

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Infotehnoloogia teaduskond

Laura Kõrgmaa 213464IACB

Valgussensorite võrdlus videopildi viite mõõtmisel

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Priit Roosipuu

MSc

Kaasjuhendaja: Kaiser Pärnamets

PhD

Tallinn 2024

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Laura Kõrgmaa

13.05.2024

Annotatsioon

Lõputöö eesmärgiks oli anda ülevaade erinevatest valgussensoritest ning leida parim valgussensor ning elektriskeem süsteemi jaoks, mis mõõdab kaamera videopildi viidet läbi ekraani.

Optimaalne valgusanduri ja skeemi leidmiseks viidi läbi katseid. Algselt mõõdeti erinevate skeemide viide ostilloskoobi abil. Seejärel testiti kõige püsivamaid ja kiiremaid skeeme mikrokontrolleriga. Selleks kasutati Raspberry Pi 5-te. Võrreldi viigult otse lugemist ja analoog-digitaalmuunduri kasutamist. Lõpuks testiti skeemide valikut reaalse süsteemiga, et näidata nende võimet mõõta kaamera viidet. Kasutatud meetodika oli olemuselt kvantitatiivne. Läbiviidud testid näitasid, et kõige parem sensor ja skeem oli fotodiodi kasutav transimpedantsvõimendi skeem.

Töö peatükis 2 antakse ülevaade erinevatest valgussensoritest ning valitakse sensorid testimiseks. Peatükis 3 luuakse elektriskeemid testimiseks. Peatükis 4 antakse ülevaade testidest, mida sooritati ning esitatakse testimistulemused. Peatükis 5 analüüsitakse tulemusi ning antakse hinnang tehtud tööle.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 29 leheküljel, 5 peatükki, 21 joonist, 13 tabelit.

Abstract

" Comparison of Light Sensors for Video Latency Measurement"

The aim of this thesis is to give an overview of different light sensors and to identify the optimal light sensor and schematic for measuring a camera's delay.

To identify the optimal light sensor and schematic, several tests were conducted. Initially, the time delay of different schematics was measured under ideal conditions using an oscilloscope. Subsequently, the most stable and fastest schematics were tested under ideal conditions using a Raspberry Pi 5. Lastly, a selection of the schematics was tested with a real system to demonstrate their capability to measure the delay. The methodology employed was quantitative in nature. The tests conducted revealed that the most effective sensor and schematic was the transimpedance amplifier schematic utilizing a photodiode. This was due to its superior speed and stability.

In Chapter 2 overview of different light sensors is given and sensors are chosen for testing. In Chapter 3 electrical schematics are developed to facilitate the testing of these sensors. Chapter 4 presents an overview of the conducted tests and presents their respective results. In Chapter 5 test results are analysed and an assessment is given to the work that was done.

The thesis is in Estonian and contains 29 pages of text, 5 chapters, 21 figures, 13 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

AD-muundur	Analoog-digitaalmuundur
LED	<i>light emitting diode</i> , valgusdiod
nm	nanomeeter
SPI	<i>Serial peripheral interface</i> , sünkroonne järjestiksuhtluse liidese standard
TIA	<i>transimpedance amplifier</i> , transimpedantsvõimendi

Sisukord

1 Sissejuhatus	10
2 Valgussensorid	12
2.1 Fotodiodid.....	12
2.2 Fototakistid	13
2.3 Fototransistorid.....	14
2.4 Digitaalsed	14
2.5 Valitud sensorite võrdlus	14
3 Elektriskeemid	16
3.1 Fotodiodiga komparaatori skeem	16
3.2 Fotodiodiga transimpedantsvõimendi skeem	17
3.3 Fototakisti skeem.....	19
3.4 Fototransistori skeem.....	20
3.5 Digitaalse sensori skeem	20
4 Testimine	21
4.1 Komparaatori skeem.....	21
4.2 Transimpedantsvõimendi skeem	21
4.3 Fototakisti skeem.....	23
4.4 Fototransistori skeem.....	24
4.5 Mikrokontroller	25
4.6 Viigult otse lugemine.....	25
4.7 Analoog-digitaalmuundur.....	26
4.8 Skeemide testimine mikrokontrolleriga.....	28
4.9 TSL2561 testimine Raspberry Pi 5-ga.....	32
4.10 Komparaatori skeemi, transimpedantsvõimendi skeemi ja fototransistori skeemi testimine Raspberry Pi 5-ga.....	32
4.11 Testimine ekraaniga.....	34
4.11.1 Testimine transimpedantsvõimendi skeemiga.....	34
4.11.2 Testimine komparaatori skeemiga.....	35
4.12 Testimine digitaalse sensoriga.....	36

4.13 Testimine ekraanilt tehisliku viitega.....	36
5 Analüüs.....	38
5.1 Edasiarendus.....	39
6 Kokkuvõte	40
Kasutatud kirjandus	42
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	46
Lisa 2	47

Jooniste loetelu

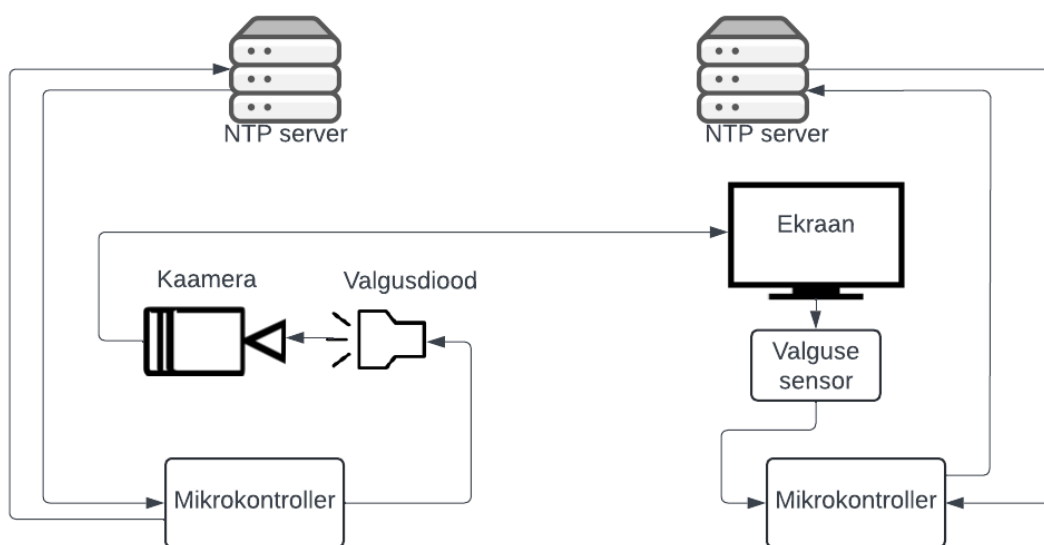
Joonis 1. Kogu süsteemi ülevaade.....	10
Joonis 2. PD-333-3C tundlikus.....	13
Joonis 3. BPW34 tundlikus.	13
Joonis 4. Komparaatori skeem viite mõõtmiseks.....	17
Joonis 5. Transimpedantsvõimendi skeem.	18
Joonis 6. Kasutamata operatsioonvõimendi ühendusskeem.....	19
Joonis 7. Fototakisti skeem.....	19
Joonis 8. Fototransistori skeem.	20
Joonis 9. TSL2561 ühendusskeem Raspberry Pi 5-ga.	20
Joonis 10. Omahilistumise mõõtmine, kus on võimalik näha valgusdiodi juhtivat signaali (oranž) ja väljundi signaali (roheline).	23
Joonis 11. Viigult lugemise kiirus koos kella küsimisega.....	26
Joonis 12. MCP3008 ühendused Raspberry Pi 5-ga.....	27
Joonis 13. Aeg mis läks ühe väärtuse lugemiseks mcp3008-ga erinevate koodidega....	28
Joonis 14. Mikrokontrolleriga testimise algoritm.....	29
Joonis 15. Valgusdiodi lõim.	30
Joonis 16. Viigult otse lugemise lõim.	31
Joonis 17. Valgusimpulsi tunnetamise viite võrdlus kasutades mõõtmiseks sensorit TSL2561.....	32
Joonis 18. Transimpedantsvõimendi skeemi viide kaamera ja ekraaniga.	34
Joonis 19. Komparaatori skeemi viited ekraanilt mõõtes.....	35
Joonis 20. TSL2561 viited ekraanilt mõõtes.	36
Joonis 21. Transimpedantsvõimendi skeemiga viite mõõtmine ekraanilt, kui videopildile on lisatud kunstlik viide.....	37

Tabelite loetelu

Tabel 1. Fotodiodide võrdlus.....	13
Tabel 2. Valgussensorite võrdlus.....	15
Tabel 3. Komparaatori skeemi omaviide ostsiloskoobiga mõõtes.	21
Tabel 4. Transimpedantsvõimendi skeemi omaviidete võrdlused ostsiloskoobiga mõõtes.....	22
Tabel 5. PD-333-3C ja BPW34 omaviidete võrdlus ostsiloskoobiga mõõtes.....	22
Tabel 6. Fototakisti skeemi mõõtetulemused.	23
Tabel 7. Kahe fototransistoride viidete tulemused kasutades takisti skeemi.	24
Tabel 8. Viigult lugemise kiiruse võrdlus Pythoniga ja C keelega kasutades gpiod teeki.	26
Tabel 9. AD-muunduri lugemise kiirus erinevaid teeke kasutades.	28
Tabel 10. Mõõtmistulemused AD-muunduri vs viigult lugemine transimpedantsvõimendi skeem.....	33
Tabel 11. BPW 34 ja PD-333-3C omaviite tulemuste võrdlused Raspberry Pi-ga mõõtes.....	33
Tabel 12. Fotodiodide skeemide omaviite võrdlus mikrokontrolleriga mõõtes.....	33
Tabel 13. Viite võrdlused ilma ja kunstliku viitega ekraanilt transimpedantsvõimendi skeemiga mõõtes.	37

1 Sissejuhatus

Antud lõputöö käigus leitakse parim valgussensor videopildi viite mõõtmisüsteemile. Videopildi viite süsteem koosneb kahest eraldi koosnevast osast. Süsteemi ülevaade on toodud joonisel 1. Ülevaate loomiseks kasutati rakendust Lucidchart [1]. Üks osa on mikrokontroller, mille külge on ühendatud valgusdiodid. Valgusdiodid asetatakse kaamera ette. Kaamerapilti näidatakse ekraanil, mille ees asub valgussensor ja teine mikrokontroller. Mõlemad mikrokontrollerid on ühendatud NTP serveritega, mistõttu ideaalis peaks nendel olema sama aeg. Süsteem mõõdab viidet, mis on ajavahemik valgusdiodi süttimise hetke ja hetke vahel, mil sensor valgusdiodi tuvastab. Seda kuidas videopilt kaamerast ekraanile jõuab antud lõputöö ei käsitle. Süsteem, mis mõõdab viidet peab olema võimalikult püsiv ning mitte lisama suurt viidet.



Joonis 1. Kogu süsteemi ülevaade.

Aine IAS1420 raames loodi sellisele süsteemile idee tõendus (*proof-of-concept*). Süsteem ehitati osadest, mis olid käes olemas ja loodud elektriskeemi ei analüüsitud eriti. Võrreldi fototakistit ja fotodiodi, muid sensoreid mitte. Rohkem saab selle kohta lugeda projekti aruandest [2]. Süsteem, mis kasutab viite mõõtmiseks valgusdiodi ja valgussensorit pole uus [3], [4]. Paraku pole siinse töö autorile teadaolevalt võrreldud, kuidas eri

valgussensorid käituvad sellises süsteemis. Seetõttu on oluline uurida erinevate sensorite tugevusi ja nõrkusi ning leida optimaalne lahendus.

Küsimused mida töö lahendab on järgmised:

- 1) Millised on erinevad valgussensorid ja millised tegurid mõjutavad nende valikut?
- 2) Milline on sobivaim ühendusskeem valgussensorite testimiseks makettplaadil?
- 3) Milline on parim valgussensor selleks, et mõõta kaamera videopildi viidet?

Töö esimeses osas antakse ülevaade erinevatest valgussensoritest ja valitakse sobivamad sensorid testimiseks. Töö teises osas valitakse sobivaim sensor süsteemi jaoks. Selleks kasutatakse teoreetilist analüüsi ja testimist. Testimise jaoks luuakse ühendus elektriskeemid makettplaadil.

