2.

Happe tuvastamine toimub happeses keskkonnas ja peamine vajadus hetkel on katsetada seda väävelhappega. Seega peab prototüüp olema vastupidav kontsentreeritud väävelhappele, mida võib sattuda ka mujale kui katseklaasile, mida kaameraga vaatlеме. See on kriitiline nõue, mida tuleb kindlasti täita ja see on välja toodud ka tabelis 1 nõudena FN3.

L. Kaasiku teadusartiklis toodi välja ka mõningaid nõudeid seadmele, mis põhineks OPIC kaameral. Need nõuded on kirjas soovitusena, sest see prototüüp ei kasuta OPIC kaamerat. Nõuetena toome välja soovitud mõõtmisageduse, mõõtmed, energiatarbe ja suhtlusliidese. Mõõtmisageduse alampiiri määramine on oluline, sest piiskadest küllastumine toimub katseklaasil kiiresti ja kui see sagedus oleks liiga aeglane ei saaks koguda piisvalt andmeid enne katseklaasi pinna piiskadega küllastumist. Täpsed nõuded on tabelis 1 nõuetena FN4, FN5, FN6, FN7. [1]

Unikaalne viide	Nõude kirjeldus
FN1	Prototüüp võiks tuvastada 1 mikromeetri suurust happepiiska.
FN2	Prototüüp peab tuvastama 10 mikromeetri suurust happepiiska.
FN3	Prototüüp peab vastu pidama kontsentreeritud väävelhappe piiskadele.
FN4	Prototüüp peab mõõtmisi teostama sagedusega vähemalt 6 Hz.
FN5	Prototüübi võiks mahtuda mõõtmetesse 130 x 53 x 41 mm.
FN6	Prototüüp võiks tarbida vähem kui 2.5 W energiat.
FN7	Prototüüp võiks kasutada suhtluseks standardühendust.

Tabel 1. Funktsionaalsed nõuded prototüübile

Mitte-funktsionaalsed nõuded ilmnevad prototüübi arenduse alguses. Nende nõuete eesmärk on rõhutada prototüübi omadusi, mida tuleb jälgida selle kavandamisel. Selle prototüübi mitte-funktsionaalsed nõuded selgusid arendusprotsessi käigus ja juhendaja suunamisel.

Igale prototüübi kasutajale meeldib kui prototüübi kasutamine on mugav. Selle nõude eesmärk on vältida koostes liigseid detaile ja proovida saavutada parimat kogemust kasutajale. See nõue on tabelis 2 esimese mitte-funktsionaalse nõudena lühendiga MFN1.

Prototüübi edasi arendamiseks tuleb seda dokumenteerida. Dokumentatsioon koostamine tähendab kõigi protsesside arusaadavalt kirja panekut. See nõue on tabelis 2 nõudena MFN2.

Viimane mitte-funktsionaalne nõue on säilitada kooste paindlikus modulaarsuse näol. See võimaldab vahetada mudelis osi välja ilma tervet süsteemi uuesti kavandamata. Prototüüpimise juures on see eriti oluline, sest kooste muutub tihti ja eesmärk on saavutada parim funktsionaalsus kiiresti ja odavalt. See nõue on tabelis 2 nõudena MFN3.

Unikaalne viide	Nõude kirjeldus
MFN1	Prototüüpi peab olema mugav kasutada.
MFN2	Prototüüp peab olema dokumenteeritud.
MFN3	Prototüüp peab olema võimalikult modulaarne.

Tabel 2. Mittefunktsionaalsed nõuded prototüübile

3.2 Kaamera ja objektiivi valik

Happetuvatuse prototüübi valmistamisel oli esimene samm kaamera valik, sest see piirab ära kui kvaliteetset väljundit prototüübist on võimalik saada. Ressursside kokku hoidmiseks tuli kavandamist alustada olemasoleva kaameraga. Kaameraks oli FLIR Chameleon 3 kaamera. See on ühevärviline tööstuskaamera CMOS sensoriga. Selle lahutusvõime on 2448 korda 2048 piksilt, mis on piisav, et täita nõuet ühe mikromeetri tuvastamiseks (Tabel 1, nõue FN1), kui leidub objektiiv, mis koondab valguse sobivalt. Kaamera edastab pilti mugavalt üle USB liidese, mis on standardliides ja sellega on rahuldatud ka nõue suhtlusliideses kohta (Tabel 1, nõue FN7). Kaamerat saab kontrollida riistvaralise sünkroniseerimisviiguga, mis võimaldab täpselt ajastada

pilte, et saada täpne kaader õiget värvi LED-valgusega. [6] See võimaldab kogu pildistamise osa prototüübist tarkvaraga kontrollida.

Ergastamiseks sobivad LED-lambid valiti varasema teadustöö käigus [1]. Lainepikkusega 425 nm valgustab LED-lamp Lumileds L1C1-VLT1000000000 [7]. Teiseks ergastuse lainepikkuseks valiti 450 nm ja seda tekitatakse Marktech MTE4600N LED-lambiga [8]. [1] Nende kahe valgusega ja ilma ergastuseta piltide intensiivsuste võrdlusel määratakse happesuse tase. LED-lampide mõju vähendamiseks oleks vaja, et ainult fluorestseeruv valgus piiskadest jõuaks kaamerasse. Selleks kasutatakse filtrit, et vähendada kaamerasse jõudvat LED-lampide valgus. Sobiv filter laseb läbi ainult 450 nm pikema lainepikkusega valgust, sest fluorestseeruv piisk on alati pikema lainepikkusega kui LED-valgus. Valituks osutus SCHOTT-i klaasfilter GG475, mis summutab madalamad lainepikkused kui 475 nm [9].

Õige lahutusvõime saamiseks, et tuvastada võimalikult väikseid happepiisku, tuleb valida kõige sobivam objektiiv. Lisaks on vaja täita nõuet prototüübi mõõtmete kohta, seega valida objektiiv, mis võimaldab konstrueerida kõige väiksema seadme. Olemasolevaid objektiive on kaks.

Sooritades esmased käsitsi mõõtmised selgitati kumb käepärastest objektiividest on parem antud ülesandeks. Üks objektiividest suutis mõõta umbes 2 x 2 cm suurust ala 6 cm kaugusel objektiivist. Teise objektiivi fookuses vaadeldav ala oli suurem ja liiga kaugel objektiivist, et mõõta piisavalt väikest objekti. Arendamine jätkus sellega, kuid pärast 3D prinditud mudeli kokku panemist selgus, et väikseim mõõdetav objekt on tunduvalt suurem kui 10 mikromeetrit.

Seetõttu tuli valida uus objektiiv. Abijuhendaja L. Kaasiku optika teadmised võimaldasid kasutada ära teist objektiivi, mis varasemalt ei sobinud. Vaadates objektiivist läbi vastupidises suunas suutis kaamera eristada väiksemaid objekte kui 10 mikromeetrit. See objektiiv ja kaamera konfiguratsioon osutus parimaks ja lõplik prototüüp valmis nendega.

3.3 Prototüübi kavand

Kui valitud on põhilised komponendid kaamera ja objektiivi näol saab alustada sobiliku ümbrise loomist, mis hoiaks kaamerat ja objektiivi paigal ning võimaldab katseklaasi kinnitada. Katseklaasi kaugus peab olema äärmiselt täpne, sest fookuses on klaas ainult kindlal kaugusel objektiivist.

Selle lõputöö peamine modelleerimistarkvara on Solidworks. Sellega valmisid 3D mudelid. Mudelid otsustati toota 3D-printimise meetodil SLS materjalist.

Enamus prototüübi funktsionaalseid nõudeid said täidetud õige kaamera ja objektiivi valikuga. Funktsionaalsed nõuded, mida tuli täita järgmistes arendusjärgkudes, olid happekindluse nõue ja seadme mõõtmete nõue.

Happekindluse nõude (tabelis 1 nõue FN1) täitmiseks on võimalusi mitmeid. Esiteks on võimalus kavandada kogu seade materjalidest, mis peavad happele vastu. Selliseks 3D prinditavaks aineks on polüpropüleen. Paremate keemiliste omaduste tõttu on see ka tunduvalt kallim, seetõttu oleks sellest tehtud seade kallim [10]. Teiseks variandiks oleks teha eraldiseisev happekindel ümbris. Selline ümbris võib olla happekindel karp või elastne kummist ümbris. Prototüübi valmistati kasutades mõlemat meetodit. Maksumuse madalana hoidmiseks kasutati ainult katseklaasi hoidiku tootmiseks polüpropüleen. Ülejäänud seade eemaldati happesest keskkonnast kasutades elastseid happekindlaid materjale.

Seadme mõõtmed on peamiselt määratud kaamera, objektiivi suurusest ning objektiivi fookuskaugusest. Kaamera on kandilise põhjaga, 44 mm pikk ja 35 mm lai. Objektiiv on 36 mm raadiusega 65 mm kõrgune silinder. Kaamera ja objektiiv on kokku ligi 90 mm kõrged. Kõrgusele lisanduvad fookuskaugus, mis peab olema reguleeritav ja katseklaasi hoidmise mehhanism. Prototüübi lõplikus mudelis õnnestus reguleeritav maksimaalne seadme kõrgus saada alla 130 mm. Mugavuskasutuse jaoks said kinnituskohad tehtud seadmest väljaulatuvaks, seega sai täielikult rahuldatud ainult kõrguse nõue (tabel 1 nõue FN5). Edaspidistes versioonides oleks võimalik

mugavuse arvelt teha seade nõutud mõõtmetes, sest enamus seadme pinnast jääb juba sellesse vahemikku ja nõuet rikuvad ainult väljaulatuvad osad.

Seadme mitte-funktsionaalsete nõuete täitmiseks tuleb neile mõelda igal arendusotsusel. Mugavuse nõude (tabel 2 nõue MFN1) täitmiseks tuli iga osa korral mõelda kuidas sellele kinnitada järgmist ilma suure vaevata, et kokkupanemine oleks lihtne. Samuti ei tohiks see vigastada kasutajat. Selleks on kõik nurgad kumerad. Dokumenteerimise nõude (tabel 2 nõue MFN2) täitmiseks pannakse käesolevasse bakalaureusetöösse kirja tootmisprotsess ja kõik oluline, mis seadmega tehti ja kuidas tegevust uuesti läbi viia kasutusjuhendisse, mis on lisades. Modulaarsuse nõue (tabel 2 nõue MFN3) võimaldab seadme osi taaskasutada ja omavahel kombineerida. Sellise funktsionaalsuse võimaldamiseks tuleb hoida kinnitused standardisel kaugusel üksteisest ja säilitada mudeli lihtsus. Modulaarselt planeerimine aitab ka seadet mugavamaks muuta.

