

Joni Jalkanen

Valomonistinputkien kalibrointilaite

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

2.5.2013

Tekijä Otsikko	Joni Jalkanen Valomonistinputkien kalibrintilaite
Sivumäärä Aika	34 sivua + 2 liitettä 2.5.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	elektroniikan koulutusohjelma
Ohjaajat	yliopettaja Kari Salmi HW Engineer Jorma Honkala
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin kahden eri valmistajan valomonistinputkien kalibrintia LED-valonlähteen avulla sekä valmistettiin kalibrintilaitteen testikappale. Insinööriyössä suunniteltiin ja rakennettiin laite, jolla valomonistinputkien kalibrinti voidaan hoitaa nopeasti ja luotettavasti. Aiemmin valomonistinputket kalibroidiin valmistettavassa laitteessa. Tämä tapa on kuitenkin hidas teollista sarjatuotantoa varten, minkä lisäksi kalibroinnissa on paljon muuttujia, jotka vaikuttavat kalibrintitulokseen.</p> <p>Aluksi kokeiltiin käyttää LEDiä hyvin pienellä, mikroampeerien suuruisella virralla. Jotta laitteen suorituskykyä sekä vakautta voitaisiin parantaa, kokeiltiin fotodiodin avulla takaisinkytkettyä LED-valonlähdettä. Tämän kytkennän tarkkuus ja vakaus eivät kuitenkaan riittäneet tähän käyttötarkoitukseen. Lopulta LED-valonlähde toteutettiin aiempaa tasavirtalähdettä suurempia virtoja käyttävän tasavirtalähteen avulla, jolloin laitteen suorituskyky on ensimmäistä valonlähdettä parempi vakauden kuitenkin ollessa riittävä.</p> <p>Kalibrintilaitteen vakautta testattiin useita vuorokausia kestävän testiajon avulla. Myös laitteen käyttöturvallisuus on otettu huomioon, sillä laite sisältää korkeajännitteisiä osia sekä laserin. Laitteelle tehtiin käyttöohjeet tuotannon työntekijöitä varten, sekä kalibroinnin tarkastus- ja uudelleenkalibrointiohjeet.</p>	
Avainsanat	valomonistinputki, kalibrinti, LED

Author Title	Joni Jalkanen Photomultiplier Tube Calibrator
Number of Pages Date	34 pages + 2 appendices 2 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Instructors	Kari Salmi, Principal Lecturer Jorma Honkala, HW Engineer
<p>In this thesis PMTs (Photomultiplier Tube) from two different manufacturers were calibrated using a LED light source. A PMT calibrator was designed and constructed. This PMT calibrator is faster and more reliable than old calibration style.</p> <p>First, the LED was driven with very small constant current of few to hundreds of microamperes. To increase the performance and stability of the LED light source, a photodiode feedback was experimented with. Unfortunately this solution was not stable and accurate enough for this application. Finally, the LED light source was constructed using a constant current source which could produce up to few milliamperes. With this light source the calibrator has better performance compared to the first light source, while the stability and accuracy are still reasonable.</p> <p>The result of this thesis is a calibrator that can be used to calibrate and test photomultiplier tubes. The calibrator was placed in endurance test for several days to verify its stability. Also the operating safety of the device is noted, as the calibrator has high voltage parts and a laser. The calibrator is in test use at production. Operating instructions were made for production workers, and also calibration check and re-calibration instructions were made.</p>	
Keywords	Photomultiplier tube, Calibration, LED

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Taustatietoa käytetyistä osista ja tarvikkeista	1
2.1	Kuvalevy	1
2.2	NTC-vastus	2
2.3	Tasavirtalähde	2
2.4	Fotodiodi	2
3	Valomonistinputki	3
3.1	Yleistä valomonistinputkista	3
3.2	Valomonistinputken rakenne ja toiminta	3
3.3	Valomonistinputken kvanttihyötysuhde ja valoherkkyys	5
3.4	Valomonistinputken pimeävirta	5
3.5	Valomonistinputken kytkentä ulkopuolisiin laitteisiin	6
3.6	Valomonistinputken käyttöalueet	7
4	Valomonistinputkien kalibrointilaite	8
4.1	Valomonistinputkien kalibrointilaitteen toteutuksen aikataulu ja tavoitteet	8
4.2	LED-valonlähteessä käytettävät LEDit sekä valomonistinputkien referenssi-kalibrointi	9
4.3	1. LED-valonlähde ilman takaisinkytkentää	10
4.4	LED-valonlähde takaisinkytkennällä	18
4.5	2. LED-valonlähde ilman takaisinkytkentää	22
4.6	LED-valonlähteillä valomonistinputkille kalibroidut HV-arvot	23
4.7	LED-valonlähteen valinta	25
4.8	Valomonistinputkien kalibrointilaitteen suunnittelu	25
4.8.1	Valomonistinputkien kalibrointilaitteen rakenne	25
4.8.2	Valomonistinputkien kalibrointilaitteen toiminnot	26
4.9	Valomonistinputkien kalibrointilaitteen rakennus	28

4.10	Valomonistinputkien kalibroitilaitteen testaus	30
4.11	Valomonistinputkien kalibroitilaitteen kalibroinnin tarkastus ja uudelleen kalibointi	30
5	Yhteenveto	31
	Lähteet	33
	Liitteet	
	Liite 1. 2. LED-valonlähteen piirikaavio	
	Liite 2. 2. LED-valonlähteen osasijoittelukuva	

Lyhenteet

HV	High Voltage; korkeajännite
LED	Light Emitting Diode; valoa emittoiva diodi
lm	lumen
lux	luksi, lm/m ²
PMT	PhotoMultiplier Tube; valomonistinputki
PWM	Pulse Width Modulation; pulssisuhdemodulaatio
S	valoherkkyys

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tutkitaan kahden eri valmistajan valomonistinputkien kalibrointia LEDien avulla. Lisäksi valmistetaan kalibrointilaitteen testiversio sekä tehdään laitteelle käyttöohjeet tuotannon käyttöä varten.

Valomonistinputket kalibroidaan valmistettavissa laitteissa käyttämällä röntgensäteilyllä valotettuja kuvalevyjä, joita pyyhitään laserilla. Kuvalevystä emittoituva valo toimii tällöin valomonistinputken kalibrointivalona.

Näin suoritettussa kalibroinnissa on kuitenkin paljon muuttujia, jotka vaikuttavat lopputulokseen: kuvalevyn kunto, valmistuserä, säteilytyskaappi, säteilytyksen onnistuminen, sijainti säteilykeilassa sekä miten nopeasti levy on siirretty valotuksen jälkeen, sillä huonevalaistus ja auringon valo tyhjentävät kuvalevyn.

Tämä kalibrointitapa on myös liian hidas teolliseen sarjatuotantoon. Tämän lisäksi jos valomonistinputkessa on jotain vikaa, sen vaihtaminen on tässä vaiheessa tuotteen valmistusta jo työlästä ja aikaa vievää. Tämän takia valomonistinputkien kalibrointi ja testaus on tarkoitus tehdä erillisellä kalibrointilaitteella jo ennen putkien asennusta laitteisiin. Kalibrointi ja testaus voitaisiin tehdä mahdollisesti jo putkien toimittajien toimesta.

2 Taustatietoa käytetyistä osista ja tarvikkeista

2.1 Kuvalevy

Kuvalevyjä käytetään lääketieteellisessä kuvantamisessa. Tässä työssä käsitellään ai-noastaan fosforikuvalevyjä. Fosforikuvalevyn pinnassa oleva fosforiaine virittyy, kun se altistuu röntgensäteilylle. Näin kuvalevyllä muodostuu sähkövarauksista kuva. Kuvalevyä luettaessa lasersäde aktivoi virittyneet elektronit, jolloin ne emittoivat röntgensäteilyn aallonpituutta korkeamman aallonpituuden valoa, jonka intensiteetti on

verrannollinen valotuksessa käytettyyn röntgensäteilyn määrään. Tämä emittoitunut valo luetaan valomonistinputken avulla. Fosforiaineet ovat usein bariumfluorohalideja. [1, s. 1 - 19.]

2.2 NTC-vastus

NTC-vastus on lämpötilaherkkä vastus. Lämpötilan kasvaessa NTC-vastuksen resistanssi laskee. NTC-vastusta voidaan käyttää kuten tavallista vastusta. Vastuksen läpi kulkeva virta lämmittää vastusta, jolloin mittaustulokseen tulee virhe. Tämän takia vastuksen läpi kulkeva virta tulee rajoittaa mahdollisimman pieneksi. NTC-vastukset valmistetaan usein oksidista, joka on puristettu levyksi. Käytettyjä oksideja ovat muun muassa koboltti-, kupari-, nikkeli-, rauta- ja titaanioksidi. [2; 3, s. 2, 3.]

2.3 Tasavirtalähde

Tasavirtalähde pitää virran kuormasta riippumatta vakiona. Tässä työssä käytettiin komparaattorikytkentään perustuvia tasavirtalähteitä. Komparaattori ohjaa transistoria, joka johtaa niin kauan, kunnes kuorman kanssa sarjassa olevan virranmittausvastuksen yli oleva jännite nousee vertailujännitteen tasolle. Kun transistori lakkaa johtamasta, kuormavirta putoaa, jolloin myös virranmittausvastuksen yli oleva jännite putoaa; opeeraatiovahvistin kytkee transistorin takaisin johtavaksi. Vertailujännitettä muuttamalla kuormavirtaa voidaan hallita. [4, s. 849 - 851, 869 - 871.]

2.4 Fotodiodi

Fotodiodit ovat puolijohteesta valmistettuja valoantureita, jotka muodostavat joko P-N-liitoksen yli jännitteen tai P-N-liitoksen läpi virran. Jos fotodiodi on kytketty kuormaan, muodostuu kuorman läpi virta. Jos fotodiodia ei ole kytketty ulkoiseen piiriin, muodostuu sen yli jännite. P-N-liitos on aina herkkä valolle, mutta tavallisissa diodeissa liitos on kotelon sisällä valolta suojassa. Fotodiodissa P-N-liitos on esillä ja usein valo ohjataan linssillä tarkasti rajapintaan. Kun valo osuu P-N-liitokseen, se absorboituu ja irrottaa elektronin valenssivyöltä johtavuusvyöhön, jolloin diodin läpi muodostuu

sähkövirta. Fotodiodin oikosulkuvirta on yleensä lineaarisesti verrannollinen valon kirkkauteen, sekä avoin jännite logaritmisesti verrannollinen. Fotodiodi toimii pimeässä tavallisen diodin tavoin, mutta valon fotonien vaikutuksesta se voi johtaa myös es-tosuuntaisena. Fotodiodeja on saatavilla erikokoisina ja eri käyttötarkoituksiin soveltuvina. [5, s. 4 - 5.]

3 Valomonistinputki

3.1 Yleistä valomonistinputkista

Valomonistinputkia on käytetty jo yli 60 vuoden ajan fotonien havaitsemiseen. Valomonistinputki tarjoaa edelleen muutamia etuja muihin valon havainnointimenetelmiin nähden.

Valomonistinputkien etuja ovat

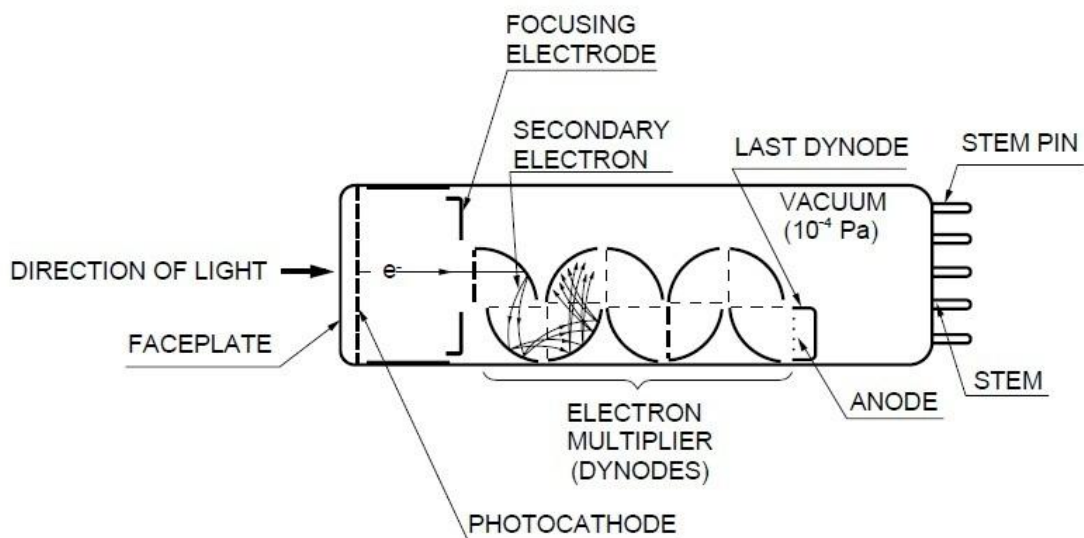
- suuri herkkyys
- suuri vastaanotinpinta-ala
- nopea vasteaika
- korkea vahvistus ja alhainen kohina. [6, s. 2; 7, s. 1.]

3.2 Valomonistinputken rakenne ja toiminta

Valomonistinputki (kuva 1, ks. seur. s.) on tyhjiöputki, jossa on valon sisääntulo ikkuna (*faceplate*), fotokatodi (*photocathode*), ohjauselektrodit (*focusin electrode*), elektronimonistin eli dynodi (*electron multiplier, dynode*) sekä anodi (*anode*), jolle elektronit kerätään. Tässä työssä tutkittavan laite A:n fotokatodin ja anodin välille muodostama jännite-ero on noin 400 - 900 V.