2 Valgussensorid

Valgussensorid on sensorid, mis tuvastavad elektromagnetilist kiirgust ultraviolettkiirgusest infrapunani. Need jagatakse kvantiliseks (*quantum*) või termiliseks (*thermal*) vastavalt sellele kas footonite neeldumine sensormaterjalis põhjustab kvant või termilise reaktsiooni [5, p. 406]. Sensori valikul peab arvesse võtma selle erinevaid omadusi. Esiteks on tähtis vaadata selle spektraaltundlikkust ehk millisel valguse lainepikkusel on see tundlik. Lainepikkus sõltub valguse ehk valgusdiodi värvist. Kuna vastavalt sensorile on võimalik valida sobivat värvi valgusdiodi siis ei ole see takistuseks. Ainuke takistus on, et ei saa valida infrapuna diodi, sest sensor peab tunnetama valgust läbi ekraani. Valikut mõjutab ka sensori reageerimiskiirus. Ka on tähtis sensori kättesaadavus, mille alla läheb selle hind. [6]

Eelistati Eestis asuvaid poode välismaiste poodide asemel, sest välismaalt tellides lisandub postikulu ning toote saabumine võib võtta kauem aega. Siiski tutvuti ka välismaise poodide valikuga. Antud töös võrreldakse järgmiseid sensoreid: fotodiodid, fototakistid, fototransistorid ja digitaalsed valgusandurid. Testimisel eelistati sensoreid, mida oli lihtsam hankida ja mille kasutamiseks oli vaja luua lihtsamaid skeeme. Näiteks ei testitud fotoelementidega (*phototubes*), mida tänapäeval eriti ei kasutata, ning laviinfotodiodidega, millel on kõrge hind ja mis enamasti vajavad kõrgpinge toidet. [7], [8]

2.1 Fotodiodid

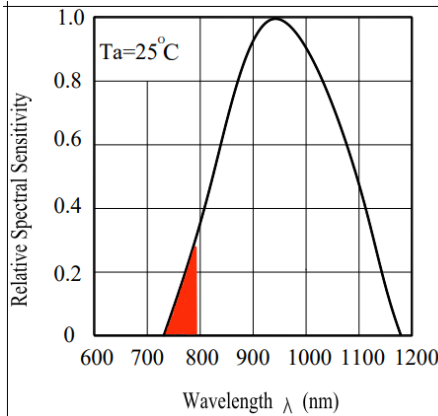
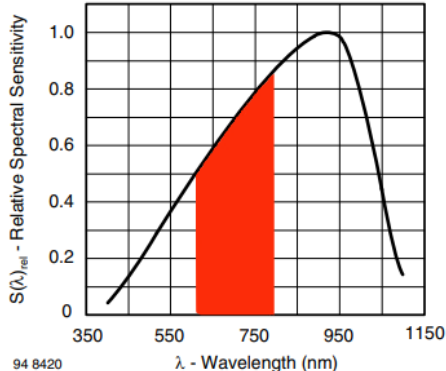
Fotodiodidel on *pn*-siire. Kui sellele langeb valgus tekivad vabade laengukandjate paarid, mille tõttu tekib vool. Fotodiodid on enamasti valmistatud ränist või germaaniumist. Räni korral on fotodiodi spektraaltundlikkus vahemikus 400 nm kuni 1000 nm ja germaaniumi korral 900 nm kuni 1600 nm. [9]

Fotodiodidel on kiire reaktsiooniaeg [10]. Näiteks internetipoes mouser.ee on saada fotodiodid, mille tõusuaeg (*rise time*) varieerub 0,18 ns kuni 45 μ s. Nende hind varieerub ka paarikümnest sendist kuni 1000 euron. [11]

Süsteemi idee tõendamiseks (*proof-of-concept*) kasutati komparaatori skeemi BPW34 fotodiodiga ja punast valgusdiodi [2]. Seda skeemi kasutatakse selles töös võrdluseks. BPW34 on kõige tundlikum lainepikkusel 900 nm [12]. On olemas väga kiireid fotodioode näiteks FDS015-1 on 35 ps tõusuaeg (*rise time*), aga selle hind on üle 50 euro [13].

Lõpuks valiti testimiseks fotodiod BPW34, millega tehti projekti „Irdtorni videoühenduse viite mõõtmine“ raames katseid ja lisaks fotodiod PD-333-3C [2] [14]. Selle tundlikus punast värvi valguse juures on väiksem BPW34 omast (Joonis 2), (Joonis 3). Samas on testingimustes selle tõusuaeg (*rise time*) väiksem. PD-333-3C on sobivam testimiseks, sest selle külge on lihtsam testimise ajal valgusdiodi kinnitada. Fotodiodide võrdlus on toodud tabelis 1. [12] [14]

Tabel 1. Fotodiodide võrdlus.

	PD-333-3C [14]	BPW34 [12]
Tundlikus graafikud (punasega on märgitud punase valguse lainepikkus)	 <p>Joonis 2. PD-333-3C tundlikus.</p>	 <p>Joonis 3. BPW34 tundlikus.</p>
Maksimaalne tundlikkus	940 nm	900 nm
Tõusuaeg	45 ns, kui $V = 10\text{ V}$ ja $R = 100\ \Omega$	100 ns, kui $V = 10\text{ V}$ ja $R = 1\text{ k}\Omega$

2.2 Fototakistid

Fototakistite takistus muutub sõltuvalt valguse hulgast, mis selle peale langeb. Pimedas on fototakistite takistus suur, aga valguse käes selle takistus väheneb [15]. Fototakistite tundlikus sõltub materjalist, millest nad tehtud on [16, p. 31]. Üks tuntumaid on CdS ehk

kaadmiumsulfiid (*cadmium sulfide*) [16, p. 32]. See on kõige tundlikum lainepikkusel 500 nm [16, p. 32]. Fototakistil võib minna paar millisekundit või rohkem, et reageerida muutusele valguse intensiivsuses [15].

Fototakistina valiti testimiseks 02-LDR12. Selle spektraaltundlikkus on suurim 560 nm juures. See on valitud sensoritest kõige aeglasem. *Selle turn on* aeg on 30 ms. [17]

2.3 Fototransistorid

Fototransistorid on valgustundlikud transistorid. Enim levinud fototransistori tüüp meenutab bipolaarset transistori, mille baas on asendatud valgustundliku pinnaga. Pimedas vool ei liigu. Valgusega tekib väike baasvool, mis juhib kollektor-emitter voolu. [15]

Fototransistorideks valiti BPV11 ja TEPT5700. BPV11-l on kiire reageerimisaeg ning baasiühendus (*base terminal*), mida enamasti fototransistoridel pole. TEPT5700-i spektraaltundlikkus on sarnane inimsilmale. Võrreldes BPV11-ga on see aeglasem. [18], [19]

2.4 Digitaalsed

Digitaalsed valgussensorid sisaldavad enamasti lisaks valgussensorile ka analoog-digitaalmuundurit. Valgussensorina kasutatakse erinevat tüüpi sensoreid. Näiteks Adafruiti VEML7700 ja TSL2561 kasutavad fotodiodi, samas ALS-PT19 kasutab fototransistori. [20], [21], [22].

Digitaalne valgustugevuse sensor valiti testimiseks TSL2561. Sellel on 2 fotodiodi nii infrapuna kui nähtava valguse spektri mõõtmiseks. Tegemist on integreeriva sensoriga (*integrating sensor*) ehk mõõtmiseks kasutatakse kahte fotodiodi. Seetõttu, aga on mõõtmisetulemuse saamine aeglasem. [21]

2.5 Valitud sensorite võrdlus

Valitud sensorite võrdlus on toodud tabelis 2.

Kuna fotodiiodi omaviide on kõige väiksem on see arvatavasti parim sensor videopildi viite mõõtmiseks. Selle tõestamiseks tehakse katsed, kus mõõdetakse sensori omaviide ideaalsetes tingimustes. Omaviide on aeg, mis sensoril läheb, et reageerida valgusemuutusele.

Tabel 2. Valgussensorite võrdlus.

Nimi	Tüüp	Suurim tundlikus	Tõusuaeg / reageerimisaeg	Hind 1 tk (eurodes)
BPW34 [12]	Fotodiiod	900 nm	100 ns	1,30 [23]
PD-333-3C [14]	Fotodiiod	940 nm	45 ns	0,44 [24]
BPV11 [18]	Fototransistor	850 nm	6 μ s	1,80 [25]
TEPT5700 [19]	Fototransistor	570 nm	45 μ s - 310 μ s [26]	1,50 [27]
02-LDR12 [17]	Fototakisti	560 nm	30 ms	2,47 [28]
TSL2561 [21]	Digitaalne valgustugevuse sensor	640 nm ja 940 nm	-	4,89 [29]

*TSL2561 puhul pole toodud tõusuaega vaid integratsiooni aeg. Kasutaja saab valida 13 ms, 101 ms ja 402 ms vahel.

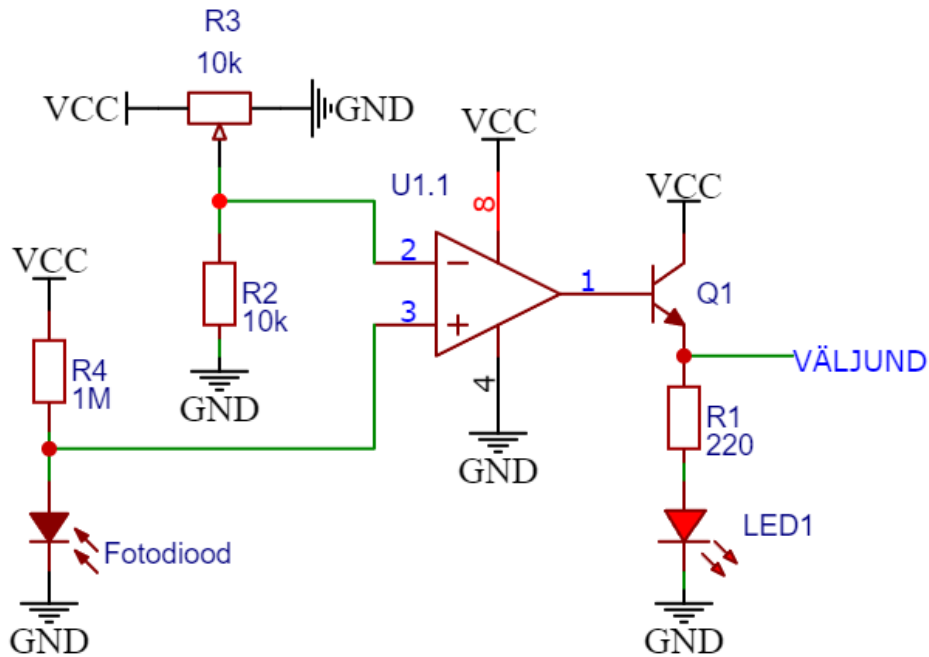
3 Elektriskeemid

Valgussensorite kasutamiseks ja testimiseks oli vaja luua elektriskeemid, mis ehitati makettplaadil. Skeemide joonistamiseks kasutati keskkonda easyeda.com [30]. Eri sensoritele on sobivamad eri tüüpi skeemid.

3.1 Fotodiodiga komparaatori skeem

Eelnevalt (projektis) oli kasutusel skeem (Joonis 4), mis kasutas fotodiodi ja operatsioonvõimendit komparaatorina. Selline lahendus küll töötas, aga see polnud ideaalne. Süsteemi omaviide ehk kui kaua skeemil läks aega, et mõõta viidet, kõikus ning tekkis küsimus, kas seda saaks püsivamaks muuta. Operatsioonvõimendi komparaatorina kasutamisel võivad tekkida probleemid, kuna operatsioonvõimendit kasutatakse ebastandardisel viisil. Samas on mõnikord operatsioonvõimendi kasutamine komparaatorina õige otsus, sest sellel on omad positiivsed küljed nagu kui operatsioonvõimendi on juba olemas ei pea hakkama ostma eraldi komparaator komponenti. Samas, kui kiirus on oluline on komparaator parem. [31] Nii eelmises projektis, kui ka selles töös ei hakatud ostma eraldi komparaator komponenti.

Skeem töötab järgmiselt - kui fotodiodile langeb valgus, siis operatsioonvõimendi väljund muutub. Väljund läheb transistori (skeemil Q1), kust edasi see läheb mikrokontrolleri sisendile. Potentsiomeetriga on võimalik muuta skeemi tundlikust. Edaspidi viidatakse sellele skeemile töös komparaatori skeemina, kuna operatsioonvõimendit kasutatakse komparaatorina.

