

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Loodusteaduskond

Toomas Tahves

FÜÜSIKALISTE MÕÕTMISTE KAUGJUHTIMISLABOR

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Mihhail Klopov

Kaasjuhendaja: Lembit Kurik

Tallinn 2019

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: Toomas Tahves

04.06.2019

Annotatsioon

Antud bakalaureusetöö eesmärk on uurida võimalusi, kuidas saab füüsilisi kaitseid sooritada interneti kaudu, koostada rakenduse arhitektuur ning seejärel programmeerida töötav rakendus.

Kaugjuhtimine aitab vähendada seadmete kulumist ning puudub vajadus seadmete ülespanekuks enne igat katset. Kui inimesel puudub võimalus füüsilisse laborisse tulla, siis alternatiivina võib sooritada kaugjuhtimislaboris olevaid katseid. Tulemused tagastatakse digitaalsel kujul ja nende põhjal joonistatakse graafik.

Arhitektuur peab olema jätkusuutlik, et seda saaks edasi arendada ning võimalusel lisada uusi laboreid.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles, sisaldab 3 peatükki, 12 joonist ja 2 tabelit.

Abstract

Purpose of the bachelor's thesis is to research opportunities for developing solutions of making physical measurements remotely, create architecture and program actual application.

Remote measurements will help against amortisation of laboratory equipment and saves time to set up equipment before each experiment. If person is not able to come to physical laboratory, then as an alternative she can make measurements using remote laboratory. Results are available digitally and visualized.

Architecture has to be sustainable, so it will be easy to develop further and add more options for different measurements.

Thesis is written in Estonian, has 3 chapters, 12 figures and 2 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

Lühend	Kirjeldus
REST	Representational State Transfer. Tarkvara arhitektuur.
API	Application Programming Interface. Serveriga suhtlemise protokoll kirjeldus.
RPi	Raspberry Pi. Väike arvuti, mille külge ühendatakse digitaalsed sensorid, loetakse andmeid ja edastatakse üle võrgu.
ORM	Object Relational Mapping. Liides serveri ja andmebaasi vahelise suhtlemise jaoks.
SPA	Single Page Application. Veebisaidi arhitektuur.
JSON	JavaScript Object Notation. Formaat andmete edastamiseks üle võrgu.
URI	Uniform Resource Identifier. Veebiaadressi osa.
HTTP	Hypertext Transfer Protocol. Protokoll asünkroonselt andmete edastuseks üle võrgu.
WebSocket	Protokoll sünkroonselt andmete edastuseks üle võrgu.
ARM	Advanced RISC Machine. Protsessori arhitektuur.
AVR	Mikrokiibi arhitektuur.

Sisukord

Sissejuhatus.....	9
1. Kaugjuhtimislabori arhitektuur	10
1.1. Kaugjuhtimislabori eesmärgid ja funktsionaalsus.....	10
1.1.1. Kaugjuhtimislabori üldised eesmärgid.....	10
1.1.2. Konkreetsete laborite eesmärgid.....	11
1.2. Üldine struktuur	12
1.2.1. Füüsiline struktuur	12
1.2.2. Teenuste struktuur.....	13
1.3. Realiseeritud rakenduse kirjeldus.....	14
1.3.1. Andmebaas	14
1.3.2. REST teenus.....	15
1.3.3. Veebikaamera teenus	15
1.3.4. Elektroonika juhtimise teenused	16
1.3.5. Veebileht.....	18
2. Realiseeritud laborid.....	19
2.1. Laboratoorne töö - Valgusdiodi efektiivsuse määramine.....	19
2.1.1. Teoreetilised alused	19
2.1.2. Realiseeritud labori kirjeldus	20
2.2. Laboratoorne töö - Lambi valgusspektri mõõtmine	21
2.1.1. Teoreetilised alused	21
2.1.2. Spektromeetri kalibreerimine.....	22
3. Edaspidised arendamise võimalused	23
3.1. Uue labori lisamine	23
3.2. Uni-ID sisselogimise lisamine	23
3.3. Automaatne hindamissüsteem	23
Kokkuvõte	24
Summary	25
Kasutatud kirjandus	26

Jooniste loetelu

Joonis 1 Labori füüsiline struktuur	12
Joonis 2 Labori teenuste struktuur	13
Joonis 3 Andmebaasi struktuur.....	14
Joonis 4 Raspberry Pi 2 sisendid ja väljundid.....	16
Joonis 5 Arduino Uno R3 sisendid ja väljundid	17
Joonis 6 Veebisaidi jadadiagramm ja seotud teenused	18
Joonis 7 Ketas, mille peal soojuse levikut mõõdetakse	20
Joonis 8 Ketta pilt soojuskaamerast pärast soojenemist.....	20
Joonis 9 Vesiniku spektrijooned.....	21
Joonis 10 Elavhõbeda spektrijooned	21
Joonis 11 Lainepikkuste ja spektromeetri näidu sõltuvus	22
Joonis 12 Lambi intensiivsus ja musta keha spekter temperatuuril $T = 1800\text{ K}$	22

Tabelite loetelu

Tabel 1 REST teenuse toetatud päringud.....	15
Tabel 2 Kaamera teenuse URI'd	15

Sissejuhatus

Kaugjuhtimislabor on veebirakendus, kus kasutaja saab teostada füüsilisi mõõtmisi. Töö tehnilise realiseerimise keerukus seisneb sensoritest andmete lugemises, füüsilises tõlgendamises ja veebi kaudu mõõtmistulemuste edastamises. Tuleb leida tarkvaraline lahendus, mis toetaks mitmeid laboreid ja hiljem ka uute laborite lisamist.