Kun putken fotokatodi altistetaan valolle, valon fotonit osuvat fotokatodille ja valosähköisen ilmiön ansiosta irrottavat siitä elektroneja, joita kutsutaan fotoelektroneiksi. Fotoelektronit ohjataan ohjauselektrodien avulla elektronimonistimelle eli dynodille. Jokainen dynodille saapuva elektroni irrottaa dynodilta useita sekundaarielektroneja, jotka kiihdytetään seuraavalle dynodille, jossa elektronien määrä taas monistuu.

Lopulta elektronit kerätään anodille, josta saadaan ulos signaali, jonka voimakkuus on riippuvainen fotokatodille saapuneesta valosta sekä katodin ja anodin välisestä jännitteestä. Fotokatodin jokaisen dynodin ja anodin välillä on vastukset, jolloin dynodien ja anodin välinen jännite laskee anodia lähestyttäessä. Vastusten lisäksi voi olla myös transistoreja, jolloin kytkentä muuttuu aktiiviseksi. Tällöin parin viimeisen dynodin vastukset on yleensä korvattu aktiivisella kytkennällä. [7, s. 1 - 2; 8, s. 2 - 3; 9, s. 154 - 155.]



Kuva 1. Valomonistinputken sisäinen rakenne [7, s. 1]

Elektronimonistimen ansiosta valomonistinputkella on suuri vahvistus ja alhainen kohina. Vahvistusta voidaan säätää katodin ja anodin välisellä jännitteellä. Dynodeja voi olla 8 - 19 kappaletta. Yleensä valomonistinputken päähän asennetaan linssi, joka suodattaa tarpeettomat aallonpituudet pois, jolloin valomonistinputki on herkkä ainoastaan kyseisessä sovelluksessa tarvittaville aallonpituuksille. Myös valomonistinputkien fotokatodissa käytetty materiaali vaikuttaa valomonistinputken herkkyteen eri

aallonpituuksilla. Fotokatodin havaitsevan alueen koko, muoto sekä sijainti vaihtelevat käyttötarkoituksesta riippuen. Havaitseva alue voi olla joko valomonistinputken päässä tai kyljessä. [7, s. 1 - 2; 8, s. 1 - 2.]

Fotokatodin materiaalina käytetään usein alkalimetalleja. Yleisimmät fotokatodimateriaalit ovat hopea-happi-cesium (Ag-O-Cs), gallium arseeni(-cesium) (GaAs(Cs)), indium-gallium-arseeni(-cesium) (InGaAs(Cs)), antimoni-cesium (Sb-Cs), antimoni-rubidium-cesium (Sb-Rb-Cs), antimoni-kalium-cesium (Sb-K,Cs), natrium-kalium-antimoni (Na-K-Sb), natrium-kalium-antimoni-cesium (Na-K-Sb-Cs), cesium-tellurium (Cs-Te) sekä cesium-jodi (Cs,I). Yleisimmät ikkunamateriaalit ovat borosilikaattilasi, UV:n läpipäästävä lasi, kvartsi, magnesium fluoridi sekä safiiri. [7, s. 3 - 4; 8, s. 2 - 3.]

3.3 Valomonistinputken kvanttihyötysuhde ja valoherkkyys

Valomonistinputken kvanttihyötysuhde kuvaa, kuinka moni fotokatodille saapuva fotoni irrottaa katodilta elektronin. Kvanttihyötysuhde on valolle yleensä alle 30 %, mikä tarkoittaa sitä, että vain vajaa kolmannes fotokatodille saapuvista fotoneista irrottaa elektronin. [7, s. 4; 8, s. 3; 9, s. 37.]

Valoherkkyys, S , taas on tärkein ominaisuus sovelluksissa, joissa havaittava valo on samalla aallonpituusalueella kuin ihmisen silmän herkkyysalue. Valomonistinputken valoherkkyys mitataan polttamalla hehkulamppua, joka valaisee noin 80 % fotokatodista, jonka värielämpötila on 2 856 K sekä ulostuloteho 1 mW. Valoherkkyys ilmoitetaan muodossa $\mu\text{A/lm}$, ja se on tyypillisesti 20 - 400 $\mu\text{A/lm}$. [8, s. 3; 9, s. 38 - 39; 10 s. 19.]

3.4 Valomonistinputken pimeävirta

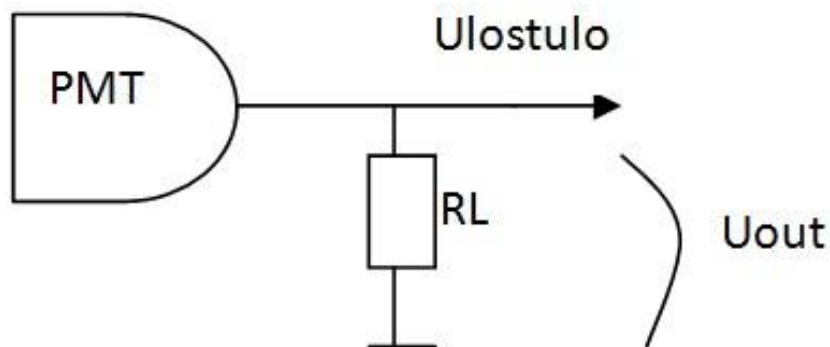
Vaikka valomonistinputkea ei altisteta valolle, sen läpi kulkee siitä huolimatta virtaa. Tätä virtaa kutsutaan pimeävirraksi. Pimeävirran aiheuttajia ovat lämpöliike, vuotovirta anodin ja elektrodien välillä, vuotovirta anodin liitosnastojen välillä, ympäröivät sähkö- ja magneettikentät, kosminen säteily, kaasujen ionisaatio sekä mahdollinen materiaalin radioaktiivisuus. Pimeävirta pyritään aina pitämään mahdollisimman alhaisena, sillä

sen aiheuttama kohina määrää alhaisimman valon havainnointitason. [6, s. 68; 8, s. 12; 9, s. 67 - 71.]

Valomonistinputket altistuvat hetkellisesti huonevalaistukselle kun ne asennetaan kalibrointilaitteeseen sekä tuotantolinjalla valmistettaviin laitteisiin. Valolle altistuminen voi tilapäisesti nostaa valomonistinputken pimeävirtaa. Pimeävirta palautuu normaalille tasolle, kun valomonistinputkea säilytetään pimeässä tilassa tunnista kahteen. Jos valomonistinputki altistetaan auringonvalolle tai todella kirkkaalle valolle, jonka kirkkaus on vähintään 10 000 luksia, valomonistinputki voi vaurioitua pysyvästi. Valomonistinputket säilytetään yleensä pimeässä. [9, s. 68.]

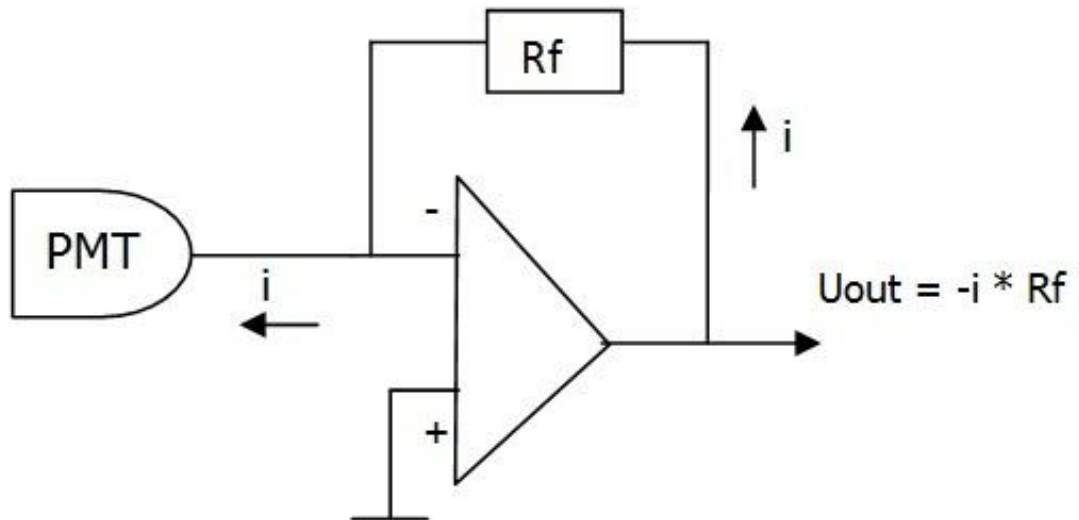
3.5 Valomonistinputken kytkentä ulkopuolisiin laitteisiin

Valomonistinputken ulostulona saadaan virtaa, koska suurin osa mittalaitteista tarvitsee kuitenkin jännitteen, virta täytyy muuttaa ensin jännitteeksi. Virta voidaan muuttaa jännitteeksi vastuksen avulla, jolloin ulostulojännite on vastuksen yli muodostuva jännite (kuva 2).



Kuva 2. PMT:n eli valomonistinputken ulostulovirta muutetaan jännitteeksi vastuksen avulla, jolloin vastuksen yli muodostuva jännite on ulostulojännite. [lähdettä 9, s. 105 – 106 muokailen]

Virta voidaan muuttaa jännitteeksi myös esimerkiksi operaatiovahvistinkytkennän avulla, jolloin ulostulojännite voi vaihdella operaatiovahvistimen positiivisen sekä negatiivisen käyttöjännitteen välillä (kuva 3, ks. seur. s.):



Kuva 3. Valomonistinputken ulostulovirta muutetaan jännitteeksi operaatiovahvistimen avulla [lähdettä 9, s. 107 mukaillen]

Ulostulossa käytetty päätevastus vaikuttaa oleellisesti putken vasteaikaan. Paras vasteaika saavutetaan mahdollisimman pienellä kuormaresistanssilla, joka on yleensä 50 ohmia. [7, s. 13 - 14; 9, s. 105 - 107.]

3.6 Valomonistinputken käyttöalueet

Valomonistinputkilla on useita käyttöalueita, joista yleisimmät ovat

- erilaiset spektrometrit
- lääketieteellinen potilaskuvantaminen
- lääketieteellinen näytteiden kuvantaminen
- fysiikan ja astronomian tutkimus
- teollisuuden mittaukset
- säteilyn havaitseminen.

Valomonistinputket ovat erittäin herkkiä valolle, minkä ansiosta niitä voidaan käyttää sovelluksissa, joissa tarvitsee havaita hyvin heikkoa valoa. Suuri vahvistus ja alhainen kohina ovat valomonistinputken parhaita etuja. [6, s. 2; 9, s. 266 - 303; 11.]

4 Valomonistinputkien kalibrointilaite

4.1 Valomonistinputkien kalibrointilaitteen toteutuksen aikataulu ja tavoitteet

Mittauksille sekä kalibrointilaitteen prototyypin valmistumiselle määriteltiin aikataulu, jonka mukaan mittaukset sekä ensimmäinen testilaitteen prototyyppi ovat valmiita maaliskuun 2013 aikana. Ennen varsinaista työn aloittamista, tutustuttiin käytettävissä olevien valomonistinputkien toimintaan ja ominaisuuksiin datalehtien sekä valomonistinputkia käsittelevien teosten avulla.

Työ tehtiin suomalaisen röntgenlaitteita valmistavan yrityksen tiloissa, jossa oli käytettävissä tietokoneen lisäksi tutkittavat valomonistinputket, vakiovirtalähteen sisältävä putkien kalibroinnin mahdollistava laite A, yleisimmät elektroniikan mittalaitteet, kolvi sekä yleisimpiä elektroniikan komponentteja.

Työssä kehitettiin laite, jolla valomonistinputken testaus ja kalibrointi tapahtuvat puoli-automaattisesti. Tällöin käyttäjän tarvitsee ainoastaan asettaa putki kalibrointilaitteeseen, mahdollisesti valita putken valmistaja sekä kytkeä kalibrointi päälle. Kalibrointilaitte on kalibroitu antamaan aina saman verran sopivan taajuista valoa, jolloin putken kalibroinnin muuttujia ovat ainoastaan putken ominaisuudet.

Kalibrointilaitteeseen asennettiin myös kuvalevyjen lukuun käytetty laser. Valomonistinputkissa käytetty suodatin suodattaa laserin emittoiman valon kokonaan pois, jolloin putki ei reagoi laservaloon lainkaan. Jos putki kuitenkin reagoi laseriin, linssi on joko viallinen tai linssin kiinnitys on puutteellinen, eikä kyseistä valomonistinputkea voida käyttää.

Kalibrointilaitteen pohjana käytettiin aiemmin valomonistinputkien kalibrointiin käytettyä laite A:ta, sillä se osaa ajaa LED-valonlähdettä pienellä virralla tasavirtalähteen avulla. Tämän lisäksi laite A osaa ajaa laseria, sekä lukea valomonistinputken vasteen.

Laite A on myös kytkettävissä tietokoneeseen, minkä kautta sitä voidaan terminaaliohjelman avulla hallita.

4.2 LED-valonlähteessä käytettävät LEDit sekä valomonistinputkien referenssikalibrointi

Valomonistinputkien ja niissä käytettyjen linssien datalehtien avulla selvitettiin, että putket ovat herkkiä 300 nm:n - 450 nm:n valolle. 400 nm:n, 405 nm:n sekä 430 nm:n LEDit löytyivät jo valmiiksi, lisäksi tilattiin 385 nm:n sekä 405 nm:n LEDit, joiden aallonpituusalue on muita 400 nm:n ja 405 nm:n LEDejä laajakaistaisempi. 430 nm:n LEDin aallonpituusalue on muita huomattavasti laajempi, sillä se alkaa jo noin 400 nm:stä ja jatkuu aina 600 nm:iin asti. Datalehtien mukaan, tiukatoleranssiset 400 nm:n sekä 405 nm:n LEDit ovat herkempiä lämpötilanmuutoksille kuin laajakaistaisemmat LEDit. Seuraavassa taulukossa 1 esitetään käytettävissä olevat LEDit, LEDien valmistaja, keskiaallonpituus sekä toleranssi.