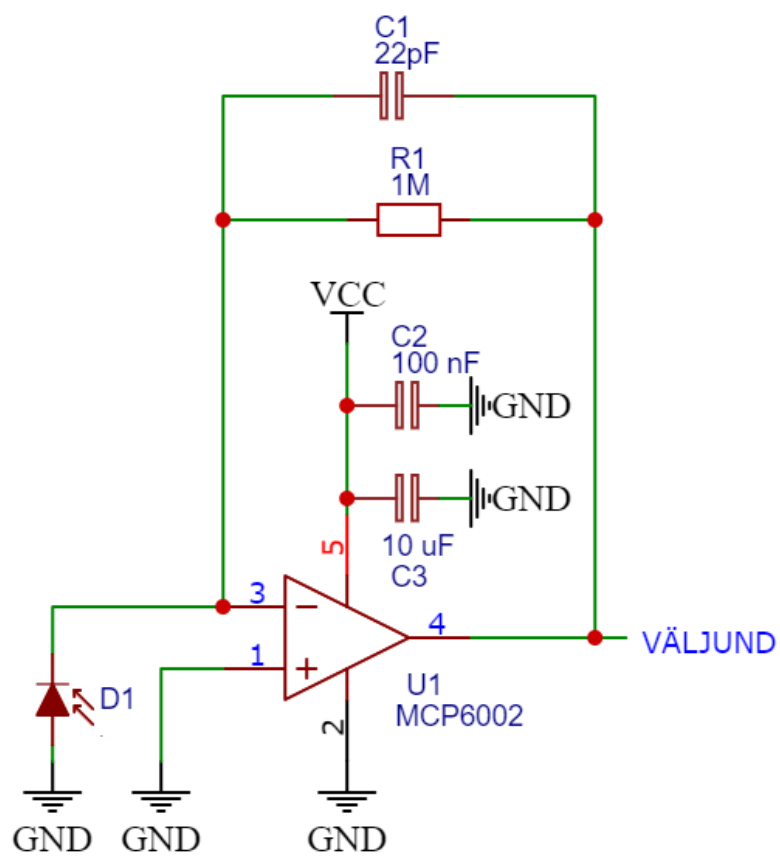


Joonis 4. Komparaatori skeem viite mõõtmiseks.

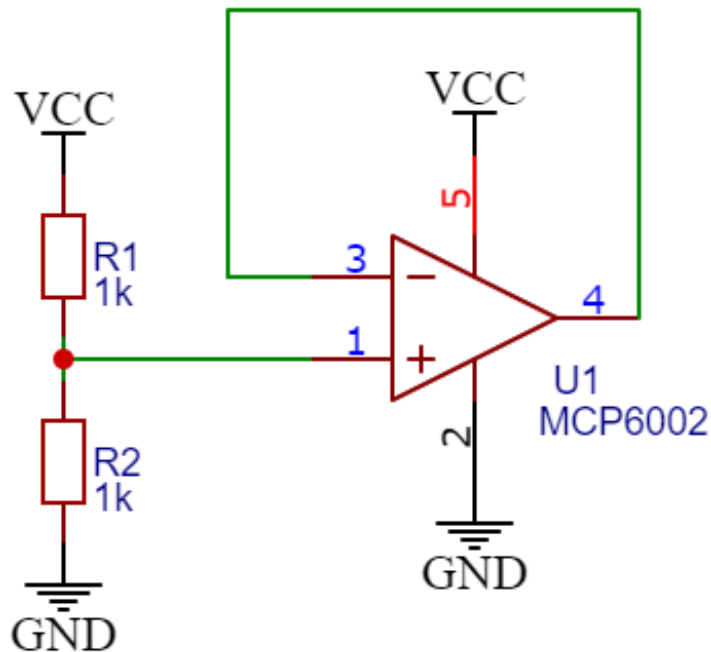
3.2 Fotodiodiga transimpedantsvõimendi skeem

Selleks, et fotodiodi vool muuta pingeks kasutati transimpedantsvõimendi skeemi (*transimpedance amplifier* ehk TIA) (Joonis 5). Skeemi võimenduse suurus sõltub tagasisidetakistist (joonisel 5 R1). Mida suurem on tagasisidetakisti seda suurem on võimendus. Voolu pingeks muutmisel võib kasutada ka takistit, aga transimpedantsvõimendi skeemis on suhe sisendvoolu ja väljundpinge vahel lineaarsem. [32]

Integraallülituse (*integrated circuits*) toite viikudele lisati toitekondensaator (*decoupling capacitor*) selleks, et kaitsta integraallülitusi [33] (joonisel 5 C2 ja C3) [34]. Ka on ühendatud mitte kasutatud operatsioonivõimendi maaga, et vähendada müra. Selleks kasutati skeemi A, mida on kujutatud joonisel 4-5 MCP6002 andmelehes [35]. See on ka kujutatud selles töös joonisel 6. Kasutati operatsioonivõimendit MCP6002, sest sellel on suurem signaalimuut, kui LM324N-1 [35], [36].



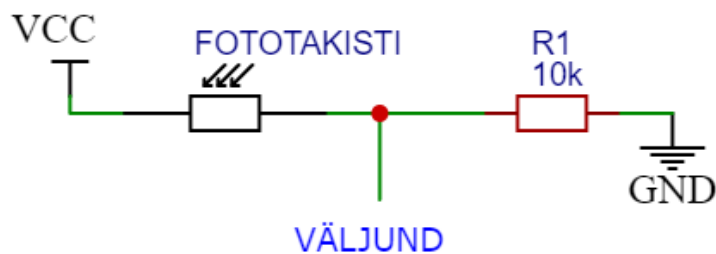
Joonis 5. Transimpedantsvõimendi skeem.



Joonis 6. Kasutamata operatsioonvõimendi ühendusskeem.

3.3 Fototakisti skeem

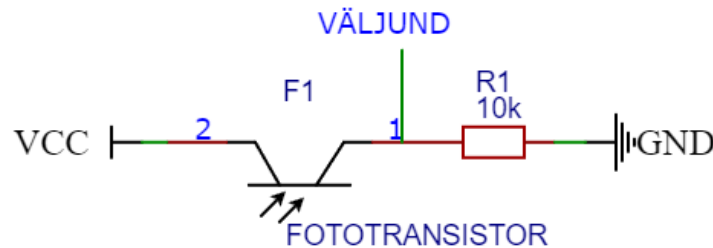
Fototakisti testimiseks loodi skeem, mida on kujutatud joonisel 7. Tegemist on pingejaguri skeemiga [15]. Fototakisti takistus muutub valguse hulgaga. Takistus väheneb, kui valgusehulk, mis langeb fototakisti peale kasvab. Asetades fototakisti pingejaguri vasakpoolseks takistik (Joonis 7) kasvab pingejaguri väljund valguse intensiivsuse kasvades. [37]



Joonis 7. Fototakisti skeem.

3.4 Fototransistori skeem

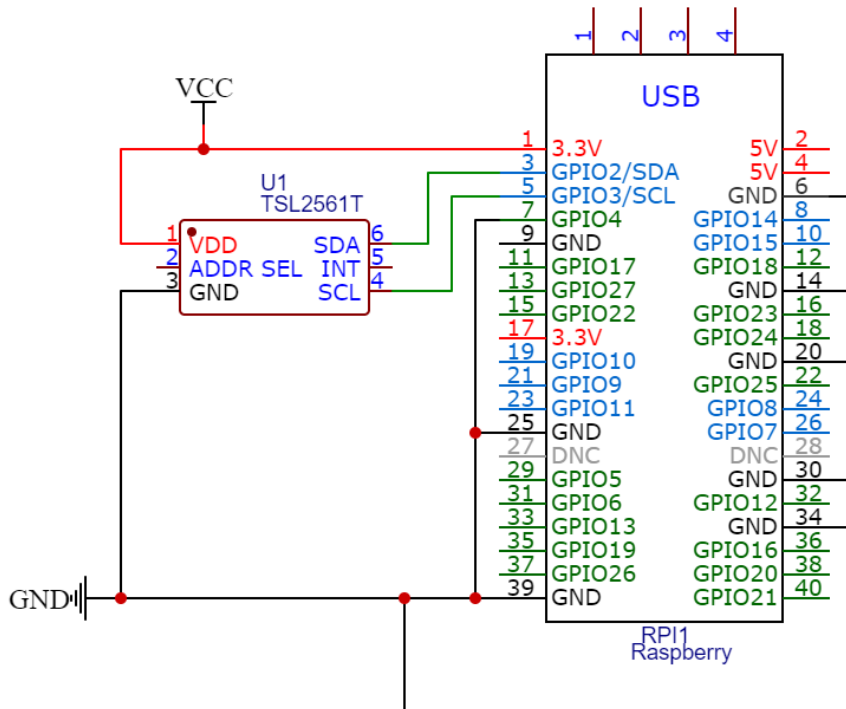
Fototransistori testimiseks kasutati skeemi, mida on kujutatud joonisel 8. Skeemi väljund muutub madalast kõrgeks kui valgus langeb fototransistori peale. [38] Skeem ei vaja eraldi võimendust fototransistori ehituse tõttu.



Joonis 8. Fototransistori skeem.

3.5 Digitaalse sensori skeem

TSL2561 ühendus mikrokontrolleriga on näidatud joonisel 9 [39]. Sensoril endal on toitekondensaatorid ning *pull up* takistid seetõttu ei pea neid lisama.



Joonis 9. TSL2561 ühendusskeem Raspberry Pi 5-ga.

4 Testimine

Testimise alguses huvitas skeemi omaviide ehk aeg, mis skeemil läheb, et reageerida sisendile. Elektriskeemide omaviide mõõdeti üle ostsilloskoobiga DSOX1102G [40]. Selle üks kanal oli ühendatud valgusdiodiga ja teine sensoriskeemi väljundiga. Valgusdiod asetati sensori lähedale. Kõrvalise valguse hulga piiramiseks teibiti valgusdiodi sensori külge. Niimoodi mõõtes saadi teada elektriskeemi omaviide. See testimise etapp esitas väljakutseid, kuna oli aeganõudev ning töömahukas.

4.1 Komparaatori skeem

Algselt mõõdeti skeem nii nagu ta oli eelmises projektis (Joonis 4). Operatsioonivõimendi mida kasutati oli LM342N [36]. Ainus erinevus oli, et Pi 4b asemel kasutati Pi 5-te. Kogu viide koosneb sellest ajast, mis skeemil ajaliselt kulub, et reageerida sisendile ja ajast, mis skeemil läheb, et väljund muutub kõrge olekust madalaks (langemisaeg). Ehk koguaeg on viide ja langemisaeg kokku liidetuna. Keskmine viide on 11,84 μs ja langemisaeg 9,74 μs 30 mõõtmise peale (Tabel 3). Skeemi negatiivne külg on, et selle omaviide võib kahaneda või kasvada potentsiomeetri keeramisega ehk kasutades viide ei pruugi olla sama. Samas on potentsiomeetri hea külg, et kasutaja saab ise leida minimaalse viite erinevates valgustustingimustes. Mõõtmiseks kasutati fotodiodi BPW34.

Tabel 3. Komparaatori skeemi omaviide ostsilloskoobiga mõõtes.

	Viide (μs)	Langemisaeg (μs)
Keskmine	11,84	9,74
Standardhälve	0,52	0,29

4.2 Transimpedantsvõimendi skeem

Ostsilloskoobiga mõõtes olid skeemi (Joonis 5) viide ja tõusuaeg (*rise time*) suhteliselt konstantsed. Skeemi omaviide muutub sõltuvalt takisti ja kondensaatori suurustest. 30

mõõtmise keskmine tulemus ja standardhälve on toodud tabelis 4. Need mõõtmised on tehtud fotodiodiga PD-333-3C.

Tabel 4. Transimpedantsvõimendi skeemi omaviidete võrdlused ostsiloskoobiga mõõtes.