Arendusprotsessi alguses ei ole täpselt teada objektiivi fookuskaugus ja kuna objektiivi omadused on muudetavad sellel olevate nuppudega tuleb leida võimalus fookuskauguse täpselt määramiseks enne tootmist, et toota täpse mõõduga seade. Teine võimalus oleks luua reguleeritav mehhanism. Sellise lahenduse kasuks otsustas ka autor, sest täpse fookuskauguse määramine on äärmiselt keeruline ja riskantne. Samuti kui soovitakse objektiivi omadusi nagu näiteks valguse hulk muuta objektiivil olevate nuppudega, siis saab seda teha ning fookuskauguse sobivaks seadistada. Sel moel jääb mudelile alles ka modulaarsus. Reguleerimismehhanismis kasutati keeret, et kaugust täpselt muuta. Mehhanismis pidi mõtlema ka LED-tuledest väljuvatele juhtmetele, mis ei tohi segamini minna pöörlemise tagajärjel. Lahenduses on võimalik reguleerida fookuskaugust keerates seadme välisküljel rõngast, mis muudab katseklaasi kaugust objektiivist. Selline lahendus on lihtne, töökindel ja äärmiselt mugav kasutajale, sest kasutamise põhimõte on sarnane tavalise peegelkaamera objektiivile.

Katseklaasi kinnitamine lahendati kasutades kummist O-rõngast ja katseklaasi pesasse lükkamist. Katseklaasi saab lükata seadme küljelt pesasse, kus O-rõngas hoiab seda tihedalt paigal. Sel viisil on klaas fikseeritud ja hape ei pääse tihendina toimiva O-rõnga tõttu seadme sisemusse.

Katseklaasi kinnitus on samuti kaitseks ülejäänud seadmele ja saab katsetamise käigus enim kokkupuudet happega, see on ainus jupp, mis prinditi polüpropüleenist happekindluse saavutamiseks. Selle katte siseküljele kinnituvad ka mõlemad LED-lambid.

Ülejäänud seadme arendusel puhul lähtuti mitte-funktsionaalsetest nõuetest ja loodi kest kaamerale ja objektiivile koos vajalike avadega juhtmetele ja reguleerimiseks. Kogu seadme kooste puhul prooviti kasutada täisarvulisi mõõtmeid ja vähendada materjali kasutust, kui see oli võimalik.

3.4 Elektroonika kavand

Elektroonika koosnes trükkplaadist, millega hoida konstantsena LED-lampide voolu ja juhtmetest, mis ühendavad seadmeid. Elektroonika osa on ka ühe trükkplaadi arvuti (ingl. keeles single board computer) Odyssey, millega teostatakse andmehõivet ja LED-lampide ning kaamera sünkroniseerimist. Sellesse on lõimitud ka Arduino tuum, seega pole vaja välist kontrolleri LED-lampide signaali ja kaamera sünkroniseerimissignaali loomiseks.

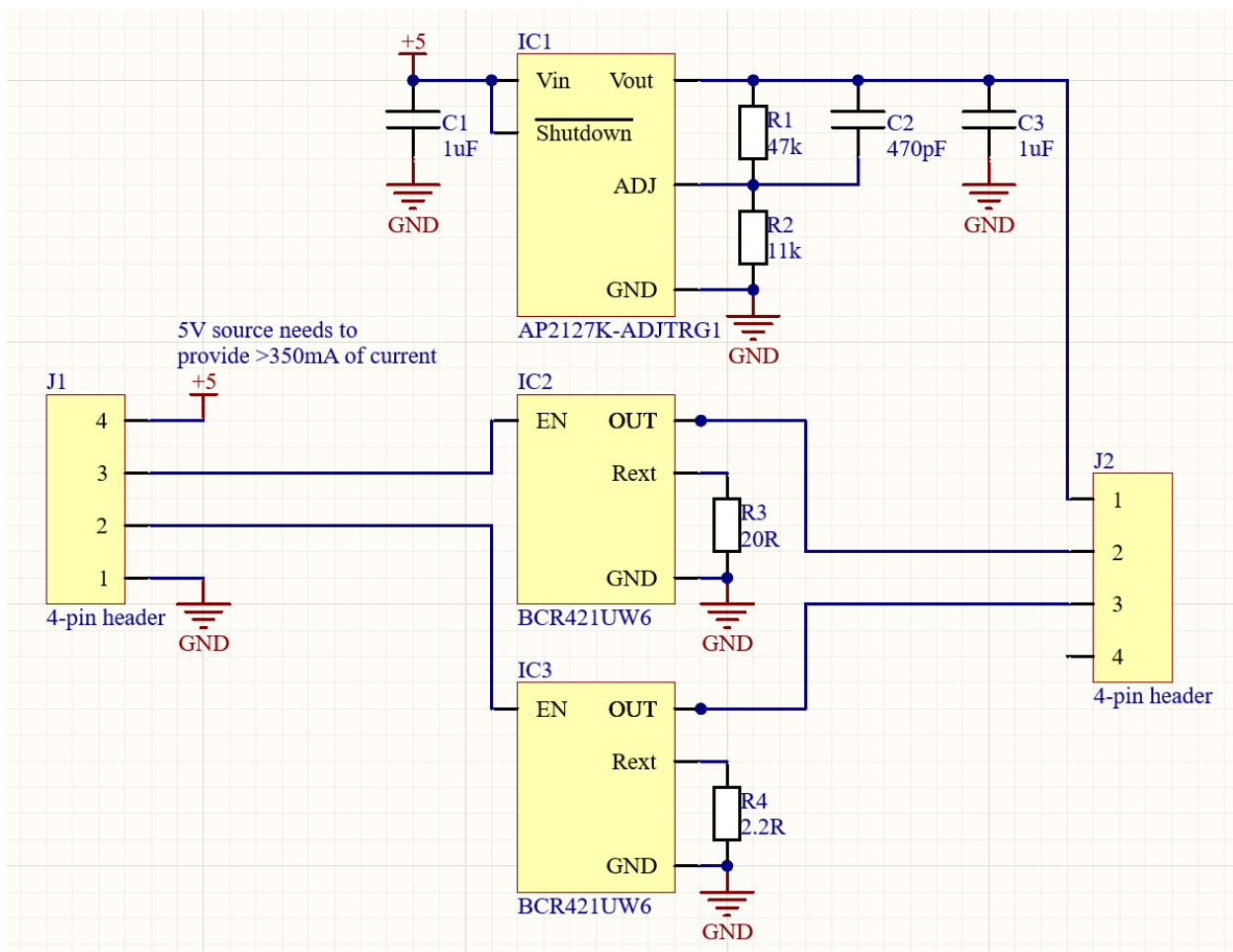
Trükkplaadi eesmärk on lihtsustada LED-lampide juhtimist. Nende heledus ei tohi mõõtmise ajal muutuda ja vool peab püsima konstantsena. Selle lahendamiseks on vaja skeemi, mis hoiaks voolu konstantsena. Selle ülesande täitmiseks on integraalskeem, kus välise takistiga ja signaaliga on võimalik kontrollida voolu LED-lampides.

LED-lambid Lumileds L1C1-VLT1000000000 [7] ja Marktech MTE4600N [8] ühendatakse draiveri trükkplaadile pistikutega. Need võimaldavad ergastada vastavalt 425 ja 450 nanomeetrise lainepikkusega. Valgusdiodide pingelang on sarnane ja see võimaldab kasutada peaaegu sama skeemi mõlema juhtimiseks.

Trükkplaadi põhjaks seati konstantse voolu ajami tüüpskeem, mis tagab selle korrektse toimimise. Lisati ka pingeregulaator, et süsteemi saaks toita tavalise 5-voldise viiguga Arduinolt. LED-

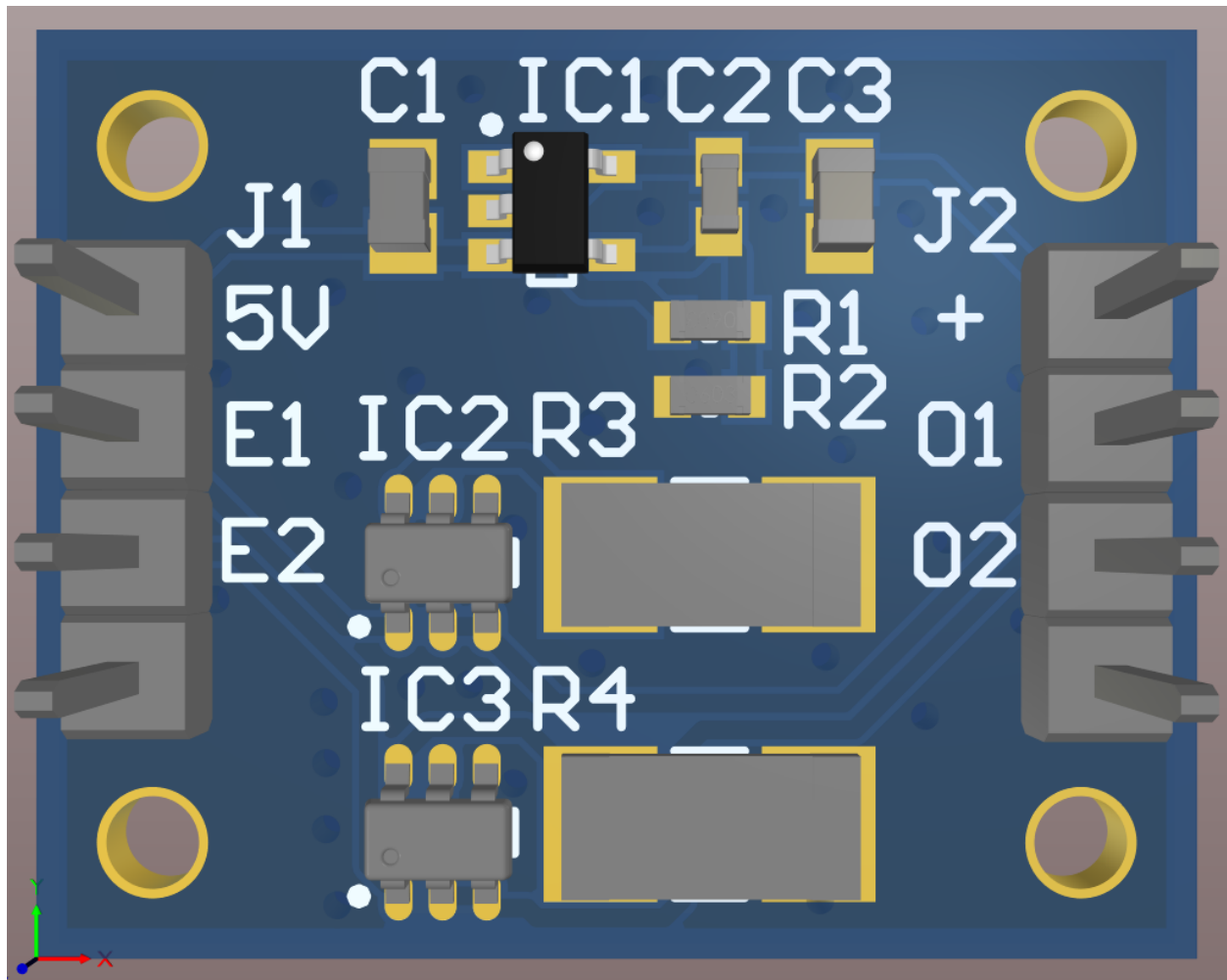
lampide ja kontrolleri ühendamiseks lisati ka standardised 2.54 mm sammuga 4-viigulised ühendused.