Taulukko 1. Käytettävissä olevien LEDien valmistajat, keskiaallonpituus sekä toleranssi

Valmistaja	Keskiaallonpituus	Toleranssi
Bivar	400 nm	+/- 2,5 nm
Bivar	405 nm	+/- 2,5 nm
Kingbright	430 nm	-
VCC	385 nm	+/- 5 nm
VCC	405 nm	+/- 5 nm

Jokainen LED antaa valomonistinputkilla erilaisen vasteen. Molempien valmistajien valomonistinputket voidaan kuitenkin kalibroida samalla kuvalevyllä, josta emittoituu valoa 400 nm:n molemmin puolin. Parhaassa tapauksessa on siis mahdollista löytää yksittäinen LED tai usean LEDin yhdistelmä, joilla molempien putkien kalibrointi onnistuu ilman, että kalibrointilaitetta tarvitsee eri valmistajien putkia kalibroitaessa säätää. [12; 13; 14; 15.]

Valomonistinputkien referenssikalibrointi

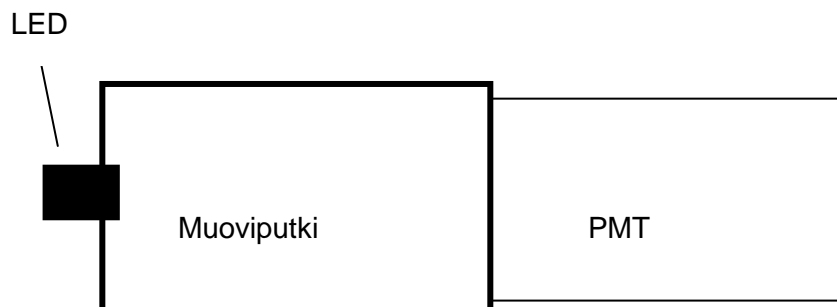
Heti, kun laite A saatiin käyttöön, aloitettiin valomonistinputkien referenssikalibrointi. Jokainen putki kalibroitiin 10 kertaa ja jokaiselle putkelle laskettiin keskimääräinen HV-arvo (taulukko 2). Laite A säätää putkelle HV-arvon, eli korkeajännitteen digitaalisesti. Pienin asetettava digitaalinen HV-arvo on 100, joka vastaa noin -400 V jännitettä. Suurin asetettava digitaalinen arvo on 223, joka vastaa noin -900 V jännitettä. Valmistajan A sekä valmistajan B putkia oli molempia 10 kappaletta. Valmistajan A putket merkittiin numerosta 1 numeroon 10, sekä valmistajan B putket merkittiin kirjaimesta A kirjaimeseen J.

Taulukko 2. Valomonistinputkien referenssikalibroidut HV-arvot

Valmistajan A putki:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kalibroitu HV	182	186	192	168	170	186	165	180	163	205
Valmistajan B putki:	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Kalibroitu HV	188	188	187	195	191	169	177	171	177	182

4.3 1. LED-valonlähde ilman takaisinkytkentää

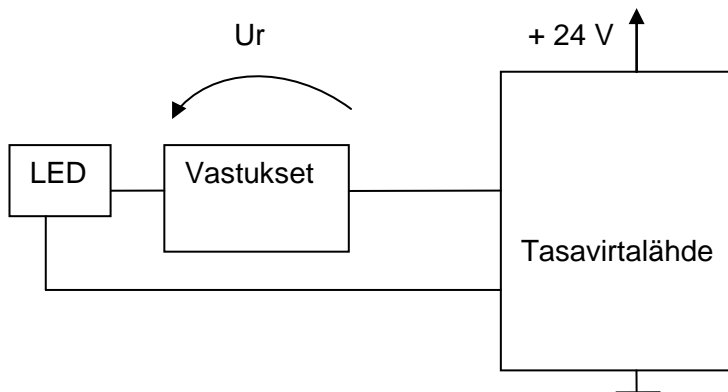
Kun valomonistinputket saatiin referenssikalibroituja, rakennettiin LED-valonlähde ja aloitettiin testaukset. LED-valonlähteen rakenne esitetään kuvassa 4. Valomonistinputki työnnetään osittain muoviputken sisään, jonka toisessa päässä on tiiviste. Tiiviste pitää valomonistinputken paikallaan sekä estää ulkopuolisen valon pääsyn putken sisälle. Muoviputken vastakkaisessa päässä on tutkittava LED.



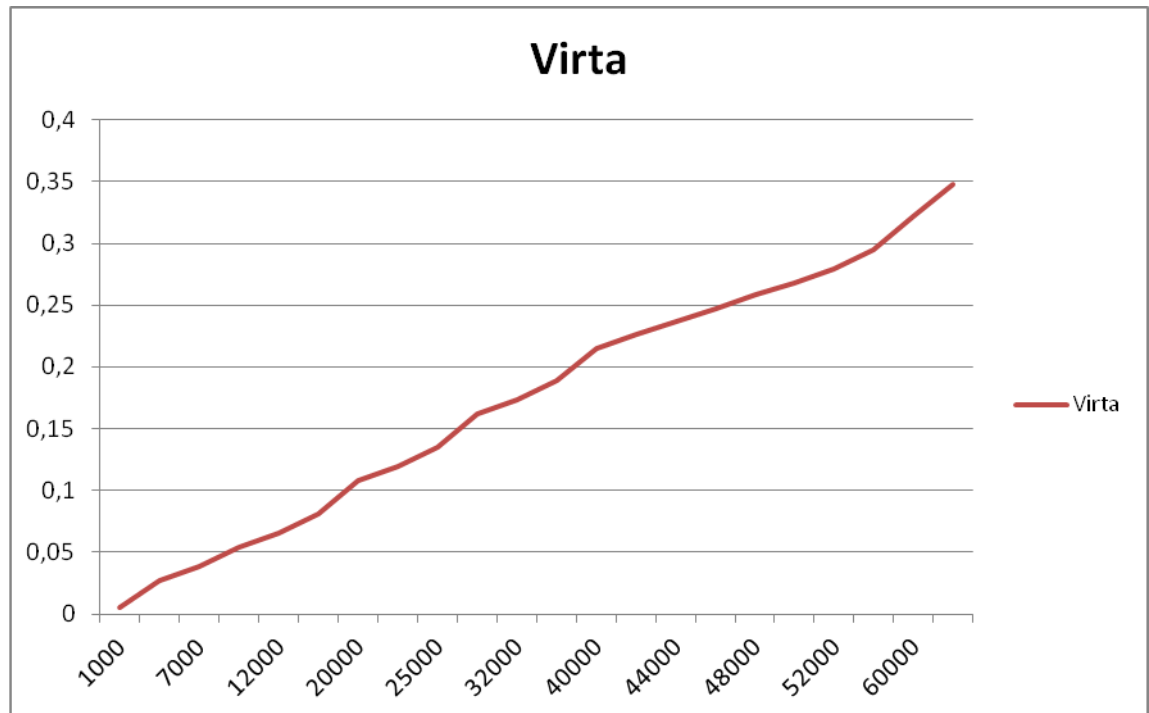
Kuva 4. LED-valonlähteen rakenne, LED osoittaa suoraan valomonistinputkea kohti, joka on osittain muoviputken sisällä ulkopuoliselta valolta suojassa

Laite A:n tasavirtalähde voidaan asettaa säätämään LEDien virta siten, että putkelta tuleva signaali vastaa kalibrointisignaalia, kun putkelle kalibroitu HV-arvo on asetettu. LED-valonlähteen valo vastaa tällöin referenssikalibroinnin valon määrää. Tasavirtalähteen virtaa voidaan säätää myös terminaaliohjelman kautta, jolloin digitaalinen arvo 0 vastaa 0 mA sekä digitaalinen arvo 65 535 maksimivirtaa, joka on muokatulla virtalähdekortilla noin 0,4 mA.

Virta kasvaa tällä välillä kohtuullisen lineaarisesti (kuva 6, ks. seur. s.). Virranmittaus tapahtui virranmittausvastuksen avulla (kuva 5). Virtalähteen sekä valonlähteen väliin asennettiin kolme kappaletta 457 ohmin vastusta rinnakkain. Yksittäisen vastuksen tehonkesto on 0,6 W. Rinnan kytkettyinä teho jakautuu vastuksiin, jolloin ne lämpenevät vähemmän, ja näin resistanssi pysyi vakaana. Rinnan kytkettyjen vastusten mitattu resistanssi on 158 ohmia. Laskennallinen resistanssi olisi muutamia ohmeja pienempi, sillä jokaisen vastuksen resistanssissa on noin 10 %:n toleranssi kumpaankin suuntaan.



Kuva 5. Tasavirtalähteen virranmittaus vastusten avulla.



Kuva 6. Tasavirtalähteen virta suhteessa digitaaliseen virran asetusarvoon, pystyakselilla virta milliampeereina ja vaaka-akselilla virran digitaalinen arvo

Tasavirtalähteessä on NTC-vastukseen perustuva lämpötilakompensointi LEDiä varten. LEDit eivät kuitenkaan sijaitse samalla piirilevyllä tasavirtalähteen kanssa, jolloin lämpötilakompensatio ei toimi oikein. Piirilevy lämpenee käytössä hieman, minkä takia lämpötilakompensointi muuttaa LEDin virtaa. LED ja piirilevy eivät kuitenkaan lämpene yhtäläisesti, joten lämpötilakompensatiosta on vain haittaa.

NTC-vastus kompensoi LEDeistä erillään ollessaankin kotelon sisälämpötilaa, mutta koska tasavirtalähteen kortti lämpenee virtalähteen ollessa kytkettynä, NTC-vastus ei kompensoi myöskään kotelon lämpötilaa oikein. Tämän takia NTC-vastus poistettiin kokonaan, jolloin virta pysyy vakiona, vaikka laite lämpeneekin. Tasavirtalähteessä käytetyssä operaatiovahvistimessa on sisäinen lämpötilakompensatio biasvirtaa sekä yksikkövahvistusta varten.

Valomonistinputkien vaste 1. LED-valonlähteelle ilman takaisinkytkentää

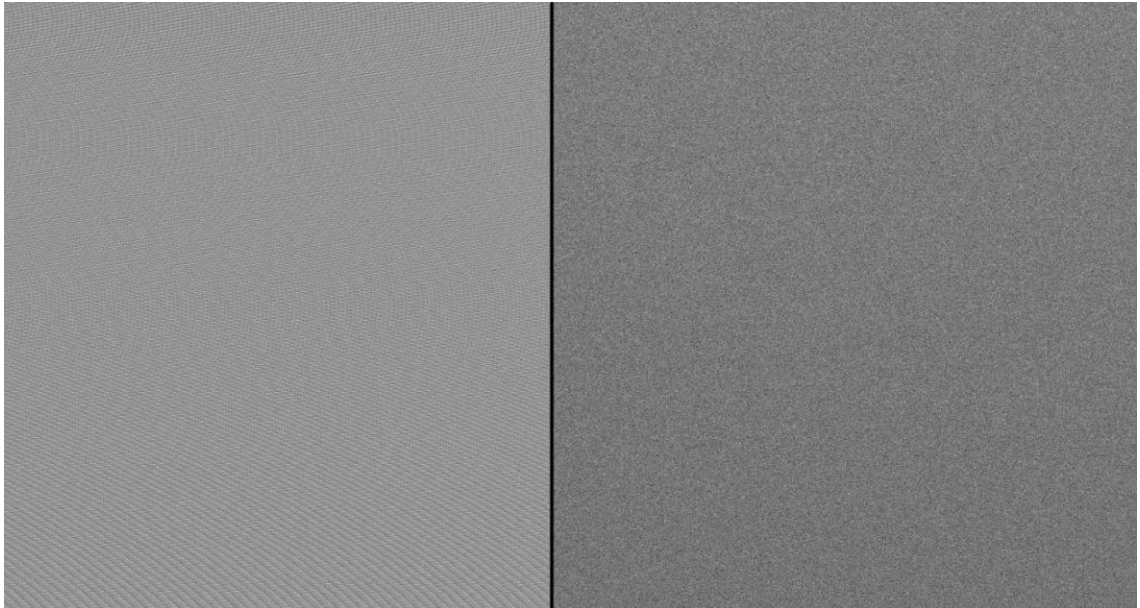
Ensin testattiin 405 nm:n LEDiä, jonka avulla valomonistinputkelta saatiin vaste, mutta LEDin lämmetessä sen kirkkaus muuttuu, jolloin myös valomonistinputken vaste muuttuu. Muut käytössä olevat LEDit eivät alkuperäisellä muokkaamattomalla kokoonpanolla syttyneet. Tämän vuoksi tasavirtalähteen virranmittausvastukset vaihdettiin pienemmiksi sekä muutettiin +5 V:n jännite +24 V:n jännitteeseen, jotta maksimivirta on suurempi. 24 V:n jännite mahdollistaa myös LEDien sarjaan kytkennän, sillä tällöin jännite riittää ylittämään kaikkien LEDien yhteenlasketut kynnysjännitteet. Muokatulla kokoonpanolla kaikki LEDit syttyivät myös sarjaan kytkettyinä ja niiltä saadaan vaste valomonistinputkilla.

LEDejä viilentämällä tai kytkemällä ne hetkeksi pois päältä, muuttuu valomonistinputken vaste. LEDit siis lämpenevät myös pienillä virroilla tarpeeksi, jotta valomonistinputken vaste muuttuu. LEDien datalehtien mukaan LEDien kuuluisi lämmetessään himmetä. Osa LEDeistä kuitenkin kirkastui lämmetessään. Koska LEDejä ajetaan paljon niiden tavanomaista käyttövirtaa pienemmillä virroilla, eivät LEDit käyttäydy aivan odotetusti. Tämän lisäksi datalehtien kuvaajat ovat liian epätarkkoja verrattuna valomonistinputkien suureen herkkyteen. Yleensä 3 mm:n LEDejä ajetaan noin 2 - 20 mA:n virralla. Valomonistinputkien vasteen muutos ei ollut laajakaistaisten LEDien kohdalla yhtä voimakas, kuin kapeakaistaisten LEDien kanssa. [12; 14; 15.]