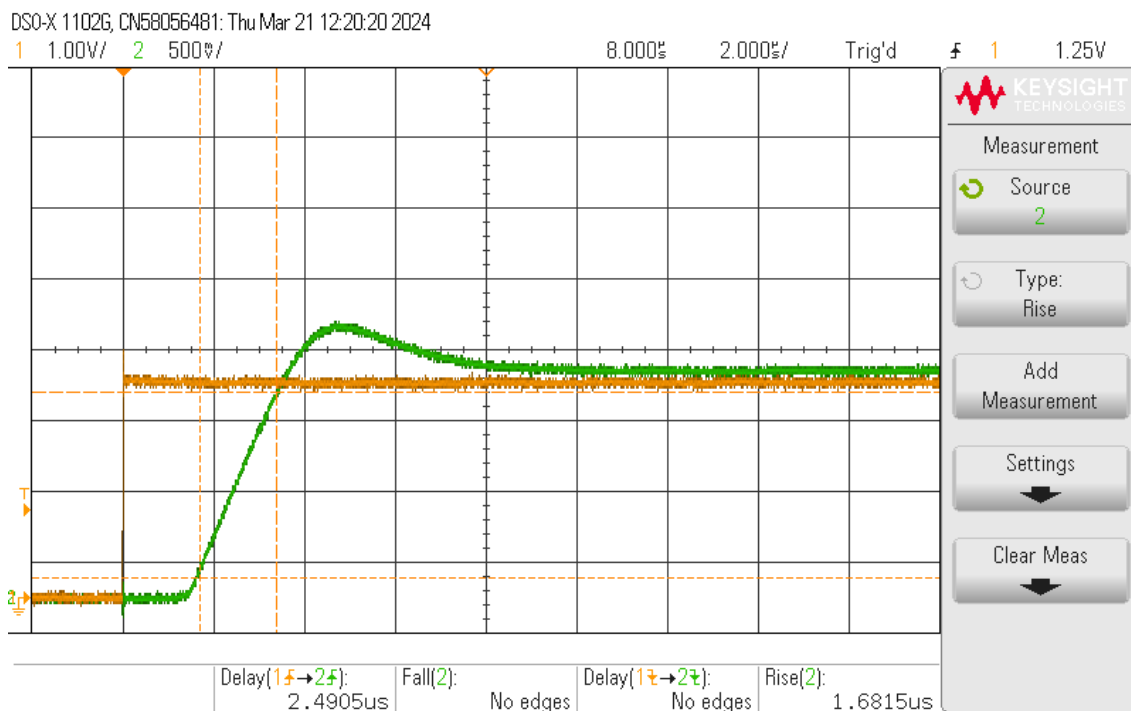
	Viide (µs) 47 kΩ + 22 pF	Tõusuaeg (µs) 47 kΩ + 22 pF	Viide (µs) 1 MΩ + 22 pF	Tõusuaeg (µs) 1 MΩ + 22 pF	Viide (µs) 100 kΩ + 22 pF	Tõusuaeg (µs) 100 kΩ + 22 pF
Keskmine	2,45	1,69	2,46	3,15	2,30	3,93
Standardhälve	0,09	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03

Võrdlused fotodiodide vahel on toodud tabelis 5. Kasutati takistit suurusega 1 MΩ ja kondensaatorit suurusega 22 pF.

Tabel 5. PD-333-3C ja BPW34 omaviidete võrdlus ostsiloskoobiga mõõtes.

	Viide (µs) PD-333-3C	Tõusuaeg (µs) PD-333-3C	Viide (µs) BPW34	Tõusuaeg (µs) BPW34
Keskmine	2,18	2,68	2,69	3,12
Standardhälve	0,03	0,05	0,03	0,07

Näide ostsiloskoobiga mõõtmisest on toodud joonisel 10.



Joonis 10. Omahilistumise mõõtmine, kus on võimalik näha valgusdiodi juhtivat signaali (oranž) ja väljundi signaali (roheline).

4.3 Fototakisti skeem

Ostilloskoobiga tehti 30 mõõtmist. Oli näha, et mõõdetu kinnitab teooriat ning fototakisti skeem (Joonis 7) on sensoritest kõige aeglasem. Fototakisti skeemi reageerimisaja viide oli keskmiselt 13,58 ms ja langemisaeg 3,5 ms. Mõõtmiste tulemused on näidatud tabelis 6.

Tabel 6. Fototakisti skeemi mõõtetulemused.

	Tõusuaeg (ms)	Viide (ms)
Keskmine	13,58	3,5
Standardhälve	0,51	0,08

Mõõdetud skeemi tulemused on kiiremad andmelehe omadest. Andmelehes on tõusuaeg 30 ms. Arvatavasti on andmelehes toodud tõusuaeg 10% kuni 90%. Tabelis 6 toodud tõusuaeg on tõusuaeg 0 kuni 50%. [17]

4.4 Fototransistori skeem

Testiti kahte erinevat fototransistori. Mõõtmiste tulemused fototransistoride TEPT5700 ja BPV11 kasutades fototransistori skeemi (Joonis 8) on toodud tabelis 7. Tehti 30 mõõtmist.

Tabel 7. Kahe fototransistoride viidete tulemused kasutades takisti skeemi.

	TEPT5700 tõusuaeg (μ s)	TEPT5700 viide (μ s)	BPV11 tõusuaeg (μ s)	BPV11 Viide (μ s)
Keskmine	208,03	86,10	57,11	30,57
Standardhälve	8,76	7,01	1,51	0,92

Fototransistor skeemi viide sõltub sensori kollektor-baas mahtuvusest (*capacitance of the collector-base junction*) ja valitud takisti väärtusest (takisti R1 Joonis 8). Milleri efekti tõttu, korrutatakse RC ajakonstandi väärtus fototransistori vooluvõimendusega. [41]

TEPT5700 andmelehes pole toodud kollektor-baas mahtuvust [19]. Küll on toodud Vishay dokumendis „Ambient Light Sensors – Circuit and Window design“ välja, et kõigi välja toodud ALS-fototransistoride (kaasa arvatud TEPT5700) on tõusu- ja langusajad vahemikus 45 μ s 50 Ω koormustakistiga ja see tõuseb lineaarselt kuni 310 μ s 10 k Ω koormustakistiga [26]. On mainitud, et väiksem valgusehulk võib tõsta tõusu- ja langusaega ning suurem seda vähendada [26]. Seal toodud info langeb kokku mõõdetud tulemustega.

BPV11-i andmelehes on antud, et kollektor-baas mahtuvus on 19 pF, kui $U_{BE} = 0$ V $f = 1$ MHz ja $E = 0$. Vooluvõimendus on tüüpiliselt 450, kui $U_{CE} = 5$ V, $I_C = 5$ mA ja $E = 0$. Vooluvõimendus varieerub sõltuvalt valgustugevusest ja temperatuurist [41]. Koormustakisti oli 10 k Ω . Valemiga 1 arvutatakse RC ajakonstant T. Valemiga 2 arvutatakse reageerimiskiirus. Milleri efekti tõttu korrutatakse fototransistori RC ajakonstant alalisvoolu võimendusega h_{FE} .

$$T = R * C = 10000 \Omega \cdot 1,9 \cdot 10^{-11} F = 1,9 \cdot 10^{-7} s \quad (1)$$

$$T * h_{fe} = 1,9 * 10^{-7} s \cdot 450 = 8,55 \cdot 10^{-5} s = 85 \mu s \quad (2)$$

Arvutatud tulemus erineb mõõdetud tulemusest. Peab arvestama, et ostsilloskoobiga mõõdetud tõusuaeg oli kuni 50% kogu tõusuajast. BPV11 spektraalne tundlikkus on suurim 850 nm juures. Punase valguse lainepikkus on, aga 620 kuni 780 nm [42]. Seal on spektraalne tundlikkus (*relative spectral sensitivity*) umbes 0,5 kuni 0,6 [18]. Ilmselt erinevus tuleneb sellest.

4.5 Mikrokontroller

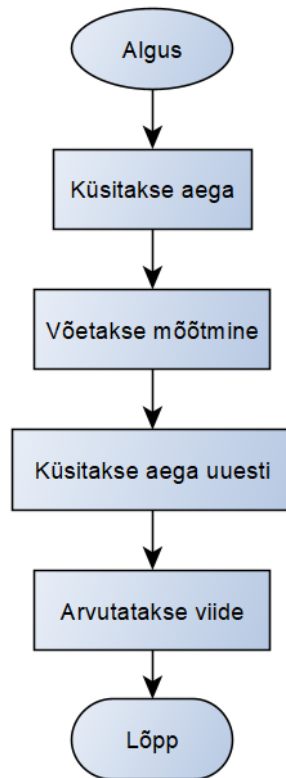
Süsteemi koguviide mõõdeti mikrokontrolleriga. Testiti ainult ühe mikrokontrolleriga nii, et lõpptulemusest puudub viide, mis võib tekkida mikrokontrolleri kellade nihkest.

Testimiseks kasutati Raspberry Pi 5-te. Enamus skeemi omaviitest tuleb ajast, mis mikrokontrolleril läheb, et lugeda elektriskeemi väljundit. Raspberry Pi-l on ainult digitaalsed viigud ehk ta saab anda teada kas sisend on loogiline 1 või 0. Võrdluse all on kumb on parem kas otse viigult lugemine või analoog-digitaalmuunduri kasutamine. Viigult lugemine on arvatavasti kiirem, aga analoog-digitaalmuundurit kasutades on võimalik mõõta väiksemaid muutusi valguse hulgas.

Pi 4b-l oli tavakasutajale rohkem võimalusi kui Pi 5-l, sest sellel oli palju teeki mida pole tahetud või jõutud Pi 5-e jaoks ümber kirjutada nagu näiteks teeki PigPiod, mida saab kasutada viigult otse lugemiseks [43]. Praegu on gpiod teeki parim võimalus viigult otse lugemiseks, seetõttu kasutati testimiseks seda [44]. Testimiseks kasutatud koodid on üles laetud Githubi. Link sellele on Lisas 2.

4.6 Viigult otse lugemine

Testimise alguses võrreldi viigult lugemise kiirust Pythonis ning C keeles. Selleks kasutati gpiod teeki. Selgus, et Pythonis läheb kasutades sama teeki lugemiseks kauem aega (Tabel 8). Pythonis kasutades gpiod teeki saab uue tulemuse iga 8,94 μ s tagant. C keeles saab gpiod teeki kasutades tulemuse keskmiselt iga 2,09 μ s tagant. Viigult lugemise aeg sisaldab ka kella küsimise aega. Mõõtmise algoritm on toodud joonisel 11. Kõikide algoritmi loomiseks kasutati programmi yEd graph editor [45].



Joonis 11. Viigult lugemise kiirus koos kella küsimisega.

Tabel 8. Viigult lugemise kiiruse võrdlus Pythoniga ja C keelega kasutades gpiod teeki.

	Viigult lugemise kiirus c keeles gpiod teeki kasutades (µs)	Viigult lugemise kiirus Pythoni keeles gpiod teeki kasutades (µs)
Keskmine	2,09	8,94
Standardhälve	0,43	1.67

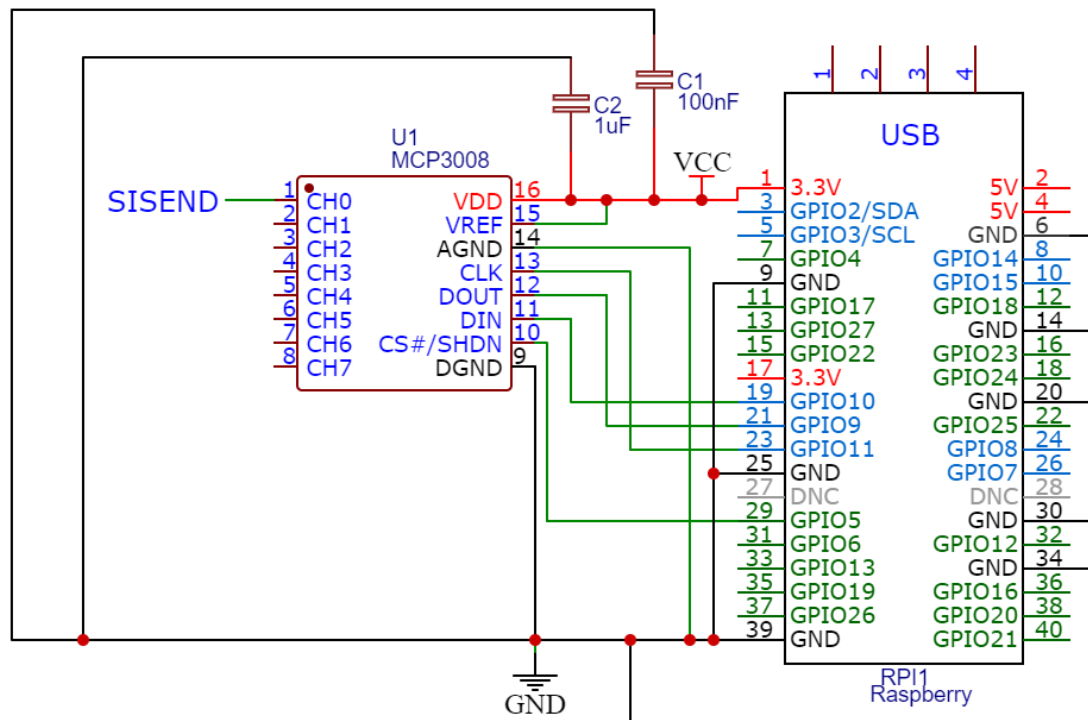
4.7 Analoo-digitaalmuundur

Analoo-digitaalmuundur ehk AD-muundur on elektroonikakomponent, mis teisendab analoogsignaali digitaalsignaals. See võrdleb mõõdetud analoogpinget teadaoleva võrdluspingega ja loob seejärel analoogsisendi digitaalse esituse. [46]

Testimiseks kasutati AD-muundurit MCP3008. Tegemist on 10 bitise resolutsiooniga analoo-digitaalmuunduriga, millel on 4 kanalit. Suhtlus mikrokontrolleriga toimub SPI

(Serial peripheral interface) jadaliidese kaudu. SPI kasutab suhtlemiseks 4 signaali sealhulgas taktsignaali ja 2 andmesignaali. [47], [48]

Ühendused AD-muunduri ja Raspberry Pi vahel on näidatud joonisel 12. [49]



Joonis 12. MCP3008 ühendused Raspberry Pi 5-ga.