Voolu konstantsena hoidmiseks valiti LED-lampide ajam BCR421UW6 firmalt Diodes Incorporated [11]. Ajami valimisel on oluline teada voolu, mida tahetakse LED-lambile pakkuda. Oluline on aru saada kuidas integraalskeem töötab. Selle draiver puhul piisab ühest takistist, et määrata vool ja samuti saab anda signaali, mis lülitab LED-lambi sisse või välja. Selline funktsionaalsus on piisav ja lihtne.



Joonis 1. Trükkplaadi elektroonikaskeem

Trükkplaadi kavandamiseks kasutati Altium Designeri tarkvara, sest see oli autorile tuttav ja mugav kasutada. Skeemi alusel (joonis 1) valmis kahekihilise trükkplaadi joonis (joonis 2). Trükkplaadi mõõtmed on väiksed, 20 mm pikk ja 25 mm lai. Trükkplaadi komponentide nimekiri ja tellimise hetkel olnud hinnad on tabelis 3. Kõige kallimaks osutus trükkplaat ise, mis telliti Euroopa ettevõttelt Eurocircuits. Ühe trükkplaadi maksumuseks kujunes 42.858 eurot. Maksumuse jaotus komponentidele on tabelis 3.



Joonis 2. Trükkplaadi pealtvaade Altium Designer tarkvaras

Komponendi tüüp	Komponendi nimetus	Kogus	Maksumus
Vooludraiver	BCR421UW6 [11]	2	0.504 €
Pingeregulaator	AP2127K-ADJTRG1 [12]	1	0.176 €
Pistik	4-viiguline <i>male</i> pistik [13]	2	0.338 €
Kondensaator	1 μ F 0805 pakendis [14]	2	0.438 €
Kondensaator	470 pF 0603 pakendis [15]	1	0.090 €
Takisti	47 k Ω 0603 pakendis [16]	1	0.100 €
Takisti	11 k Ω 0603 pakendis [13]	1	0.083 €
Takisti	20 Ω 2512 pakendis [17]	1	0.256 €
Takisti	2.2 Ω 2512 pakendis [18]	1	1.333 €
Trükkplaat	Eurocircuits trükkplaat [19]	1	39.520 €
Summa			42.858 €

Tabel 3. Trükkplaadi komponentide nimekiri

3.5 Prototüübi tootmine ja kokkupanek

Kui 3D mudelite ja trükkplaadi virtuaalne kavand on valmis, tuleb need valmistada. Tartu Ülikoolis on olemas vahendid nii 3D printimiseks kui ka trükkplaadi prototüübi valmistamiseks. Printimiseks on tudengitel võimalik kasutada Delta keskuse digilaboris olevaid Prusa 3D printereid. Need on suurepärase prototüüpimiseks, sest toode valmib enamasti kiiresti ja piisava kvaliteediga. Tehnoloogiainstituudil on olemas ka frees, et teha lihtsaid trükkplaate. Selline võimalus aitab jällegi kiiresti toota valmis trükkplaadi. Tartu Ülikoolis kohapeal printimise suureks miinuseks on printerite võimekus. Nende täpsus ja veakindlus on sobilikud väikest mõõtu detailide valmistamiseks, millel pole erilisi sisse- või väljalõikeid. Trükkplaadi freesimise miinuseks on samuti freesimise võimekus. Piiratud on kihtide arv, täpsus ja radade lähedus.

Prototüübi 3D mudel otsustati tellida firmalt Shapeways. Printimise teenusena tellimisel saab kindel olla valminud juppide kvaliteedis ja kavandamisel ei pea mõtlema, et seda oleks lihtne printida. Delta digilaboris prinditi siiski üksikud pisemad jupid, mida sai seadme modulaarsuse tõttu lihtsalt lisada. Trükkplaat telliti ettevõttelt Eurocircuits, kes valmistas selle kiiresti ja kvaliteetselt.

Tegeledes kaameramõõtmistega on oluline, et mõõtmistulemus oleks müravaba. Müra tuleb väliskeskkonnast. Müra võib ka pärineda valguse peegeldusest seadmelt endalt. Selle vähendamiseks peaks seade valgust võimalikult palju neelama. Parim viis selleks on valida seadme värvuseks must. 3D prinditud jupid olid uuea heledad, sest sellisena neid tellida on kõige odavam. Heledate juppide mustaks värvimiseks kasutati musta tekstiilivärvi, mis imendus nailonist osadesse ja kuumutades jäi detaili värvus mustaks. Sel meetodil ei saa värvida aineid, mis on vedelikke hülgavad nagu näiteks polüpropüleen. Polüpropüleenist oli tehtud katseklaasi hoidik, mis on kõige rohkem valgust saav osa. Polüpropüleen suudab siiski osa värvist siduda enda pinnale kuumutades. Seetõttu on jupi värvus pruun, mis on piisav peegelduste vähendamiseks.

Kui kavandamisel on mõeldud läbi seadme kokkupanek, siis ei tohiks kokkupanemise protsessis ühtegi probleemi ilmned. Kõik ühenduskohad ühtivad ja vajalikud komponendid nagu kaamera, objektiiv ja LED-lambid mahuvad oma pesadesse ning on sinna fikseeritud. Ainus seadmele tehtud muudatus oli õõnestamine, sest kohati olid tootmistolerantsid teinud ava liiga väikseks, et komponent sinna sisse mahuks. Selline õõnestamine tehti näiteks katseklaasi hoidikule, sest kavandamisel eeldati, et klaasi vastu suruv O-rõngas on elastsem. Peamine arendusotsus, mis nõudis 3D prinditud jupi katki lõikamist oli reguleerimisrõnga seadmesse panemine. Selleks tehti üks sisselõige rõngasse, mis võimaldas selle omale kohale seada materjali painduvuse tõttu.

LED-lampide ja kaamera sünkroniseerimist juhitakse tarkvaraga, sest see võimaldab täpseid ajastusi ja nende lihtsat muutmist. Selliseks ülesandeks saab kasutada mikrokontrollereid, mis võimaldavad programmkoodiga genereerida signaale ja neid sobivalt ajastada. Kaamerale on vaja anda signaal pildi tegemiseks ja sellega kaasa ka informatsioon säritusaja kohta. Kasutatav Chameleon 3 tööstuskaamera võimaldab vastu võtta sünkroniseerimissignaali ja selle signaali

kestvus määrab säritusaja. Sel moel saab määrata mõlemale LED-lambile sobiliku säritusaja. Enne pildistamissignaali algust tuleb vastav LED-lamp sisse lülitada.

4 Tulemused

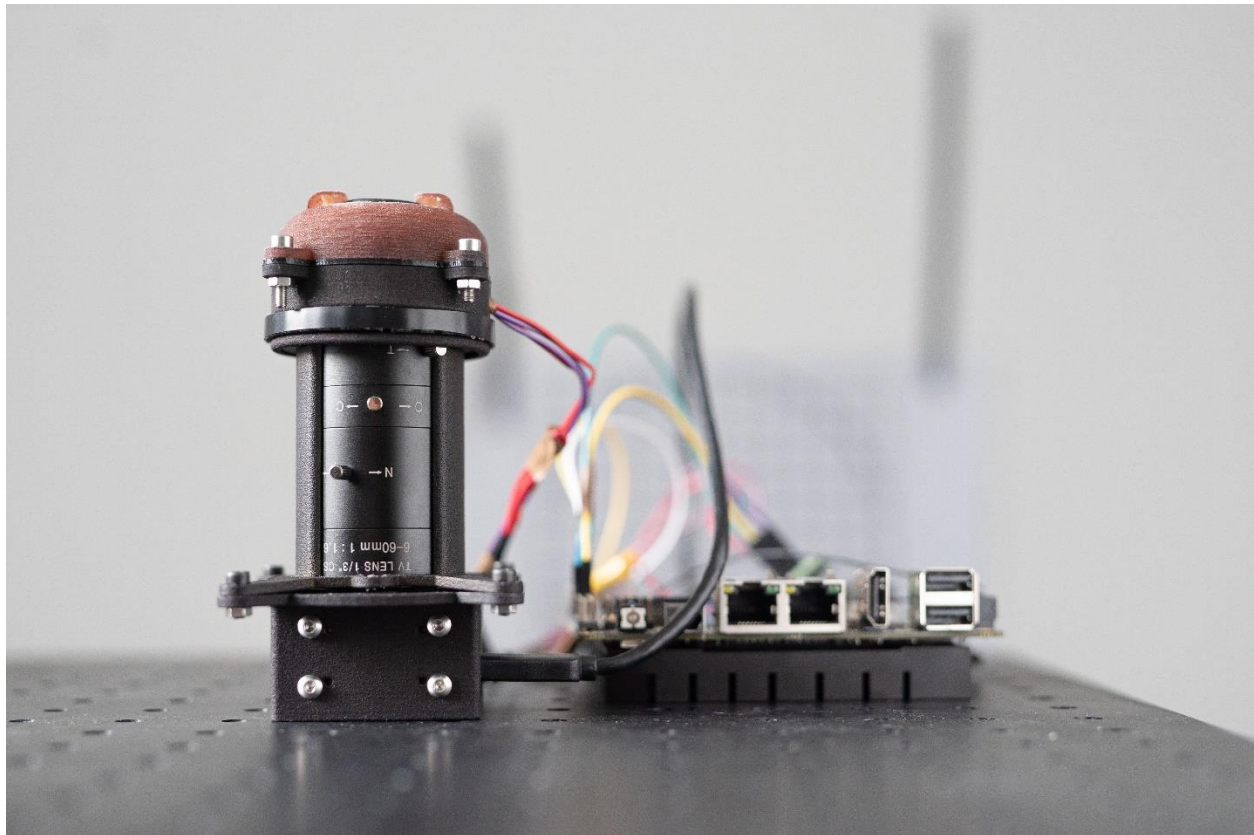
Peamiseks töö tulemuseks on füüsilise prototüübi valmimine. Tulemusena tuleb käsitleda ka tõestust, et seade suudab sellele antud ülesannet täita. Selleks tuli testida seadet ja teha kindlaks selle võimekus ja nõuetele vastavus.