Kun LEDejä pidetään päällä muutamia minutteja, LEDit saavuttavat vakaan toimintatilan, jolloin valomonistinputken vaste pysyy melko vakaana, sillä LEDien kirkkaus muuttuu hyvin hitaasti. Jos LEDit kytkee hetkeksi pois päältä, muuttuu valomonistinputken vaste, sillä LED jäähtyy.

Tasavirtalähteen vertailujännite on kondensaattoreilla tasattua PWM-signaalia. Kanavatransistorin ulostulo hieman värähtelee, sillä operaatiovahvistin ja kanavatransistori eivät ole äärettömän nopeita. Tämän lisäksi virtalähdekortilta LEDille menevät johdot aiheuttavat kuormaan induktanssia sekä mahdollisesti keräävät ympäristöstä häiriöitä, mikä lisää LEDin virran heilahtelua. Kun LED kytketään päälle, ja PMT:lla otetaan kuva päällä olevasta LEDistä, kuvassa näkyy ympyrämäistä raitaa (kuva 7, ks. seur. s.). Ympyrämäinen raita johtuu ulostulojännitteen heilahteluista ja korjaantuu lisäämällä LEDin

yli kondensaattorin, joka vähentää jännitteen ja virran värähtelyä. Käytetyn kondensaattorin kapasitanssi on noin 47 nF.



Kuva 7. Kuvan vasemmalla puolella on ympyrämäistä raitaa ja oikealla puolella pelkkää kohinaa. Molemmat kuvat ovat käsittelemättömiä.

Myös PWM-signaaliin perustuvan vertailujännitteen sisääntuloon kokeiltiin lisätä kondensaattoreita jo olemassa olevien tasauskondensaattorien lisäksi, mutta sillä ei ollut vaikutusta kuvan laatuun tai putkien vasteeseen. Vertailujännite oli siis jo tarpeeksi tasaista. Tämän takia PWM-signaalin tasauskondensaattoreiden kapasitanssia ei myöhemmin tarvitse lisätä.

Kun kapeakaistaiset 400 nm:n ja 405 nm:n LEDit lämpenivät testatessa, niiden valoteho muuttui voimakkaasti. Kun LEDiä pidettiin päällä useita minuutteja, LED lämpeni kohtuullisen vakaaseen tilaan, tällöin pienikin virran muutos vaikutti voimakkaasti LEDin kirkkauteen ja näin valomonistinputken vasteeseen.

Ensin 400 nm:n kapeakaistainen LED antoi valomonistinputkella kalibrointia vastaavan vasteen virran arvolla 110 μ A, mutta LEDin lämmitessä ja kirkastuessa, sama vaste saatiin virralla 8 μ A. Lämmenneen LEDin virta on yli kymmenen kertaa pienempi kuin kylmän LEDin. Myös 405 nm:n kapeakaistainen LED käyttäytyi samalla tavalla. Näitä LEDejä ei enää tutkita, sillä ne vaativat liian pitkän lämmitysajan, minkä jälkeenkin

niiden kirkkaus muuttuu liian voimakkaasti pienenkin virran muutoksen seurauksena, eikä kalibrointia voida pitää luotettavana.

Myös valomonistinputken lämmitystä kokeiltiin, sillä valomonistinputken valmistajan dokumentaatiossa oli maininta, että putkia tulisi lämmittää puolesta tunnista tuntiin ennen varsinaista käyttöä, jotta putken toiminta on mahdollisimman vakaa. Lämmittäminen tapahtuu kytkemällä putkeen aiemmin kalibroitaessa saatu korkeajännite. Tällä ei kuitenkaan ollut huomattavaa vaikutusta putken herkkyyteen. Putket ovat myös kalibroitaessa käytännössä aina kylmiä, joten asiaan ei tarvitse kiinnittää enempää huomiota. [9, s. 64.]

430 nm:n laajakaistaisen sinisen LEDin kirkkaus ei juuri muuttunut lämmitessä. Eri valmistajien valomonistinputket antoivat myös tällä LEDillä erilaiset vasteet. Vasteiden ero oli suurempi kuin kapeakaistaisilla 400 nm:n sekä 405 nm:n LEDeillä. Myös saman valmistajan putkien välillä oli tällä LEDillä aiempia LEDejä suurempia eroja.

385 nm:n sekä 405 nm:n laajakaistaiset LEDit tuntuivat toimivan parhaiten. Saman valmistajan putkien välillä oli aiempia LEDejä pienempiä eroja, eikä LEDien kirkkaus myöskään muuttunut liikaa LEDien lämmitessä. Lämmitysaika on siis kohtuullisen lyhyt.

Myös sarjaan kytkettyjä laajakaistaisia LEDejä kokeiltiin, mutta tästä ei ollut yksittäiseen laajakaistaiseen LEDiin nähden hyötyä. Mittaustulokset vaihtelivat myös tässä kokoonpanossa putken valmistajien sekä saman valmistajan putkien välillä. Ensin kokeiltiin 405 nm:n sekä 385 nm:n laajakaistaista LEDiä sarjassa. Koska 405 nm:n LEDin tarvitsema virta on noin puolet 385 nm:n laajakaistaisen LEDin virrasta, LEDit eivät pala sarjaan kytkettyinä yhtä kirkkaasti. Tämän takia reikälevylle juotettiin kaksi 405 nm:n LEDiä rinnakkain sekä näiden kanssa sarjaan 385 nm:n LED, jotta valoteho molemmilla aallonpituuksilla olisi tasaisempi. Vaste oli erilainen kuin aiemmillä valonlähteillä, mutta käytännön hyötyä ei tästä kuitenkaan ollut, sillä eri valmistajien putket antoivat edelleen erilaisen vasteen.

Taulukossa 3 (ks. seur. s.) esitetään muutamia eri LEDien kalibrointia vastaavia digitaalisia virta-arvoja. Tarvittaviin virta-arvoihin vaikuttaa huomattavasti

tasavirtalähdekortissa käytettyjen virranmittausvastusten toleranssit sekä käytetty LED. Myös lämpötila vaikuttaa virran suuruuteen ja tarpeeseen.

Taulukko 3. Eri valonlähteiden digitaalisia virta-arvoja jotka vastaavat kalibroinnin valon määrää muutamalle eri PMT:lle. Ensin ilmoitettu lukema on LEDin aallonpituus, lukeman perässä oleva L kirjain kertoo, että kyseessä on laajakaistainen LED

Valmistaja A	Putki 1	Putki 3	Putki 7
430 nm	44 896	45 690	44 400
385L nm	12 714	12 984	12 746
405L nm	5 213	5 327	5 182
405L + 385L	5 009	5 131	4 991
2 x 405L + 385L	5 170	5 235	5 180
Valmistaja B	Putki H	Putki I	Putki J
430 nm	36 480	36 099	37 098
385L nm	11 748	11 470	11 861
405L nm	4 384	4 336	4 495
405L + 385L	4 243	4 194	4 327
2 x 405L + 385L	4 310	4 340	4 410

Parhaaksi LEDiksi valonlähdettä varten osoittautui 385 nm:n laajakaistainen LED, sillä se ei ole liian herkkä pienille virranmuutoksille. Tämä LED ei myöskään muuta kirkkautaan liikaa lämmitessään, eikä lämmitys aika ole liian pitkä. Ei ole myöskään järkevää käyttää useaa LEDiä, jos yhdellä LEDillä saadaan valomonistinputket kalibroituja yhtä hyvin. Valonlähteestä kannattaa tehdä mahdollisimman yksinkertainen, jotta vikatilanteessa ongelman selvittäminen olisi helppoa ja nopeaa. Myös valmistus ja ylläpitokustannukset pysyvät näin mahdollisimman alhaisina.

LEDille löydettiin kaksi virta-arvoa, joilla kaikki valomonistinputket voitiin kalibroida riittävän tarkasti, valmistajan A valomonistinputkille toinen ja valmistajan B valomonistinputkille toinen virta-arvo. Laite A osaa hakea sopivan virran LED:ille niin, että valomonistinputken vaste on sama kuin kalibroimisessa käytetyn kuvalevyn pinnasta emittoitunut valo. Näitä virta-arvoja voi muuttaa jonkin verran ilman, että kalibroitava HV-arvo muuttuu. Käytännössä automaattisesti haettua arvoa pitää hieman säätää, jotta kaikki putket saadaan kalibroituja tarpeeksi luotettavasti, sillä eri putket antavat samalla LEDillä hieman erilaisen vasteen verrattuna kuvalevystä emittoituneeseen valoon.

Kun 385 nm:n laajakaistainen LED kytkettiin päälle usean päivän ajaksi, muuttui sen kirkkaus ja näin valomonistinputken vaste hieman. Kirkkauden muutokset johtuvat

lämpötilanvaikutuksesta LEDiin sekä tasavirtalähteeseen, mutta LEDin ominaisuudet myös muuttuvat ajan kanssa, kun sitä käytetään.

LEDien vanhennus

Kun 385nm:n laajakaistaista LEDiä tutkittiin tarkemmin, huomattiin, että se välillä himmenemisen sijaan kirkastui ollessaan päällä useita tunteja, kun sitä ajettiin pienellä tasavirralla. Vaikka LEDin antoi jäähtyä, se pysyi kirkkaampana kuin ennen käyttöä.

Tämän takia LEDiä ajettiin LEDin normaalilla käyttövirralla, joka on noin 15 mA, jotta nähtiin, saavuttaako LED stabiilin toiminnan tietyn ajanjakson jälkeen. Tätä prosessia kutsutaan vanhennukseksi. Vanhennuksen ideana on saada tuote asettumaan vakaaseen tilaan käyttämällä tuotetta tietyn ajan. [16; 17, s. 1.]

Noin vuorokauden ajon jälkeen, 385nm:n LED oli odotusten mukaisesti hieman himmentynyt. LEDin himmentyminen vaikutti huomattavasti käytettävään kalibrointivirtaan. Vaikka LEDiä tämän jälkeen ajettiin pienellä virralla useita päiviä, sen kirkkaudessa ei enää tapahtunut suurta muutosta, vaikka LED hieman himmeni tai kirkastui seurantajakson aikana. LED on nyt tarpeeksi vakaa käytettäväksi kalibroinnissa. Kalibrointilaitteen tarkkuus tarkistetaan säännöllisesti.

Yhteenveto 1. LED-valonlähteestä ilman takaisinkytkentää

1. LED-valonlähteessä ilman takaisinkytkentää käytetään 385 nm:n laajakaistaista LEDiä. Koska LEDin kirkkaus muuttuu sen lämmetessä, sitä täytyy ensin ajaa vähän aikaa kalibrointiin käytettävällä virralla, jotta sen lämpötila ja näin myös kirkkaus asetuvat mahdollisimman vakaisiksi. Tämä lämmitys on asetettava osaksi kalibrointilaitteen automaattista toimintaa käytettäessä pienivirtaista tasavirtalähdettä.

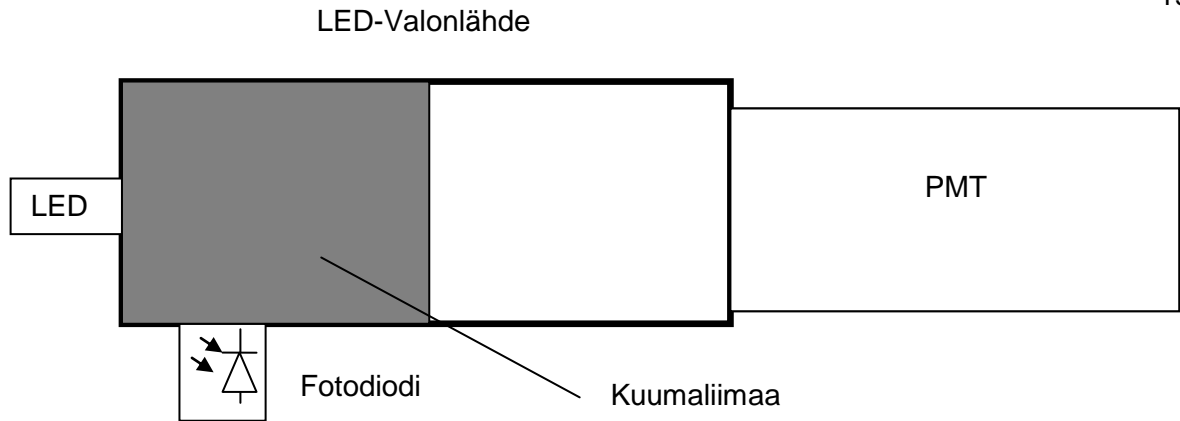
Jotta laitetta ei tarvitsisi kalibroida kovin usein, kokeillaan LED-valonlähteeseen asentaa fotodiodiin perustuva takaisinkytkentä. LED-valonlähteessä, jossa on fotodiodin avulla toteutettu takaisinkytkentä, vanhennusta ei tarvitse tehdä, sillä valonlähde säätää kirkkauden automaattisesti fotodiodin avulla.

4.4 LED-valonlähde takaisinkytkennällä

Jotta LEDin kirkkaus pysyisi mahdollisimman vakaana, on syytä tutkia, saadaanko fotodiodin avulla rakennettua riittävän tarkka ja luotettava takaisinkytkentä kalibroitua varten. Luotettavan takaisinkytkennän avulla kalibroituvuutta voidaan pidentää.