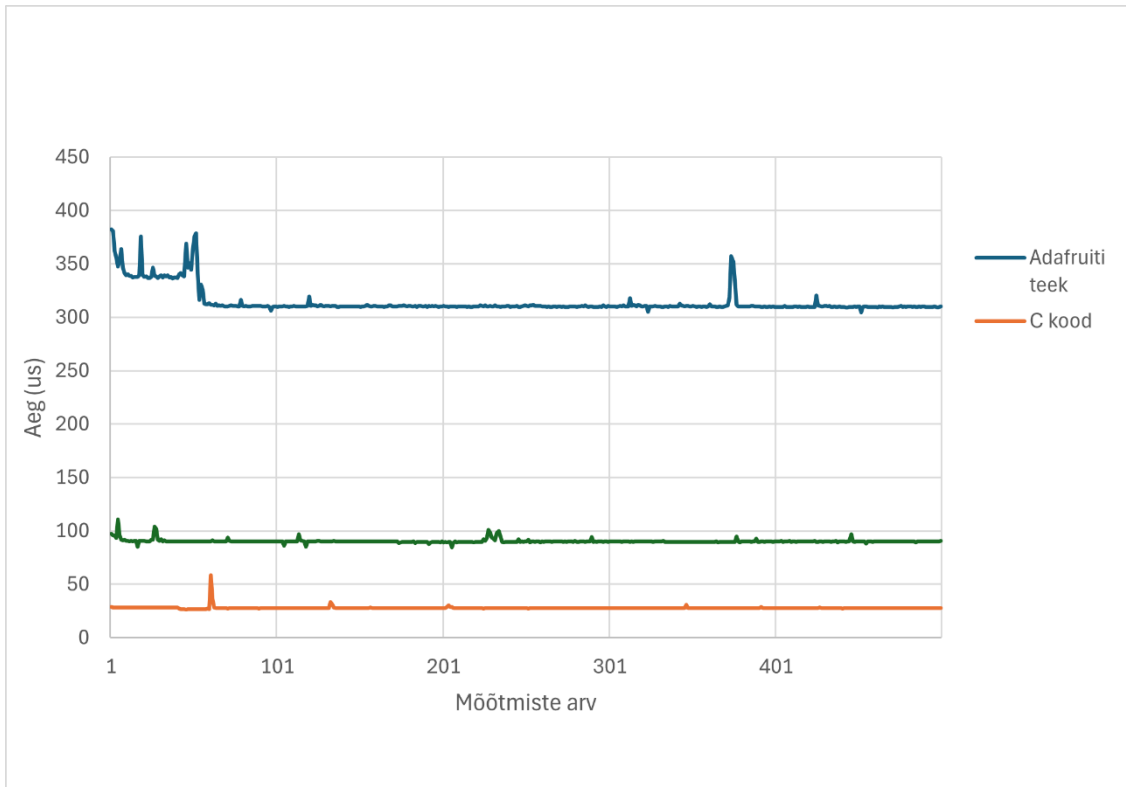
Adafruit on loonud teegi selleks, et kasutada MCP3008-t [39]. Analoog-digitaalmuunduriga lugedes kasutades Adafruiti enda teeki oli tulemus keskmiselt 329,74 μ s.

Kasutades gpiozero teeki oli tulemus keskmiselt mõõtmise 91,47 μ s tagant. [50]

Lõpuks kasutades Ruslan Nagimovi C keeles kirjutatud koodi MCP3008-ga suhtlemiseks oli tulemuse lugemine keskmiselt 28,17 μ s tagant [51]. Tulemused on toodud tabelis 9. See oli ka kõige parem tulemus, mis saavutati, kui kasutada AD-muundurit. Mõõtmiste võrdlused on ka toodud joonisel 13. Kõikide graafikute loomiseks, mis näitavad mõõtmiste tulemusi kasutati programmi Excel [52].

Tabel 9. AD-muunduri lugemise kiirus erinevaid teeke kasutades.

	Python Adafruiti teek 100 mõõtmist (µs)	Python gpiozero mcp3008 teek 100 mõõtmist (µs)	C keel Nagimovi kood 100 mõõtmist (µs)
Keskmine	329,74	91,47	28,17
Standardhälve	19,77	2,16	3,22



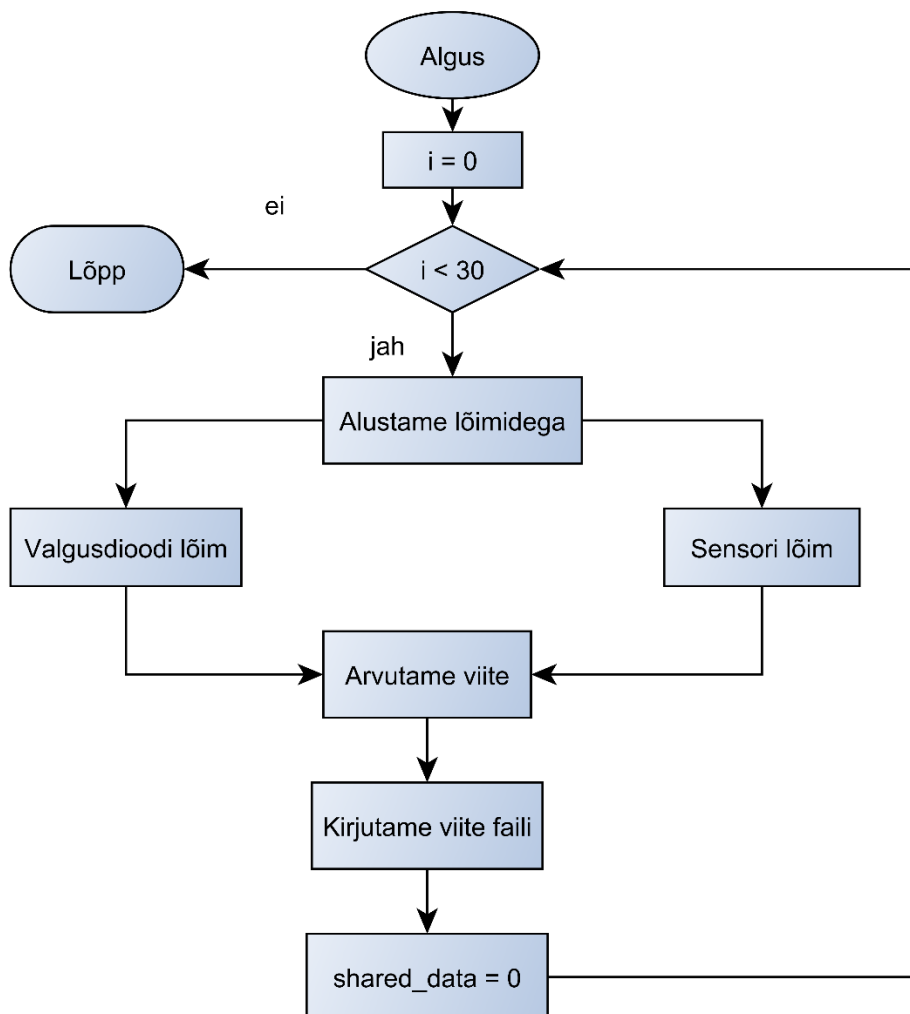
Joonis 13. Aeg mis läks ühe väärtuse lugemiseks mcp3008-ga erinevate koodidega.

Viigult otse lugemisel saab sama aja sees rohkem lugemisi kui analoog-digitaalmuunduriga lugedes. Samas on võimalik ka AD-muundurit kasutades saada tulemus suhteliselt kiiresti.

4.8 Skeemide testimine mikrokontrolleriga

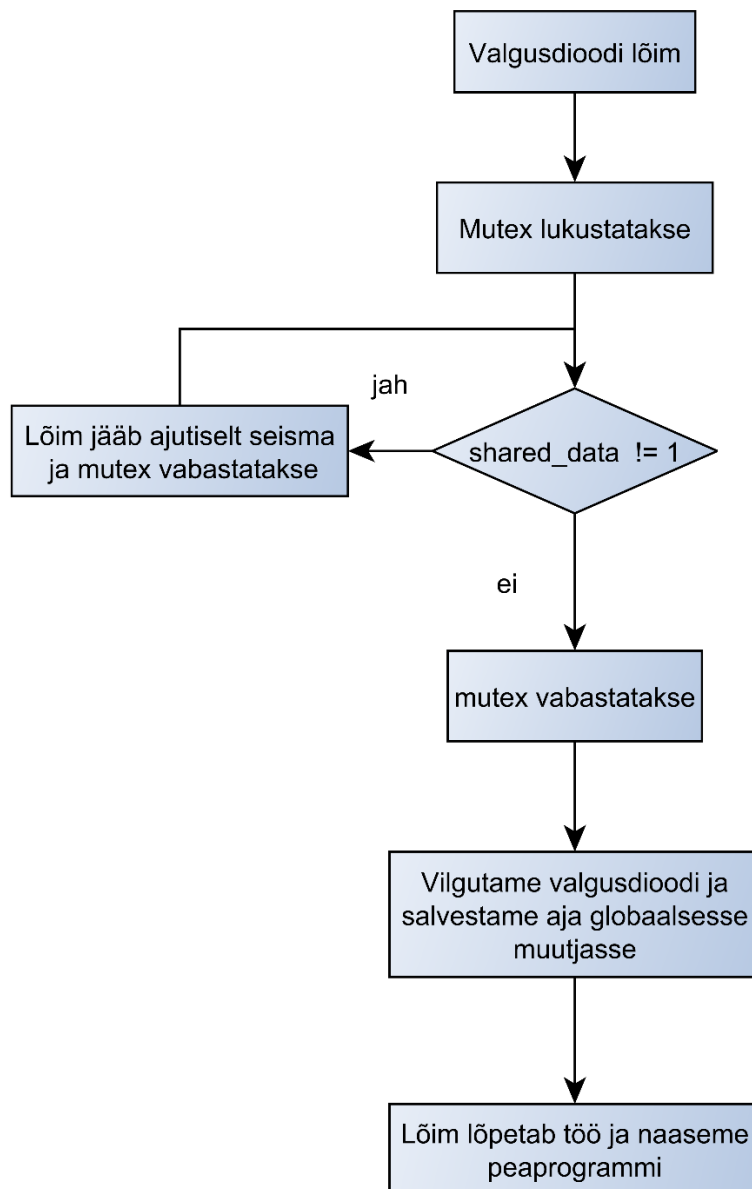
Testiti skeeme, millel olid kõige väiksemad omaviited ostsiloskoobiga mõõtes ehk fotodiodi komparaatori skeem, transimpedantsvõimendi skeem ja BPV11 fototransistori takisti skeem. Ka testiti TSL2561-te, kuna seda ei mõõdetud ostsiloskoobiga.

Mikrokontrolleriga skeemide testimiseks kasutati algoritmi, mis on toodud joonisel 14. Kõikidel testidel kasutati lõimesid. Lõimede (*threads*) jaoks kasutati pthread teeki [53]. Ühes lõimes jookseb kood, mis vilgutab valgusdiodi ning salvestab vilgutamise aja ning teises jookseb kood, mis salvestab aja, millal sensor tunnetas valgusimpulssi.