Töö eesmärk on välja töötada teenustepõhine arhitektuur, mis võimaldab sensoritest andmeid serverisse lugeda ning seejärel reaalajas veebisaidile edastada. Lisaks on vaja andmebaasist laborite infot lugeda, mõõtmistulemusi salvestada ning veebikaamera pilti veebisaidile üle kanda, et jälgida labori kulgemist. Välja arendatud arhitektuuri peale saab ehitatud kaks laboratoorset tööd.

Esimene laboratoorne töö on diodi efektiivsuse arvutamine. Selleks on vajalik ringikujuline metallist plaat, mille keskkohas on diod, mis soojendab plaati. Veebilehel kasutaja näeb soojuskaamera abil soojuse levikut plaadil. Kui plaat on piisavalt soojenenud, siis veebirakendus loeb pildi pealt plaadi keskkohast kuni teatud raadiuseni temperatuuri näidud ning joonistab graafiku raadiuse ja temperatuuri suhtest, mille abil saab arvutada diodi efektiivsuse..

Teine laboratoorne töö on spektromeetrist valguse spektri edastamine üle võrgu. Kasutaja siseneb labori lehele ning graafikule joonistatakse reaalajas spektromeetri ees oleva lambi valguse spekter.

Arhitektuur peab olema jätkusuutlik, nii et seda saab edasi arendada ja vajadusel lisada uusi laboreid. Programmeeritud rakenduse kood asub TTÜ Gitlabis.

1. Kaugjuhtimislabori arhitektuur

1.1. Kaugjuhtimislabori eesmärgid ja funktsionaalsus

1.1.1. Kaugjuhtimislabori üldised eesmärgid

- Labori kasutamine ananüümse kasutajana. Kuna veebilehel hetkel ei ole TTÜ Uni-ID sisselogimisvõimalust, aga veebilehe kasutajaid peab kuidagi eristama, siis igale kasutajale genereeritakse unikaalne ID, mis salvestatakse veebilehitsejasse ning selle järgi kontrollitakse, kas kasutajal on õigus hõivatud laborit kasutada.
- Laborite nimekirja kuvamine, kus kuvatakse labori nimi, kirjeldus, illustreeriv pilt ning kas on vaba, hõivatud või jätkamise võimalus.
- Hõivatud laborit saab korraga kasutada vaid üks kasutaja.
- Labori lehe avamisel märkida labor hõivatuks ja käivitada aegumise timer.
- Labori vabastamine kui mõõtmine lõpetatud või aeg saab läbi.
- Internetiühenduse katkemisel või brauseri sulgemisel on võimalik labori tööd jätkata kui tulla tagasi.
- Labori lehel kaamera pildi kuvamine reaajas, et katset jälgida.
- Labori lehel mõõtmistulemuse kuvamine.
- Mõõtmistulemuste andmebaasi salvestamine, kuvamine, ja kustutamine.
- Mõõtmistulemuste allalaadimine .csv failina

1.1.2. Konkreetsete laborite eesmärgid

Realiseeritud on kaks laboratoorset tööd – spektromeeter ja soojusjuhtivus. Järgnevad nimekirjad kirjeldavad konkreetsete laborite funktsionaalseid nõudeid

Spektromeeteri labori funktsionaalsed nõuded.

- Spektromeetri ja Arduino vahelise suhtlemise koodi seadistamine.
- Arduino kaudu spektromeetri andmete lugemine ja USB kaudu edastamine.
- Python teenuse kaudu USB'st andmete lugemine.
- Spektromeetri andmete kuvamine graafikul labori lehel.
- Veebikaamera pildi kuvamine labori lehel.
- Spektromeetri tulemuste salvestamine andmebaasi.

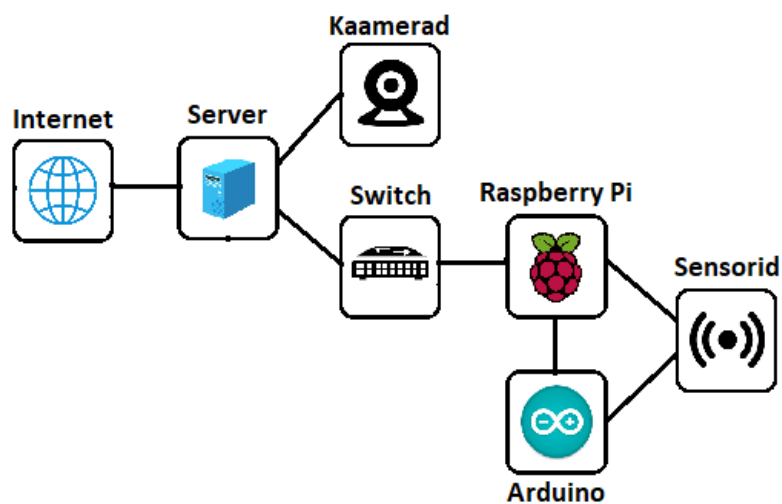
Soojusjuhtivuse labori funktsionaalsed nõuded.

- Soojuskaamera pildi kuvamine labori lehel.
- Soojuskaamera pildi töötlemine: keskkohast kuni etteantud raadiuseni pikslite väärtuste lugemine.
- Temperatuuri ja ketta raadiuse vahelise suhte kuvamine graafikul (radiaalne pilt).
- Temperatuuri ja raadiuse salvestamine andmebaasi.

1.2. Üldine struktuur

1.2.1. Füüsiline struktuur

Joonis 1 kirjeldab füüsilisi seadmeid, mida kasutatakse labori ehitamisel. Switch küljes on väline internet ja server. Switch on vajalik, et serveri ja hiljem lisanduvate Raspberry Pi (Rpi) seadmete vahel saaks andmeid liigutada ning seadmed saaksid andmeid üle interneti saata. Server jagab veebilehte ja sinna tulevad kasutajate esmased päringud. Serveri küljes on ka veebikaamerad pildi edastamiseks. Arduino eesmärk on anduritest andmete lugemine ja üle Serial Port edastamine RPi'le. RPi eesmärk on samuti anduritest ja ka Arduinost andmete lugemine ning lisaks andmete edastamine üle võrgu kasutajale.