Koska fotodiodi ei ole yhtä herkkä kuin valomonistinputki, fotodiodi täytyy asettaa lähelle LEDiä, ja LEDiä tulee käyttää tarpeeksi suurella virralla, jotta sen kirkkaus riittää saattamaan fotodiodi käyttöalueelle. Tällöin LED on kuitenkin liian kirkas valomonistinputkea varten. Ratkaisu on asettaa LEDin sekä valomonistinputken väliin jotain valoa vaimentavaa materiaalia. Täksi materiaaliksi sopii esimerkiksi läpikuultava valkoinen kuumaliima. Kuumaliima vaimentaa valoa, mutta ei estä sen kulkua kokonaan. Kuumaliimaa on helppo valaa oikea määrä, jotta vaimennus saadaan juuri sopivaksi. Tämän lisäksi valo leviää tasaisesti kuumaliimaan, eikä valo ole enää pistemäinen. Tämän ansiosta valomonistinputken asennolla ei ole kalibroinnissa merkitystä. Fotodiodina käytettiin Vishayn valmistamaa BPW20RF-fotodiodia. Tämä fotodiodi on herkkä myös UV-valolle. [18.]

Valonlähteelle suunniteltiin ja rakennettiin kytkentä, jossa fotodiodi on kytketty komparaattoriin, joka vertailee fotodiodin jännitettä tarkkuuspotentiometrillä säädettyyn vertailujännitteeseen. Fotodiodilla varustetun takaisinkytkennän takia koko valonlähde täytyi rakentaa uudestaan. LED upotettiin kuumaliimaan, ja tämän viereen asennettiin fotodiodi kohtisuorasti kuumaliimaa kohti (kuva 8, ks. seur. s.). Koska Fotodiodi ei osoita suoraan LEDiin, vaan kuumaliiman kautta heijastuneeseen valoon, fotodiodi ei saturoidu, vaikka LEDiä ajettaisi täydellä teholla. Kuumaliimaa on tarpeeksi paljon, jotta valonvoimakkuus on saatu laskettua valomonistinputkelle sopivaksi. Valonlähdettä varten hankittiin Bivarin valmistama 405 nm:n LED, jonka valoteho on aiempia LEDejä suurempi, jotta valonvaimennuksesta huolimatta LEDin kirkkaus varmasti riittää, vaikka LED käytön aikana jonkin verran himmenisikin. [19.]

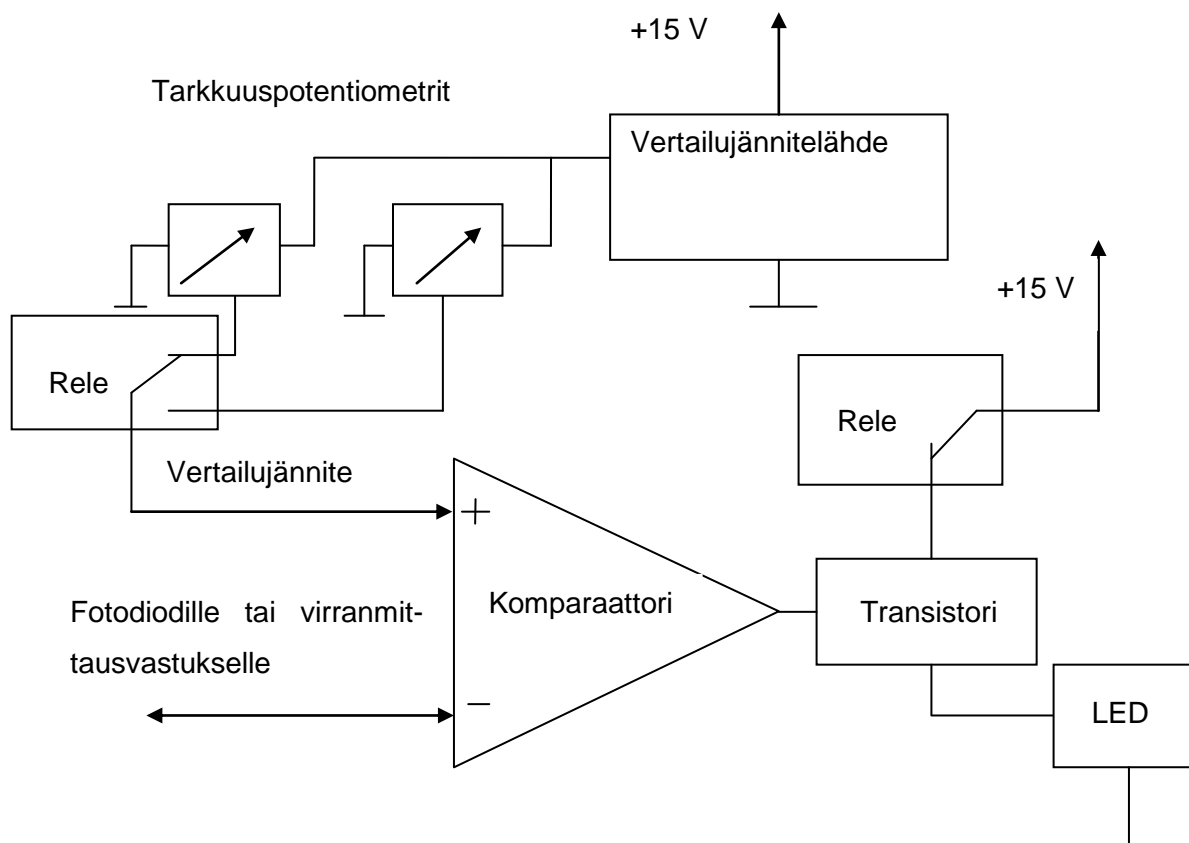


Kuva 8. LED valonlähteen rakenne, fotodiodin ja valomonistinputken välissä on kuumaliimaa, fotodiodi on LEDin suhteen kohtisuorassa kuumaliimaa kohden

Koska LEDiä ajetaan nyt sen normaalilla käyttövirralla, eli noin 10 mA:lla, laite A ei pysty sitä enää suoraan ohjaamaan. Valonlähteelle rakennettiin erillinen jännitelähde (kuva 9, ks. seur. s.), jossa fotodiodin yli oleva jännite ohjataan komparaattoriin, joka vertaa tätä jännitettä vertailujännitteeseen. Fotodiodin jännite oli valonlähteen ollessa päällä noin 350 mV. Vertailujännitteet luodaan tarkkuuspottiometriavulla. Tarkkuuspottiometriavun toinen nasta on liitetty tarkkuusjännitelähteeseen ja toinen maatasoon. Tarkkuuspottiometriavun ulostulojännite ohjataan releeseen, jolla voidaan valita käytettävä tarkkuuspottiometri valomonistinputken valmistajan mukaan. Tämä jännite ohjataan komparaattoriin vertailujännitteeksi. Komparaattori ohjaa transistoria, jonka kautta LED on kytketty käyttöjännitteeseen.

Valonlähdetä varten tarvitaan vain yksi komparaattori piirin neljästä komparaattorista. Käyttämättömät komparaattoriyksiköt on kytkettävä pois käytöstä, jotta ne eivät värähtele käyttöjännitteen heilahtelujen tai ulkoisten häiriöiden takia aiheuttaen toimintahäiriöitä myös käytössä olevaan komparaattoriyksikköön. Tämä tapahtuu kytkemällä komparaattorin ei-invertoiva sisääntulo vastuksilla toteutetun jännitteenjaon avulla käyttöjännitteen ja maatasoon väliin sekä kytkemällä ulostulo invertoivaan sisääntuloon. [20, s. 8.]

Valonlähde säädetään tarkkuuspottiometriavulla säätämällä. Molempia valomonistinputken valmistajia varten on yksi pottiometri. Käytössä oleva pottiometri valitaan releellä, jota ohjataan laite A:lta saatavalla signaalilla. Komparaattori kytkennälle jyrkettiin ensimmäinen testipiirilevy Metropolia Ammattikorkeakoulun Albertinkadun LPKF-piirilevyjyrsimellä.



Kuva 9. Fotodiodilla kompensoidun jännitelähteen yksinkertaistettu kytkentäkaavio

Kun tätä kokoonpanoa käytettiin vanhentamattomalla LEDillä, LEDin yli oleva jännite kasvoi viikon testijakson aikana, sillä laitteisto kompensoi LEDin himmenemistä lisäämällä LEDin jännitettä ja näin myös virtaa, jotta LEDin kirkkaus pysyy vakiona.

Takaisinkytkennän ansiosta LEDiä ei tarvitse pitää päällä muulloin kuin kalibroinnin aikana. Valonlähteen piirilevyä päivitettiin niin, että siinä on myös valonlähteen päällepois kytkemisen mahdollistava rele. Koska laite A:lta saatavat ohjaussignaalit ovat jännitetasoltaan 3,3 V, mutta releen käyttöjännite on 24 V, releitä täytyy ohjata transistorien avulla. Transistorin ohjaukseen riittää mainiosti 3,3 V, sillä transistori tulee johtavaksi jo, kun kannan ja emitterin välillä on noin 0,7 V:n jännite-ero.

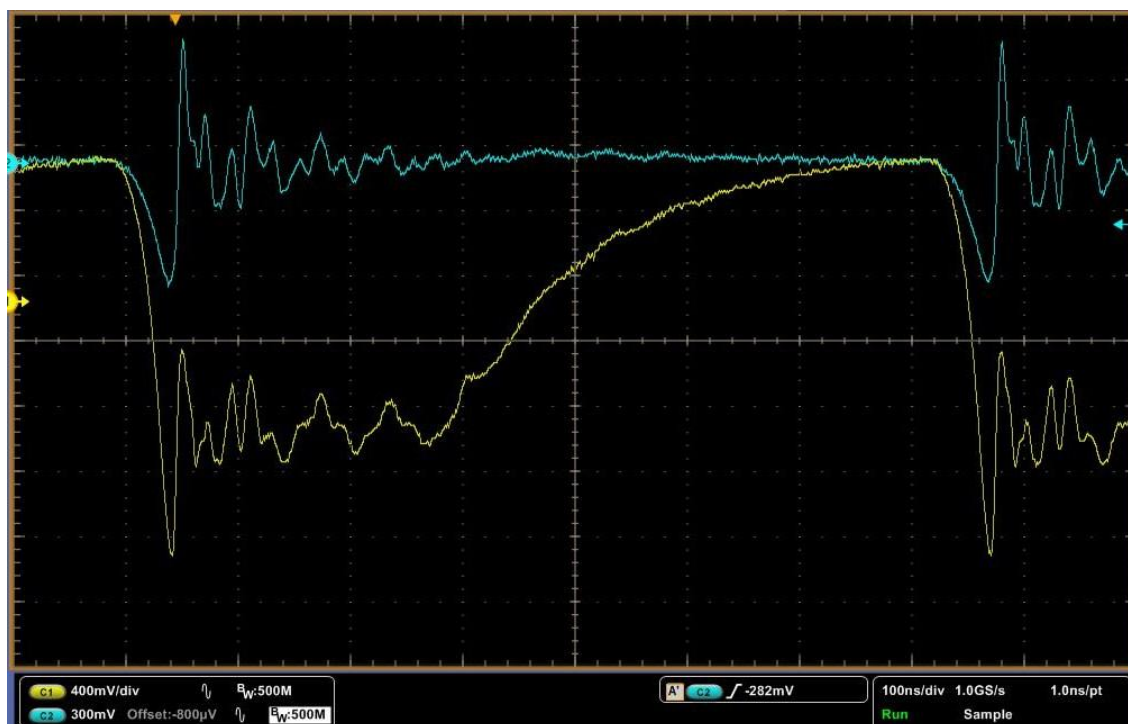
Valonlähteen päivitettyssä piirilevyssä on myös releiden ohjaustransistorit sekä transistorien suoja diodit valmiina.

Releitä ohjaaville transistoreille on aina asennettava suojadiodit, sillä muuten releen kytkinkelan induktanssi aiheuttaa transistorille suuren jännitepiikin aina, kun rele vapautetaan. Aina, kun kelasta katkaistaan virta, sen sisäinen magneettikenttä vastustaa

tätä virranmuutosta nostamalla jännitettä. Tämä jännite rikkoo transistorit. Suojadiodi asennetaan aina estosuuntaisesti käyttöjännitteeseen nähden, sillä muuten diodi oikosulkisi piirin.

Valomonistinputkien vaste takaisinkytketylle LED-valonlähteelle

Valomonistinputkilta saadaan vaste LED-valonlähteen vertailujännitteen arvon mukaan. Aluksi kuvassa esiintyi huomattavaa raitaa, sekä kalibroitu HV-arvo vaihteli, kun samaa putkea kalibroitiin monta kertaa. Tämä johtui LEDin jännitteen heilahtelusta. Komparaattorin laskiessa LEDin jännitettä fotodiodin jännite seurasi tätä pienellä viiveellä (kuva 10). Tämän lisäksi fotodiodin jännitteessä esiintyi värähtelyä, joka näkyi myös komparaattori ulostulossa. Värähtely johtui todennäköisesti osittain mittausjärjestelyistä. Noin 250ns kuluttua värähtelyn alkamisesta LEDin jännite alkoi nousta aiemmalle tasolle. Komparaattorin vasteaika on noin $1,3\mu\text{s}$. Komparaattori ei siis ole tarpeeksi nopea, jotta LEDin jännite ei heilahtelisi. LEDin jännitteen heilahtelu on noin 1,5 V.



Kuva 10. Kuvassa jännite on pystyakselilla ja aika vaaka-akselilla. Keltainen viiva on LEDin jännite ja sininen viiva fotodiodin jännite.

Ongelma korjaantui lisäämällä LEDin positiivisen liitosnastan sekä maatasen väliin suuri kondensaattori, näin LEDin jännite laskee hitaammin, jolloin jännitteen heilahtelu on huomattavasti alhaisempaa, eikä kuvaan enää synny raitaa. Myöskään fotodiodi ei

enää värähtelee yhtä rajusti, sillä LEDin kirkkauden muutos on hitaampi. Komparaattori kytkennän takia LEDin jännitteessä esiintyy käytännössä aina hieman värähtelyä.