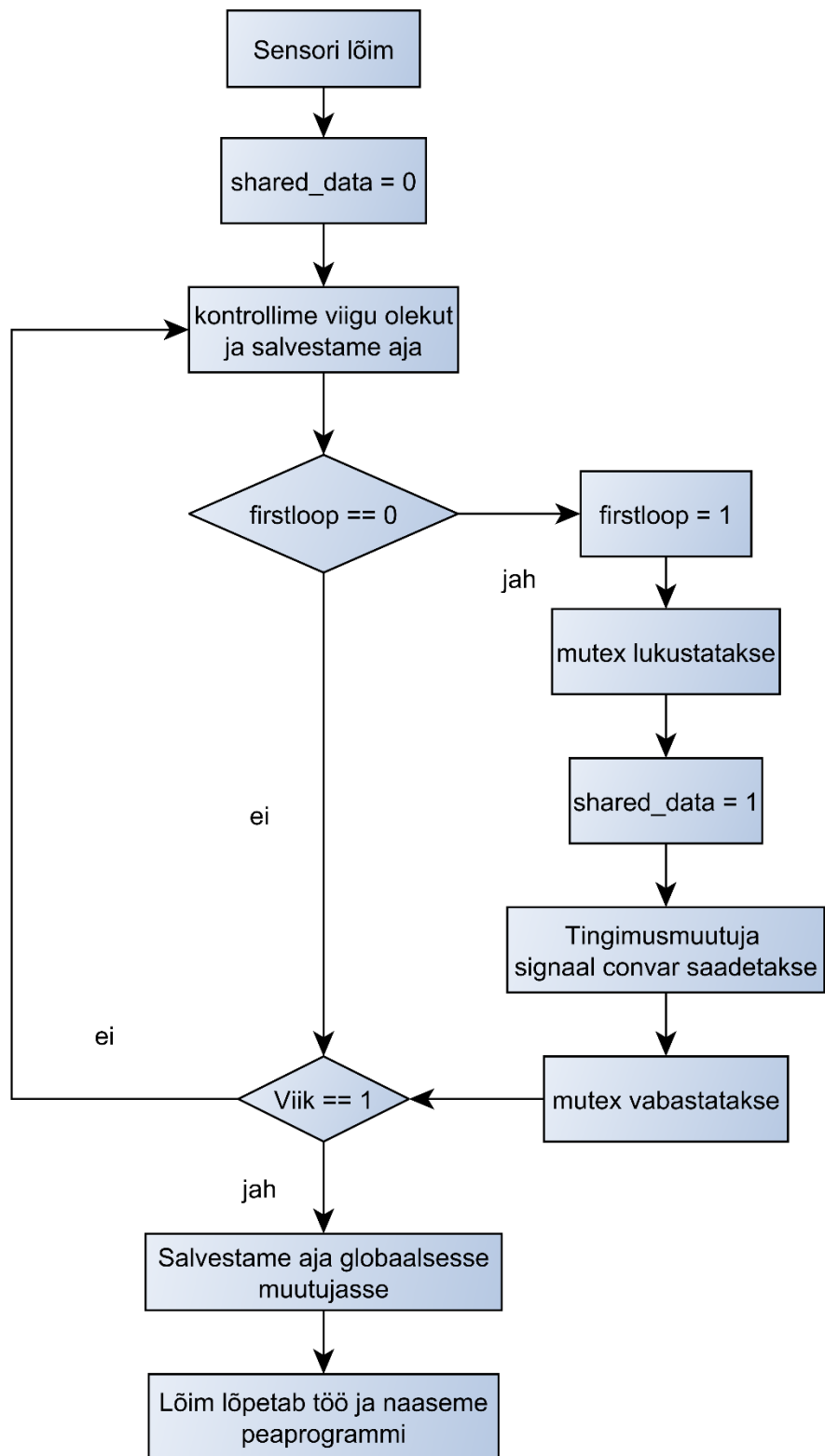
Joonis 14. Mikrokontrolleriga testimise algoritm.

Valgusdiodi lugemise lõim on näidatud joonisel 15. Valgusdiodi vilgutamiseks kasutati gpiod teeki ja seda kasutati ka otse viigult lugemiseks. Valgusdiodi ei vilgutata enne, kui sensor on alustanud lugemist. Selle kontrollimiseks kasutatakse muutujat *shared_data* ja mutexit (*mutual exclusion*). Mutex ei lase mitmel lõimel samaaegselt kasutada jagatud ressursi [54].



Joonis 15. Valgusdiodi lõim.

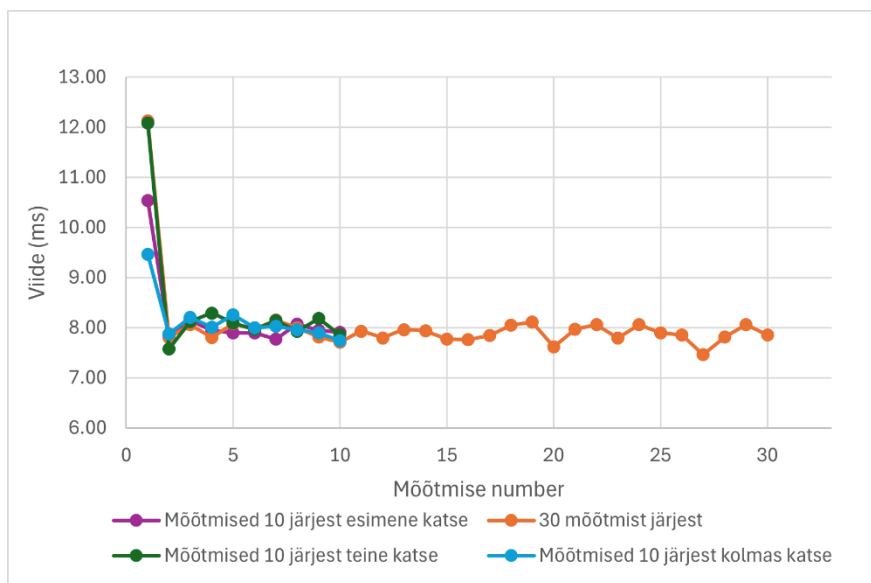
Sensori lugemise lõim on näidatud joonisel 16. AD-muunduriga testimisel kontrolliti viigu asemel, kas AD-muunduri välja antud väärtus on kasvanud.



Joonis 16. Viigult otse lugemise lõim.

4.9 TSL2561 testimine Raspberry Pi 5-ga

TSL2561 testimiseks kasutati Adafruiti soovitatud ühendusi ja teeki. Testimise käigus selgus, et esimene viide, kui kood alustab on alati suurem, kui kõik ülejäänud. Seetõttu ei arvestata seda keskmise väärtuse arvutamisel. Esimest väärtust ei arvestatud mitte ühegi sensori mõõtmisel. Sensori omaviide on suur. See on seetõttu, et tegemist on integreeriva sensoriga (Joonis 17).



Joonis 17. Valgusimpulsi tunnetamise viite võrdlus kasutades mõõtmiseks sensorit TSL2561.

4.10 Komparaatori skeemi, transimpedantsvõimendi skeemi ja fototransistori skeemi testimine Raspberry Pi 5-ga

Komparaatori skeemi omaviide oli keskmiselt 28,94 μ s. Transimpedantsvõimendi skeemi omaviide oli keskmiselt 5,11 μ s.

Alguses tundus, et otse viigult lugedes ja AD-muunduriga lugedes oli omaviide väga sarnane. Ilmnes, et käsuviipile (*command line'ile*) kirjutamine aeglustas lugemist programmi 10 kordselt. Kui seda mitte teha siis oli pinnilt lugemine 10 korda kiirem, kui AD-muundur, mis on loogiline, sest sama aja sees tehakse rohkem mõõtmisi. Otse viigult lugedes saadud ja AD-muunduri mõõtmised transimpedantsvõimendi skeemi kohta, kus

on 100 k Ω takisti ja 22pF kondensaator on toodud tabelis 10. Viigult lugemiseks kasutati koodi C keeles ning gpiod teeki. Lõimede (*threads*) jaoks kasutati pthread teeki.

Tabel 10. Mõõtmistulemused AD-muunduri vs viigult lugemine transimpedantsvõimendi skeem.

	AD-muunduri omaviide 100 mõõtmise peale (μs)	Viigult lugemise omaviide 100 mõõtmise peale (μs)
Keskmine omaviide	33,11	5,11
Standardhälve	9,49	0,56

Transimpedantsvõimendi skeemiga tehti võrdlus kahe erineva fotodiodi vahel (Tabel 11). Sensoreid testiti samades tingimustes. Takisti väärtus oli 1 M Ω ja kondensaatori väärtus 22 pF. Mõõtmised tehti Pi 5-ga peale seda, kui sellele oli pandud peale operatsioonisüsteem uuesti. Sellest on rohkem räägitud analüüsi osas. Mõõtmistulemused kõikusid rohkem peale seda. Samas tulemused PD-333-3C-ga olid püsivamad, kui BPW34-ga.

Tabel 11. BPW 34 ja PD-333-3C omaviite tulemuste võrdlused Raspberry Pi-ga mõõtes.

	BPW34	PD-333-3C
Keskmine	10,57	8,42
Standardhälve	4,45	1,83

Tabelis 12 on toodud fotodiodi komparaatori skeemi, transimpedantsvõimendi skeemi ja fototransistor skeemi omaviite võrdlus otse viigult lugedes. Vahel pole ekraani.

Tabel 12. Fotodiodide skeemide omaviite võrdlus mikrokontrolleriga mõõtes.

	Komparaator skeem 100 mõõtmist (μs)	Transimpedantsvõimendi skeem 100 mõõtmist (μs)	Fototransistori BPV11 takisti skeem 100 mõõtmist (μs)
Keskmine omaviide	28,94	5,11	28,44
Standardhälve	1,08	0,56	4,24

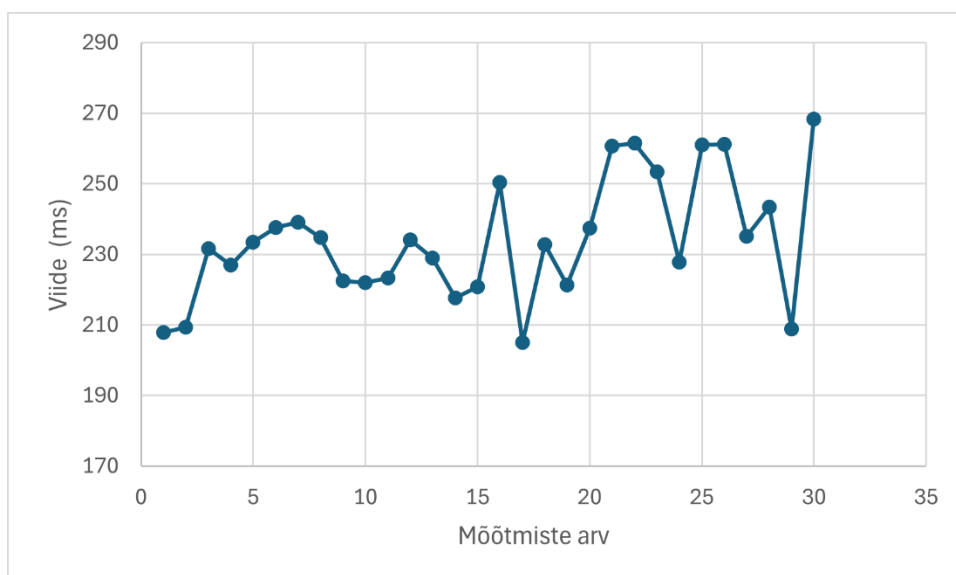
Testide põhjal saab järeldada, et kõige väiksema omaviitega ja kõige püsivam oli transimpedantsvõimendi skeem, kui seda otse viigult lugeda.

4.11 Testimine ekraaniga

Järgmised testid sooritati nii, et filmiti telefonikaameraga valgusdiodi ning sensoriga mõõdeti arvutiekraani pealt valgusehulga muutust. Testiti skeemi, millel oli kõige väiksem omaviide ehk transimpedantsvõimendi skeem ning komparaatori skeemi, sest see oli skeem, mis oli kasutusel eelmises projektis. Veel testiti digitaalse sensoriga, sest nendest skeemidest, mida testiti Pi-ga oli sellel kõige aeglasem reageerimisaeg.

4.11.1 Testimine transimpedantsvõimendi skeemiga

Skeem töötas ainult 1 M Ω takistiga, sest arvutiekraani ning kaamera lisamine vähendas kättesaadava valguse hulka. Kui enne saadi 1 M Ω takistiga kätte maksimum 3,3 V siis nüüd saadi maksimum 1,5 V. Võimendi toitepinge jäeti samaks, sest kui seda muuta suuremaks ning süsteem peaks sattuma olukorda, kus sensori peale langeb ere punane valgus siis antakse välja 5V ja seda mikrokontrolleri viik ei talu. Telefonikaamera oli ühendatud arvutiga EpocCam programmiga WI-FI kaudu [55]. Mõõdetud tulemused on toodud joonisel 18.