Joonis 1 Labori füüsiline struktuur

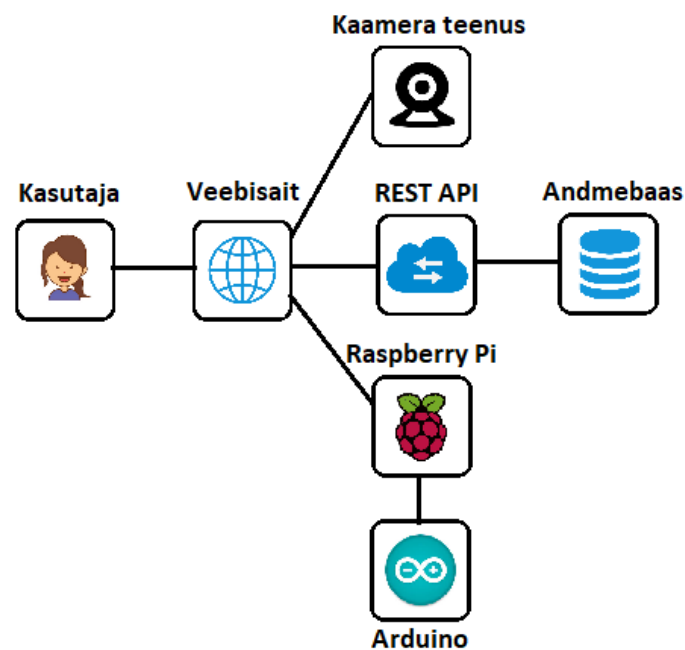
1.2.2. Teenuste struktuur

Joonis 2 kirjeldab realiseeritud teenuste struktuuri.

Kui kasutaja sisestab brauserisse veebilehe aadressi, siis päring jõuab serverisse ning see saadab tagasi veebilehe rakenduse.

Kui kasutaja siseneb veebilehel laborite nimekirja lehele, siis toimub päring REST API teenusele, mis loeb andmebaasist laborite nimekirja, saadab tagasi kasutajale ning kuvab nimekirja veebilehel.

Kui kasutaja valib labori ja avab valitud labori lehe, et alustada mõõtmist, siis selle taga on kolm teenust. Üks teenus on veebikaamera pildi kuvamine. Teine teenus on REST API, kust toimub labori andmete päring andmebaasist ja labori hõivatuks märkimine. Kolmas teenus on RPi kaudu mõõtmise alustamise käsu andmine ja sensoritest tulemuste lugemine.

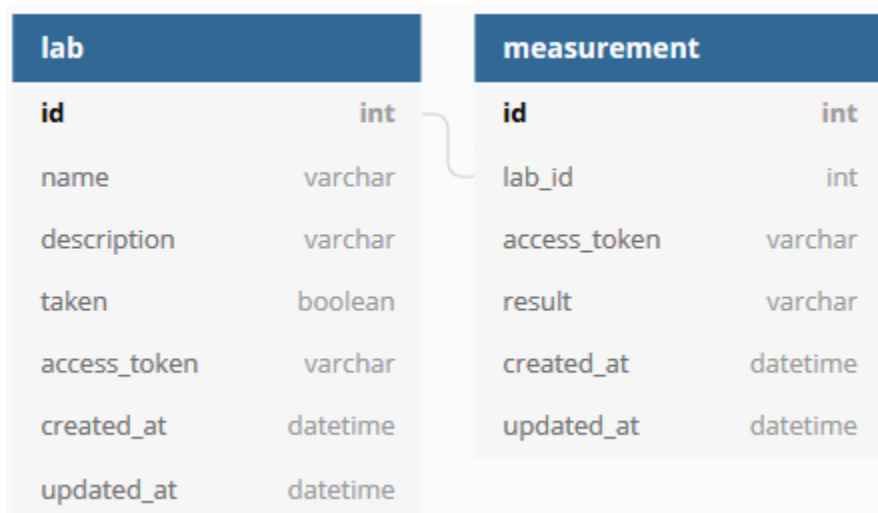


Joonis 2 Labori teenuste struktuur

1.3. Realiseeritud rakenduse kirjeldus

1.3.1. Andmebaas

Laborite detailide info ja mõõtmistulemusi saab pärida, sisestada ja kustutada. Andmete salvestamiseks sai andmebaasiks valitud PostgreSQL. Andmebaasi tabelite struktuuri kirjeldab Joonis 3.



Joonis 3 Andmebaasi struktuur

Labori tabel sisaldab nime ja kirjeldust. Hõivatud staatust *taken* kasutatakse selleks, et veebilehel saaks ainult üks kasutaja sama laborit teha. Autentimine on anonüümne ja anonüümsete kasutajate eristamiseks kasutatakse *access_token* välja, mis omab unikaalset väärtust iga veebilehe külastaja korral.

Mõõtmistulemuste tabelis on *result* väljas mõõtmistulemus ning *access_token* abil saab anonüümne kasutaja pärida ja kustutada oma mõõtmistulemusi.

1.3.2. REST teenus

Andmebaasiga suhtlemiseks on kirjutatud REST teenus Python keeles. Serveri ja andmebaasi suhtlus toimub Peewee ORM teegi kaudu. Server on kirjutatud Flask teegi abil ja andmete edastus toimub JSON formaadis.

Anonüümsete kasutajate eristamiseks antakse päringutega edasi *access_token*, mille põhjal otsustatakse, kas kasutajal on õigus labori lehte avada või andmeid kustutada.

Tabel 1 kirjeldab URI'sid ja HTTP päringu tüüpe, mida teenus toetab.