4.1 Valminud prototüüp

Prototüübi kaamera ja objektiivi ümbris ning klaasihoidik läbisid kaks sammu. Esimeses sammus kavandati ja toodeti seade, mis koosnes Chameleon 3 tööstuskaamerast ja ülesandeks kõige paremini õiges paigutuses sobivast olemasolevast objektiivist. Selle mudeli eesmärk oli määrata objektiivi fookuskaugus ja sobivus edasiseks arenduseks. Mudel kasutas keermemehhanismi fookuskauguse reguleerimiseks. Esimene mudel on lisades joonisel 7. Mudeli teisejärguline eesmärk oli ka tutvuda kasutuses olevate materjalidega, seetõttu olid selle mudeli seinad kohati liiga paksud ja maksumus oli suurem.

Teise 3D prinditud mudeli korral suudeti õppida vigadest ja kasutati oma töövahendeid efektiivselt. Kasutusel oli algselt välistatud objektiiv, mis keerati vastupidisesse suunda ehk kaamera vaatas objektiivi nn. volest otsast sisse. Sel moel suudeti käsitsi mõõtmistega kindlaks teha, et see objektiiv on sobilik. Objektiivil on ainult ühes otsas keere, et seda kaamerale kinnitada. Objektiiv peab olema tugevalt kinnitatud kaamerale, et vältida vigu edasises mõõtmises. Objektiivile loodi tihe ümbris, millest ulatusid välja objektiivi reguleerimise nupud. Ümbrise külge integreeriti ka keermemehhanism. Esimese mudeli keermekonstruktsiooni täiustati ja tehti kompaktseks, kuid samas mugavaks. Prinditud 3D mudeliga prototüübi külgvaade on joonisel 3 ja pealtvaade joonisel 4 ilma happekindla ümbriseta. Reguleeritava osa peale kinnitus filtri hoidja ja

happekindel kuppel koos katseklaasi kinnitusega, mis kasutab pesa ja O-rõngast klaasi paigaldamiseks. Katseklaasi kinnitus on nähtav lisades joonisel 8.

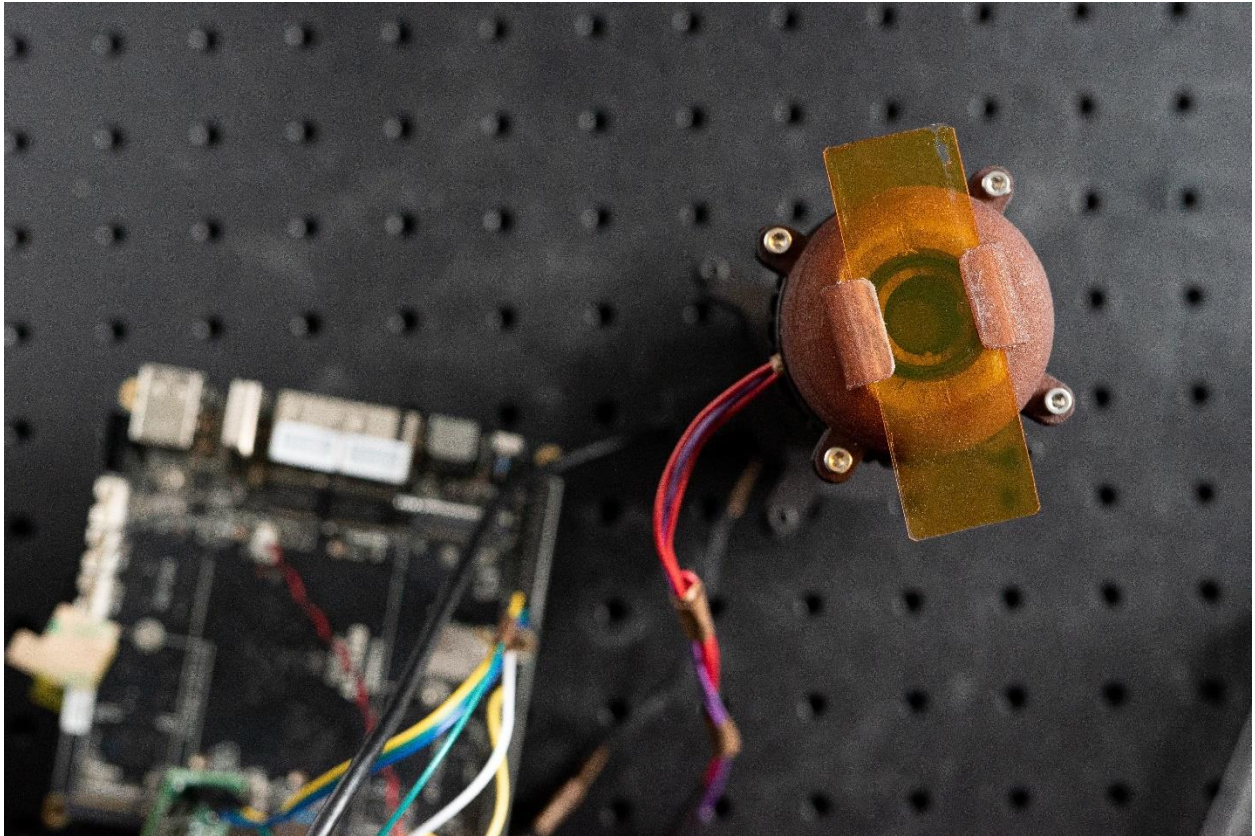


Joonis 3. 3D prinditud osade ja arvuti kooste külgvaade

Trükkplaat suutis täita sellele seatud eesmärgi. Läbimõeldud kavand lihtsustas juotmist ja kasutamist. Trükkplaadil on ühel küljel neli viiku, kuhu ühendatakse selle toide ja LED-lampide sisselülitamise signaalid. Teisel küljel on neli viiku, millest kasutuses on kolm ja kuhu saab ühendada LED-lampidest tulevad juhtmed. Sel moel saab LED-lampe kontrollida digitaalse signaaliga. LED-lampide valguse intensiivsuse muutmiseks valiti katsetamise käigus parimad väärtused, mis tagasid mõlema LED-lambi korral sarnase valguse intensiivsuse. Lõplikus versioonis kasutati sama takistite väärtust 20 oomi.

Andmehõive ja seadistamine käib Odyssey arvuti abil. Arvutil on Windows 10 operatsioonisüsteem, mis võimaldab kasutada paljusid tarkvarasid. Arvutile pääsetakse ligi üle

WiFi ühenduse kasutades AnyDesk kaugühenduse tarkvara. Arvutis olev Arduino kaasprotsessor võimaldab anda ka kontrollsignaale LED-lampidele ja kaamerale. Arduino kood (joonis 10) võimaldab muutujaid muutes kontrollida säritusaega ja mõõtmisagedust. Kasutades Odyssey arvutit on vaja ainsa juhtmena ühendada toitejuhe. See lihtsustab prototüübi happekindlaks tegemist. [20]

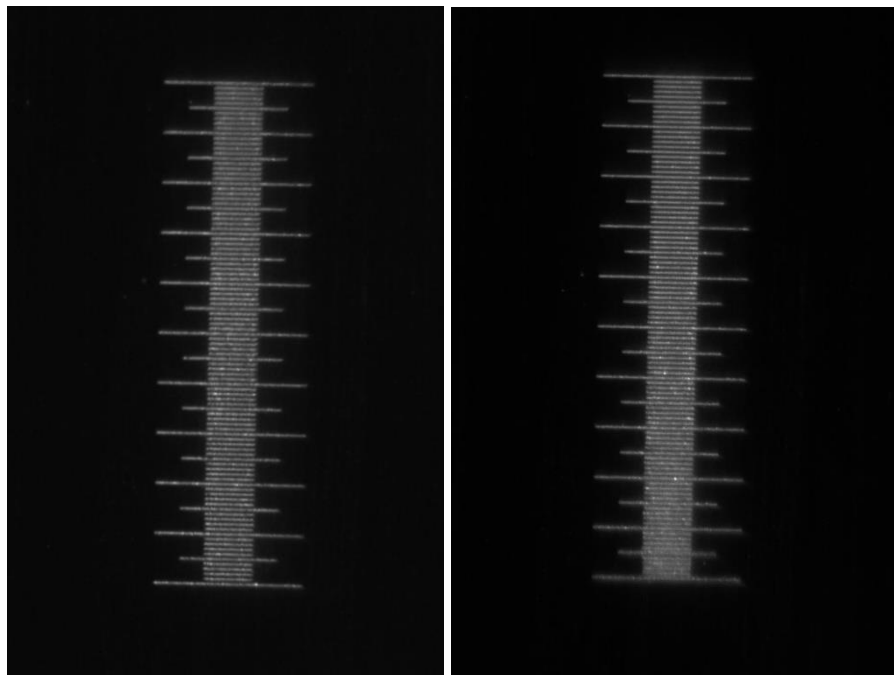


Joonis 4. Valminud prototüübi pealtvaade

4.2 Katse

Prototüübi võimekuse ja nõuetele vastavuse kinnitamiseks tuleb läbi viia nõuetele vastavaid katseid. Katsetada tuleb lahutusvõimet (tabelis 1 nõuded FN1 ja FN2), et seade saaks mõõta piisku vajalikus suuruses. Seadme mõõtmisagedust (tabelis 1 nõue FN4) saab mõõta proovides seadistada maksimaalse võimaliku väärtuse.