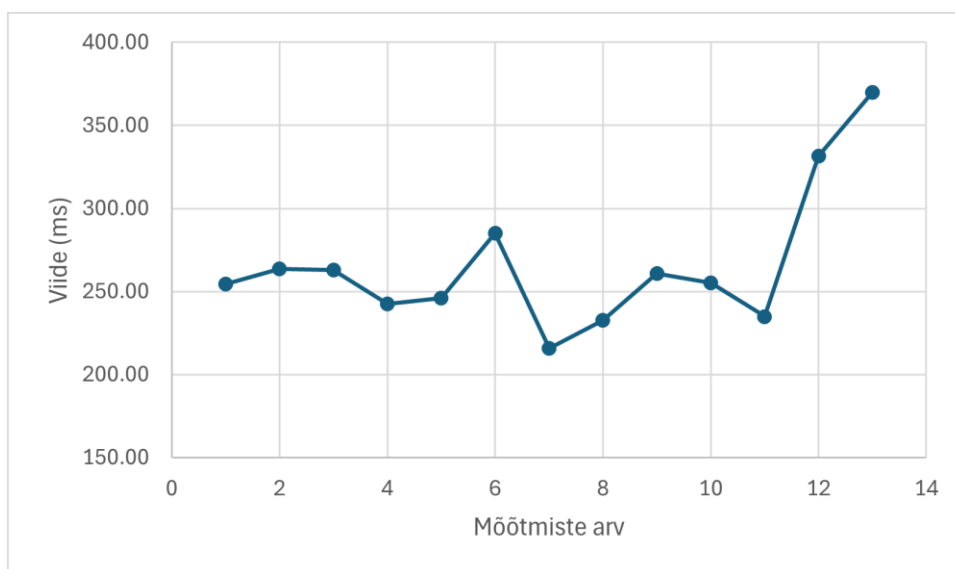
Joonis 18. Transimpedantsvõimendi skeemi viide kaamera ja ekraaniga.

Sensor peaks olema võimalikult ekraani lähedal, sest kuigi umbes 10 cm kaugusel ekraanist tundis sensor valgusdiodi pulsi ära oli viide suurem ning umbes 12 cm

kaugusel ekraanist oli valgusdiodi vilkumise registreerimine kõikuv. Sensor oli ekraani suhtes 90 kraadise nurgaga. Erinevalt ideaalsetes oludes testimisest oli nüüd rohkem asjaolusid, mis võisid viidet vähendada või suurendada. Üks, mis mõjutas oli sensori hoidmine ekraani ees. Programmis oli väike aken, kuhu näidati pilti valgusdiodist. Sensorit hoiti käega ekraani ees, kui käsi vääratas võis mõõtetulemus muutuda. Valgusdiodi kinnitust ekraani külge ei käsitletud selle töö raames.

4.11.2 Testimine komparaatori skeemiga

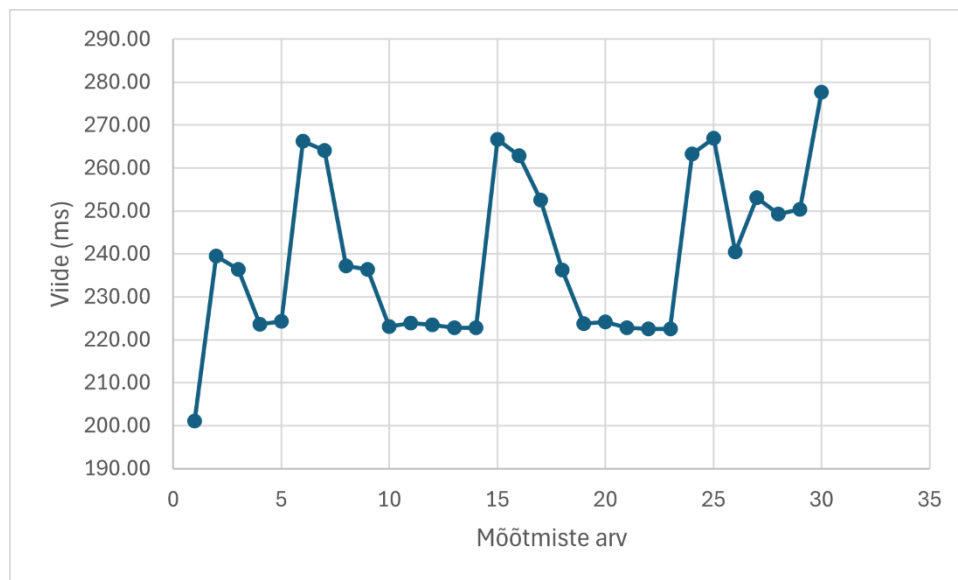
Testimistingimused olid samad kui transimpedantsvõimendi skeemi testimisel. Komparaatori skeem ei saanud alati ekraanilt piisavalt valgust, et mõõtmist teha. See asjaolu tegi selle suhteliselt ebakindlaks. Samas projekti raames saadi selle skeemiga mõõtmised sooritatud [2]. Ehk piisavalt ereda ekraaniga saab skeem mõõtmisega hakkama. Selle viide oli sarnane transimpedantsvõimendi skeemile, aga kuna see ei saanud alati mõõtmisega hakkama võib öelda, et samades oludes toimis see halvemini kui transimpedantsvõimendi skeem. Mõõtmise tulemused on toodud joonisel 19. Mõõtmisi tehti 13 tükki, sest nende kogumine oli aeganõudev ning oli näha, et selles suhtes transimpedantsvõimendi skeem on etem. Arvatavasti töötaks skeem paremini, kui otse viigult lugemise asemel loeks väärtus AD-muunduriga aga kuna transimpedantsvõimendi skeem töötas viigult lugemisega siis ei hakatud seda testimata.



Joonis 19. Komparaatori skeemi viited ekraanilt mõõtes.

4.12 Testimine digitaalse sensoriga

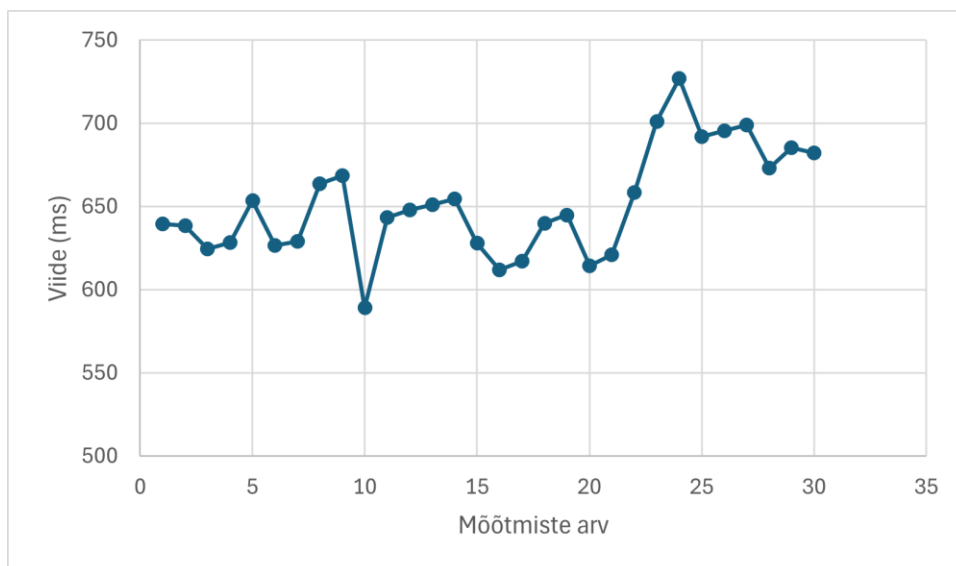
Testimistingimused olid samad, kui kahel teisel skeemil, mida testiti ekraaniga. Test näitab ainult seda, et sensoriga on võimalik mõõta ekraani pealt omaviidet (Joonis 20). Samas kuna on teada, et sensori omaviide on suurem kui transimpedantsvõimendi skeemi oma siis on tulemused selle võrra ebatäpsemad.



Joonis 20. TSL2561 viited ekraanilt mõõtes.

4.13 Testimine ekraanilt tehisliku viitega

Viite loomiseks kasutati programmi OBS [56]. Sellega on võimalik luua pilti kunstlik viide. Joonisel 21 on näidatud mõõtetulemused, kui viide oli 400 ms.



Joonis 21. Transimpedantsvõimendi skeemiga viite mõõtmine ekraanilt, kui videopildile on lisatud kunstlik viide.

Võrdlus ilma viiteta ja viitega tulemuste vahel on toodud tabelis 13.

Tabel 13. Viite võrdlused ilma ja kunstliku viitega ekraanilt transimpedantsvõimendi skeemiga mõõtes.

	Mõõtmine ekraanilt ilma kunstliku viiteta (ms)	Mõõtmine ekraanilt, kui on kunstlik viide 400 ms (ms)
Keskmine	239,77	651,66
Standardhälve	19,59	31,91

5 Analüüs

Testimise kohapealt oleks võinud vähem aega kulutada omaviite leidmisele ideaalsetes tingimustes, sest selle peale läks väga suur osa ajast. Alles viimase mõõtmise ajal saadi ostsilloskoop triggeriga mõõtma, kui seda oleks varem teha osanud oleks mõõtmistele palju vähem aega kulunud. Testimise piiranguid oli palju. Ostsilloskoobiga mõõtes on tulemused ainult nii täpsed, kui ostsilloskoop neid mõõta suudab. Mikrokontrolleriga on sama lugu. Kuna skeemid olid kokku pandud makettplaadil võisid juhtmed kogemata lahti tulla. Õnneks seda tihti ei juhtunud.

Ostsilloskoobiga mõõtes tehti iga skeemi kohta alguses 15 mõõtmist siis korrati mõõtmisi, et saada iga skeemi kohta 30 mõõtetulemust. Statistikas, mida rohkem on mõõtmistulemusi seda täpsemad on tulemused. Samas üle mingi hetke ei suurenda mõõtmistulemuste lisamine arusaamist süsteemist. Arvu 30 kasutatakse tihti valimi suurusena, kuna sellest hakkab kehtima *central limit theorem*. [57], [58]

Näiteks transimpedantsvõimendi skeemi mõõtmisel oli peale 15 mõõtmist keskmine reageerimisaeg 2,47 μs ning standardhälve 0,05 μs . Keskmine tõusuaeg oli 1,68 μs ning standardhälve 0,01 μs . Peale 34 mõõtmist oli keskmine reageerimisaeg 2,42 μs ning standardhälve 0,12. Keskmine tõusuaeg oli 1,69 μs ning standardhälve 0,02 μs . Fototakisti skeemis oli 15 mõõtmise keskmine reageerimisaeg 13,40 ms ning standardhälve 0,41 ms ja keskmine tõusuaeg 3,52 ms ning standardhälve 0,10 ms. Peale 34 mõõtmist oli keskmine reageerimisaeg 13,58 ms ning standardhälve 0,52 ms ja keskmine tõusuaeg 3,51 ms ning standardhälve 0,09 ms. Muutused omaviidetes on marginaalsed ning rohkem mõõtmisi ei anna eriti uut infot. Seetõttu ei tehtud ostsilloskoobiga rohkem kui 30 mõõtmist. Mikrokontrolleriga oli ideaalsetes tingimustes mõõtmine lihtsam, kui ostsilloskoobiga. Seetõttu tehti sellega rohkem mõõtmisi. Tegelikult oleks võinud teha ka vähem mõõtmisi. Näiteks C koodiga oli AD-muunduri lugemisaja omaviide 500 mõõtmise peale keskmiselt 27,86 μs ja standardhälve 2,32 μs . 30 mõõtmise peale oli omaviide keskmiselt 27,71 μs ja standardhälve 0,06 μs .

Siis kui enamus testid tehtud olid korrumppeerus Raspberry Pi 5 SD kaart. Arvatavasti juhtus see toitejuhtme lahti tõmbamise tõttu siis kui Pi veel töötas. Õnneks enamus koodid ja testitulemused olid salvestatud teisele arvutile. Siiski kõik teegid ja programmid, mis olid Pi peale tõmmatud kustusid.

5.1 Edasiarendus

Edasiarendusena võiks mõõta transimpedantsvõimendi skeemi omaviite erinevates valgustingimustes. Siis võiks kasutada AD-muundurit et mõõta valgustugevus mõõtmishetkel ning vaadata tabelist, mis oli keskmine omaviide sellise valgushulgaga. Siis saaks arvutada esitada kasutajale süsteemi arvatava omaviite mõõtmishetkel.

Veel võiks testida transimpedantsvõimendi skeemi teiste komponentidega, kui testiti siin töös. Ka võiks huvi pärast mõõta üle ostsilloskoobiga skeemide tõusuajad vahemikus 10%-90%, sest praegu mõõdeti 50% tõusuajast. Samas otseselt pole see vajalik, sest skeemide viited mõõdeti ka mikrokontrolleriga.

6 Kokkuvõte

Lõputöö eesmärgiks oli anda ülevaade erinevatest valgussensoritest ning millised tegurid mõjutavad nende valikut. Samuti uuriti, milline on sobivaim ühendusskeem nende testimiseks ja milline valgussensor sobib kõige paremini kaamera videopildi viite mõõtmiseks. Seatud eesmärgid täideti. Tegurid, mis olid tähtsad valgusensori valikul testimiseks olid selle reageerimiskiirus, spektraaltundlikkus ja kättesaadavus. Lõputöö raames valiti testimiseks mitu erinevat valgussensorit. Need olid fotodiodid BPW34 ja PD-333-3C, fototransistorid BPV11 ja TEPT5700, fototakisti 02-LDR12 ning digitaalne valgustugevuse sensor TSL2561. Loodi elektriskeemid, et mõõta sensorite omaviited. Fotodioode testiti komparaatori ja transimpedantsvõimendi skeemiga. Fototransistoreid ja fototakistit pingejaguri skeemiga. Digitaalne sensor ühendati juhtmetega mikrokontrolleri viikude külge.

Alguses mõõdeti omaviited (aeg, mis skeemil läheb, et reageerida valguseallikale) ideaalsetes tingimustes (ainuke valgusallikas oli valgusdiod). Omaviidete mõõtmiseks kasutati ostsilloskoopi DSOX1102G. Järgmisena mõõdeti skeeme, mis olid kõige väiksema omaviitega ja püsivamad mikrokontrolleriga Raspberry Pi 5. Võrreldi kiirust otse viigult lugemise ja AD-muunduri kasutamise vahel. AD-muundurina kasutati MCP3008-t. Viigult otse lugemine oli kiirem kui AD-muunduriga lugemine. Samas AD-muunduriga lugedes saab tulemuse ka siis kui skeem ei anna välja üle 1,3 V, mida on vaja, et Pi ütleks, et pinge on loogiline 1. Töö tulemusena selgus, et parim skeem viite mõõtmiseks on fotodiodi transimpedantsvõimendi skeem. Sellel oli kõige väiksem omaviide ning see oli kõige püsivam. Parim fotodiodi oli PD-333-3B, sest sellel oli väikseim omaviide. Valminud skeem oli kiirem ja püsivam kui skeem, mida kasutati idee tõendamiseks.

Käesoleva bakalaureusetöö edasiarendusena oleks võimalik mõõta, kuidas loodud skeem käitub eri valgusoludes ning uurida, kas ja kui palju muutub omaviide. Ka oleks võimalik testida kas ja kui palju muudaks omaviidet teised komponendid nagu näiteks fotodiod, mille spektraaltundlikkus on suurim punase valguse juures.

Lõputöö autor õppis töö käigus palju. Autor soovib tänada oma juhendajat Priit Roosipuud ja kaasjuhendajat Kaiser Pärnametsa, nende abi ja nõuannete eest selle töö käigus.

Kasutatud kirjandus

- [1] „Lucidchart,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lucidchart.com/pages/>. [Kasutatud 12. 05. 2024].
- [2] A. Mändmets, L. Kõrgmaa, K. Paabut ja A. Prääm, *Irdtorni videoühenduse viite mõõtmine*, Tallinn: Unpublished, 2023.
- [3] C. Bachhuber ja E. Steinbach, „A system for high precision glass-to-glass delay measurements in video communication,“ 09. 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/307516190_A_system_for_high_precision_glass-to-glass_delay_measurements_in_video_communication. [Kasutatud 11. 05. 2024].
- [4] P. Rensing, „Measuring Camera Display Latency,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://ligerbots.org/docs/whitepapers/LigerBots_Camera_Latency_Whitepaper.pdf. [Kasutatud 11. 05. 2024].
- [5] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Third edition., San Diego, California: Springer, 2003.
- [6] E. Hergert ja S. Piatek, „Photonics,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.photonics.com/Articles/Selecting_a_Photodetector_Using_WITS_as_a_Rough/a57549. [Kasutatud 18. 02. 2024].
- [7] R. Paschotta, „RP Photonics Encyclopedia,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rp-photonics.com/phototubes.html>. [Kasutatud 27. 03. 2024].
- [8] R. Pachotta, „RP Photonics Encyclopedia,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.rp-photonics.com/avalanche_photodiodes.html. [Kasutatud 04. 05. 2024].
- [9] R. Paschotta, „RP Photonics Encyclopedia,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rp-photonics.com/photodiodes.html>. [Kasutatud 27. 04. 2024].
- [10] M. K. Saini, „Tutorialspoint,“ 22. 10. 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tutorialspoint.com/difference-between-photodiode-and-phototransistor#:~:text=A%20photodiode%20is%20a%20semiconductor,light%20energy%20into%20electrical%20energy..> [Kasutatud 04. 05. 2024].
- [11] „Mouseri fotodiodide valik,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/c/sensors/optical-sensors/photodiodes/?product=Photodiodes&sort=pricing%7C1>. [Kasutatud 07. 05. 2024].
- [12] „BPW34 andmeleht,“ 23. 08. 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>. [Kasutatud 06. 05. 2024].
- [13] „Thorlabs,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FDS015>. [Kasutatud 12. 05. 2024].

- [14] „PD-333-3C andmeleht,“ 2010. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.mouser.ee/datasheet/2/143/EVER_S_A0003536626_1-2548659.pdf. [Kasutatud 09. 05. 2024].
- [15] P. Scherz ja S. Monk, Practical Electronics for Inventors, Fourth Edition, 4th Edition, McGraw-Hill Education TAB, 2016.
- [16] J. Haus, Optical Sensors: Basics and Applications, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.
- [17] „02–LDR2 andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/Document/a6885e43cec8543bb6ebffb078f868f/02-LDR1.pdf>. [Kasutatud 05. 05. 2024].
- [18] „BPV11 andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vishay.com/docs/81504/bpv11.pdf>. [Kasutatud 09. 05. 2024].
- [19] „TEPT5700 andmeleht,“ 01. 01. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vishay.com/docs/81321/tept5700.pdf>. [Kasutatud 19. 04. 2024].
- [20] „VEML7700 andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vishay.com/docs/84286/veml7700.pdf>. [Kasutatud 07. 05. 2024].
- [21] „TSL2561 andmeleht,“ 03. 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf>. [Kasutatud 02. 05. 2024].
- [22] „ALS-PT19 andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.snapeda.com/parts/ALS-PT19-315C/L177/TR8/Everlight/datasheet/>. [Kasutatud 07. 05. 2024].
- [23] „Oomipood,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/en/product/bpw34_bpw34_photo_d_32v_80na_880nm. [Kasutatud 08. 03. 2024].
- [24] „Lemona,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lemona.ee/foto-diod-elpd333-3c.html>. [Kasutatud 08. 03. 2024].
- [25] „Oomipood,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/en/product/bpv11_bpv11. [Kasutatud 08. 03. 2024].
- [26] „Ambient Light Sensors - Circuit and Window design,“ 06. 08. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vishay.com/docs/84154/appnotesensors.pdf>. [Kasutatud 18. 04. 2024].
- [27] „Oomipood,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oomipood.ee/en/product/tept5700_phototransistor_5mm__p_max_570nm_1_5v_50_lens_tran. [Kasutatud 08. 03. 2024].
- [28] „Oomipood,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.oomipood.ee/en/kataloog/tme/toode?sku=MDItTERSMTI>. [Kasutatud 08. 03. 2024].
- [29] „YE International,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.yeint.ee/elektroonika/arendusvahendid/andurid/valgus-ja-optilised-andurid/adafruit-ada439-ee-tsl2561-digitaalne-valgustugevuse-andur-3-5v>. [Kasutatud 08. 03. 2024].
- [30] „EasyEDA,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://easyeda.com/>. [Kasutatud 09. 05. 2024].
- [31] J. Bryant, „Analog Devices Using Op Amps as Comparators,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical->

- documentation/application-notes/AN-849.pdf#:~:text=However%2C%20the%20best%20advice%20on,designed%20for%20none%20of%20these.. [Kasutatud 27. 03. 2024].
- [32] R. Keim, „All about circuits,“ 12. 01. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/design-tips-for-photodiode-amplifiers/>. [Kasutatud 22. 03. 2024].
- [33] „MT-101: Decoupling Techniques,“ Analog Devices. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-101.pdf?doc=CN0276.pdf>. [Kasutatud 22. 03. 2024].
- [34] „Sierra circuits,“ 30. 03. 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.protoexpress.com/blog/decoupling-capacitor-use/>. [Kasutatud 12. 05. 2024].
- [35] „MCP6002 andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP6001-1R-1U-2-4-1-MHz-Low-Power-Op-Amp-DS20001733L.pdf>. [Kasutatud 24. 04. 2024].
- [36] „LM324N andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm224.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-ww&ts=1715271135646>. [Kasutatud 09. 05. 2024].
- [37] G. Recktenwald, „Sparkfun "Measuring Ambient Light with a Photoresistor",“ 25. 11. 2012. [Võrgumaterjal]. Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/resources/4/4/input_photoresister.pdf. [Kasutatud 11. 05. 2024].
- [38] „Eletronics notes,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/transistor/phototransistor-circuits-applications.php. [Kasutatud 27. 04. 2024].
- [39] „Adafruit,“ 02. 05. 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://learn.adafruit.com/tsl2561/python-circuitpython>. [Kasutatud 03. 05. 2024].
- [40] „DSOX1102G andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/product/DSOX1102G/oscilloscope-70-100-mhz-2-analog-channels.html>. [Kasutatud 12. 05. 2024].
- [41] „EG&G optoelectronics,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://johnloomis.org/ece445/topics/egginc/pt_char.html#:~:text=Speed%20of%20Response&text=These%20dominate%20due%20to%20the,be%20its%20speed%20of%20response.. [Kasutatud 19. 04. 2024].
- [42] „Michigan State University Chemistry Department materials,“ 05. 05. 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/spectrpy/uv-vis/spectrum.htm>. [Kasutatud 01. 05. 2024].
- [43] „Github,“ 07. 11. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/joan2937/pigpio/issues/589>. [Kasutatud 01. 05. 2024].
- [44] MakerMelissa, „Adafruit Playground,“ 08. 03. 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://adafruit-playground.com/u/MakerMelissa/pages/comparing-libgpiod-and-gpiozero-speeds-on-the-raspberry-pi-5>. [Kasutatud 18. 04. 2024].
- [45] „yEd graph editor,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.yworks.com/products/yed>. [Kasutatud 11. 05. 2024].

- [46] „Analog devices,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.analog.com/en/resources/glossary/adc.html>. [Kasutatud 28. 04. 2024].
- [47] „MCP3008 andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MCP3008.pdf>. [Kasutatud 05. 05. 2024].
- [48] „Analog Devices,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html#:~:text=Serial%20peripheral%20interface%20\(SPI\)%20is,registers%2C%20SRAM%2C%20and%20others..](https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html#:~:text=Serial%20peripheral%20interface%20(SPI)%20is,registers%2C%20SRAM%2C%20and%20others..) [Kasutatud 05. 05. 2024].
- [49] K. Rembor, „Adafruit,“ 05. 05. 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://learn.adafruit.com/mcp3008-spi-adc/python-circuitpython>. [Kasutatud 05. 05. 2024].
- [50] „gpiozero dokumentatsioon,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://gpiozero.readthedocs.io/en/stable/api_spi.html. [Kasutatud 05. 05. 2024].
- [51] R. Nagimov, „Nagimov Ruslani github,“ 24. 04. 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/nagimov/mcp3008hwspi?tab=readme-ov-file>. [Kasutatud 01. 03. 2024].
- [52] „Excel,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel>. [Kasutatud 11. 05. 2024].
- [53] „Geeks for geeks,“ 09. 05. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/thread-functions-in-c-c/>. [Kasutatud 11. 05. 2024].
- [54] R. Sheldon, „TechTarget,“ 05. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/mutex>. [Kasutatud 11. 05. 2024].
- [55] „EpocCam,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elgato.com/us/en/s/epoccam>. [Kasutatud 12. 05. 2024].
- [56] „OBS Studio,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://obsproject.com/>. [Kasutatud 12. 05. 2024].
- [57] „Stats with cats,“ 17. 07. 2010. [Võrgumaterjal]. Available: <https://statswithcats.net/2010/07/17/purrfect-resolution/>. [Kasutatud 03. 05. 2024].
- [58] „Linkedin,“ 13. 09. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/magic-number-30-why-sample-size-often-considered-sufficient>. [Kasutatud 03. 05. 2024].
- [59] „Cricklewood Electronics,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cricklewoodelectronics.com/CQY37.html>. [Kasutatud 20. 02. 2024].
- [60] „Sparkfun,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/voltage-dividers/all>. [Kasutatud 24. 04. 2024].
- [61] EUROCAE, *ED-240B MINIMUM AVIATION SYSTEM PERFORMANCE STANDARD FOR REMOTE TOWER OPTICAL SYSTEMS*, Prantsusmaa: Acuris, 2023.

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Laura Kõrgmaa

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Valgussensorite võrdlus videopildi viite mõõtmisel“, mille juhendaja on Priit Roosipuu
 - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

13.05.2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktile 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Lisa 2

Testimiseks kasutatud koodid: <https://github.com/tempestcannoli/Loputoo-testimine>