Tabel 1 REST teenuse toetatud päringud

Tüüp	URI	Andmed	Selgitus
GET	/labs		Laborite nimekiri
GET	/lab/:id		Labori info
POST	/check_token	access_token, id	access_token kontrollimine, kas kasutajal on õigus laborit kasutada
POST	/measurements	access_token, id, lab_id	Mõõtmistulemuste salvestamine serverisse või pärimine lab_id abil
DELETE	/measurements	access_token, id	Mõõtmistulemuse kustutamine
PUT	/measurements	access_token, id	Mõõtmistulemuse muutmine

1.3.3. Veebikaamera teenus

Veebikaamerad on vajalikud, et kasutaja saaks jälgida katse toimumist reaajas. Veebikaamerad on füüsiliselt ühendatud serveri külge, veebikaamera teenus loeb kaamerate pildi ning jagab üle HTTP protokollile, nii et saab lihtsalt integreerida veebisaidile. Veebikaamera teenus on kirjutatud Python keeles, kasutab OpenCV teeki pildi saamiseks kaamerast ning Flask teegiga kirjutatud server jagab pilti üle võrgu. Teenuse kood on võetud Miuel Grinberg õpetusest. Tabel 2 kirjeldab URI'sid, kust saab erinevate kaamerate pilte näha. Töö kirjutamise hetkel on ühendatud kaks kaamerat, aga kaamerasid saab lisada rohkem.

Tabel 2 Kaamera teenuse URI'd

URI	Selgitus
address:3001/video_feed/	Kaamera 1 pilt
address:3002/video_feed/	Kaamera 2 pilt

1.3.4. Elektroonika juhtimise teenused

Elektroonika juhtimise teenuste eesmärk on lugeda anduritest andmeid ja veebisaidi kaudu vahendada käske. Antud töös elektroonika kaudu käib spektromeetrist andmete lugemine, mis edastatakse USB pordi kaudu RPi peal töötavale teenusele, mis jagab andmeid edasi veebisaidile.

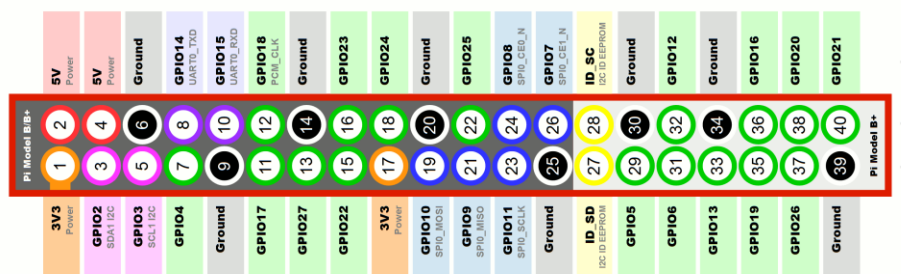
Riistvaraliselt on võimalik luua oma elektrooniline süsteem, mis loeb anduritest väärtused, puhastab signaali, muudab digitaalsele kujule ja mis on liidestatud arvutiga, aga see nõuab väga palju tööd, seetõttu on leitud kiirem ja lihtsam viis seda teha. Elektroonikaga suhtlemiseks on kasutusele võetud Arduino ja Raspberry Pi (RPi) platvormid. Valitud platvormid said kasutusele võetud nende populaarsuse ja kasutusmugavuse tõttu. Soovi korral võib teised laborid ehitada teistsuguste platvormide peale. Järgnevalt tulevad valitud platvormide lühikirjeldused.

Raspberry Pi kirjeldus

Raspberry Pi on väikeste ja madala volutarbega arvutite seeria, mille tuumaks on ARM protsessor ning millel jookseb Linuxi ARM versioon. Arendusplaadil on digitaalsed sisendid/väljundid ning programmeerimiskeelte valik, mille abil kontrolleri juhtida, on väga lai (C/C++, Python, Java jt). Arendusplaat omab LAN porti ning elektroonikat on võimalik juhtida üle võrgu.

Antud töös on RPi peale kirjutatud Python keeles ja Flask teegi abil teenus, mis loeb USB pordi kaudu Arduino spektromeetrist andmed ja edastab üle võrgu veebilehele. Joonis 4 kirjeldab RPi arendusplaadi sisendeid ja väljundeid.

RPi kasutamise arhitektuuriline eesmärk on laborit juhtida füüsiliselt eraldiseisva arvutiga, kus töötab teenus, mis võimaldab digitaalsete sisendite/väljundite kaudu juhtida elektroonikat ning edastada sensorite andmeid. Eelistatud lahendus on iga labor ehitada eraldiseisva RPi peale, et saavutada kõrgem töökindlus ja seadmete loogiline eraldatus. Tehnilise tõrke korral ainult ühe konkreetse labori töö katkeb, aga teised laborid ja teenused jäävad töökorda.



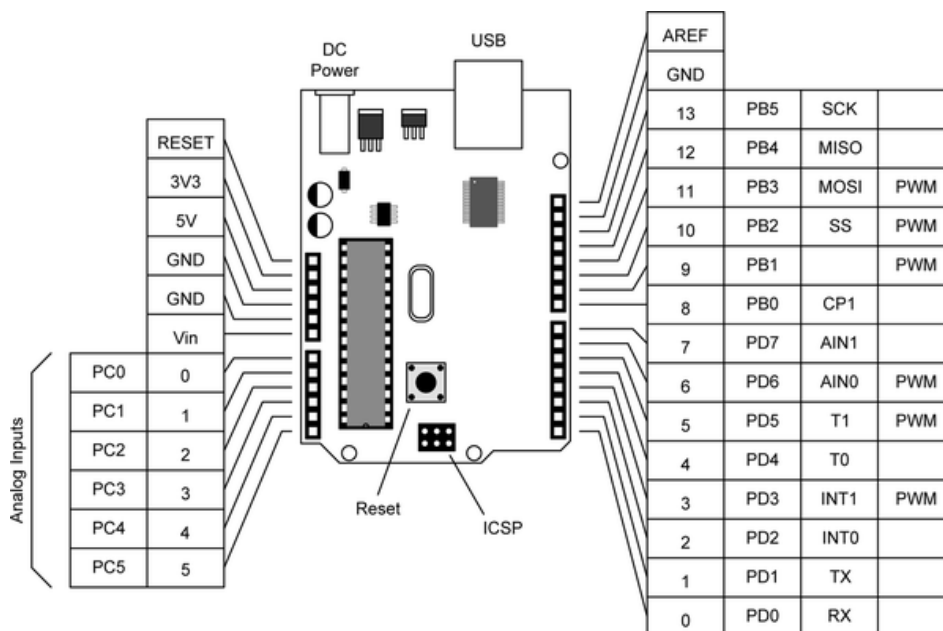
Joonis 4 Raspberry Pi 2 sisendid ja väljundid