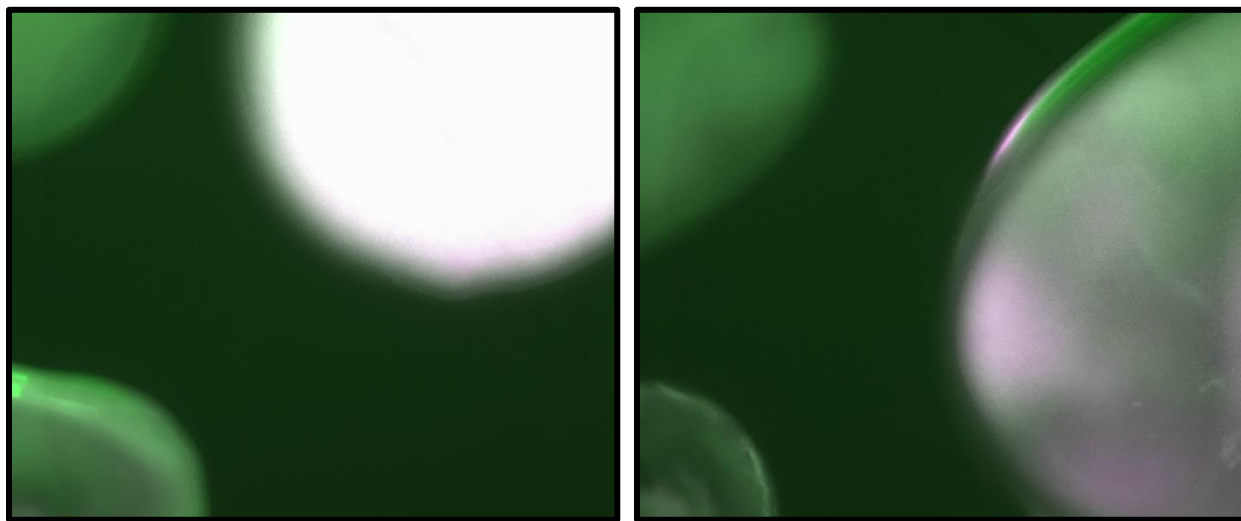
Lahutusvõime määramiseks tuleb teha kindlaks mingi objekti mõõde seadme vaateväljas. Mikromeetrite suuruste objektide mõõtmiseks on olemas katseklaasid, millele on kantud kindla vahemikuga skaala. Range nõudena peab seade eristama 10 mikromeetri suuruseid objekte. Selleks valiti katseklaas, kus skaalal on 10 mikromeetri suurused vahed. Seade suutis tuvastada kõik skaalal olevad jaotised ja piksli suuruseks saadi 0.987 mikromeerit. Seega on täidetud ka lisanõue ühe mikromeetri suuruse objekti tuvastamiseks, kuid sellise reaalse objekti mõõtmine sõltub valgusoludest ja mõõdetavast objektist. Lahutusvõime mõõtmise tulemus on nähtav joonisel 5.



Joonis 5. Lahutusvõime mõõtmine mõlema LED-lambiga valgustades.

Prototüübis oleva kaamera maksimaalne kaadrisagedus on 35 kaadrit sekundis. Mõõtmisageduse saame jagades selle kolmega, sest iga mõõtmise samm koosneb kahest eri LED-lambiga ergastatud pildist ja pildist, millel pole ergastust. Ilma ergastuseta pilti on tarvis, et saaksime teada keskkonna valgusoludest. Seega on teoreetiline maksimaalne pisut üle 11 kaadri sekundis, mis oleks piisav nõude FN4 täitmiseks. Seda sagedust piirab samuti säritusaeg, mis on ühel LED-lampidest tunduvalt pikem teisest. Praktiline suurim kaamera sagedus oli 20 kaadrit sekundis, mis määrab mõõtmisageduse üle 6 korra sekundis.

Reaalses keskkonnas on seadme eesmärk mõõta piiskade happesust. Sellise keskkonna jälgendamiseks asetati sensorkilega kaetud katseklaasile kolme erineva väävelhappe kontsentratsiooniga vedelikke. Lahusteks olid kontsentreeritud väävelhape, vesi ja 1-molaarne väävelhappelahus (pH ligikaudu 0). Piisad klaasil olid mitme millimeetri suurused ja vaatevälja jäid ainult piiskade nurgad. Katse eesmärk oli tõestada, et seade suudab selliseid tilku eristada. Kahe katse töödeldud tulemus on nähtav joonisel 6. Mõlema LED-lambiga ergastud pildid ja ilma ergastuseta pilt kombineeriti üheks seades igale kolmest pildist vastavusse värvikanali. Selline töötlus võimaldab esitada andmeid kompaktsemalt. Ülemises vasakus nurgas on kontsentreeritud väävelhape, paremal on vesi ja vasakul all on vahepealse pH tasemega vedelik.



Joonis 6. Erineva pH tasemega piiskade omavaheline võrdlus kahe katse jooksul

5 Tulemuste analüüs ja järeldused

5.1 Prototüübi nõuetele vastavus

Arendusprotsessi alguses määrati prototüübile nõuded, et see suudaks oma ülesannet täielikult täita. Rangel kujul on kirja pandud nõuded, mille rikkumine segab seadme õigesti toimimist. Vabamas vormis on nõuded, mille täitmine on soovituslik, kuid nende rikkumine ei sega seadme funktsionaalsust.

Prototüübi lahutusvõime kohta käib tabelis 1 soovituslik nõue FN1 ja range nõue FN2. Nõude FN2, mille alusel peab seade suutma tuvastada 10 mikromeetri suurust happepiiska, saab täidetuks lugeda. See ilmnes jooniselt 5, kus on selgelt eristatavad 10 mikromeetrise vahega jaotised. Nõuet FN1, mille alusel võiks suuta tuvastada 1 mikromeetri suurust happepiiska saab lugeda täielikult täidetuks, kuid selline suurus on seadme väikseima mõõdetava jaotise piiril ja see ei pruugi olla alati üheselt eristatav.

Seadme korrektseks toimiseks on vaja teada ka vaatevälja, millel olevate piiskade happesust mõõdame. Lahutusvõimet teades saab arvutada ka seadme vaatevälja ehk ala millel olevate piiskade happesust mõõdetakse. Prototüübi puhul oleva 0,987 mikromeetri suuruse piksli puhul oleks vaateväli ligikaudu 2,4 korda 2 millimeetrit. Selline vaateväli pole piisav lõppseadmes, kuid võimaldab seadmel teostada piisavas mahu. Selle omaduse parandamiseks peab valima uue kaamera ja objektiivi kombinatsiooni.

Vastupidavus kontsentreeritud väävelhappele, mis oli range nõue tabelis 1 nõudena FN3, kindlustati paigutades seadme kinnisesse kummist ümbrisesse, mille happekindluses veenduti varasemalt. Kummist väljaulatuv osa, mis hoiab ka katseklaasi on toodetud happekindlast materjalist ja kõik avad on happepiiskade kindlalt suletud.

Mõõtmisageduse nõue tabelis 1 viitega FN4 täitmist kinnitati katsemeetodil. Katses suudeti koguda kaameraga pilte sagedusega 20 Hz. Mõõtmisagedus on kaamera sagedus jagatud kolmega, sest igal mõõtmisammul on 3 faasi. Mõõtmisagedus 6.(6) Hz on suurem kui nõudena ette nähtud ja sellega on nõue täidetud.

Prototüübi mõõtmetele määratud nõue tabelis 1 viitega FN5 ei saanud täielikult täidetud. Täidetud sai kõrguse nõue. Laiuse ja pikkuse nõuet rikkuvad vaid seadmest väljaulatuvad osad, mis olid vajalikud seadme mugavamaks kasutuseks ja selle modulaarsuse säilimiseks. Väljaulatuvad osad saab tulevastes versioonides vaevata eemaldada.

Seadme energiatarbimise nõuet hoida võimsus väiksem kui 2.5 W (nõue FN6 tabelis 1) ei olnud võimalik täita, sest prototüübi kaamera ja arvuti võimsus koormuse all tunduvalt üle 2.5 W [6], [20]. See nõue on võimalik rahuldada kui seade sisaldab ainult kaamerat, mis edastab andmeid kesksesse arvutisse, milles toimub edasine andmetöötlus. See nõue pärineb teadusartiklist, kus pakuti Tartu Observatooriumi OPIC kaamerat, kuid see ei olnud esimeses prototüübis kasutusel.

Viimane funktsionaalne nõue pärines samuti teadusartiklist, kus sooviti kasutada standardliidest seadmega suhtlemiseks. Artiklis mainiti riistvaralisi liideseid nagu SPI või Spacewire. Selline suhtlus oleks eeldanud piltide edastamist kesksesse arvutisse. Valminud prototüübis võib selleks liideseks lugeda USB liidese, millega saab arvuti pilte kaamerast või juhtmevaba WiFi ühenduse üle mille teostatakse tarkvara seadistamist ja andmete kogumise juhtimist. Mõlemad ühendused on standardsed ja laialdaselt kasutusel, seega on ka nõue FN7 tabelis 1 täidetud. [1]

Mittefunktsionaalsete nõuete täitmist pole niivõrd lihtne kontrollida. Mugavuse nõue sai täidetud, sest kasutajad on seadme mugavusega rahul. Dokumentatsiooni nõue sai täidetud, sest valmis dokumentatsioon lõputöö ja kasutusjuhendi näol. Modulaarsuse nõude võib lugeda täidetuks, sest seadme teises versioonis sai kasutada esimese varianti juppe.