LED-valonlähdettä testatessa LEDin yli oleva jännite hieman kasvoi, sillä kytkentä kompensoi LEDin himmenemistä. Jännitteen kasvu ei kuitenkaan ollut riittävä ja laite kalibroikin valomonistinputket pari HV-arvoa aiempaa suurempaan arvoon. Testaus tapahtui NE555-ajastinpiiriin perustuvalla kytkennällä, joka kytki LED-valonlähteen päälle ja pois minuutin välein jäljitellen valomonistinputkien kalibrointilaitteen käyttöä.

Kun LED-valonlähde sekä piirilevy olivat suljetun kotelon sisällä, piirilevy sekä fotodiodi lämpenivät. Tällöin valomonistinputkien vaste muuttui. Etenkin fotodiodin lämpeneminen vaikutti vasteeseen.

Fotodiodin herkkyys ja vakaus sekä komparaattorin herkkyys eivät kuitenkaan valonvaimennuksesta huolimatta riitä, jotta niiden avulla pystyisi säätämään LEDin kirkkautta tarpeeksi luotettavasti. Tämän lisäksi fotodiodin sekä LEDin lämpeneminen vaikuttavat kirkkauteen. Pelkästään tässä työssä käytettyjen fotodiodin sekä komparaattorin avulla ei saada rakennettua tarpeeksi luotettavaa kompensatiota.

4.5 2. LED-valonlähde ilman takaisinkytkentää

Koska fotodiodin avulla toteutettu takaisinkytkentä ei ollut tarpeeksi luotettava, toteutetaan kalibrointilaitte tasavirtalähteen avulla ilman takaisinkytkentää. Koska fotodiodin kanssa oli LEDiä kuitenkin ajettu sen tavanomaisella käyttövirralla, sen jälkeen on laitettu kuumaliimaa vaimentamaan valoa. Tätä voidaan käyttää hyväksi myös tasavirtalähteellä ajetussa valonlähteessä, sillä nyt LEDiä voidaan ajaa suuremmalla virralla, kuin aiemmalla tasavirtalähteellä, ja näin LED käyttäytyy datalehtien mukaisesti.

Myöskään LEDin lämmitystä ennen kalibrointia ei enää tarvita, sillä valomonistinputken vaste ei juuri muutu, vaikka LED käytössä jonkin verran lämpeneekin. Kalibrointi voidaan suorittaa yhtä nopeasti, kuin fotodiodilla kompensoidulla valonlähteelläkin. Tasavirtalähteelle suunniteltiin ja toteutettiin uusi kytkentä, jossa komparaattori ohjaa transistoria vertailujännitteen sekä virranmittausvastuksen yli olevan jännitteen mukaan. Kytkentä on perustoiminnaltaan samanlainen kuin takaisinkytketyn valonlähteen

kytkentäkin (kuva 9, ks. s. 20), mutta fotodiodin yli olevan jännitteen sijaan käytetään virranmittausvastuksen yli olevaa jännitettä. Tasavirtalähteelle tehtiin uusi kytkentäkaavio (liite 1) sekä osasijoittelu (liite 2) piirilevyn valmistusta varten.

Virranmittausvastuksena on 10 vastusta rinnan kytkettyinä, jolloin resistanssi pysyy paremmin vakiona lämpötilan muuttuessa. Vastukset myös lämpenevät yksittäistä vastusta vähemmän, sillä teho jakautuu niihin tasaisesti. Virranmittausvastuksen yli olevan jännitteen on oltava tarpeeksi suuri, sillä komparaattori toimii kunnollisesti vasta yli 10mV:n sisääntulojännitteellä, vaikka datalehden mukaan bias-jännite on vain muutamia millivolteja. [21.]

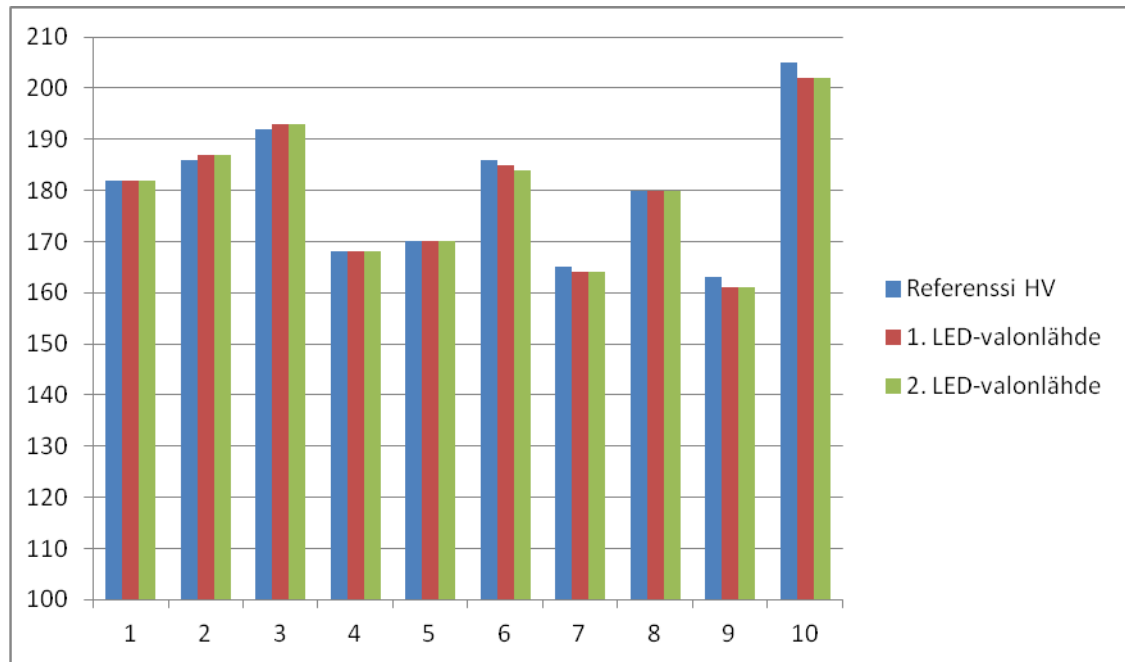
Valomonistinputkien vaste 2. LED-valonlähteelle ilman takaisinkytkentää

Valomonistinputkilta saatiin samanlainen vaste kuin takaisinkytketyllä LED-valonlähteelläkin, sillä itse valonlähde on samanlainen. Vain valonlähteen ohjauselektronikka on erilainen.

Tämä valonlähde on suunnilleen yhtä vakaa kuin ensimmäinen LED-valonlähdekin ilman takaisinkytkentää. Tämä valonlähde on kuitenkin aiempaa käyttökelpoisempi, sillä nyt LEDien käyttäytymistä voidaan ennustaa paremmin datalehtien avulla, mutta kalibrointi on myös yhtä nopeaa kuin takaisinkytketyllä valonlähteellä, sillä LEDin kirkkaus ei juuri muutu laitteen lämmitessä. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että LEDiä ajetaan sen tavanomaisella virralla. Myös tätä valonlähdettä testattiin NE555-ajastinpiiriin perustuvalla kytkennällä (s. 22). Valonlähteellä ajettiin noin 500 sykliä, jolloin laite oli kokonaan lämmennyt. Tällöin valomonistinputkelle kalibroitu HV-arvo oli muuttunut 1 - 2 yksikköä.

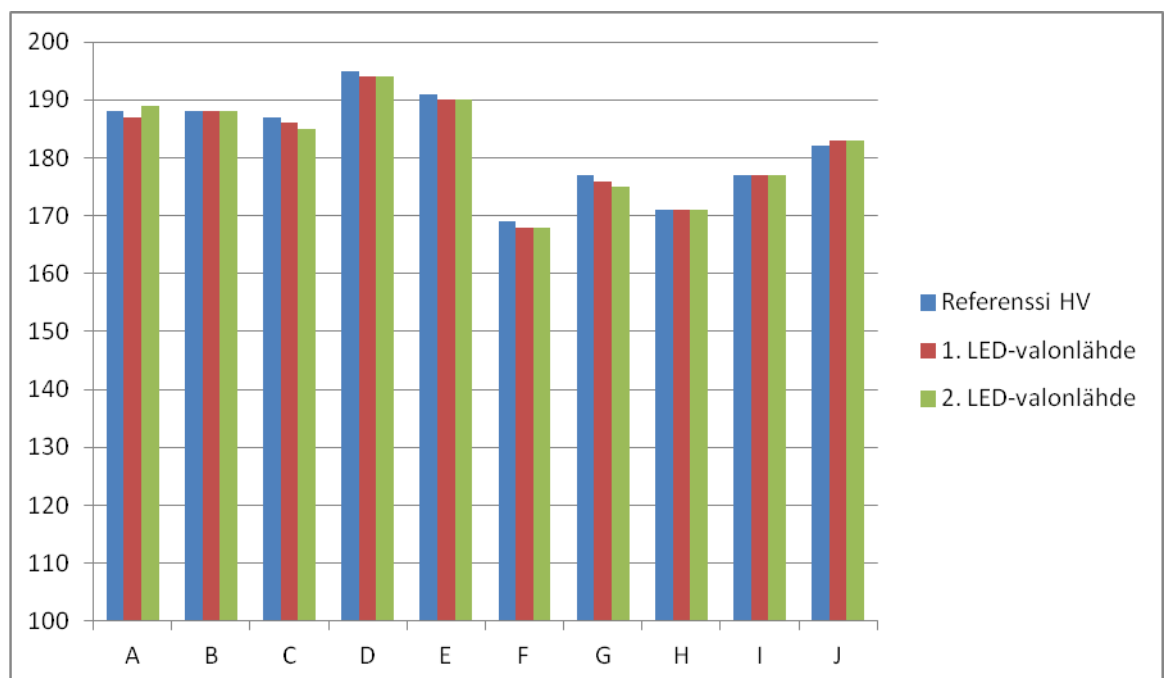
4.6 LED-valonlähteillä valomonistinputkille kalibroidut HV-arvot

Kuvassa 11 (ks. seur. s.) esitetään valmistajan A valomonistinputkille referenssi, 1. LED-valonlähteellä sekä 2. LED-valonlähteellä kalibroidut HV-arvot. Kuvassa 12 (ks. seur. s) on valmistajan B valomonistinputkien vastaavat arvot.



Kuva 11. Valmistajan A valomonistinputkien kalibroituja HV-arvoja

Valomonistinputkien HV-arvojen välillä on jonkin verran hajontaa. 1. sekä 2. LED-valonlähde kalibroivat suurimman osan putkista hyvin lähelle tai samaan HV-arvoon kuin referenssikalibrointi. Osa LEDillä kalibroiduista HV-arvoista on suurempia ja osa taas pienempiä kuin referenssikalibroitu HV.



Kuva 12. Valmistajan B valomonistinputkien kalibroituja HV-arvoja

Valmistajan B valomonistinputkien hajonta oli valmistaja A:han verrattuna hieman pienempi. Valmistajan B valomonistinputket kalibroituivat LEDeillä yhtä hyvin kuin Valmistajan A putketkin.

4.7 LED-valonlähteen valinta

Parhaaksi LED-valonlähteeksi osoittautui 2. versio LED-valonlähteestä ilman takaisinkytkentää. Valonlähde pysyy tarpeeksi vakaana, jotta kalibrointia voidaan pitää luotettavana, mutta LEDiä ei tarvitse lämmittää ennen käyttöä, jolloin kalibrointi on yhtä nopea kuin fotodiodin avulla takaisinkytketyllä valonlähteellä. Tämän lisäksi valonlähteessä oleva vaimentava kuumaliima myös levittää LEDin valon suuremmalle alueelle tasaisesti, jolloin valomonistinputken asennolla ei ole kalibroinnin kannalta merkitystä. Ensimmäisessä valonlähteessä LED osoitti suoraan valomonistinputkea kohti, jolloin valomonistinputken liikkuminen sekä asento vaikuttivat vasteeseen.

4.8 Valomonistinputkien kalibrointilaitteen suunnittelu

4.8.1 Valomonistinputkien kalibrointilaitteen rakenne

Kalibrointilaitteen pohjana käytetään laite A:n emolevyä, johon LED-valonlähde piirikortteineen sekä laser voidaan kytkeä. Laitteelle asennetaan kalibrointiin sopiva laiteohjelmisto eli *firmware*. Laiteohjelmiston ohjelmoi yrityksen sulautettujenjärjestelmien ohjelmoija.

Laitteen sisällä olevassa valonlähteessä on kiinni myös punainen laser. Valonlähteessä on virtaliittimet LEDiä sekä releitten ohjaussignaaleja varten. Laser kytketään suoraan laitteen A emokorttiin. Putkessa, johon valomonistinputki työnnetään kalibroinnin ajaksi, on turvakytin, joka kytkee laserin käyttövalmiiksi ainoastaan silloin, kun valomonistinputki on paikallaan.

Laitteen etupaneelissa on liittimet valomonistinputken korkeajännite- sekä signaalijohtoja varten. Korkeajänniteliihtintä varten täytyy laitteeseen asentaa myös suoja, joka estää korkeajännitteisten osien koskemisen, kun kalibrointi on käynnissä.

Korkeajänniteliittimen suojassa on myös kaksi turvakytkintä kytkettynä sarjaan. Molempien turvakytkinten on oltava painettuna, jotta laitetta voi käyttää. Turvakytkimet on sijoitettu kotelon sisään, jolloin niitä ei voi painaa vahingossa. Etupaneelissa on reikä, josta valomonistinputki voidaan asettaa paikoilleen kalibroitaavaksi.

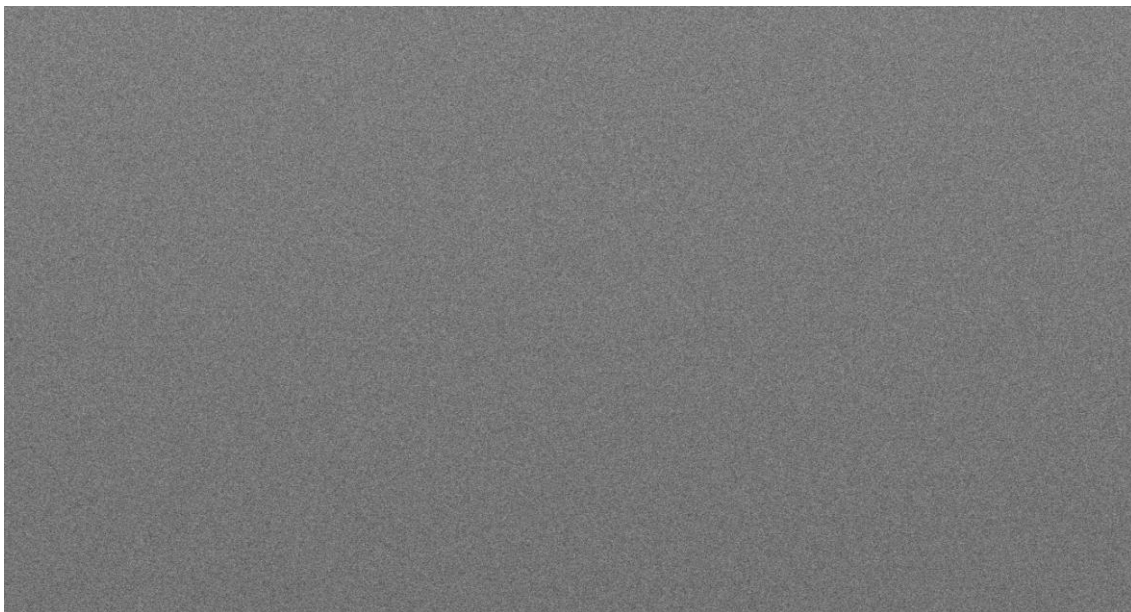
Valomonistinputken kiinnitykseksi riittää putkiliitos, jossa on kuminen tiiviste. Tämä tiiviste estää valon pääsyn putkeen sekä pitää valomonistinputken paikallaan. Valomonistinputki pääsee hieman liikkumaan putkiliitoksessa. Vaikka valomonistinputkea heiluttaa se ei vaikuta kalibroituun HV-arvoon, mutta kuvassa voi näkyä tällöin pientä raitaa. Koska laitteessa ei ole kalibroinnin aikana mitään liikkuvia osia, valomonistinputki pysyy kalibroitaessa paikallaan ilman erillistä kiinnitystä.

4.8.2 Valomonistinputkien kalibroitilaiteen toiminnot

Kun laite on kytkettynä tietokoneeseen, voidaan sekä laite että terminaaliohjelma käynnistää. Tämän jälkeen laite kysyy, haluaako käyttäjä kalibroida valmistajan A vai B valomonistinputken. Valomonistinputki valitaan painamalla joko A- tai B-näppäintä terminaaliohjelmassa. Asetus-tilaan päästään kirjoittamalla *setup*. Kun valomonistinputken valinta on suoritettu, laite jää odottamaan *calibrate*-napin painallusta. *Calibrate*-nappi on laitteen etupaneelissa. Laite voidaan käynnistää uudestaan kirjoittamalla *reset*.

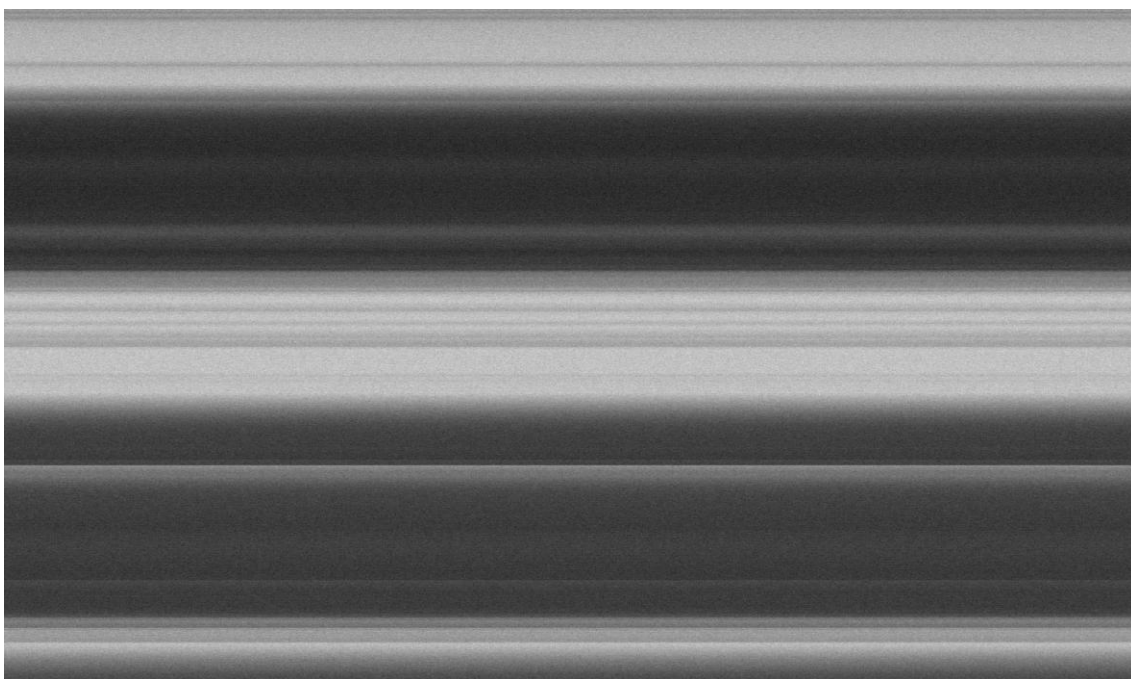
HV-arvon kalibrointi sekä testikuvan otto

Kun *calibrate*-nappia painetaan, laite kalibroi valomonistinputken HV-arvon sekä näyttää tämän tietokoneen näytöllä. Jos HV-arvon kalibrointi epäonnistuu, laite ilmoittaa tästä näytöllä sekä äänimerkillä. HV:n kalibroinnin jälkeen laite ottaa valomonistinputkella testikuvan sekä näyttää tämän tietokoneen näytöllä. Testikuva otetaan valonlähteenä toimivasta LEDistä. Testikuvassa saa näkyä pelkkää kohinaa (kuva 13, ks. seur. s.):



Kuva 13. Valomonistinputken ottama käsittelemätön kuva LED-valonlähteestä. Kuva on tasainen, eikä siinä näy muuta kuin kohinaa.

Kuvassa ei saa esiintyä raitaa tai muuta siihen kuulumatonta. Kuvassa 14 näkyvä raita johtuu valomonistinputken viasta. Tällaista putkea ei voida käyttää.



Kuva 14. Valomonistinputken ottamassa kuvassa näkyy raitaa, vaikka kuvan pitäisi olla tasaisen harmaa

Jos testikuva ei ole tasainen, valomonistinputkessa on jotain vikaa, eikä sitä voida käyttää. On tärkeää, että valomonistinputkista johtuvat kuvan häiriöt saadaan poistettua ennen valomonistinputkien asennusta valmiisiin laitteisiin. Jos valmiin laitteen kuvissa näkyy virheitä, vika ei ole ainakaan valomonistinputkessa.

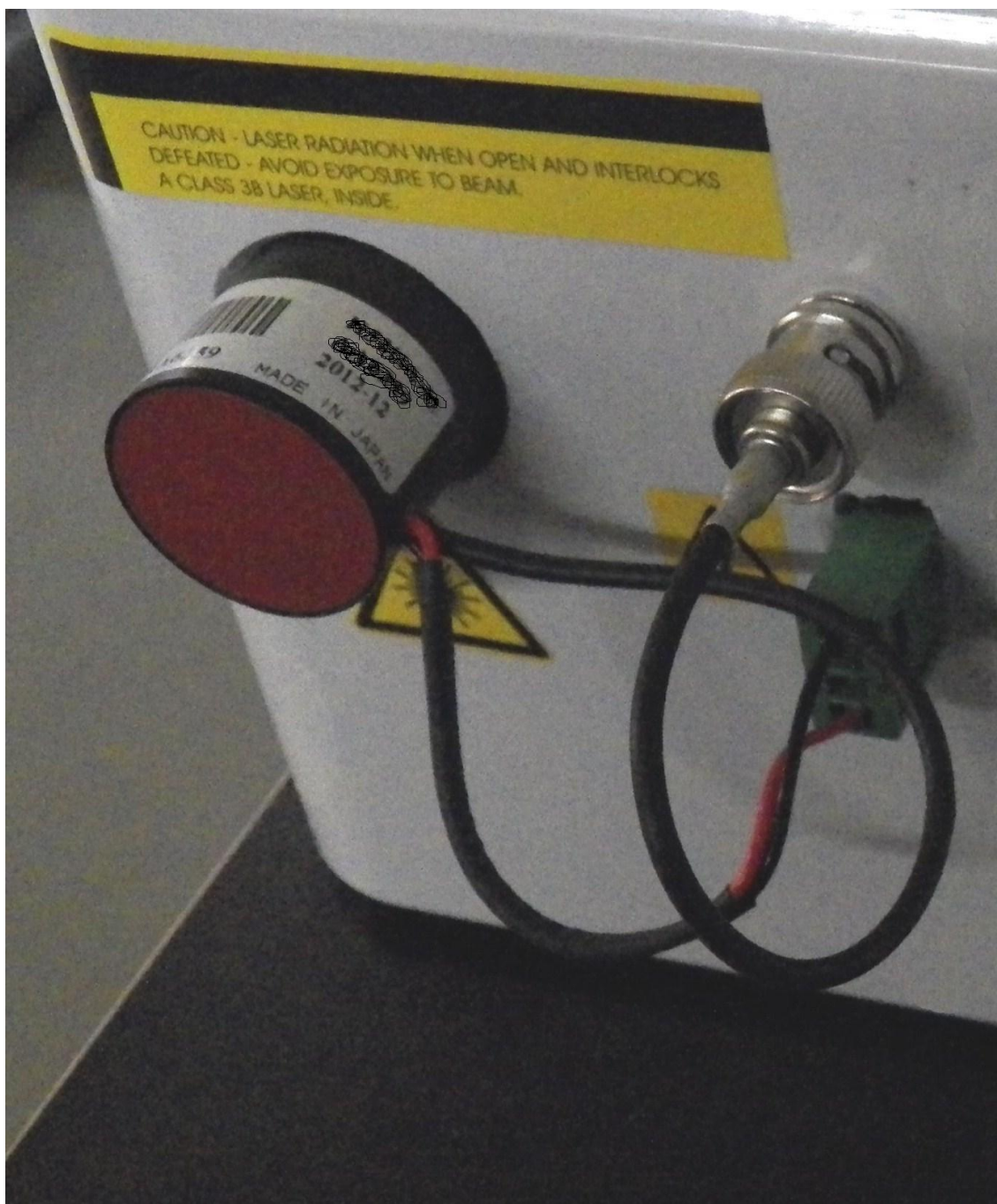
Laser testaus

Valomonistinputkien herkkyys punaiselle laservalolle testataan samalla laitteella, sillä laite osaa ajaa lasermoduulia. Koska lasermoduulin valokeila on hyvin pistemäinen, on laserista poistettu linssi, jotta valokeila on laajempi ja peittää valomonistinputken ikkunan kokonaan. Valomonistinputkelta ei saa tulla minkäänlaista vastetta punaiselle laservalolle, sillä valomonistinputken päässä oleva ikkuna suodattaa kaiken punaisen valon pois. Jos valomonistinputki reagoi laservaloon, linssi on joko rikki, tai sen kiinnitys on puutteellinen. Tällaista valomonistinputkea ei voida käyttää.

Laite ilmoittaa lasertestin onnistumisen näytöllä sekä mahdollisen epäonnistumisen lisäksi myös äänimerkillä. Lopuksi laite näyttää vielä kalibroidun HV-arvon ja jää odottamaan uutta *calibrate*-napin painallusta. Testikuva voidaan haluttaessa nähdä vielä uudestaan ennen seuraavan valomonistinputken kalibrointia kirjoittamalla terminaali-ohjelmaan *rp*.

4.9 Valomonistinputkien kalibrointilaitteen rakennus

Kalibrointilaite rakennettiin laite A:n kotelon sisään. Laitteesta poistettiin sisältä kaikki osat, mitä ei kalibrointilaitteessa tarvita. Etupaneeliin porattiin reikä, josta valomonistinputki voidaan asettaa laitteen sisälle kiinnitettyyn valonlähteeseen. Etupaneeliin porattiin reiät myös signaali- sekä korkeajänniteliitintä varten. Signaaliliitin on etupaneeliin ruuvattava BNC-runkoliitin, mutta korkeajänniteliitin täytyy liimata etupaneeliin (kuva 15, ks. seur. s.).



Kuva 15. Laitteen etupaneeliin porattiin reikä josta valomonistinputki voidaan asettaa paikalleen. Etupaneelissa on myös signaali- sekä korkeajänniteliittimet.

Valonlähteen piirilevy on myös kiinnitetty laitteen sisään niin, että tarkkuuspotentimetrejä voidaan säätää laitteen kanteen porattujen reikien kautta. Mekaniikka suunnittelija rakensi laitteelle suojakannen, joka kiinni ollessaan sulkee kaksi mikrokytkintä sekä estää korkeajännitteisten osien koskemisen kalibroinnin aikana.

4.10 Valomonistinputkien kalibrointilaitteen testaus

Ennen laitteen testikäyttöä tuotannossa, laitteella ajettiin 2000 syklin testaus. Testaus toteutettiin NE555-ajastinpiiriin perustuvalla kytkennällä. Kytkentä ja testaustapa ovat samat kuin aiemmin ajetuissa testeissä (s. 22). Laitteen kalibroima HV-arvo muuttui testijakson aikana noin 2 yksikköä. Testaus kesti noin 60 tuntia. Huonelämpötila pysyi testauksen ajan lähes vakiona, mutta laitteen sisälämpötila hieman kohosi laitteen toiminnan aikana.