Arduino kirjeldus

Arduino on avatud tarkvaraga mikrokontroller, mille tuumaks on AVR kiip. Arendusplaadil on analoog ja digitaalsed sisendid/väljundid ning seda on võimalik juhtida koodi kirjutamisega Arduino keeles, mis baseerub C keelel. Samahästi võib kirjutada koodi ka C/C++ keeles. Sisendite külge on võimalik ühendada sensorid, kirjutada andmete lugemise kood ja USB pordi kaudu arvutist andmeid pärida.

Antud töös on Arduino plaadi kasutamine vajalik, sest sellega saab analoogsisenditesse ühendada andureid. Spektromeetri laboris on analoogsisenditesse ühendatud spektromeeter Hamamatsu C12880MA, millest lähemalt juttu spektromeetri labori kirjelduses. Arduino platvormi on võimalik kasutada ka teiste laborite arendamisel, kus sensorid on samuti mõeldud Arduinoga ühilduma ning avatud tarkvara keskkondades leidub koodinäiteid, mis säästab arendamise aega.

Joonis 5 kirjeldab Arduino Uno R3 plaati ja selle sisendeid. Spektromeeter Hamamatsu C12880MA ühendatakse PC0 – PC5 analoogsisenditesse (lisaks vajalik V_{in} toide ja GND maandus) ning Github keskkonnast sai võetud sisenditest lugemise ja edastamise kood.



Joonis 5 Arduino Uno R3 sisendid ja väljundid

1.3.5. Veebileht

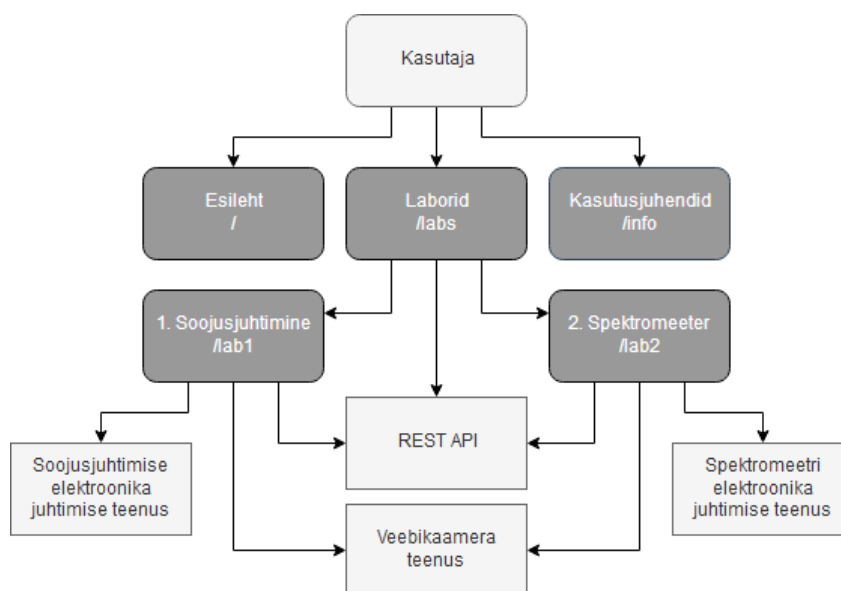
Veebilehe eesmärk on pakkuda kasutajaliidest, kus saab valida laboratoorse töö ja sooritada füüsikalisi mõõtmisi.

Veebileht on ehitatud ühe lehe rakendusena (Single Page Application ehk SPA). Programmeerimiskeeleks on Javascript ja põhiliseks teegiks Vue.js. Kujundamiseks on kasutatud CSS ja Bootstrap Material Design komponente. Veebisait töötab Node.js serveris kasutades Express teeki, mille eesmärk on veebisaiti ja seotud faile üle võrgu kättesaadavaks teha. Antud tehnoloogiad said valitud, sest nad on väga populaarsed ja kiirendavad veebilehe arendamist.

Joonis 6 kirjeldab veebisaidi ülesehitust pärast kasutaja sisenemist veebisaidile. Tumehallid kastid kirjeldavad veebisaidil olevaid lehekülgi ja nende URI'sid. Esimesena laetakse esileht, mis tutvustab veebisaidi sisu. Kasutusjuhendite alla tulevad praktikumide kasutusjuhendite failid. Laborite all kuvatakse laborite nimekirja, mis laetakse REST teenuse kaudu andmebaasist.

Hetkel on realiseeritud kaks laborite lehekülge, aga lehekülgi saab lisada kui tekib rohkem laboreid. Laborite lehekülgede ühine osa on veebikaamerate teenus ja REST teenus. REST teenusega suhtlemine on vajalik selleks, et kontrollida labori kasutamise õigust ja märkida labor hõivatuks või vabastatuks. Iga labori leht suhtleb eraldiseisva elektroonika juhtimise teenusega, et anda käske või lugeda sensorite andmeid ja kuvada lehel.