5.2 Piiskade pH taseme määramine

Piiskade pH taseme määramine on oluline, et teha kindlaks kas prototüüp suudab täita selle põhilist ülesannet. Jooniselt 6 on eristatavad erinevate ainete piisad. Vesi on heledam kui happesed ained. Tekkida võiks seos, et happesemad ained nagu kontsentreeritud väävelhape vasakus ülemises nurgas, on tumedamad, kuid sellist järeldust ei saa teha. Peamine põhjus on happepiiskade suurus. Nii suurte tilkade puhul on seadme vaadeldav ala juba küllastunud ja mõõtmistulemused pole enam õiged. Seade on mõeldud vaatlema mõne kuni paarikümne mikromeetri suuruseid tilku. Suuremate tilkade puhul hakkab neis valgus murduma sobimatult ja tekivad peegeldused, mis tekitavad valesid mõõtetulemusi. Seega tuleks seadet põhjalikumalt testida kambris, kus on võimalik nii väikseid piisku tekitada. Selline vahend on hetkel väljatöötamisel Tartu Observatooriumis ja peaks suutma toota piisku suuruses, mis jäljendavad Veenuse atmosfääri.

6 Kokkuvõte

Tartu Observatoorium osaleb kosmosemissioonis, mille käigus uuritakse elu võimalikust ja olemasolu Veenusel. Selleks saadetakse sinna kosmosesond, millega mõõta erinevaid atmosfääri omadusi ja muuhulgas selle happesust. Happesuse mõõtmise seadme valmistab Tartu Observatoorium. Seadme tööpõhimõtet on laboritingimustes kinnitatud, kuid puudub seade mis sobiks missiooni piirangutega. Selle probleemi lahendamiseks valmistati käesoleva bakalaureusetöö käigus prototüüp, millega happesust mõõta.

Prototüübi valmistamiseks kasutati olemasolevat kaamerat, objektiivi ja andmehõive arvutit. Need seadmed tuli paigutada kosmosemissioonile sarnasesse koostesse, et võimaldada seadme edasist testimist. Arendusprotsessi käigus valmis 3D kavand seadmest, mis toodeti 3D printeriga. Prototüübi arendusel kasutati nõuete põhist kavandamist, et töö lõpuks valmiks ootustele vastav seade. Seadme elektroonika töökindluse parandamiseks valmistati ka trükkplaat LED-lampide kontrollimiseks digitaalse signaaliga.

Bakalaureusetöö tulemusena valmis prototüüp, mis sarnaneb mõõtmiselt kosmosemissiooni jaoks vajaminevale seadmele ja võimaldab mõõta happesust paari kuni mõnekümne mikromeetri suuruste piiskade puhul. Sealhulgas on võimalik eristada mitme piisa happesust samaaegselt. Mõõtmise käigus vaadatakse katseklaasi läbi objektiivi kaameraga ja igal kaadril ergastatakse pilti erineva LED-lambiga. Kahe erineva ja ilma ergatuseta piltide võrdlusel on võimalik määrata iga pildil oleva piisa happesust.

Lõputöö käigus valminud seade suutis täita seatud eesmärgi. Seadme disainile püstitatud rangeid nõudeid täideti täielikult ja teisi nõudeid täideti piisavalt, et saavutada parim seadme funktsionaalsus olemasolevate vahenditega. Prototüüp võimaldab eristada selle vaadeldavat pinda tabavate piiskade happelisust samaaegselt. Edasine testimine on vajalik, et töötada välja algoritm seoste leidmiseks happesuse ja piiskade intensiivsuse vahel.

Tänuavaldused

Autor soovib tänada doktoranti Laila Kaasikut, kes mind tohutult aitas prototüübi valmistamise igal sammul ja oli alati äärmiselt abivalmis. Tänan ka oma juhendajat, sest tema andis mulle teema ja suutis vastata ammendavalt igale mu küsimusele.

M. Avi

Viited

- [1] L. Kaasik, I. Rahu, E. M. Roper, R. Seeba, A. Rohtsalu, ja M. Pajusalu, „Sensor for Determining Single Droplet Acidities in the Venusian Atmosphere“, *Aerospace*, kd 9, nr 10, Art. nr 10, okt 2022, doi: 10.3390/aerospace9100560.
- [2] C. S. Cockell, „Life on Venus“, *Planet. Space Sci.*, kd 47, nr 12, lk 1487–1501, dets 1999, doi: 10.1016/S0032-0633(99)00036-7.
- [3] A. T. Basilevsky ja J. W. Head, „The surface of Venus“, *Rep. Prog. Phys.*, kd 66, nr 10, lk 1699, sept 2003, doi: 10.1088/0034-4885/66/10/R04.
- [4] S. Seager *et al.*, „Venus Life Finder Habitability Mission: Motivation, Science Objectives, and Instrumentation“, *Aerospace*, kd 9, nr 11, Art. nr 11, nov 2022, doi: 10.3390/aerospace9110733.
- [5] „Morning Star Missions“, *Venus Cloud Life - MIT*. <https://venuscloudlife.com/mission-concepts/> (vaadatud 24. mai 2023).
- [6] „CM3-U3-50S5M-CS 2/3" Chameleon®3 Monochrome Camera | Edmund Optics“. <https://www.edmundoptics.com/p/cm3-u3-50s5m-cs-2-3-inch-chameleon3-monochrome-camera/37031/> (vaadatud 6. mai 2023).
- [7] „L1C1-VLT1000000000 Lumileds | Mouser Estonia“. <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Lumileds/L1C1-VLT1000000000?qs=T3oQrpIy3y%252BsowLvcZK%252BjA%3D%3D> (vaadatud 24. mai 2023).
- [8] „MTE4600N Marktech Optoelectronics | Mouser Estonia“. <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Marktech-Optoelectronics/MTE4600N?qs=DRkmTr78QAQzTYQauIOPBg%3D%3D> (vaadatud 24. mai 2023).
- [9] „SCHOTT Colored Glass Longpass Filters | Edmund Optics“. <https://www.edmundoptics.com/f/schott-colored-glass-longpass-filters/39632/> (vaadatud 24. mai 2023).
- [10] „3D Printing Materials: Plastic, Metal, and More“, *Shapeways*. <https://www.shapeways.com/materials> (vaadatud 11. mai 2023).
- [11] „BCR421UW6-7 DIODES INCORPORATED - IC: driver | single transistor; current regulator,LED driver | TME - Elektroonilise osad“. <https://www.tme.eu/ee/details/bcr421uw6-7/draiverid-led/diodes-incorporated/> (vaadatud 11. mai 2023).

- [12] „AP2127K-ADJTRG1 DIODES INCORPORATED - IC: voltage regulator | LDO,linear,adjustable; 0.8÷5.5V; 0.4A | TME - Elektroonilise osad“. <https://www.tme.eu/ee/details/ap2127k-adjtrg1/reguleeritud-pingeregulaatorid-ldo/diodes-incorporated/> (vaadatud 11. mai 2023).
- [13] „77311-101-04LF Amphenol Communications Solutions - Pin header | pin strips; BERGSTIK; male; PIN: 4; straight; 2.54mm | TME - Elektroonilise osad“. <https://www.tme.eu/ee/details/77311-101-04lf/tihvtliistud-ja-kontaktid/amphenol-communications-solutions/> (vaadatud 11. mai 2023).
- [14] „08053C105K4T2A KYOCERA AVX - Capacitor: ceramic | MLCC; 1uF; 25V; X7R; ±10%; SMD; 0805 | TME - Elektroonilise osad“. <https://www.tme.eu/ee/details/08053c105k4t2a/kondensaatorid-mlcc-smd/kyocera-avx/> (vaadatud 11. mai 2023).
- [15] „C0603C471K3RACTU KEMET - Capacitor: ceramic | MLCC; 470pF; 25VDC; X7R; ±10%; SMD; 0603 | TME - Elektroonilise osad“. <https://www.tme.eu/ee/details/c0603c471k3ractu/kondensaatorid-mlcc-smd/kemet/> (vaadatud 11. mai 2023).
- [16] „AR03BTCX4702 Viking - Resistor: thin film | precise; SMD; 0603; 47kΩ; 0.1W; ±0.1%; 25ppm/°C; AR0603-47K-0.1% | TME - Elektroonilise osad“. <https://www.tme.eu/ee/details/ar0603-47k-0.1%25/takistid-smd/viking/ar03btcx4702/> (vaadatud 11. mai 2023).
- [17] „SP123WF200JT2E ROYAL OHM - Resistor: thick film | high power; SMD; 2512; 20Ω; 3W; ±1%; SP12-20R-1% | TME - Elektroonilise osad“. <https://www.tme.eu/ee/details/sp12-20r-1%25/takistid-smd/royal-ohm/sp123wf200jt2e/> (vaadatud 11. mai 2023).
- [18] „SP123WF220KT1E ROYAL OHM - Resistor: thick film | high power; SMD; 2512; 2.2Ω; 3W; ±1%; SP12-2R2-1% | TME - Elektroonilise osad“. <https://www.tme.eu/ee/details/sp12-2r2-1%25/takistid-smd/royal-ohm/sp123wf220kt1e/> (vaadatud 11. mai 2023).
- [19] „PCB & PCBA prototypes and small series ‘right first time’ - Eurocircuits“. <https://www.eurocircuits.com/> (vaadatud 11. mai 2023).
- [20] „ODYSSEY - X86J4105800 Most expandable Win10 Mini PC (Linux and Arduino Core) with 8GB RAM“, 2. juuli 2022. <https://www.seeedstudio.com/ODYSSEY-X86J4105800-p-4445.html> (vaadatud 12. mai 2023).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mattias Avi