Laite myös jäähdytettiin noin 0 °C:een, jolloin laitteen kalibroima HV-arvo muuttui jonkin verran. Kun laitteen antoi lämmetä huonelämpötilaan noin tunnin ajan, HV-arvo palautui aiemmalle tasolle. Kylmätestauksen aikana ei esiintynyt muita toimintahäiriöitä.

4.11 Valomonistinputkien kalibrointilaitteen kalibroinnin tarkastus ja uudelleen kalibrointi

Valomonistinputkien kalibrointilaitteen kalibroinnin tarkistus

Kalibrointilaitteen toiminta sekä kalibrointi tulee tarkastaa säännöllisesti. Kun laite otetaan käyttöön, tarkistukset tehdään päivittäin, jotta nähdään, miten laite käyttäytyy ajan kuluessa. Jos laitteessa ei tapahdu suuria muutoksia testikäytön aikana, muutokset ovat siis hitaita, ja kalibrointiväliä voidaan mahdollisesti harventaa.

Kalibroinnin tarkistus tapahtuu kalibroimalla referenssikalibroituja valomonistinputkia, ja vertaamalla kalibroitaessa saatua HV-arvoa putkien referenssi HV-arvoon. Kalibroinnin tarkistus putkia tulee olla ainakin kaksi kappaletta, joiden HV-arvot poikkeavat toisistaan mahdollisimman paljon, ja joiden vaste LEDille on erilainen. Pelkästään yhdellä putkella ei nähdä, onko kalibrointi hyväksyttävä kaikilla valomonistinputkilla, sillä putkien vaste LEDille hieman vaihtelee.

Valomonistinputket kalibroidaan laitteella ainakin kaksi kertaa HV-arvoon, jotta nähdään laitteen vakaus. HV-arvo saa poiketa referenssiarvosta korkeintaan 2 yksikköä, tai

muuten laite pitää kalibroida uudestaan. Myös referenssivalomonistinputkien kalibrointi tarkistetaan säännöllisesti.

Valomonistinputkien kalibrointilaitteen uudelleen kalibrointi

Jos laite täytyy kalibroida uudestaan, se tapahtuu säätämällä laitteessa olevia tarkkuuspotentiometrejä. Potentiometrien vieressä on myös liitin, johon yleismittari voidaan kytkeä ja vertailujännite mitata. Vertailujännite kannattaa mitata kalibroitaessa, jotta voidaan seurata, tapahtuuko siinä muutoksia. Näin nähdään, johtuuko uudelleenkalibroinnin tarve vertailujännitteen muutoksista vai esimerkiksi LEDin himmenemisestä. Kun vertailujännitettä nostaa, laitteen kalibroima HV-arvo laskee sekä päinvastoin. Jo muutaman millivoltin muutos vertailujännitteessä vaikuttaa HV-arvoon. Tämän takia tarkkuuspotentiometrejä pitää säätää vain vähän kerrallaan. Yleismittarin ollessa kytkettynä on vertailujännitettä helpompi säätää, koska jännitteen muutosta voidaan samalla seurata. Säädön jälkeen kalibroidaan referenssiputket, jos HV-arvo on nyt sallituissa rajoissa, laite on kalibroitu onnistuneesti. Muussa tapauksessa kalibrointi on tehtävä uudestaan.

5 Yhteenveto

Insinööriyössä suunniteltiin ja toteutettiin valomonistinputkien kalibrointilaitte. Kalibrointilaitte kalibroi ja testaa valomonistinputken toiminnan LEDin avulla sekä testaa herkkyuden punaiselle valolle laserin avulla. Tuotantoa varten tehtiin kalibrointilaitteen työohje, kalibroinnin tarkastus ohje sekä uudelleen kalibrointi ohje. LED-valonlähde toteutettiin UV-LEDin sekä tasavirtalähteen avulla. Kalibrointilaitte vietiin tuotannon testikäyttöön.

Valomonistinputkien kalibrointilaitte nopeuttaa tuotannon prosessia sekä parantaa saantoa, sillä valomonistinputkien viat löydetään ennen laitteiden kokoonpanoa. Tästä on myös taloudellista hyötyä, sillä mitä myöhemässä vaiheessa laitteen valmistusta vika esiintyy, sitä kalliimmaksi sen korjaaminen tulee. Myös kalibroinnin luotettavuus paranee, sillä kalibrointi on lähes automaattinen, eikä kalibroinnissa ole montaa käyttäjistä johtuvaa muuttujaa.

Myös fotodiodin avulla takaisinkytkettyä valonlähdettä kokeiltiin, mutta siitä ei saatu tarpeeksi luotettavaa. Jotta fotodiodin avulla toteutetusta LEDin kirkkauden kompensointiosta saataisi tarpeeksi tarkka ja luotettava, tarvittaisiin fotodiodille vähän kohiseva ja herkkä vahvistin. Tällöin fotodiodin virta voidaan muuttaa jännitteeksi alhaisen impedanssin avulla, jolloin fotodiodi käyttäytyy ainakin lähes lineaarisesti. LEDiä voisi ohjata mikro-ohjaimen avulla, jolloin laitteeseen voidaan tarvittaessa asentaa monta lämpötila anturia tarkkaa lämpötilakompensointia varten.

Mikro-ohjaimelta saataisiin myös tasaamalla PWM-signaalin avulla vertailujännite fotodiodia varten. Tasatun PWM-signaalin tarkkuus ja vakaus pitää kuitenkin ensin todentaa. Jos tasatusta PWM-signaalista ei saada tarpeeksi vakaata, voi tarkkuusjännitelähteeseen perustuvaa vertailujännitelähdettä kuitenkin parantaa. Nykyiset normaalit tarkkuuspotentiometrit voisi vaihtaa foliopotentioetreihin joiden resistanssi säätyy hyvin lineaarisesti ja joiden lämpötilastabiilius on erinomainen. Releet voi korvata esimerkiksi puolijohdekytkimin, joissa ei ole liikkuvia osia. Pintaliitoskomponenttien avulla piirilevyn kokoa voidaan huomattavasti pienentää. Toinen kehityskohde on HV-arvojen automaattinen tallentaminen tietokantaan, josta ne voidaan kokoonpanon aikana automaattisesti hakea. Tällöin näppäilyvirheiden mahdollisuus poistuu ja prosessi nopeutuu.

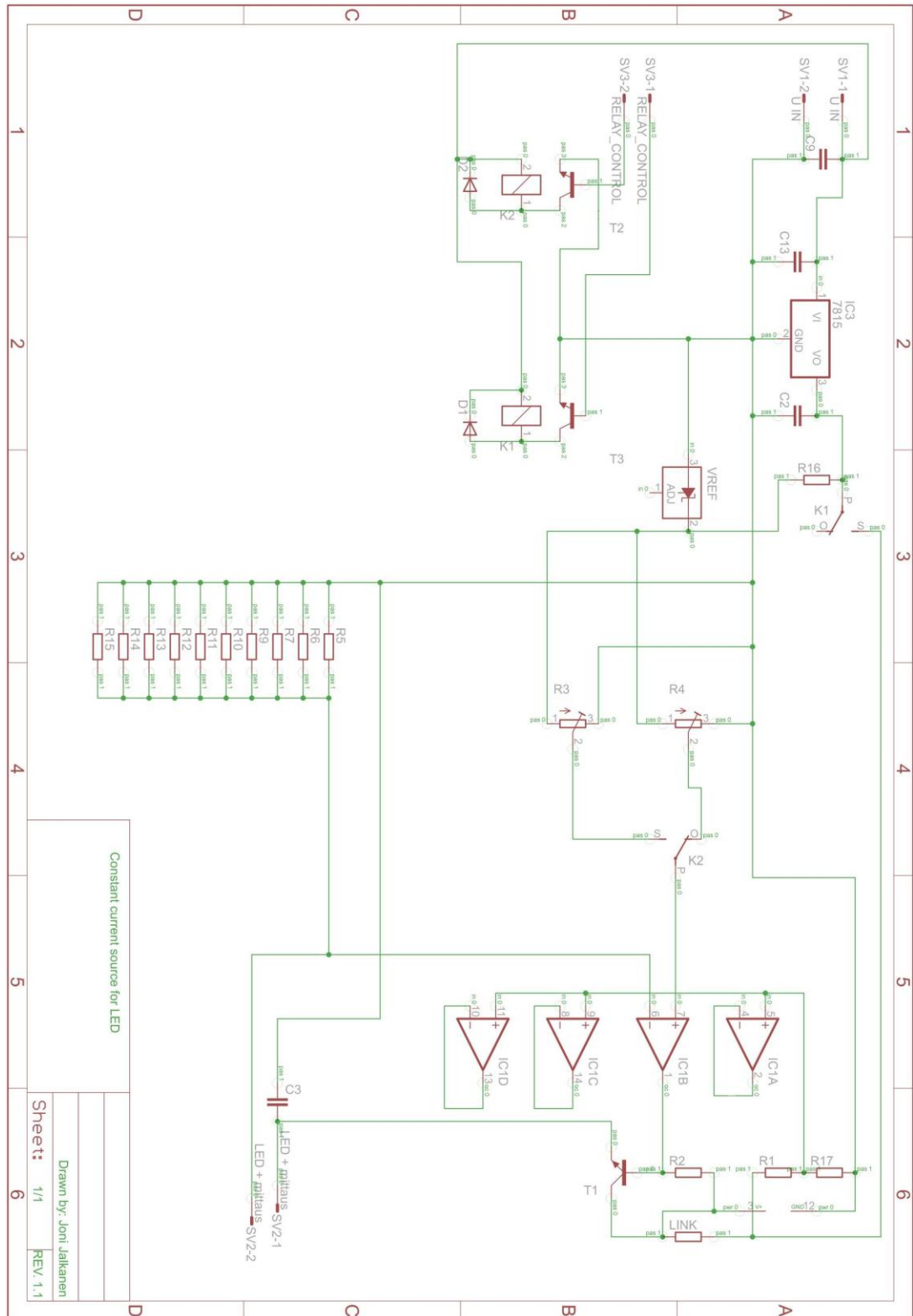
Lähteet

- 1 Rowlands, J A. 2002. The physics of computed radiography. University of Toronto: Sunnybrook and Women's College Health Sciences Centre.
- 2 Thermistor Information. 2012. Verkkodokumentti. Peaksensors. <<http://www.peaksensors.co.uk/thermistors.html>>. Luettu 31.10.2012.
- 3 EPCOS. 2009. NTC Thermistors. Verkkodokumentti. EPCOS. <http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/ProductCatalog/Sensors/TemperatureMeasurement/PDF/PDF_General_technical_information,property=Data_en.pdf;/PDF_General_technical_information.pdf>. Luettu 31.10.2012.
- 4 Thomas L. Floyd. 2008. Electronic Devices Conventional Current Version Eighth Edition. New Jersey, USA: Pearson Education.
- 5 Hamamatsu photonics K.K. Photodiode Technical Information. Japan: Hamamatsu photonics K.K.. PDF-dokumentti. Luettu 7.1.2013.
- 6 Flyckt, S-O., Marmonier, Carole. 2002. Photomultiplier tubes principles & applications. Ranska: Photonis. PDF-dokumentti.
- 7 Hamamatsu photonics K.K.. 1998. Photomultiplier Tubes Construction and Operating Characteristics. Japan: Hamamatsu photonics K.K.. PDF-dokumentti.
- 8 ET Enterprises. 2007. Understanding photomultipliers. Englanti: ET Enterprises limited. PDF-dokumentti.
- 9 Hamamatsu Photonics K.K.. 2006. Photomultiplier tubes Basics and Applications. Japan: Hamamatsu Photonics K.K.. PDF-dokumentti.
- 10 Burle industries INC. 1980. Photomultiplier handbook. USA: Burle Industries INC. PDF-dokumentti.
- 11 E T Enterprises. 2012. Photomultiplier applications. Verkkodokumentti. <<http://www.et-enterprises.com/photomultipliers/photomultiplier-applications>> Luettu 31.10.2012.
- 12 Bivar. 2008. Tight Tolerance Ultraviolet LED Lamp TZ Series Revision A. Datalehti. Bivar. PDF-dokumentti.
- 13 Kingbright. 2003. KP-2012MBC Rev V.4. Datalehti. Kingbright. PDF-dokumentti.

- 14 VCC. 2009. UV LED LAMP VAOL-3EUV8Y4. Datalehti. VCC. PDF-dokumentti. Luettu 24.9.2012.
- 15 VCC. 2009. UV LED LAMP VAOL-3EUVOY4. Datalehti. VCC. PDF-dokumentti. Luettu 24.9.2012.
- 16 LED professional. 2008. LED professional Review. Issue 10. PDF-dokumentti.
- 17 Steve Zu. 2011. LED aging concepts and methods. Xiamen Guangpu Electronics Co., LTD. Free Press. PDF-dokumentti. Luettu 29.10.2012
- 18 Vishay Intertechnology Inc. 2008. Silicon Photodiode BPW20RF datasheet Rev. 1.6. Datalehti. Vishay. PDF-dokumentti.
- 19 Bivar Inc. 2002. High power UV LEDs. LED5-UV-400-30 Series datasheet. Datalehti. Bivar. PDF-dokumentti. Luettu 15.1.2013
- 20 Texas Instruments. 2001. Op Amp and Comparators - Don't Confuse Them! SLOA067. Texas Instruments. PDF-dokumentti.
- 21 ST Microelectronics. 2011. Low-power quad voltage comparators Rev 3. Datalehti. ST Microelectronics. PDF-dokumentti.

2. LED-valonlähteen piirikaavio

2. LED-valonlähteen piirikaavio, piirretty Eagle CAD ohjelmalla.



2. LED-valonlähteen osasijoittelukuva

2. LED-valonlähteen osasijoittelukuva, tehty Eagle CAD ohjelmalla.