Füüsiliselt asub veebileht, REST teenus, andmebaas ja veebikaamera teenus samas serveris. Elektroonika juhtimise teenused töötavad eraldi RPi peal.



Joonis 6 Veebisaidi jadadiagramm ja seotud teenused

2. Realiseeritud laborid

2.1. Laboratoorne töö - Valgusdiodi efektiivsuse määramine

2.1.1. Teoreetilised alused

Soojusallikas asub sisesilindris ja soojus läbib sisesilindri seina radiaalselt. Temperatuuri radiaalse jaotuse saab arvutada diferentsiaalvõrrandiga (1).

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (1)$$

Kui võrrandis (1) teha asendus $Z = \frac{dT}{dr}$, siis saab võrrandi (2).

$$\frac{dZ}{dr} + \frac{1}{r} Z = 0 \quad (2)$$

Võrrandit (2) saab otse lahendada

$$\begin{aligned} \frac{dZ}{Z} &= -\frac{dr}{r} \\ Z(r) &= \frac{b}{r} \end{aligned} \quad (3)$$

Integreerides võrrandit (3) saab lahendiks (4).

$$T(r) = a + b \ln(r) \quad (4)$$

Soojust, mis läbib sisesilindri seina, kirjeldab soojusjuhtivuse võrrand (5), kus s – sisemise silindri pindala, t – aeg, χ – soojusjuhtivuse tegur.

$$Q = \chi \frac{dT}{dr} \cdot s \cdot t \quad (5)$$

Kui võrrandis (5) teha asendused $\frac{dT}{dr} = \frac{b}{r}$ ja $N = \frac{Q}{t}$, siis saab võrrandi (6), kus h – ketta paksus.

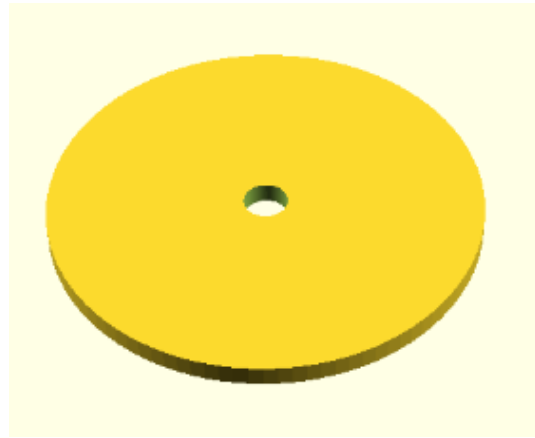
$$N_{\text{soojusvõimsus}} = \chi 2\pi h b \quad (6)$$

Võrrandis (6) parameeter b on sirge tõus ja selle saab graafikult, mis kirjeldab ketta raadiuse logaritmi ja antud raadiuse peal temperatuuri suhet $b = \frac{\Delta T}{\Delta \ln(r)}$.

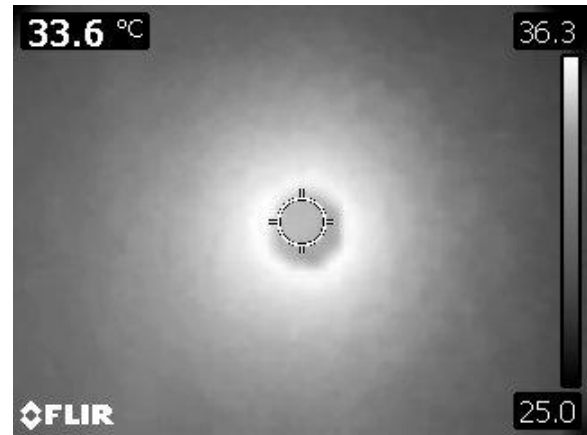
Lõpuks saab välja arvutada valgusdiodi efektiivsuse valemist: $\frac{I \cdot U - N_{\text{soojusvõimsus}}}{I \cdot U} \cdot 100\%$, kus $I \cdot U$ on koguvõimsus.

2.1.2. Realiseeritud labori kirjeldus

Füüsiliselt on labori ehitamiseks vaja soojuskaamerat, ketast, diodi ja juhtimiseks RPi arvutit.



Joonis 7 Ketas, mille peal soojuse levikut mõõdetakse



Joonis 8 Ketta pilt soojuskaamerast pärast soojenemist

Joonis 7 visualiseerib idealiseeritud metallist ketast. Plaadi keskel on diod, mis plaati soojendab. Kui diod sisse lülitada, siis hakkab ketas soojenema ning Joonis 8 näitab soojuskaamera pilti soojenenud kettast.

Soojuskaamera pildil paremal pool on temperatuuri ja piksli värvi suhe. Üleval maksimaalne temperatuur ja all minimaalne temperatuur. Ketta keskkohast kuni ääreni saab võtta pikslite väärtused, mis vastavad temperatuurile.

Antud töös on kasutusel JPG pildi formaat. Musta piksli väärtus on 0 ja valge piksli väärtus on 255. Saadud andmete alusel joonistatakse graafik, kus on ketta raadiuse ja temperatuuri logaritmi suhe. Graafikul tekib sirge joon, mille tõusu abil saab arvutada valgusdiodi efektiivsust.