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

“ Prototüüp happesuse mõõtmiseks kaameraga”

mille juhendajad on Mihkel Pajusalu ja Laila Kaasik

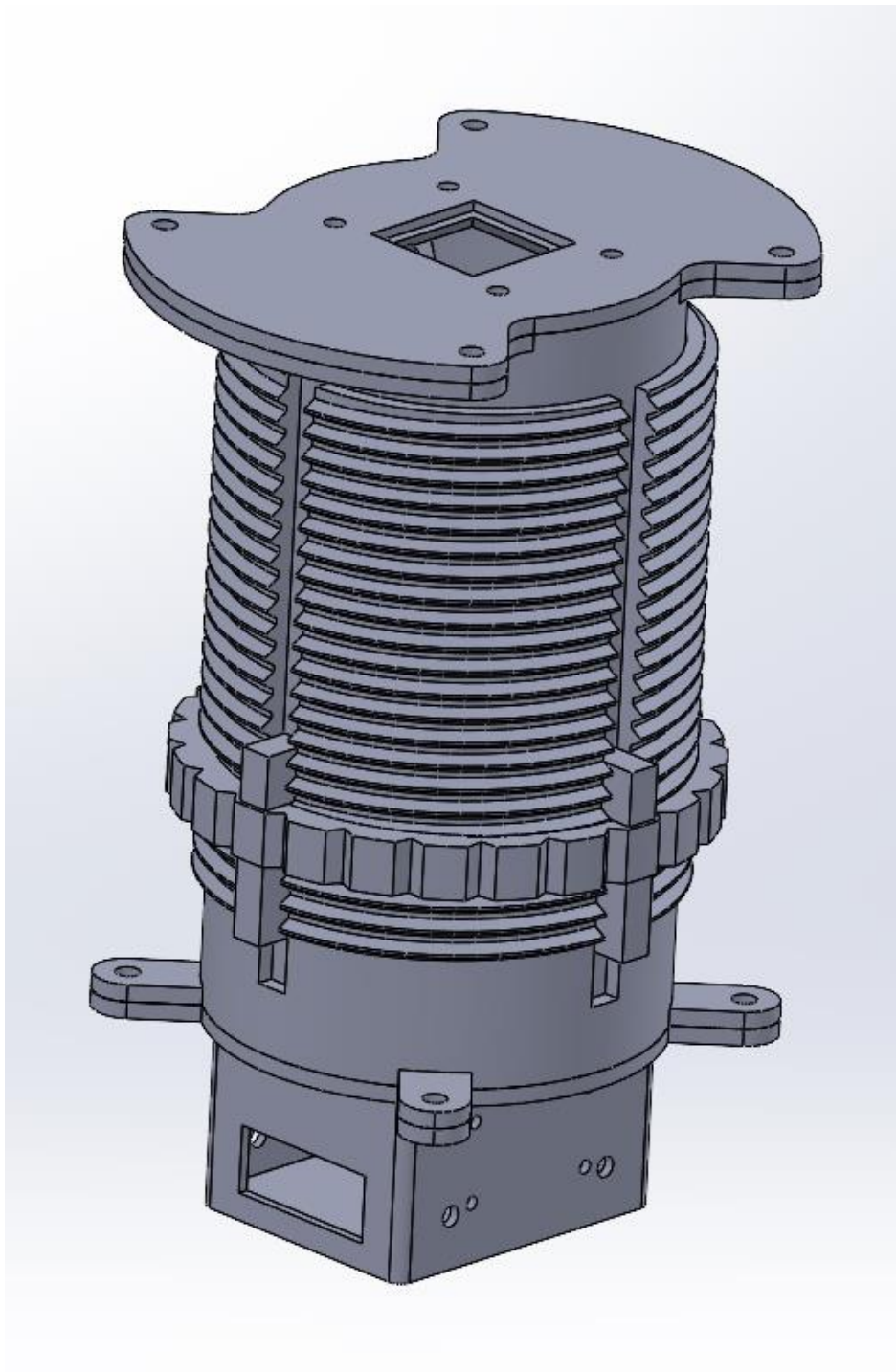
reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

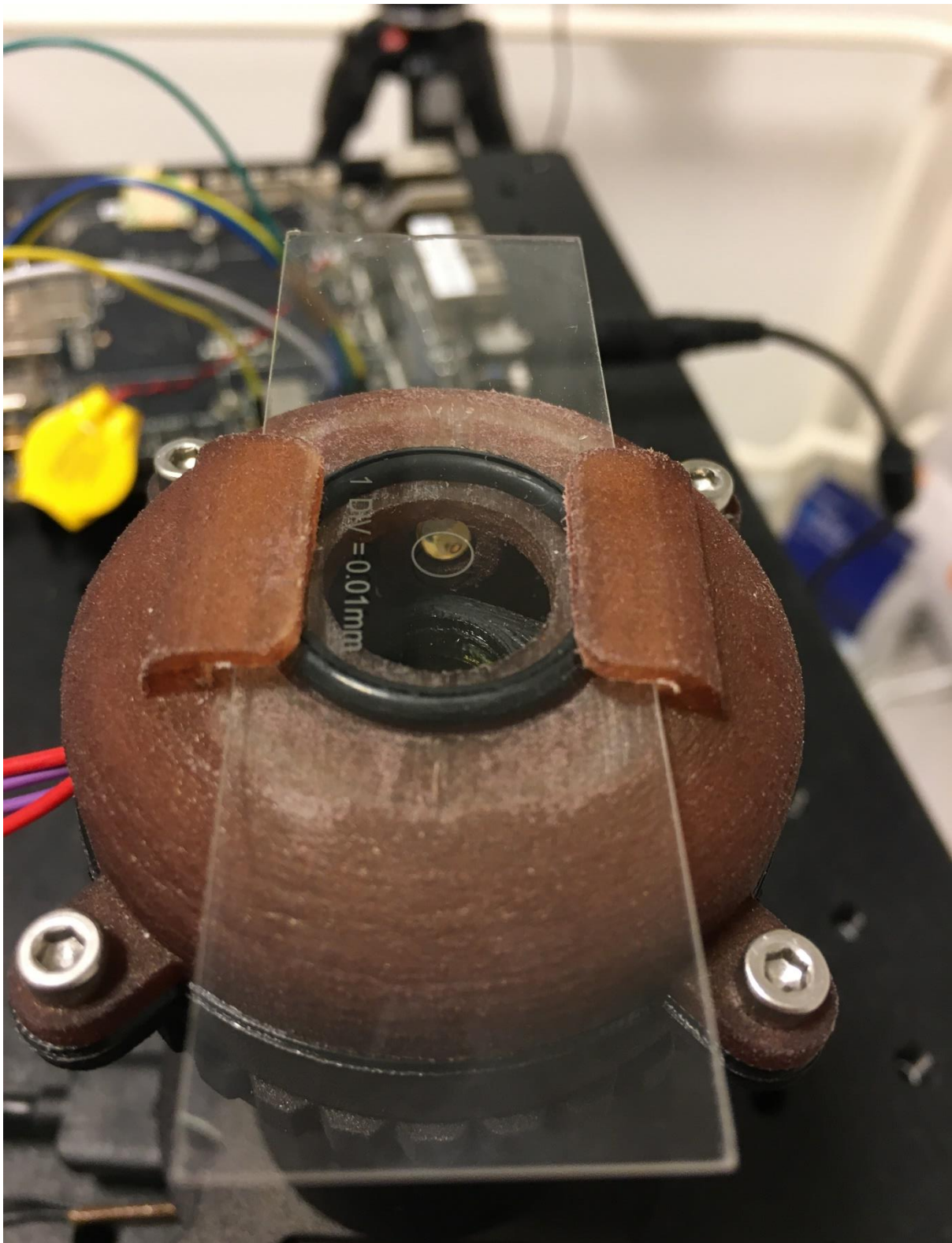
Mattias Avi

25.05.2023

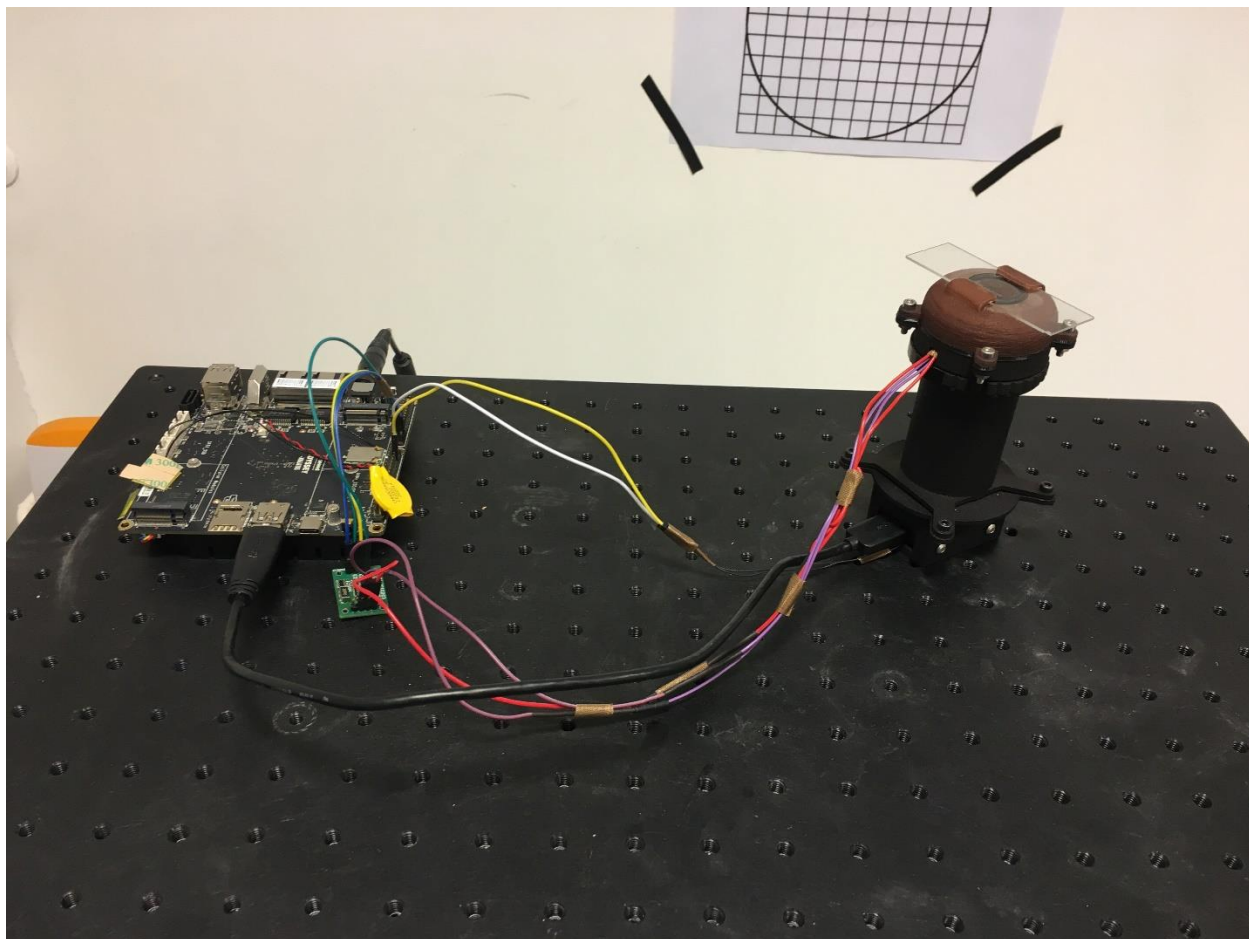
Lisad



Joonis 7. Esimene prototüübi mudel Solidworks keskkonnas



Joonis 8. Katseklaasi kinnitus



Joonis 9. Prototüübi süsteemi koondvaade

```

1  float fps = 20; // Maksimaalne fps 20
2  // Exposure values used only if trigger mode is 1.
3  int exposureLED1 = 20000; // 430 nm LED camera exposure
4  int pinLED1 = D11; // 430 nm LED enable pin
5  int exposureLED2 = 2000; // 450 nm LED camera exposure
6  int pinLED2 = D12; // 450 nm LED enable pin
7  int syncPin = D13; // camera synchronization pin
8  int delayLED1; // variables to hold delay values
9  int delayLED2;
10 void setup() {
11     // Set 3 pins as outputs
12     pinMode(pinLED1, OUTPUT);
13     pinMode(pinLED2, OUTPUT);
14     pinMode(syncPin, OUTPUT);
15     // Calculate delay variables only once.
16     delayLED1 = (1000.0/fps) - (exposureLED1/1000.0);
17     delayLED2 = (1000.0/fps) - (exposureLED2/1000.0);
18 }
19
20 void loop() {
21     // First LED 430 nm
22     digitalWrite(pinLED1, HIGH);
23     digitalWrite(syncPin, HIGH);
24     delayMicroseconds(exposureLED1);
25     digitalWrite(syncPin, LOW);
26     digitalWrite(pinLED1, LOW);
27     delay(delayLED1);
28
29     // Second LED 450 nm
30     digitalWrite(pinLED2, HIGH);
31     digitalWrite(syncPin, HIGH);
32     delayMicroseconds(exposureLED2);
33     digitalWrite(syncPin, LOW);
34     digitalWrite(pinLED2, LOW);
35     delay(delayLED2);
36
37     // LEDs OFF
38     digitalWrite(syncPin, HIGH);
39     delay(10);
40     digitalWrite(syncPin, LOW);
41     delay((1000.0/fps)-10);
42     // --- Auxiliary code to find exposure values --- //
43     /*
44     for(int i = 1; i<20; i++) {
45         digitalWrite(D11, HIGH);
46         digitalWrite(D13, HIGH);
47         delayMicroseconds(i*1000);
48         Serial.println(i*1000);
49         digitalWrite(D13, LOW);
50         delay((1000.0/fps)-((i*1000)/1000.0));
51         digitalWrite(D11, LOW);
52     }
53     */
54 }

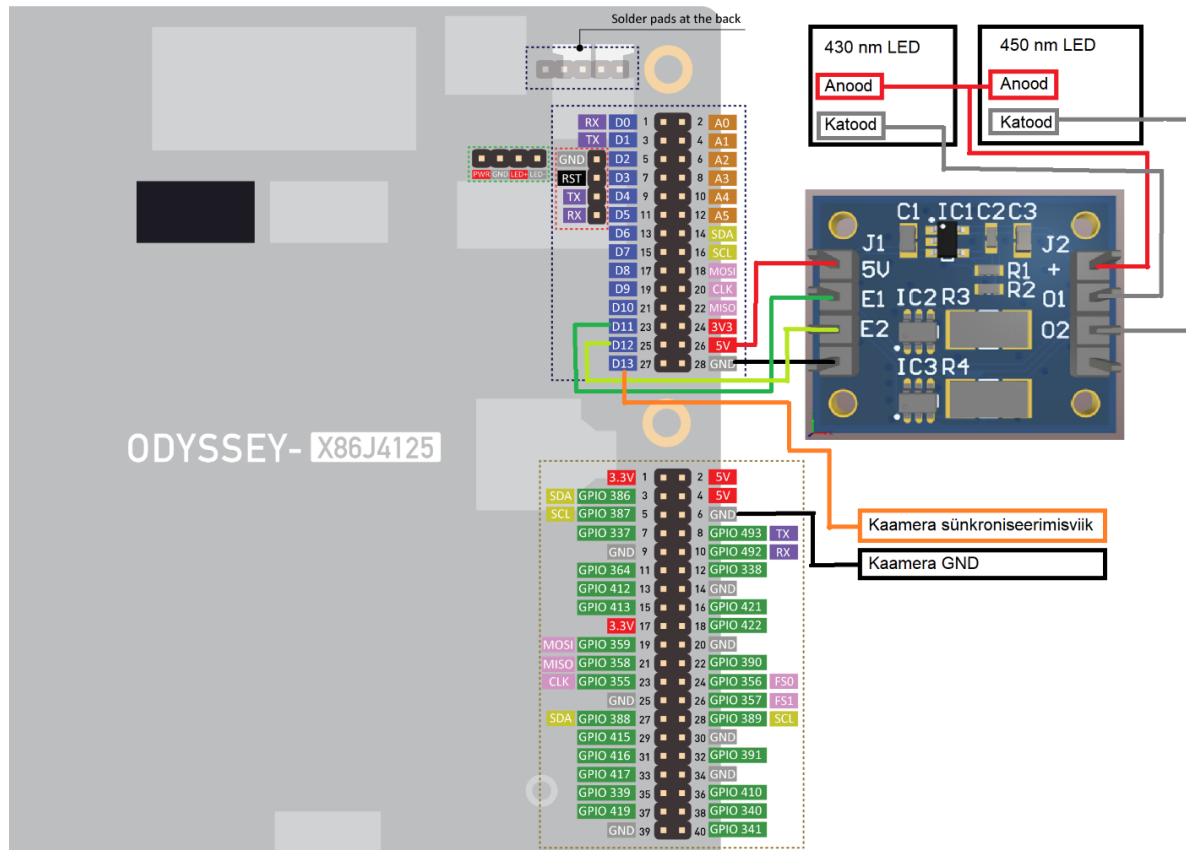
```

Joonis 10. Arduino kood LED-lampide ja kaamera sünkroniseerimiseks

Kasutusjuhend

Füüsiliste ühenduste loomine

Trükkplaat ja Odyssey arvuti tuleb ühendada vastavalt järgmisele skeemile:

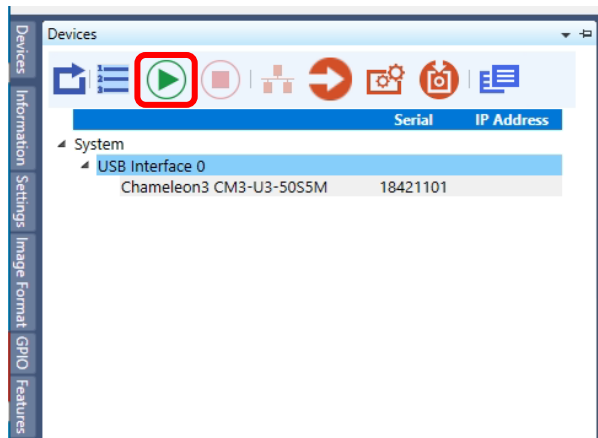


Arvutiga ühendumine

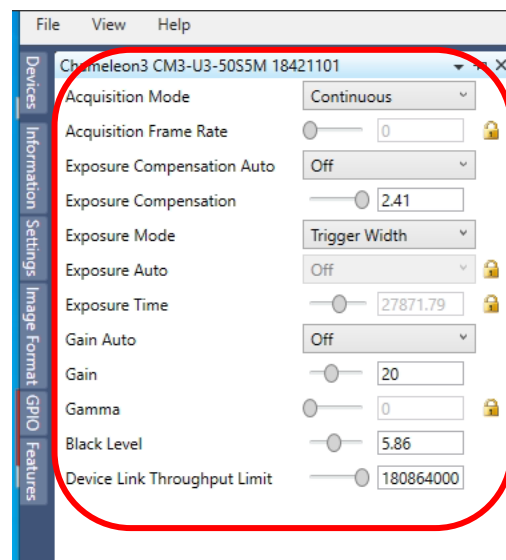
1. Kui ühenduste õiguses on veendunud võib arvutile ühendada toitejuhtme, et see käivitada.
2. Käivitumise ajal ühenda kaamera ja arvuti omavahel. Ühendus tuleb teha arvuti sinise sisuga USB pesasse, et tagada korrektne toimimine. Kui seade ühendada teistesse pesadesse pole suhtlusliides piisaval kiire ja kaamera kaadrisagedus on piiratud madalaks.
3. Seejärel käivita oma arvutis AnyDesk tarkvara ja proovi luua ühendust luua arvutiga.
4. Kui ühendus on edukas, siis saad ligipääsu arvutisse.

Kaamera ettevalmistamine

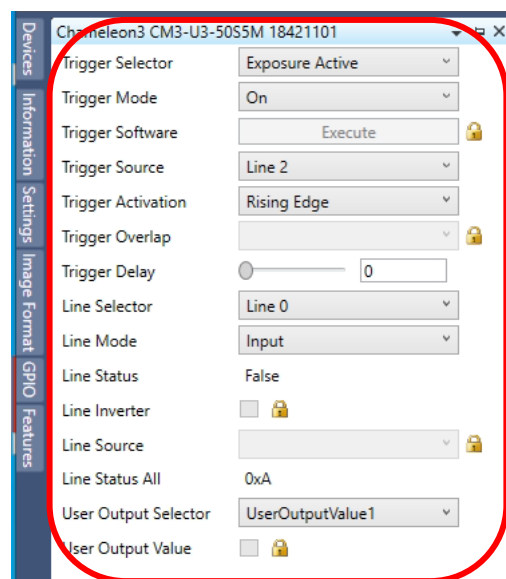
1. Käivita SpinView tarkvara.
2. Kui kaamera on arvutiga ühendatud ilmub see seadmete alla.
3. Vali seade ja vajuta rohelisele nupule.



4. Peale kaamera käivitumist tuleb see seadistada. Seda saab teha vasakul paneelil olevate akende kaudu.
5. Ava „Settings“ aken ja seadista järgmiselt



6. Ava „GPIO“ aken ja seadista järgmiselt



7. Nüüd on kaamera seadistatud ja peaks kuvama kaamerast videovoogu sagedusega 20 Hz.

Kaamerapildi salvestamine

Kaameraga saab pilte ja videoid salvestada kasutades punast ümmargust nuppu. Menüüst saab seejärel valida salvestuse asukoha ja salvestuse meetodi.