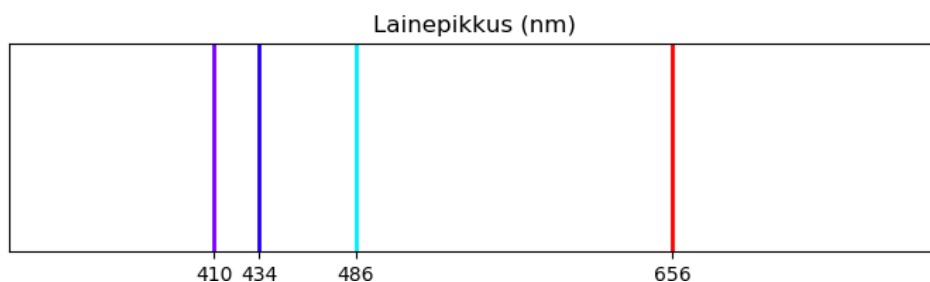
2.2. Laboratoorne töö - Lambi valgusspektri mõõtmine

2.1.1. Teoreetilised alused

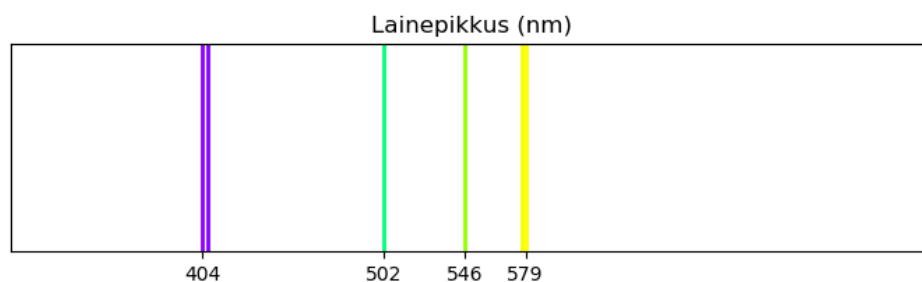
Elektromagnetiline spekter on elektromagnetilise kiirguse sageduste ja vastavate lainepikkuste vahemik. Antud töös vaadeldakse nähtava valguse spektrit vahemikus 320 – 800 nm.

Keemilise elemendi emissiooni spekter on elektromagnetilise kiirguse sageduste vahemik kui aatom või molekul muudab olekut kõrge energia nivoo ja madala energia nivoo vahel. Muutuse ajal toimub footoni kiirgamine, mis on võrdne kahe nivoo energia vahega. Selle abil on võimalik tuvastada tundmatuid keemilisi elemente.

Joonis 9 kirjeldab vesiniku aatomi spektri kõige intensiivsemaid jooni ja nende lainepikkuseid nanomeetrites. Joonis 10 kirjeldab elavhõbeda aatomi kõige intensiivsemaid jooni. Nende joonte abil sai kalibreeritud ja määratud spektromeetri lainepikkused.



Joonis 9 Vesiniku spektrijooned



Joonis 10 Elavhõbeda spektrijooned

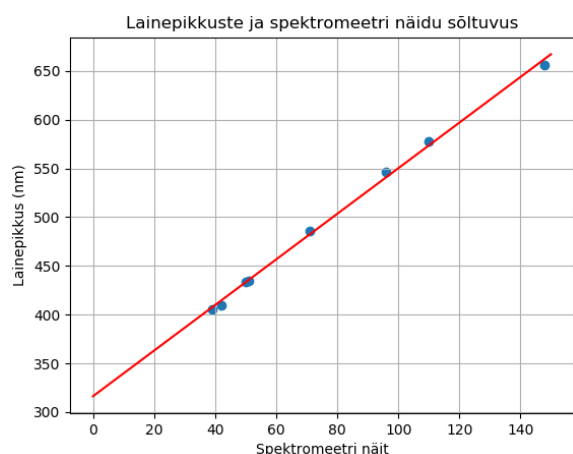
Absoluutselt musta keha kiirgus on elektromagnetiline kiirgus, mida kiirgab absoluutselt must keha (AMK). AMK kiirguse spektri intensiivsus sõltub ainult temperatuurist. Plancki seadust kirjeldab valem (7), kus T – keha temperatuur, λ – lainepikkus, h – Plancki konstant, c – valguskiirus ja k – Boltzmanni konstant. AMK spektrit saab kasutada referents-spektrina, kui kalibreerida spektromeetri intensiivsust erinevatel lainepikkustel.

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (7)$$

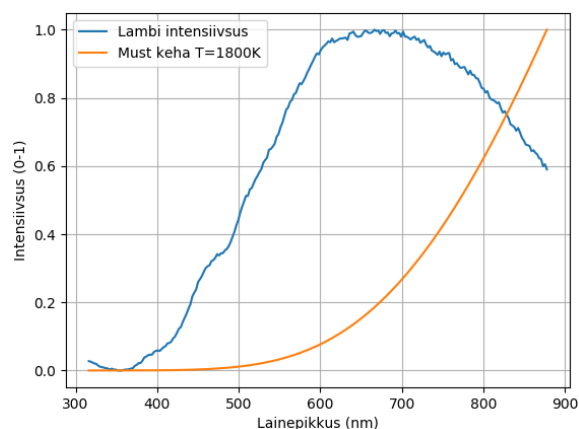
2.1.2. Spektromeetri kalibreerimine

Füüsiliselt on labori ehitamiseks kasutatud Arduino UNO R3 arendusplaat, Hamamatsu C12880MA spektromeetrit, elavhõbeda lampi ja RPi arvutit. Spektromeeter käib Arduino külge ning Github keskkonnas on kood, mida saab laadida Arduino peale, nii et loeks spektromeetrist andmeid ja edastaks USB kaudu arvutile.

Spektromeeter edastab korraga 288 numbrit, mis on vastavalt iga lainepikkuse intensiivsus. Selleks, et teada saada, mis lainepikkus vastab igale numbrile, on vajalik kalibreerimine. Kalibreerimiseks sai kasutatud Hg ja H_2 lampe, millel on teada kõige intensiivsemate spektrijoonte lainepikkused ja nende abil sai joonistatud Joonis 11, mis kirjeldab spektromeetri näidu ja lainepikkuste seost. Lineaarse regressiooni abil sai leitud sirge (tõus ja vabaliige), mille abil saab numbreid konverteerida.



Joonis 11 Lainepikkuste ja spektromeetri näidu sõltuvus



Joonis 12 Lambi intensiivsus ja musta keha spekter temperatuuril $T = 1800\text{ K}$

Pärast lainepikkuste paika saamist, on vajalik kalibreerida ka iga lainepikkuse intensiivsus, sest spektromeeter on erineva lainepikkuse puhul erineva tundlikusega. Selle jaoks on kasutatud volframi hõõglampi, mis toimib nagu must keha temperatuuril $T = 1800\text{ K}$. Joonis 12 kirjeldab teoreetilise musta keha spektrit valitud temperatuuril. Lisaks on joonisel ka lambi spekter kalibreerimata spektromeetriga. Selle graafiku alusel on võimalik välja arvutada koefitsendid iga lainepikkuse jaoks ning spektromeetri intensiivsust vastavalt korrigeerida.

Valem (8) kirjeldab kalibreerimise valemit, kus $\varepsilon(\lambda)$ on musta keha kõver, $I_E(\lambda)$ on etalonlamp, $I_m(\lambda)$ on spektromeetri sissetulev signaal ja $I_p(\lambda)$ on spektromeetri pimedakõver. Tulemuseks on $I(\lambda)$, mis on kalibreeritud intensiivsus sõltuvalt lainepikkusest.

$$I(\lambda) = \frac{\varepsilon(\lambda)}{I_E(\lambda) - I_p(\lambda)} \cdot (I_m(\lambda) - I_p(\lambda)) \quad (8)$$

3. Edaspidised arendamise võimalused

3.1. Uue labori lisamine

Uue laborite lisamise jaoks on vaja teha järgnevad tegevused:

- Andmebaasi luua uus kirje labori kohta, mida veebisaidil kuvada.
- Veebisaidi rakenduses tuleb luua uue labori lehekülg, mis suhtleks uue veebikaamera ning uue RPi elektroonika teenusega.
- Veebikaamera teenus seadistada uue kaamera jaoks.
- Elektroonika juhtimiseks kirjutada teenus, mis toimiks uue RPi peal ja vahendaks käske elektroonika ja kasutaja vahel.
- RPi ühendada switch'iga ja serveris määrata RPi poole suunamise port.

3.2. Uni-ID sisselogimise lisamine

Selleks, et vältida veebirobotite või võõraste inimeste poolt laborite kasutamist, on vajalik luua teistsugune autentimissüsteem. Ise ei pea autentimisteenust looma, vaid võib integreerida TalTechi Uni-ID süsteemiga. Selleks on vajalik teha järgnevad tegevused:

- Lisada andmebaasi *User* tabel, kus hoitakse registreerunud üliõpilase info, aga mitte sisselogimise info (paroolid ja kasutajanimed on Uni-ID autentimisserveris). Seejärel siduda see mõõtmistulemuste tabeliga ja ka laborite tabeliga, et saaks labor määrata hõivatuks *User* tabeli abil.
- Veebisaidile lisada Uni-ID sisselogimise nupp, mille vajutamise järel suunatakse kasutaja Uni-ID serverise sisselogimise leheküljele. Pärast edukat sisselogimist, Uni-ID server genereerib token'i, mida kasutatakse kasutaja autentsuse kontrollimiseks ning saadab selle tagasi kaugjuhtimislabori serverile. Token salvestatakse serveri andmebaasi ja kasutaja veebilehitsejasse. Niimoodi saab kasutajat tuvastada ilma, et ta peaks uuesti sisse logima.

3.3. Automaatne hindamissüsteem

Kaugjuhtimislabori praktikumide lahenduskäike on võimalik automatiseerida ja genereerida vastustega PDF fail, mille abil õppejõud saab üliõpilase tööd kontrollida. Teine lahendus on luua vastuste sisestamise lehekülg, mis automaatselt kontrollib üliõpilase vastuseid ja hindab tööd.

Kokkuvõte

Töö käigus sai välja selgitatud, millised füüsilised seadmed on vajalikud kaugjuhtimislabori ehitamiseks ning sai välja töötatud teenustepõhine arhitektuur, mille peale on võimalik ehitada mitmeid laboreid.

Seejärel sai kirjeldatud kahte laboratoorset tööd, mis on ehitatud eelnevalt välja töötatud arhitektuuri peale. Kasutaja saab veebisaidil sooritada mõõtmised, laadida alla tulemused ning mõõtmistulemuste alusel lahendada püstitatud ülesanded.

Kirjeldatud töö põhjal sai reaalselt programmeeritud tarkvara (veebisait ja teenused), mis on serverisse üles pandud ja valmis kasutamiseks.

Rakendust saab edasi arendada lisades uusi laboreid, täiendada Uni-ID sisselogimisega ning õppejõu koormuse vähendamiseks lisada ülesannete automaatne hindamissüsteem.

Summary

As a result of this work, necessary physical equipment was chosen for building remote laboratory and developed architecture to support implementing multiple laboratories.

Described two labs that can be built upon developed architecture. User can make measurements and download data from the website.

Implemented actual software (website and services), which is set up live and ready for everyday use.

Application can be developed further by adding more laboratories, replace current authentication with Uni-ID solution and add automatic solution verification software to reduce load on teachers.

Kasutatud kirjandus

- [1] Hamamatsu C12880MA example code for Arduino, GroupGets
<https://github.com/groupgets/c12880ma>
- [2] Flask Video Streaming, Miguel Grinberg
<https://blog.miguelgrinberg.com/post/flask-video-streaming-revisited>
- [3] Arduino: A Technical Reference by J. M. Hughes
<https://www.oreilly.com/library/view/arduino-a-technical/9781491934319/ch04.html>
- [4] Simple Guide to the Raspberry Pi GPIO Header and Pins, Matt
<https://www.raspberrypi-spy.co.uk/2012/06/simple-guide-to-the-rpi-gpio-header-and-pins/>
- [5] Wikipedia, Mercury (element)
[https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_\(element\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_(element))
- [6] Wikipedia, Hydrogen
<https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen>