



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Joonas Rahkola

Ajoneuvon laserlisävalot, niiden turvallisuus ja laillisuus tieliikenne- käytössä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

11.5.2020

Tekijä Otsikko	Joonas Rahkola Ajoneuvon laserlisävalot, niiden turvallisuus ja laillisuus tieliikennekäytössä
Sivumäärä Aika	39 sivua + 5 liitettä 11.5.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine	Autosähkötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Pasi Kovanen Jaakko Jyrkkä, Startax Finland Oy
<p>Tämän insinöörityön tavoitteena on laatia selvitys henkilö- ja hyötyajoneuvojen sähkövaraosien maahantuontiin erikoistuneelle Startax Finland Oy:lle kahden eri valmistajan prototyyppiasteella olevien laserlisävalojen sisältämän laserin turvallisuudesta. Lisäksi kartoitetaan laserlisävalojen lainsäädännöllinen soveltuvuus ja käyttö Suomen tieliikenteessä. Työssä luodaan myös katsaus laserlisävalojen sisältämään valotekniikkaan ja niiden toimintaperiaatteisiin.</p> <p>Selvitys tehtiin, koska laserlisävaloja ei ole tyyppitarkastettu tai -hyväksytty käytettäväksi tieliikenteessä minkään hyväksytyin viranomaisen toimesta Suomessa tai Euroopassa. Laserlisävalojen sisältämien laserlaitteiden turvallinen käyttö ja tieliikenteen vaatimukset halutaan varmistaa. Insinöörityössä tukeudutaan viimeisimpään voimassa olevaan lainsäädäntöön, määräyksiin ja standardeihin sekä käytetään hyväksi alan asiantuntijoiden näkemyksiä ja kirjallisuutta.</p> <p>Tuloksena saatiin kattava paketti laserlisävaloille asetetuista turvallisuutta ohjaavista standardeista sekä lainsäädäntöä koskevista vaatimuksista tieliikenteessä. Työssä pureudutaan myös syvällisesti laserlisävalojen sisältämään laser- ja LED-tekniikkaan, niiden toimintaperiaatteisiin sekä selostetaan tieliikennetyyppi hyväksynnän prosessia. Laserlisävalot voidaan tyyppi hyväksyttää tieliikenteeseen samoilla kriteereillä kuin perinteiset ajoneuvon kauko- tai lisävalot, kunhan ne täyttävät niihin kohdistuvien E-sääntöjen vaatimukset. Laserlaitteiden tulee myös täyttää standardien ja lainsäädännön asettamat turvallisuusmääräykset. Näiden vaatimusten täytyttyä voidaan laserlisävalojen katsoa olevan turvallisia ja asianmukaisia tieliikennekäytössä. Laskelmien perusteella molempien laserlisävalojen tuottama valon intensiteetti ylittää moninkertaisesti tyyppi hyväksyntätestauksessa sallitun valon maksimi-intensiteetin rajan.</p> <p>Keskeisimpänä haasteena laserlisävalojen tyyppi hyväksynnälle tulisikin todennäköisesti olemaan laserlisävalojen tuottaman valon erittäin korkea intensiteetti. Lisäksi tuotteen tuotannon laatu ja valvonta täytyy vastata tyyppi hyväksynnän vaatimaa tasoa.</p>	
Avainsanat	Lisävalot, laservalot, turvallisuus

Author Title	Joonas Rahkola Vehicle Laser Auxiliary Lights, Their Safety and Legality in Road Traffic Use
Number of Pages Date	39 pages + 5 appendices 11 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Electronics Engineering
Instructors	Pasi Kovanen, Senior Lecturer Jaakko Jyrkkä, Startax Finland Oy
<p>This Bachelor's thesis was carried out for Startax Finland Oy, which is specialized in importing electrical spare parts for passenger and commercial vehicles. The aim of the thesis was to study and analyze the safety of the lasers of the prototype auxiliary laser lights that are being developed by two different manufacturers. In addition, the thesis discusses the legal suitability and the use of laser auxiliary lights in Finnish road traffic. The thesis also gives an overview of the lighting technology of the laser auxiliary lights and their operating principles in general.</p> <p>This thesis was carried out because laser auxiliary lights have not been type tested or approved for road traffic use by any approved authority in Finland or in Europe. The legal suitability and the use of laser auxiliary lights in Finnish road traffic had to be assessed. This thesis is based on the latest legislation, regulations, and standards as well as the views of the experts in the field in the literature dealing with this issue.</p> <p>As a result, a comprehensive package of safety-related standards and regulatory requirements for laser auxiliary lights in road traffic was obtained. The thesis also provides an in-depth study of the laser and LED technology included in laser auxiliary lights, their operating principles, and the process of type-approval for road traffic. Auxiliary laser lights may be type-approved for road traffic using the same process and criteria as the conventional high beam or auxiliary lights of vehicles provided, that they meet the requirements of the applicable E-regulations. Laser devices must also meet the safety requirements set by the standards and the legislation. If these requirements are met, laser auxiliary lights may be considered to be safe and suitable for road traffic use. Based on the calculations, the light intensity produced by both the auxiliary laser lights exceeds the maximum values of light intensity multiple times in the type-approval test.</p> <p>The main challenge in the type-approval for both laser auxiliary lights seems to be the extremely high intensity of light generated by the laser auxiliary lights. In addition, the production quality of the product and its control must meet the type-approval requirements.</p>	
Keywords	Auxiliary lights, Laser Lights, Safety

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Laservalotekniikka	2
2.1	Toimintaperiaate	2
2.1.1	Absorptio	3
2.1.2	Spontaani emissio	4
2.1.3	Stimuloitu emissio	5
2.2	Komponentit	6
2.3	Ominaisuudet	7
2.4	Sähkömagneettinen spektri	8
3	Laserlisävalot	9
3.1	Tekniikka	9
3.1.1	Prototyyppi 1.	9
3.1.2	Prototyyppi 2.	11
3.2	Toimintaperiaate	13
3.2.1	LED	13
3.2.2	Laserdiodi	14
3.2.3	Keltafosforipeili	16
4	Laserturvallisuus	16
4.1	Yleistä	16
4.2	Standardit	17
4.2.1	SFS-EN 60825-1:2014	17
4.2.2	SFS-EN 62471:2009	20
4.3	Käyttöturvallisuus	22
5	Lainsäädäntö	22
5.1	Säteilylaki 859/2018	22
5.2	Ajoneuvolaki 1090/2002	23

5.3	Trafi/437519	24
5.4	Tyyppihyväksynät	25
5.4.1	EU- ja EY-tyyppihyväksyntä	26
5.4.2	E-tyyppihyväksyntä	26
5.4.3	Kansallinen tyyppihyväksyntä	26
5.5	Laserlisävalojen tyyppihyväksyntä	27
5.5.1	E-sääntö 48	27
5.5.2	E-sääntö 112	28
5.5.3	Tyyppihyväksynnässä huomioitavaa	30
5.6	Tyyppihyväksyntäprosessi	31
5.6.1	Tarpeellisuus	31
5.6.2	Tekniset vaatimukset	31
5.6.3	Tuotannon vaatimuksenmukaisuuden valvonta	32
5.6.4	Tutkimuslaitoksen tekemä testaus	32
5.6.5	Tyyppihyväksyntähakemus	33
5.6.6	Tuotannon vaatimustenmukaisuuden valvonnan alkuarviointi	34
5.6.7	Tyyppihyväksynnän myöntäminen	34
6	Yhteenveto	34
	Lähteet	37
	Liitteet	
	Liite 1. Eri lasertekniikat ja niiden sähkömagneettinen spektri	
	Liite 2. Prototyyppi 1. -laserlisävalot	
	Liite 3. Prototyyppi 2. -laserlisävalot	
	Liite 4. Prototyyppi 2. -laserlisävalojen SMD-laser	
	Liite 5. E-sääntö 48:n määrittelemät valkoisen valon x, y -koordinaatit	

Lyhenteet ja käsitteet

Absorptio Imeytyminen. Tapahtuma, jossa valohiukkanen imeytyy atomin elektroniin aiheuttaen atomin virittymisen.

Diodi Puolijohdekomponentti, joka rakentuu anodista ja katodista. Läpäisee sähkövirtaa vain yhteen suuntaan.

Divergenssi Hajaantuminen, valoallon taipuminen. Valonsäteen halkaisija kasvaa etäisyyden kasvaessa.

Emittoituminen

Säteileminen, lähettäminen, tapahtuma, jossa valohiukkanen poistuu valoa tuottavasta laitteesta.

Fotoni Valohiukkanen, välittäjähiukkanen sähkömagneettisessa vuorovaikutuksessa.

Goniofotometri

Kulmafotometri, pistevalomittauksessa käytettävä valonmittauslaite.

Isoluksikäyrä

Valonjakokäyrä, kaavio, jossa valaisimen valovoiman osoitetaan pysty- tai vaaka-akselilla.

Koherenttisyys

Yhtenäisyys, sähkömagneettisten aaltojen yhtenäisyyttä kuvaava käsite. Aaltojen taajuus ja vaihe-ero vastaavat toisiaan. Aallot myös liikkuvat samaan suuntaan.

Laser *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Laite, joka tuottaa näkyvää valoa samalla aallonpituudella, samaan suuntaan sekä samalla taajuudella

LD *Laser Diode*. Laserdiodista käytetty kirjainlyhenne.

LED *Light Emitting Diode*. Hohtodiodista käytetty kirjainlyhenne.

Monokromaattisuus

Yksivärisyys. Monokromaattinen valo sisältää vain yhtä valon aallonpituutta.

Populaatioinversio

Käänteinen miehitys, tilanne, jossa atomin virittyneellä energiatasolla on enemmän elektroneja kuin sen matalammalla energiatasolla.

SMD *Surface Mount Device*. Pintaliitostekniikalla valmistettu elektroniikkakomponentti.

Spontaani emissio

Virittyneen atomin varauksen purkautuminen oma-aloitteisesti ilman ulkopuolista ärsykettä, samalla säteillen satunnaisen valohiukkasen.

Stimuloitu emissio

Virittyneen atomin varauksen purkautuminen hallitusti ulkopuolisen ärsykkeen vaikutuksesta, samalla säteillen viritystilaa vastaavan valohiukkasen.

1 Johdanto

Autoilija saattaa kaivata ajoneuvonsa kaukovalojen tueksi ylimääräistä valotehoa nähdäkseen paremmin ja pidemmälle pimeällä tieosuudella. Usein ratkaisu on auton keulalle asennettavat lisävalot. Uudet valaisintekniikat lanseerataan yleensä ensimmäisenä ajoneuvon omiin valaisimiin, joiden tekniikkaa sovelletaan lisävalaisimiin. Lisävaloja suosivien autoilijoiden valontarpeelle ei näytä löytyvän loppua, ja seuraavaksi lisävalaisintekniikan läpimurroksi povataankin laservalotekniikkaa.

Lasertekniikalla toteutettujen lisävalojen valokantaman luvataan jopa kaksinkertaistuvan markkinoilla oleviin LED-lisävalaisimiin verrattuna. Ensimmäisistä ajoneuvovalmistajien markkinoille lanseeraamista ajoneuvolaservalaisimista tulee vierähtäneeksi jo muutama vuosi. Nyt laservalotekniikka on valjastettu valaisemaan teitä ajoneuvokäyttöön suunnattujen laserlisävalojen muodossa.

Ajoneuvotekniikan ollessa jatkuvassa murroksessa uusien innovaatioiden ja tekniikoiden muokatessa markkinoita on tärkeää huomioida viimeisimmän tekniikan yhteensopivuus nykyisen lainsäädännön säädösten sekä määräysten kanssa. Tuotteen maahantuojan on myös tärkeää tuntea tuotteensa ollakseen selvillä sille määritellyistä vaatimuksista ennen uuden tuotteen asettamista kuluttajien saataville.

Tämän insinööriyön tavoitteena on laatia selvitys henkilö- ja hyötyajoneuvojen sähkövaraosien maahantuontiin erikoistuneelle Startax Finland Oy:lle kahden eri valmistajan prototyyppiasteella olevien laserlisävalojen sisältämän laserin turvallisuudesta. Lisäksi kartoitetaan laserlisävalojen lainsäädännöllinen soveltuvuus ja käyttö Suomen tieliikenteessä. Työssä luodaan myös katsaus laserlisävalojen sisältämään valotekniikkaan ja niiden toimintaperiaatteisiin.

Selvitys tehdään, koska laserlisävaloja ei ole tyyppitarkastettu tai -hyväksytty käytettäväksi tieliikenteessä minkään hyväksytyn viranomaisen toimesta Suomessa tai Euroopassa. Laserlisävalojen sisältämien laserlaitteiden turvallinen käyttö ja tieliikenteen vaatimukset halutaan varmistaa.

Insinööriyössä tukeudutaan viimeisimpään voimassa olevaan lainsäädäntöön, määräyksiin ja standardeihin sekä käytetään hyväksi alan asiantuntijoiden näkemyksiä ja kirjallisuutta.

2 Laservalotekniikka

Laser on laite, joka tuottaa vahvistettua sähkömagneettistasäteilyä näkyvän valon, UV- tai infrapunasäteilyn aallonpituudella. Lisäksi valoalto kulkee samaan suuntaan ja samalla taajuudella. Laser on akronyymi eli kirjainsana, joka on vakiintunut yleisesti puhe- ja kirjakielen. Laser-akronyymi tulee sanoista ”Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, ja lasertoiminta perustuu nimensä mukaisesti valonsäteen vahvistamiseen stimuloitulla emissiolla. Käytännössä laser on optinen oskillaattori. Albert Einstein esitti vuonna 1916 teorian stimuloitun emission olemassaolosta, joka loi perustan lasertekniikalle. Ensimmäiset näkyvän valon aallonpituudella toimivat laserit valmistuivat vasta 44 vuotta Einsteinin teoriaa myöhemmin 1960. [1; 2, s. 1; 3; 4; 5, s. 4, 17.]

2.1 Toimintaperiaate

Normaalitilanteissa käytännössä kaikki atomit ovat perustilassa, joten laserlaitteessa olevan laseroivan väliaineen atomit täytyy saada virittymään korkeammalle energiatasolle lasertoiminnan mahdollistamiseksi. Kun atomin korkeammalla energiatasolla (E_2) on suurempi miehitys elektroneja, kuin sen alemmalla energiatasolla (E_1), puhutaan käänteisestä miehityksestä eli populaatioinversiosta. Populaatioinversion aikaansaamiseksi täytyy laseroivaan väliaineeseen pumpata energiaa. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi optisesti toisella ulkoisella valonlähteellä, kemiallisesti, termodynaamisesti tai sähkövirralla, kuten puolijohdelaserissa. [3; 5, s. 17–18.]

Einsteinin mukaan atomien kaasun terminen tasapaino pystytään määrittämään atomien suoralla vuorovaikutuksella säteilyn suhteen. Energiatilojen vuorovaikutusta säteilyn ja atomien välillä kuvataan kolmella prosessilla, joita ovat absorptio, spontaani emissio ja stimuloitu emissio (sivu 5). [5, s. 83.]

Näitä kolmea atomin energiatilojen vaihtelua voidaan havainnollistaa matemaattisesti johtamalla kaavat Bohrin yhtälöstä (1) ja Boltzmannin tilastojen yhtälöstä (2). Yhtälö 1 kuvaa atomin viritystilan sisältämän energian suhdetta taajuuteen:

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (1)$$

jossa $h\nu$ on fotonin energia, h on fotonin siirtymätaajuus, ν on siirtymätaajuus, E_1 on atomin energiataso 1 (perustaso) ja E_2 on atomin energiataso 2 (virittynyt taso). Yhtälö 2 kuvaa puolestaan 2-tasoisesta atomijärjestelmän termistä tasapainoa:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-h\nu/kT}, \quad (2)$$

jossa N_1 on atomin energiatason 1 populaatio, N_2 on atomin energiatason 2 populaatio, e on neperin luku, k on Boltzmannin vakio ja T on lämpötila. [5, s. 85.]

2.1.1 Absorptio

Absorptio on tapahtuma, jossa atomin perustasolla olevaan elektroniin imeytyy eli absorboituu ulkopuolista energiaa. Elektroni siirtyy atomin korkeammalle energiatasolle, jolloin atomi siirtyy virittyneeseen tilaan (sivu 5). Absorptiota voidaan kuvata atomilla, jonka elektroni on atomin energiatasojen perustasolla. Ajatellaan esimerkiksi, että perustasolla olevaan elektroniin on varautunut energiaa 1 yksikköä ja sen siirtyminen atomin korkeammalle energiatasolle vaatisi, että elektroniin olisi imeytynyt energiaa 5 yksikköä. Jos elektroniin kohdistuu fotonin, jonka energiasisältö vastaa 4 yksikköä, voi elektroni absorboida tämän fotonin sisältämän energian itseensä. Näin elektronin energiamäärä kasvaa 1 yksiköstä 5 yksikköön ja se siirtyy atomin korkeammalle eli virittyneelle tasolle. Esimerkiksi erilaiset valokennot, kuten aurinkopaneelit ja fotodiodit perustuvat absorptioon. [3; 5, s. 86; 6, s. 603–604.]

Absorptiossa tapahtuvan fotonin imeytymisen vaikutus atomin perustason populaation eli varauksen muutokseen absorptioprosessin aikana kuvataan kaavalla

$$dN_1 = -B_{21}\rho(\nu)N_1dt, \quad (3)$$

jossa dN_1 on atomin energiatason 1 populaation muutos aikavälillä, B_{21} on Einsteinin absorption kerroin, $\rho(\nu)$ on spektrinen energiatiheys siirtymätaajuuden suhteen ja dt on ajan muutos [5, s. 86].

2.1.2 Spontaani emissio

Spontaanisissa emissiossa atomi on virittyneessä tilassa. Virittynyt tila on atomille epävakaa, joten virittyneen atomin elektroni pyrkii siirtymään korkeammalta energiatasolta perustasolle spontaanisti ilman ulkopuolista vaikutusta (kuva 1). Normaalisti atomi pysyy virittyneenä yhdestä nanosekunnista yhteen millisekuntiin. Elektronin siirtyessä perustasolle voi se emittoida eli säteillä energiatasojen erotusta vastaavan fotonin. Itsestään perustasolle siirtyneen elektronin fotonin vaihe ja kulkusuunta voi olla käytännössä mikä vain, joten lopputuloksena ei ole lasersäteilyä. LEDin (Light Emitting Diode) toiminta perustuu spontaaniin emissioon. Myös normaalissa lasertoiminnassa tapahtuu pieniä määriä spontaania emissiota, mutta se on niin vähäistä ja säteily heikkoa, että se on usein jätetty laskelmissa huomioimatta. [3; 5, s. 85; 6, s. 604.]

Kaavalla 4 voidaan kuvata spontaanissa emissiossa fotonina vapautuvan energian aiheuttamaa korkeamman energiatason populaation muutosta spontaanin emission aikana:

$$dN_2 = -A_{21}N_2dt, \quad (4)$$

jossa dN_2 on atomin energiatason 2 populaation muutos aikavälillä, A_{21} on Einsteinin spontaanin emission kerroin [5, s. 85].

2.1.3 Stimuloitu emissio

Stimuloitu emissio on tapahtuma, jossa laseroivan väliaineen atomin, vaihtoehtoisesti molekyylin elektroni saadaan siirtymään hallitusti virittyneestä tilasta perustilaan. Virittyneenä olevan atomin elektroni saadaan perustilaan stimuloimalla sitä fotonilla (kuva 1). Tämän fotonin energia täytyy olla sama, kuin atomin energiatasojen 1 ja 2 erotus (kaava 6). Elektronin siirtyessä perustilaan alemmalle energiatasolle, elektroniin varautunut energia purkautuu pois fotonin säteilynä. Monistunut foton on vastaavanlainen elektronia stimuloineen fotonin kanssa ja sisältää saman määrän energiaa. Monistuneet fotonit kasvattavat valovirtaa. [3; 5, s. 86; 6, s. 604.]

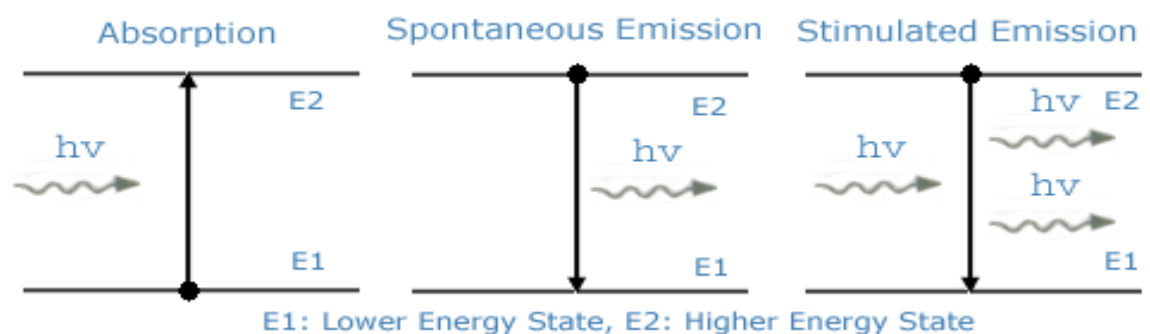
Kaavalla 5 voidaan kuvata stimuloidussa emissiossa fotonina vapautuneen energian aiheuttamaa korkeamman energiatason populaation muutosta stimuloidun emission aikana.

$$dN_2 = -B_{21}\rho(\nu)N_2 dt. \quad (5)$$

Stimuloidussa emissiossa monistuneen sekä spontaanissa emissiossa vapautuneen fotonin sisältämä energia $h\nu$ vastaa energiatason 2 ja energiatason 1 välistä populaatioeroa, ja sitä voidaan havainnollistaa kaavalla

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu, \quad (6)$$

jossa ΔE vastaa systeemin kokonaisenergiaa. [5, s. 85–86.]

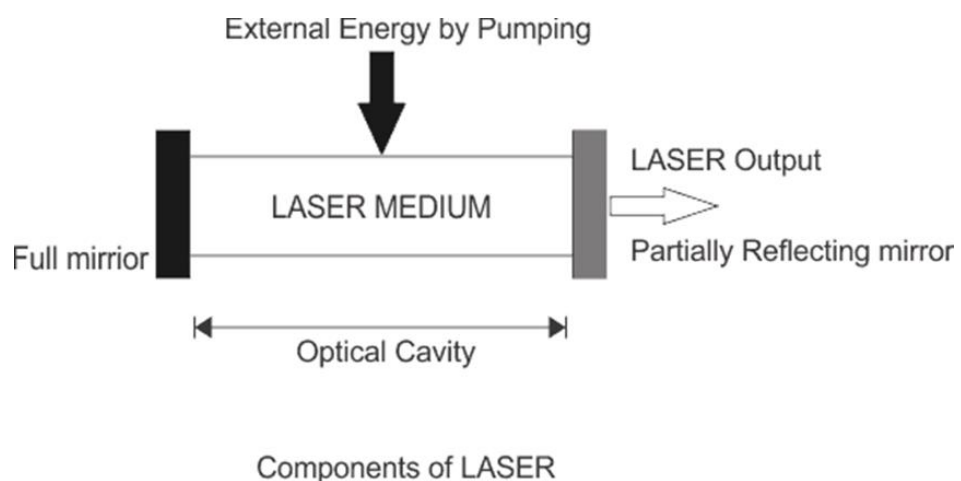


Kuva 1. Lasertoiminnan kannalta kriittiset atomin energiatilojen vaihtelua kuvaavat prosessit [7].

2.2 Komponentit

Laserlaitteen peruskomponentteja (kuva 2) ovat seuraavat:

- **Laserväliaine.** On laserlaitteen osa, jossa valon vahvistus eli stimuloitu emissio tapahtuu. Laserlaitteessa laserväliaine on sijoitettu laserresonaattoriin sisään. Laserväliaineen atomien, vaihtoehtoisesti molekyylien energiatasot ovat perustasot, maataso ja korkeampi eli virittynyt taso. Joissain lasereissa väliaineen atomeilla voi olla myös kolme tai neljä eri energiatasoa. [5, s. 18, 22; 8.]
- **Pumppausjärjestelmä.** Pumppaa ulkopuolista energiaa väliaineessa olevien atomien elektroneihin. Pumppaus saa atomit virittymään, jolloin elektronit siirtyvät atomin perustasolta virittyneelle tasolle. Energian pumppaus on välttämätöntä populaatioinversion aikaansaamiseksi. [2, s. 86; 4; 5, s. 18; 8.]
- **Laserresonaattori.** Koostuu yksinkertaisemmillaan kahdesta peilistä, joista toinen on puoliläpäisevä. Peilit sijaitsevat laserväliaineen molemmiin puolin. Peilien tehtävänä on koota ja varastoida valonsäteitä yhtenäiseksi valoksi laserväliaineen sisällä. Yhtenäiset ja samansuuntaiset valonsäteet kulkevat peilien välissä edes takaisin ylläpitäen stimuloitua emissiota. Tarpeeksi vahvistunut laservalo pääsee laserlaitteesta lopulta ulos puoliläpäisevän peilin läpi. [1; 2, s. 89–90; 5, s. 18; 8.]



Kuva 2. Laserlaitteen peruskomponentit [8].

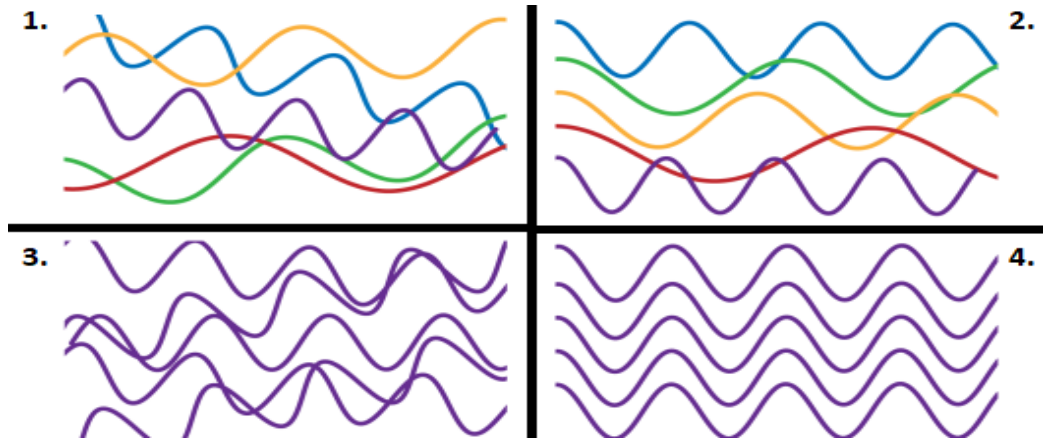
2.3 Ominaisuudet

Laservalolla on ainutlaatuisia ominaisuuksia, jotka erottavat sen kaikista muista valonlähteistä. Näitä ovat koherenttisuus, yhdensuuntaisuus ja monokromaattisuus [2, s. 57; 4]. Valo on laservaloa, kun se täyttää nämä ominaisuudet:

- **Koherenttisuus.** Koherenttisuus jaetaan kahteen ryhmään, joita ovat ajallinen ja paikallinen koherenssi. Ajallisella koherenssilla kuvataan valon monokromaattisuutta, eli yksivärisyyttä. Paikallinen koherenssi taas kuvaa valorintaman yhtenäisyyttä. Laservalo täyttää molemmat koherenttisuuden ryhmät, koska laservalon taajuus ja vaihe pysyvät vakiona eli valorintama on eheää ja valonsäde hyvin monokromaattista. [2, s. 64; 4; 5, s. 3; 9.]
- **Yhdensuuntaisuus.** Laservalo on yhdensuuntaista eli kollimoitua. Tällöin jokainen lasersäteen sisältämä fotoni kulkee samaan suuntaan. Valonsäteen hajonta ja leviäminen on hyvin pientä. Käytännössä täydellisesti kollimoitua laservaloa ei pystytä tuottamaan valoaaltojen divergenssin, eli valoalloille tapahtuvan hajonnan takia. Divergenssiä tapahtuu valoaaltojen fysikaalisista ominaisuuksista johtuen. [2, s. 58–62; 4.]
- **Monokromaattisuus.** Monokromaattisuus on mitta valosävyyn puhtaudelle. Monokromaattinen valo on täysin yksiväristä, eli se sisältää vain yhtä valon aallonpituutta. Laservalo on hyvin monokromaattista, koska laserlaitteen laserväliaineessa tapahtuva stimuloitu emissio monistaa vain fotoneja yhdeltä tarkkaan määritellyltä valon aallonpituudelta. Käytännössä laservalo ei kuitenkaan missään tilanteessa voi olla täysin monokromaattista, valoaaltojen divergenssistä johtuen. [2, s. 57–58; 4.]

Kuvassa 3. havainnoidaan neljää erilaista valoa, valoaaltona kuvattuna. Kuvan kohdassa 1. valoaallot eivät ole yhdensuuntaisia, valo on ajallisesti ja paikallisesti epäkoherenttia, lisäksi valo sisältää useita eri aallonpituuksia eli valo ei myöskään ole monokromaattista. Kohdassa 2. valoaallot ovat yhdensuuntaisia, valo on paikallisesti koherenttia, mutta ajallisesti epäkoherenttia. Lisäksi valo sisältää useita eri aallonpituuksia, joten valo ei ole monokromaattista.

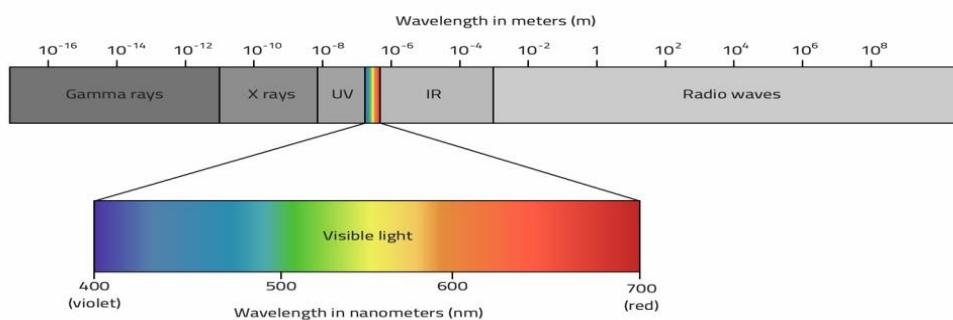
Kohdassa 3. valo on monokromaattista sisältäen vain yhtä valon aallonpituutta, valo on ajallisesti koherenttia, mutta paikallisesti epäkoherenttia. Kohdassa 4. valo on ajallisesti ja paikallisesti koherenttia sekä monokromaattista. [9.]



Kuva 3. Neljä esimerkkiä valon koherentsuudesta valoaltona kuvattuna [9].

2.4 Sähkömagneettinen spektri

Sähkömagneettinen spektri (kuva 4) on kuvaaja, jolla kuvataan koko sähkömagneettisen säteilyn skaalaa. Sähkömagneettisessa spektrissä sähkömagneettisen säteilyn yksikönä on yleensä käytetty aallonpituutta, vaihtoehtoisesti taajuutta. Lyhyen aallonpituuden omaava säteily on luonnollisesti energiatiheämpää, kuin pitkän aallonpituuden omaava säteily. Pitkän aallonpituuden omaava säteily kantaa kuitenkin pisimmälle. Näkyvä laservalo sijoittuu näkyvän valon aallonpituuksille 400–700 nm. [2, s. 9; 5, s. 4.]



Kuva 4. Sähkömagneettisen säteilyn spektri [10].

3 Laserlisävalot

3.1 Tekniikka

Laserlisävalot koostuvat yhdestä laserdiodista ja LED-patteristosta. Laserilla tuotetun valon kantama on pitkä ja kapea, joten LED-valoja käytetään lisänä täydentämään valaistuspinna-alaa. LEDit täyttävät laserin valaisematta jättävää katvealuetta, kuten tien piennarta. Lisävaloja, jotka sisältävät kahta eri tekniikalla toteutettua valonlähdettä, voidaan kutsua myös hybridilisävaloiksi.

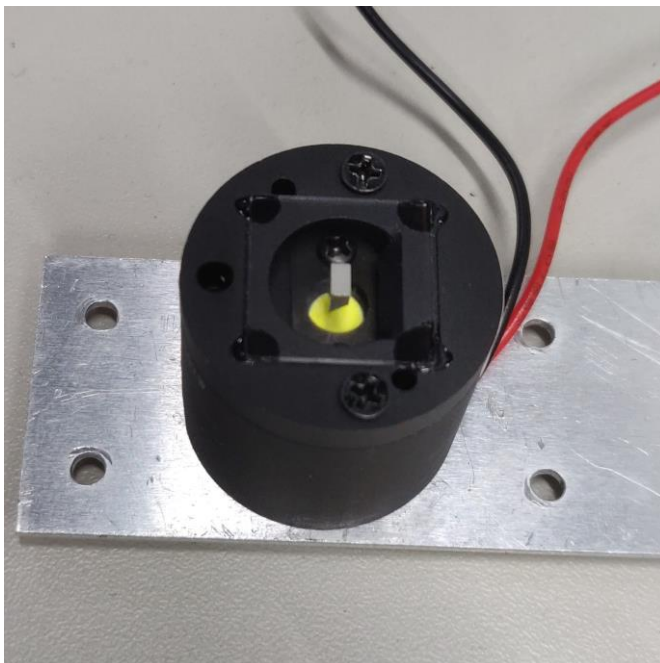
Insinööriyössä tarkastellaan kahden eri valmistajan laserlisävaloa, joiden valotekniikat perustuvat LED- ja lasertekniikkaan. Laserlisävalot ovat prototyyppiasteella, eikä niitä ole brändätty tai lanseerattu Euroopan tai Suomen markkinoille. Kummastakaan lisävalokonstruktioista ei löydy E- tai muuta tyyppihyväksyntää. Opinnäytetyössä lisävaloja käsitellään nimellä prototyyppi 1. ja prototyyppi 2. Molemmat laserlisävalot on valmistettu Kiinassa. Molempien laserlisävalojen laseryksiköiden valmistajat lupaavat laseryksiköilleen >10000 h:n käyttöiän [11; 12].

3.1.1 Prototyyppi 1.

Prototyyppi 1. -lisävalokonstruktio on perinteisen mallinen pyöreä lisävalo, jossa valaisimen reunoilla on 8 kpl Osramin valmistamia valkoisia teholedejä ja keskellä yksi laseryksikkö (kuva 5 ja liite 2). Laseryksikkö sisältää koteloidun laserdiodin, kaksi kappaletta sädettä ohjaavaa peiliä sekä keltafosforipeiliin, jonka kautta lasersäde suodattuu ulos yksiköstä (kuva 6). Laserdiodi on asetettu 180°:n kulmaan keltafosforipeiliin nähden. Lasersäde ohjataan keltafosforipeiliin kahden 90°:n kulmassa olevan peilin avulla (kuva 7). Yksiköstä ulos tuleva valo on värilämpötilaltaan 5000–7500 K valkoisen ja sinertävän valosävyän välimaastossa. Laseryksikön valmistaja lupaa valovirran olevan 400–450 lm. Laseryksikkö on kiinalaisvalmisteinen. Laserlisävalojen valokantaman luvataan valmistajan omien mittausten perusteella olevan jopa 2099 m valaistusvoimakkuudella 1 lx (liite 2). [11.]



Kuva 5. Prototyyppi 1. -lisävalokonstruktio, jossa reunoilla 8 kpl teholedettä ja keskellä laseryksikkö ilman lisävalon linssiä.



Kuva 6. Prototyyppi 1. -laserlisävalon laseryksikkö.



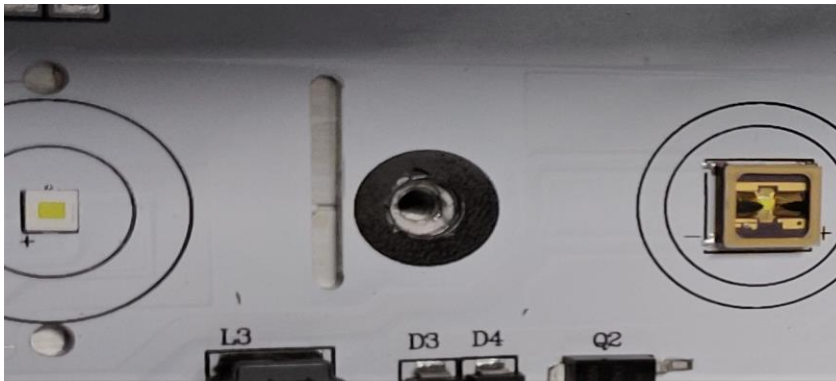
Kuva 7. Prototyyppi 1. -laserlisävalon laseryksikkö (oik.) ilman säteenohjauspeilejä (vas.).

3.1.2 Prototyyppi 2.

Prototyyppi 2. -laserlisävalo on paneelilisävalon mallinen konstruktio (kuva 8). Lisävalokonstruktiossa on yhteensä 10 kpl Osramin valmistamia valkoisia teholedejä. Lisäksi lisävalon keskelle on sijoitettu yksi yhdysvaltalainen SMD-laseryksikkö. Prototyypin 2. -lisävalon kantaman luvataan olevan 978 m valaistusvoimakkuudella 1 lx (liite 3).



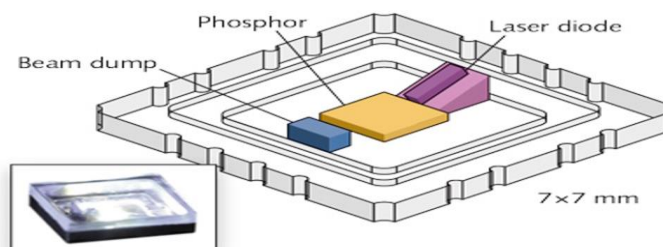
Kuva 8. Prototyyppi 2. -laserlisävalomoduli, jossa keskellä SMD-laseryksikkö ja reunoilla 2 x 5 kpl teholedejä.



Kuva 9. Prototyypin 2. -laserisävalokonstruktion LED (vasemmalla) ja SMD-laser (oikealla).

SMD (Surface Mount Device) on pintaliitostekniikalla valmistettu komponentti. Laserisävaloissa SMD-komponenttiin on integroitu sinistä valon aallonpituutta tuottava GaN/In-GaN-pohjainen laseriodi, lasersäteen suodattava keltafosforipeili sekä säteenkerääjä (kuva 9 ja 10). Tuloksena on värilämpötila-asteikolla 5300–6500 K:n lämpöistä, niin kutsuttua valkoista epäkoherenttia valoa (liite 4). Samaa periaatetta käytetään yleisesti valkoista valoa hohtavissa LEDeissä. [12; 13.]

Laserisävaloissa käytettävän SMD-laserin luvataan olevan jopa 100 kertaa kirkkaampi, kuin markkinoilta löytyvät LEDit. Valmistajan ilmoittama valovirta on 400–510 lm. Koska laseriodilla tuotettu valo on huomattavasti LED-valoa kirkkaampaa, ei niitä tarvita lisävalokonstruktiossa yhtä montaa kappaletta. SMD-laser on 49 mm²:n kokoinen komponentti, noin neljä kertaa teholediä suurempi (liite 4). [12.] Tulevaisuudessa myös ajoneuvon ajovalot saattaa olla toteutettu laservaloilla. SMD-laserin avulla laservaloumpio voidaan suunnitella huomattavasti pienemmäksi valotehosta tinkimättä. Pienempi umpio mahdollistaa myös ajoneuvon otsapinta-alan pienentämisen, jolloin ajoneuvoon kohdistuva ilmanvastus pienenee.



Kuva 10. SMD-laser [13].

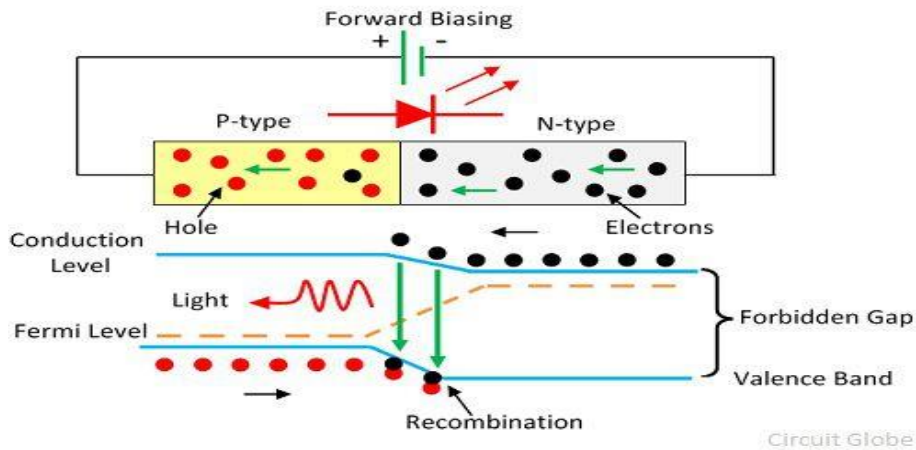
3.2 Toimintaperiaate

LED- ja laserdiodit ovat molemmat pn-tyyppisiä puolijohdekomponentteja. Puolijohdeiden sähkönjohtavuus on parempi kuin eristeillä, mutta johteita huonompi. Molempien diodityyppien tuottama valo sisältää vain yhtä aallonpituutta eli niiden tuottama valo on hyvin monokromaattista. LEDin tuottama valo ei kuitenkaan ole koherenttia, joten valon säteen vaihe ja suunta ovat satunnaisia. Lisäksi diodityyppien toimintaperiaatteessa ja fyysisessä rakenteessa on eroja. Viitaten tämän työn edellisiin lukuihin LEDin toiminta perustuu spontaaniin emissioon, kun taas laserdiodin toiminta perustuu stimuloituun emissioon. [2, s. 182; 6, s. 604, 608–611, 633–634; 14, s. 11.] Laserlisävalojen LEDien ja laserdiodien tuottama valo on alun perin värisävyltään sinistä, joka suodatetaan keltafosforin avulla valkoiseksi valoksi [6, s. 619–620; 13; 14, s. 15–16].

3.2.1 LED

LED (Light Emitting Diode, suomeksi hohtodiodi) on puolijohdekomponentti, jonka toiminta perustuu yleisesti p- ja n-tyyppisiin puolijohdeisiin, jotka on liitetty yhteen (kuva 11). P-tyyppiset puolijohdeet ovat positiivisesti varautuneita (anodi), eli ne vastaanottavat elektroneja. Näin ollen niillä on valenssielektroneja vähemmän kuin pn-liitoksen isäntäatomeilla. Koska valenssielektroneja on vajaa määrä, muodostuu puolijohdeeseen positiivisia elektroniaukkoja. Nämä aukot mahdollistavat varauksen kuljettamisen eli elektronien siirtymisen n-puolelta p-puolelle.

Vuorostaan n-tyyppiset puolijohdeet (katodi) ovat negatiivisesti varautuneita. Niillä on valenssielektroneja enemmän, kuin pn-liitoksen isäntäatomeilla. N-puolella vallitsee tällöin korkeampi energiatila p-puolen energiatasoon nähden. Elektronit saadaan siirtymään spontaanisti puolijohdeissa n-puolelta p-puolen aukkoihin kytkemällä niihin tasavirta. Elektronien yhdistymistä aukkojen kanssa kutsutaan rekombinaatioksi. Korkeammalta (katodi) energiatasolta alemmalle energiatasolle (anodi) siirtyvät elektronit emittoivat fotoneja, joiden vaihe ja kulkusuunta on satunnainen taajuuden ollessa vakio. Toisin sanoen LED alkaa hohtaa monokromaattista epäkoherenttia valoa. Tällaista toimintaa kutsutaan elektroluminesenssiksi. [6, s. 608–611; 14, s. 11–12.]



Kuva 11. LED-diodin toimintaperiaate [15].

3.2.2 Laserdiodi

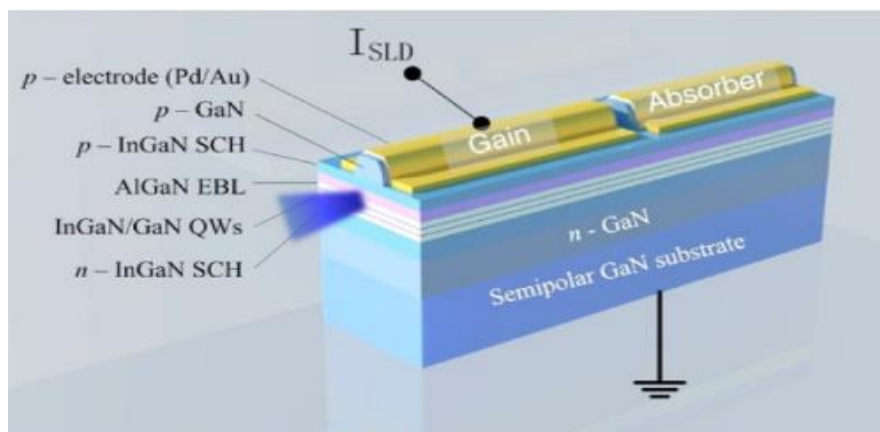
Puolijohdelaseria voidaan kutsua injektio-, rajapintalaseriksi tai yleisemmin laserdiodiksi (LD). Puolijohdelaseriin syntyy laseroivat olosuhteet diodin laserväliaineena toimivassa pn-rajapinnassa, kun diodia pumpataan sähkövirralla populaatioinversion aikaansaamiseksi. Laserdiodin lasersiru (kuva 12) on hyvin pieni, noin 100 μm pitkä komponentti. [6, s. 621–622.]

Puolijohdelaser sisältää kaksi erillään olevaa vyötä, joilla on eri energiatasot. Nämä vyöt rakentuvat johtavuusvyöstä (p-tyyppi) ja valenssivyöstä (n-tyyppi). Johtavuusvyö sisältää positiivisesti varautuneita elektronien mentäviä aukkoja ja valenssivyö sisältää negatiivisesti varautuneita elektroneja, kuten hohtodiodi. Systemissä vallitsee populaatioinversio eli käänteinen miehitys, kun johtavuusvyö on täysin tyhjä elektroneista ja valenssivyöllä vastaavasti on täysi lataus elektroneja. [2, s. 179–180; 6, s. 621–626.]

Lasertoiminta saadaan käyntiin, kun käänteisesti varautuneeseen pn-rajapintaan lähetetään atomin energiatilojen erotusta vastaava fotoni, joka stimuloi lasertoiminnan käyntiin stimuloitun emission toimintaperiaatteen mukaisesti (sivu 5). Fotonit kimpoilevat pn-rajapinnan molemmiin puolin sijaitsevien peilien välissä ylläpitäen stimuloitua emissiota. Laserdiodi sisältää saman kaltaisen laserresonaattorin kuin ”perinteinen” laserlaite. Laserdiodin resonaattorin peilit ovat kuitenkin huomattavasti vähemmän heijastavia. [6, s. 622, 626–627, 657.]

Varhaisten laserdiodien ongelmana oli komponentin ylikuumentuminen ja tästä johtuva rikkoutuminen, koska laserdiodin populaatioinversion ylläpitämiseksi vaadittiin erittäin korkeita virtoja. Nykyään modernien laserdiodien käyttövirtaa on saatu laskettua, pienentämällä laserväliaineen kokoa. Virrantiheys on silti riittävä ylläpitämään populaatioinversiota, eikä ylikuumentamista pääse tapahtumaan. Laserväliaineen kokoa voidaan pienentää nostamalla varauksenkuljettajien tiheyttä tai nostamalla pn-rajapinnan optisen tehon tiheyttä. Näillä toimenpiteillä laserdiodin käyttöikä on saatu kasvatettua huomattavasti. [2, s. 182, 184.]

Laserdiodin puolijohdemateriaaleina voidaan käyttää lukuisia eri puolijohhteita, jotka toimivat laserväliaineena puolijohdelasereissa (liite 1). Laserdiodin tuottama valon väri eli valon aallonpituus riippuu laserin vapauttamasta energiasta pn-rajapinnassa. Laserväliaine määrittelee, kuinka energiapitoisia fotoneja pn-rajapinnassa emittoituu. Niin sanottua sinistä korkeaaenergistä laservaloa tuottava laserdiodin puolijohdeet (kuva 12) perustuvat GaN eli galliumnitridiyhdisteeseen, joka koostuu galliumista (Ga) ja typestä (N). Kyseisellä puolijohdeella tuotettu laservalo on värisävyltään lähempänä violettiä aallonpituudella 405 nm. [2, s. 186; 13.] Vaihtoehtoksi on kehitetty InGaN-puolijohdelasereita, jotka tuottavat täysin sinistä laservaloa aallonpituudella 450 nm. InGaN-puolijohdelasereissa galliumnitridiyhdisteeseen on seostettu Indiumia (In). [13.]



Kuva 12. InGaN/GaN-laserdiodin lasersirua kuvaava pn-puolijohderakenne [16].

3.2.3 Keltafosforipeili

Keltafosforipeili on laserlisävalojen osa, jonka avulla puhdas laservalo suodatetaan silmälle vaarattomaksi epäkoherentiksi valoksi. Samalla suodattuu silmälle haitallisia uv-valoaaltoja. Sininen laservalo suodattuu, kun sen säde ohjataan keltafosforipeilin kautta, jolloin keltafosforin molekyylit absorboivat korkeaenergisien laservalon fotonit ja emittoivat matalaenergisempää valkoista valoa. Tätä toimintaa kutsutaan fluoresenssiksi. Kyseistä tekniikkaa käytetään laserlisävalojen laseryksikön lisäksi yleisesti valkoista valoa tuottavissa LEDeissä. Keltafosforipeili on laserlisävalojen tärkein turvallisuusvaruste, jolla pidetään huoli, ettei silmälle haitallista laservaloa pääse ulos komponentista. [6, s. 619–620; 12; 13; 14, s. 15–16; 17.]

4 Laserturvallisuus

4.1 Yleistä

Laservalon ominaisuuksien ansiosta lasersäteellä voidaan siirtää suuria määriä energiaa pienelle pinta-alalle. Tämä energia ylittää herkästi erilaisten kudosten, kuten silmän verkkokalvon tai ihon vauriokynnyksen. Laserlaitteiden käytössä piilee riskejä, joten lasersäteilylle on asetettu altistusrajat. IEC/EN 60825-1 -standardissa laserlaitteet on luokiteltu turvallisuusluokkiin, niiden aiheuttamien terveystarpeiden pohjalta. Lasersäteilyn vaikutuksia biologiaan on tutkittu 1960-luvulta lähtien, heti ensimmäisten lasereiden valmistuttua. Tutkimustyön ansiosta on saatu kattavaa tietoa millaisilla ja millaisilla tehoilla vaurioita lasersäteilystä aiheutuu silmille tai ihokudokselle. Tutkimustulosten avulla lasersäteilylle on voitu määrittää tarkat altistusrajat. [18, s. 76.]

Oleellista lasersäteilyn vaikutuksessa kudokseen on, kuinka suuri määrä energiaa siihen absorboituu ja millä aallonpituudella laser säteilee. Lasersäteilyn altistusrajat sekä voimakkuutta altistuneen silmän tai ihon alueella kuvataan energiatiheydellä J/m^2 ja irradianssilla eli tehotiheydellä W/m^2 . [18, s. 77.]

Näkyvän valon (400–780 nm) ja lähi-infrapunasäteilyn (780–1400 nm) aallonpituuksilla toimivat laserit ovat vaarallisia erityisesti silmän verkkokalvolle (liite 1).

Silmä on kehittynyt toimimaan juuri näillä valon aallonpituuksilla, joten silmän etuosat eivät niitä kykene vaimentamaan. Näkyvän valon aallonpituudella toimivan laserin säteilyenergia pääsee kohdistumaan hyvin pienelle pinta-alalle silmän verkkokalvolle, jolloin verkkokalvo vaurioituu herkästi. Vaurion vakavuuteen vaikuttaa suuresti, mihin kohtaa verkkokalvoa lasersäde fokusoituu. Lisäksi silmässä vallitseva tarkennustila ja lasersäteen sisältämä energia vauriohetkellä vaikuttavat olennaisesti vaurion suuruuteen. Erityisesti pulssilaserit ovat jatkuvatoimisia lasereita vaarallisempia, koska niiden lasersäteen sisältämät energiamäärät saattavat olla todella korkeita. [18, s. 77–79.] Lasersäteilyn aiheuttamat vauriot silmässä voivat olla

- sokea täplä verkkokalvossa
- näön heikkeneminen tai sumentuminen
- näön menetys (erittäin tehokkaat pulssilaserit).

4.2 Standardit

4.2.1 SFS-EN 60825-1:2014

SFS-EN 60825-1 on suomalainen lasertuotteiden turvallisuusstandardi, jossa määritetään lasersäteilyn säteilyrajat aallonpituuden ja altistumisajan perusteella. SFS-EN 60825-1 -standardi perustuu kansainvälisen sähköalan IEC 60825-1 -standardiin. Markkinoilla olevat ominaisuuksiltaan ja tehoiltaan eroavat laserlaitteet määritellään turvallisuusluokkiin: 1, 1M, 1C, 2, 2M, 3R, 3B ja 4. [18, s. 96; 20.]

Luokka 1

Luokkaan 1 luokitellut laserit ovat matalatehoisia ja ne toimivat UV-säteilyn, näkyvän valon sekä infrapunasäteilyn aallonpituuksilla 180–1000 nm. Käytännössä luokan 1 laserlaitteen säteilylle altistuminen ei aiheuta vaaraa normaalitilanteissa edes pitkällä altistumisajoilla, eikä säteiltä suojaustoimenpiteitä tarvita. Tyypillisesti lasten lelut, jotka sisältävät laserlaitteen ovat luokan 1 lasereita. Luokan 1 lasereille suurin sallittu jatkuva säteilyteho on 0,39 mW.

Lisäksi luokkaan 1 kuuluu laitteita, jotka voivat sisältää säteilyteholtaan tehokkaamman ylempään turvallisuusluokkaan kuuluvan laserin, joka on koteloitu niin, ettei lasersäteilyä pääse laitteen ulkopuolelle. Tällöin niiden käyttöohjeissa tulee olla varoitus, ettei suoja-koteloita tai sen osaa saa avata. Tällaisten laitteiden huolto- ja korjaustoimenpiteet tulee teettää ammattihenkilöllä. [18, s. 99; 20.]

Luokka 1M

Luokkaan 1M luokitelluille lasereille suurin sallittu jatkuva säteilyteho on 500 mW, ja ne toimivat UV-säteilyyn, infrapunasäteilyyn sekä näkyvän valon aallonpituuksilla. Vaikka luokkaan 1M kuuluvan laserin suurin sallittu kokonaisteho tai pulssienergia ylittää usein luokan 1 laserille sallitut arvot, on luokan 1M laserin tuottama lasersäde levinyt tai sitä on levitetty optisesti. Toisin sanoen lasersäde on hajonnut eli sen koherenttisuusarvo on alhaisempi, jolloin se ei pääse fokusoitumaan suoraan silmään ja altistumisrajat eivät ylity.

Luokan 1M laserlaitteessa on kuitenkin olemassa säteilyvaara, jos sädettä katsotaan optisilla apuvälineillä, jolloin säteellä on mahdollisuus fokusoitua pienemälle pinta-alalle. Optisia apuvälineitä ovat mm. kiikarit, kaukoputket ja suurennuslasit. Valmistaja voi ilmoittaa mahdollisesti vaarallisista optisista apuvälineistä laitteen käyttö- ja turvallisuusohjeessa. Luokan 1M lasereita käytetään langattomassa tiedonsiirrossa. M-kirjain tulee englannin kielen sanasta "magnification", suomeksi suurennus tai suurennuskyky. [18, s. 99; 20.]

Luokka 1C

Luokkaan 1C luokitellun laserlaitteen säteily voi ylittää ihoaltistukselle määritetyt enimmäisarvot, jolloin ihovauriot ovat mahdollisia. Laitteet on kuitenkin suunniteltu niin, etteivät ne ole vaaraksi silmille. Luokan 1C lasereita käytetään yleensä ihon kosmeettisessa käsittelyssä ja ne voivat sisältää jopa luokan 3B tai 4 laserin. C-kirjain tulee englannin kielen sanasta "contact", suomeksi kosketus tai kontakti. [20.]

Luokka 2

Luokkaan 2 luokiteltujen lasereiden suurin sallittu säteilyteho on 1 mW, ja ne toimivat näkyvän valon aallonpituuksilla 400–700 nm. Luokan 2 laserit ovat matalatehoisia, mutta voivat aiheuttaa silmävaurioita, jos säde kohdistetaan suoraan silmään ja sen katsomista pitkitetään. Silmän suojautumisrefleksin katsotaan normaalitilanteessa suojaavan silmää. Sen reagoimisaika on noin neljännes sekunti (0,25 s). Viivakoodinlukijat ja Suomessa sallitut laserosoittimet sisältävät luokan 2 laserin. [18, s. 100; 20.]

Luokka 2M

Luokkaan 2M luokitellut laserit säteilevät luokan 2 laserilaitteiden kanssa samoilla valon aallonpituuksilla. Laserin suurin sallittu jatkuva säteilyteho on 500 mW, lisäksi lasersäteen hajonneisuus on sama luokan 1M lasereiden kanssa. Silmävaurio on mahdollinen, jos sädettä katsotaan optisella apuvälineellä tai pidempään, kuin silmän suojautumisrefleksillä kestää reagoida. Mahdollisesti vaarallista optisista apuvälineistä voidaan ilmoittaa valmistajan käyttö- ja turvallisuusohjeessa samalla tavalla, kuin luokan 1M laitteissa. Mm. rakennustöissä käytettävät suuntaus- ja tasosuuntauslaserit kuuluvat luokan 2M laserilaitteisiin. [18, s. 100; 20.]

Luokka 3R

Luokkaan 3R luokitellut laserit voivat ylittää luokan 1 laserien maksimisäteilyntehon (0.39 mW) viisinkertaisesti näkymättömän säteilyn aallonpituuksilla, tällöin suurin säteilyteho on siis 1,95 mW. Näkyvän valon aallonpituuksilla luokan 3R lasersäde voi ylittää viisinkertaisesti luokan 2 laserilaitteen suurimman säteilyntehon (1 mW), eli suurin sallittu säteilyteho on tällöin 5 mW. Luokan 3R lasersäde voi aiheuttaa pysyvän silmävaurion osuessaan suoraan suojaamattomaan silmään tai heijastuessaan sileästä kirkkaasta pinnasta, kuten esimerkiksi peilistä. Rakentamisessa käytettävät mittauslaserit voivat kuulua luokkaan 3R. [18, s. 100; 20.]

Luokka 3B

Luokkaan 3B luokiteltujen lasereiden suurin sallittu jatkuva säteilyteho on 500 mW ja ne ylittävät luokan 3R säteilyrajat. Luokan 3B laserit aiheuttavat silmävaurion kohdistuneena suoraan tai peilautuneena silmään, lisäksi se voi synnyttää ihoon pieniä ihovaurioita. Tutkimuskäytössä olevat laserit kuuluvat usein luokkaan 3B. [18, s. 100; 20.]

Luokka 4

Luokkaan 4 luokitellaan kaikki laserit, joiden säteilyteho ylittää muiden luokkien suurimmat säteilyrajat, eikä niille ole asetettu ylärajaa. Luokan 4 lasersäde voi synnyttää iholle palovamman hetkessä ja se voi vaurioittaa silmää jo hajaheijastuksesta. Luokan 4 laser-säteily voi olla niin voimakasta, että sillä voi kohdistettuna sytyttää kappaleita tuleen tai muuttaa se plasmaksi. Käyttökohteita tällaisilla lasereilla on laserkirurgiassa, metallin leikkauksessa ja yleisoesityksissä. [18, s. 101; 20.]

Luokan 3B ja 4 laserluokkien laserlaitteet luokitellaan suuritehoisiin laserlaitteisiin ja niille vaaditaan Suomessa erilliset käyttöluvut, jos lasersäteet kulkevat alueella, jossa liikkuu tai oleskelee väestöä. [18, s. 101.]

4.2.2 SFS-EN 62471:2009

Valaisinkäyttöön suunniteltujen lasereiden fotobiologista turvallisuutta voidaan arvioida valaisinstandardin SFS-EN 62471 vaatimalla tavalla. Tällöin edellytetään, että laserlaite on tarkoitettu käytettäväksi tavanomaisten valaisimien tavoin ja laserlaitteesta ulos tuleva valo alittaa SFS-EN 60825-1 -standardin kohdan 4.4 määritellyt sallitun radianssin eli säteilyvirran raja-arvot. Laservalaisimen tuottama radianssi L_t ilmoitetaan valonlähteen kulmakoon α suhteen

$$L_T = \frac{1MWm^{-2}sr^{-1}}{\alpha}. \quad (7)$$

SFS-EN 60825-1 -standardin määräämä sallittu radianssiarvo tulee olla arvojen $200MWm^{-2}sr^{-1}$ ja $10MWm^{-2}sr^{-1}$ sisällä, kulmakoon ollessa 0,005–1 rad. [20.]

Raja-arvot alittava laserlaite luokitellaan silloin luokkaan 1, vaikka laite sisältäisi SFS-EN 60825-1 -standardin mukaan jopa luokkaan 4 luokitellun laserlaitteen. Tuotteen koteloinnille, käytettävyydelle ja huoltoon liittyviin turvallisuusvaatimuksiin sovellettaisiin kuitenkin edelleen SFS-EN 60825 -standardiperheen standardeja. [19; 20.]

SFS-EN 62471 on suomalainen valaisimien ja valaisinjärjestelmien fotobiologista turvallisuutta arvioiva standardi. Standardi on suuriltaosin yhtäläinen kansainvälisen IEC/EN 62471 -standardin kanssa. Standardi määrittää riskit ja altistusraajat epäkoherenttia valoa aallonpituuksilla 200–3000 nm säteileville valaisimille. Altistusraajat ja riskit perustuvat säteilyn aiheuttamista fotobiologisista vaikutuksista silmille ja iholle.

Valaisimen fotobiologisen vaaran arvot mitataan siltä etäisyydeltä, jolla valaisin tuottama valaistusvoimakkuus on 500 lx. Mittaus suoritetaan kuitenkin vähintään 200 mm:n päästä valonlähteestä. Testien perusteella valaisimelle annetaan riskiryhmä (taulukko 1). Riskiryhmissä vaaralliselle fotobiologiselle valolle altistumiselle on asetettu suojarajat altistumisaikojen perusteella.

- **Riskitön ryhmä.** Riskittömään ryhmään (vapautettu) lukeutuvan valaisin ei altista vaaralliselle fotobiologiselle säteilylle, eikä ylitä riskittömän ryhmän altistusrajoja.
- **Riskiryhmä 1.** Riskiryhmää 1 (alhainen riski) lukeutuva valaisin ei altista vaaralliselle fotobiologiselle säteilylle normaalissa käytössä ylittää riskittömän ryhmän, mutta alittaa riskiryhmän 1 altistusraajat.
- **Riskiryhmä 2.** Riskiryhmää 2 (kohtalainen riski) lukeutuva valaisin ei altista vaaralliselle fotobiologiselle säteilylle silmän suojausrefleksin tai säteilyn aiheuttaman termisen epämukavuuden vuoksi. Valaisin ylittää riskiryhmän 1, mutta alittaa riskiryhmän 2 altistusraajat.
- **Riskiryhmä 3.** Riskiryhmään 3 (korkea riski) lukeutuva valaisin ylittää riskiryhmän 2 fotobiologisen säteilyn altistusraajat ja saattaa altistaa vaaralliselle fotobiologiselle säteilylle, jopa hetkellisellä tai lyhyellä altistusajalla. [20.]

Taulukko 1. SFS-EN 62471 -standardin mukainen riskiryhmiin jako ja vaaramuotojen altistusraajat [20].

		Riskitön ryhmä	Riskiryhmä 1	Riskiryhmä 2	Riskiryhmä 3
Fotobiologisen vaaran muoto	Aallonpituusalue (nm)	Altistusraja (s)	Altistusraja (s)	Altistusraja (s)	Altistusraja (s)
Valokemiallinen UV-säteily	200-400	< 30000	< 10000	< 1000	-
Lähi ultraviolettisäteily	315-400	< 1000	< 300	< 100	-
Sininen valo verkkokalvolle	300-700	< 10000	< 100	< 0,25	-
verkkokalvon lämpäminen	380-1400	< 10	< 10	< 0,25	-
Infrapunasäteily silmälle	780-3000	< 1000	< 100	< 10	-

4.3 Käyttöturvallisuus

Suomessa markkinoilla olevien laserlaitteiden käyttöä ja turvallisuutta valvoo Säteilyturvakeskus STUK, säteilylain 859/2018 määräämällä tavalla. Lasertuotteita voidaan maahantua ilman lupaa. Laserlaitteen maahantuoja on kuitenkin vastuussa siitä, että maahantuotu tuote on turvallinen ja täyttää sille asetetut vaatimukset. Laserlaitteiden käyttöturvallisuusvaatimukset määräytyvät sille määritellyn turvallisuusluokan sekä laitekohtaisien standardien mukaan. Laserlaitteen turvallisuudesta vastaa puolestaan valmistaja. Laitteen vaatimustenmukaisuus osoitetaan vaatimuksenmukaisuusvakuutuksella ja tarvittaessa tehtävällä laitestandardiin perustuvalla testauksella, jonka testausraportti osoittaa laitteen täyttävän sille asetettujen standardien asettamat vaatimukset. [21; 22.]

5 Lainsäädäntö

5.1 Säteilylaki 859/2018

Säteilylaki on laadittu luomaan perusteet säteilyturvallisuudelle ja sen valvonnalle. Lain keskeisimmät tavoitteet ovat suojata terveyttä sekä ympäristöä säteilyn aiheuttamilta haitoilta ja minimoida siitä syntyviä riskejä. Säteilylain ja sen määräysten noudattamisesta vastaa Suomessa lain määrittämä valvontaviranomainen Säteilyturvakeskus STUK. [19.]

Säteilylain luvussa 8 säädetään perusteet tuotteen säteilyturvallisuudelle. Pykälässä 56 määrätään, kuka on vastuussa myytävän tuotteen turvallisuudesta: ”Toiminnanharjoittajan, joka valmistaa, tuo maahan, saattaa markkinoille, tarjoaa, pitää kaupan, myy tai muuten luovuttaa säteilylähteitä tai säteilytoiminnan turvallisuuteen liittyviä varusteita ja muita tuotteita (*tuote*), on voitava osoittaa, että tuote on turvallinen” [21]. Lisäksi pykälän 58 ensimmäisessä momentissa säädetään: ”Valvontaviranomainen arvioi 56 §:ssä tarkoitetun tuotteen säteilyturvallisuuden sitä koskevan tuoteturvallisuuslainsäädännön nojalla tai sellaisten standardien mukaisesti, joita koskeva viittaus on julkaistu Euroopan unionin virallisessa lehdessä” [21]. Näitä valvontaviranomaisen määrittämiä laserlisävalojen laserlaitteen osalta turvallisuutta koskevia standardeja ovat SFS-EN 60825-1 ja SFS-EN 62471 [19].

5.2 Ajoneuvolaki 1090/2002

Ajoneuvolaki 1090/2002 luo säädöspohjan tieliikennelaissa (267/1981) määritellyn mukaisella tiellä ja muualla käytettäville ajoneuvoille sekä niiden varusteille, järjestelmille, osille ja erillisille teknisille yksiköille. Ajoneuvolaissa määrätty tyyppihyväksyntäviranomaisena Suomessa toimii Liikenne- ja viestintävirasto Traficom (entinen Trafi). Laissa myös määritellään osaltaan säännöt liikenteeseen hyväksymisen perusteista, jotka koskevat ajoneuvon asennettavia lisävaloja. [23.]

Ajoneuvolain luvussa 1. pykälän 6 ensimmäisessä kohdassa ajoneuvon, järjestelmän, osan tai erillisen teknisen yksikön hyväksymisestä liikenteeseen on säädetty:

Ajoneuvon, järjestelmän, osan, erillisen teknisen yksikön ja varusteen käyttö liikenteessä on kielletty, jollei ajoneuvotyyppiä tai yksittäistä ajoneuvoa, järjestelmää, osaa, erillistä teknistä yksikköä tai varustetta ole asianmukaisesti hyväksytty liikenteeseen. Hyväksyntää hakevan on esitettävä hyväksyntää varten säännöksissä ja määräyksissä edellytetyt asiakirjat ja muut selvitykset [23].

Mikäli tieliikenteeseen tarkoitettua järjestelmästä, osasta, erillisestä teknisestä yksiköstä tai varusteesta ei löydy lainmukaista hyväksyntää, on pykälän 6 kolmannessa kohdassa määritelty:

Järjestelmää, osaa, erillistä teknistä yksikköä ja varustetta, joka ei ole tämän lain ja sen nojalla annettujen säännösten ja määräysten mukainen ja jota ei ole näiden säännösten ja määräysten mukaisesti varustettu hyväksyntämerkinnällä tai CE-merkinnällä, jos sellaista on säännöksissä tai määräyksissä edellytetty, ei saa tietä maastoliikennekäyttöön tarkoitettuna myyntitarkoituksessa tuoda maahan eikä valmistaa Suomessa myytäväksi, pitää kaupan taikka myydä tai muuten luovuttaa [23].

Ajoneuvolain luvut 5, 5a, 5b sekä 5c sisältävät perussäädökset tyyppihyväksynnöistä ja niiden vaatimustenmukaisuudesta sekä vaatimukset tyyppihyväksyntöjä tekeville laitoksille, joiden pohjalta Liikenne- ja viestintävirasto Traficom määrittää tyyppihyväksyntätoimintansa [23].

Luvun 5. pykälässä 32 määrätään tyyppihyväksyntävelvollisuus ”Liikenneturvallisuuden ja ympäristönsuojelun kannalta keskeisiltä ajoneuvon käyttöön liittyviltä osilta, järjestelmiltä ja erillisiltä teknisiltä yksiköiltä sekä varusteilta edellytetään tyyppihyväksyntää. Valtioneuvoston asetuksella annetaan tarkempia säännöksiä tyyppihyväksyntävelvollisuudesta” [23].

5.3 Trafi/437519

Trafi/437519 on kansallinen Liikenne- ja viestintäviraston laatima määräys ”Autojen ja niiden perävaunujen teknisistä vaatimuksista” [24], jonka viimeisin versio on tullut voimaan 1.7.2018. Määräys perustuu ajoneuvolain (1090/2002) pykäliin: 27 a, 29, 36, 50 c, 50 e, 60 a, 61 a ja 62. Määräystä sovelletaan ”auton ja sen perävaunun käyttöön liittyvistä hyväksyntää edellyttävistä osista, järjestelmistä ja erillisistä teknisistä yksiköistä sekä muista varusteista, kuin renkaiden nastoista” [24]. Lisävalojen asennuksen osalta kyseisen määräyksen keskeiset vaatimukset löytyvät kohdasta 3, jossa määrätään valaisimien ja heijastimien vaatimustenmukaisuus E-säännön mukaisesti. Kohdassa 3.3.1 asennuksen suhteen määrätään:

Kohdissa 3.3.2 ja 3.3.3 tarkoitettujen valaisimien ja heijastimien väriin, muotoon, sijoitukseen, näkyvyyteen ja suuntaukseen sovelletaan E-säännön n:o 48 vaatimuksia. Lumen auraukseen varustetun auton lisälähi-, lisäkauko-, lisäsuunta- ja lisäetuvalaisimet saa kuitenkin asentaa sellaiselle korkeudelle kuin olosuhteet vaativat, lähivalaisimet kuitenkin niin suunnattuina, etteivät ne tarpeettomasti häiritse vastaanulijoita. Lisälähivalaisimet on asennettava niin, että vain varsinaiset lähivalot tai lisälähivalot voivat olla kytkettyinä ajon aikana [24].

Kohdassa 3.3.2 määrätään ajoneuvon pakolliset valaisimet ja kohdassa 3.3.3 määrätään kansallisesti Suomessa sallitut ylimääräiset valaisimet, jotka voidaan asentaa E-säännössä 48 määrättyjen valaisimien lisäksi: ”Ylimääräinen kaukovalaisin, jos kaukovalaisimien, jotka voidaan kytkeä päälle samanaikaisesti, yhteinen voimakkuus ei ylitä E-säännön n:o 48 mukaista vertailuarvoa 100” [24]. Lisäksi sallitaan ”Lumen auraukseen varustetussa autossa kaksi ylimääräistä ylös asennettua lisälähi-, lisäkauko-, lisäsuunta- ja lisäetuvalaisinta” [24].

5.4 Tyypin hyväksynnät

Tyypin hyväksyntä on kansainvälinen, vaihtoehtoisesti kansallinen ajoneuvon tai sen komponenteille määrätty hyväksyntä, jolla tuotteen valmistaja pystyy varmistumaan tuotteen kelpoisuudesta tieliikenteessä. Tyypin hyväksynnän ajoneuvolle tai sen komponenteille antaa tunnustettu hyväksyntäviranomainen, joka tarkastaa tuotetta koskevat tekniset vaatimukset. Tyypin hyväksytty ajoneuvo tai sen komponentti on kelvollinen käytettäväksi tieliikenteessä kaikissa niissä maissa, jotka ovat kyseisen tyypin hyväksynnän tunnustaneet valtionsa lainsäädännössä.

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom vastaa tyypin hyväksyntäviranomaisena Suomessa hyväksytyistä ja tunnustetuista tyypin hyväksyntöjä laillisesti tekevästä tutkimuslaitoksista sekä asiantuntijoista. Suomen lisäksi tyypin hyväksyntöjä tunnustetaan myös muissa EU- ja ETA-maissa sekä Venäjällä, Aasiassa, Etelä-Amerikassa ja Afrikassa.

Yksinään ei riitä, että tuote täyttää tyypin hyväksynnässä määrätyt tekniset ominaisuudet, vaan tyypin hyväksyttävän tuotteen tuotannolle on myös määritelty joitakin erityisvaatimuksia. Hyväksyntää hakevan valmistajan täytyy pystyä todentamaan, että sen tuotteen sarjatuotanto tuottaa tarpeeksi tasalaatuista tuotetta, jotta se täyttää edelleen tyypin hyväksynnän määrittelemät vaatimukset. Jos tuotetta ei ole tarkoitus valmistaa sarjatuotantona, on valmistajalla mahdollisuus hakea myös tuotteelleen yksittäishyväksyntää. Tyypin hyväksyntää voi valmistajan lisäksi hakea valmistajan tähän valtuuttama edustaja. Tyypin hyväksynnät voidaan jakaa kolmeen osaan sääntelyperustan mukaan. [25.]

5.4.1 EU- ja EY-tyyppihyväksyntä

EU- ja EY-tyyppihyväksyntä voidaan myöntää kokonaisille ajoneuvoille, tietyille ajoneuvojen komponenteille tai erillisille teknisille yksiköille. EU- ja EY-tyyppihyväksyntöjen pohjana on Euroopan Unionin lainsäädäntö ja niiden direktiivit. Tällaisen tyyppihyväksyntyn tuotteen markkinoille tuontia, tai käyttöönottoa ei saa kieltää missään EU-maassa. Lisäksi Norja ja Sveitsi ovat tunnustaneet EU- ja EY-tyyppihyväksynnän. [25.]

5.4.2 E-tyyppihyväksyntä

E-tyyppihyväksyntä on moottoriajoneuvoille ja niiden osille Genevessä 20.3.1958 Yhdistyneiden kansakuntien tekemä sopimus, jonka tarkoituksena on yhdenmukaistaa hyväksymisehtoja ja hyväksyntöjen tunnustamista valtiosopimuksessa 70/1976 asetettujen sääntöjen mukaan.

Moottoriajoneuvojen varusteet ja niiden osat ovat jaettu E-sääntöihin, joilla on oma numeronsa 1-160. Jokainen sääntö tulee voimaan YK:n valtioissa, jotka ovat ilmoittaneet YK:n pääsihteeristölle hyväksyvänsä kyseisen säännön. [25.]

5.4.3 Kansallinen tyyppihyväksyntä

Kansallinen tyyppihyväksyntä voidaan myöntää, jos tietylle ajoneuvolle tai sen komponentille ei ole olemassa yhtenäistä kansainvälistä lainsäädäntöä. Tällöin tyyppihyväksyntä tehdään kansallisen eli valtion oman lainsäädännön mukaan. [25.] Tällaisia tieliikenteeseen rekisteröitäviä ajoneuvoja ja niiden komponentteja ovat

- moottorityökoneet
- maastoajoneuvot
- nastarenkaat
- alkolukot.

5.5 Laserlisävalojen tyyppihyväksyntä

Laserlisävalot kategorioidaan moottoriajoneuvon varusteeksi ja ajoneuvon kaukovalaisimiksi. Asennuksen suhteen kansallisesti määräyksen Trafi/437519 mukaan sovelletaan E-sääntöä 48. Kyseisen säännön mukaan ajoneuvokäyttöön asennettavat kaukovalot tulee olla tyyppihyväksytyt, joko E-säännön 31 mukaan, joka asettaa säännöt ajoneuvon halogeeniajovalaisimille, E-säännön 98 mukaan, joka asettaa säännöt ajoneuvon kaasupurkausvaloille tai E-säännön 112 mukaan, jossa määritellään säännöt ajoneuvon LED-valaisinyksiköille. Laserlisävalojen tyyppihyväksyntämuodoksi asettuu tällöin E-tyyppihyväksyntä. [24; 26.]

Kummassakaan laserlisävaloissa ei käytetä halogeeni- tai kaasupurkausvalotekniikkaa, joten laserlisävalojen tyyppihyväksynnässä sovellettavaksi vaihtoehdoksi jää E-sääntö 112. Laserlisävalojen sisältämien LED-valaisimien lisäksi voidaan lisävalojen laseryksiköön soveltaa E-säännön 112 vaatimuksia. Laserlisävalojen asennuksen suhteen sovelletaan E-sääntöä 48 ”Yhdenmukaiset säädökset ajoneuvojen valaisimien ja valosignaali-laitteiden asentamisen suhteen”. [26.]

5.5.1 E-sääntö 48

E-säännön 48 luvun 5. kohdassa 5.15. määrätään, että kaukovalojen säteilevän valon on oltava väriltään valkoista. Luvun 2 kohdassa 2.29.1. määritetään valkoisen valon sävy kromaattisten x, y -koordinaattien avulla (liite 5). Säännöt kaukovalaisimien asennuksen suhteen alkavat luvusta 6. Laserlisävalojen tyyppihyväksynnän suhteen keskeisiä kohtia säännössä ovat:

Kohta 6.1. Ajoneuvon kaukovalojen tulee olla hyväksytyt E-sääntö 31, 98 tai 112 mukaan. Kohdassa 6.1.2 asennettuja kaukovaloja saa ajoneuvossa olla parillinen määrä, joko 2 tai 4, lukuun ottamatta luokan A ajovalaisimia. Lisäksi kohdassa 6.1.9.1 määrätään enimmäisvalovoimakkuus yhtä aikaa päälle kytkettävien kaukovalojen valovoimakkuudesta. Tämä valovoimakkuus saa enimmillään olla 430000 cd, joka vastaa referenssi- eli vertailuarvoa 100. [27.]

5.5.2 E-sääntö 112

E-sääntö 112 käsittelee epäsymmetristä valoa tuottavia ajovalaisimia, jotka sisältävät lähi- tai kaukovalon tai molemmat [28]. Säännön 112 keskeisiä kohtia laserisävalojen tyyppihyväksynnän suhteen ovat seuraavat:

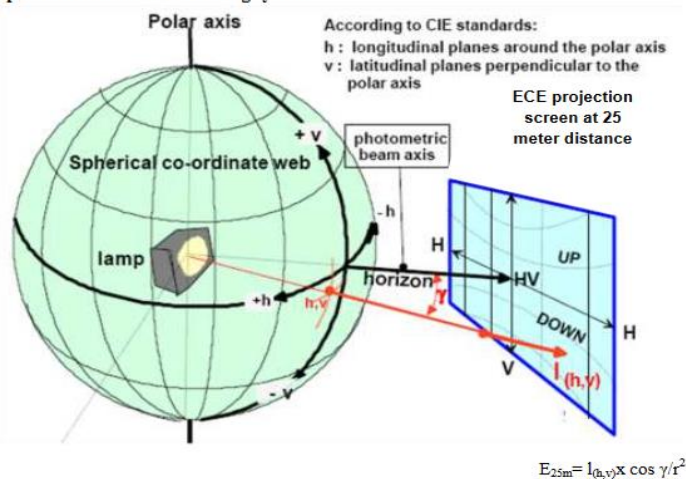
Kohdassa 6.1.2 määritellään yleiset vaatimukset ajovalaisimen valovoiman mittaamiselle (kuva 13):

Valovoima mitataan 25 m:n etäisyydeltä käyttäen valokennoa, jonka tehoalue on sivuiltaan 65 mm:n kokoisen neliön sisällä. Piste HV on pystysuoran napa-akselin sisältävän koordinaattijärjestelmän keskipiste. Linja h kulkee vaakasuorassa pisteeseen HV kautta [28].

Spherical coordinate measuring system and test point locations

Figure A

Spherical coordinate measuring system



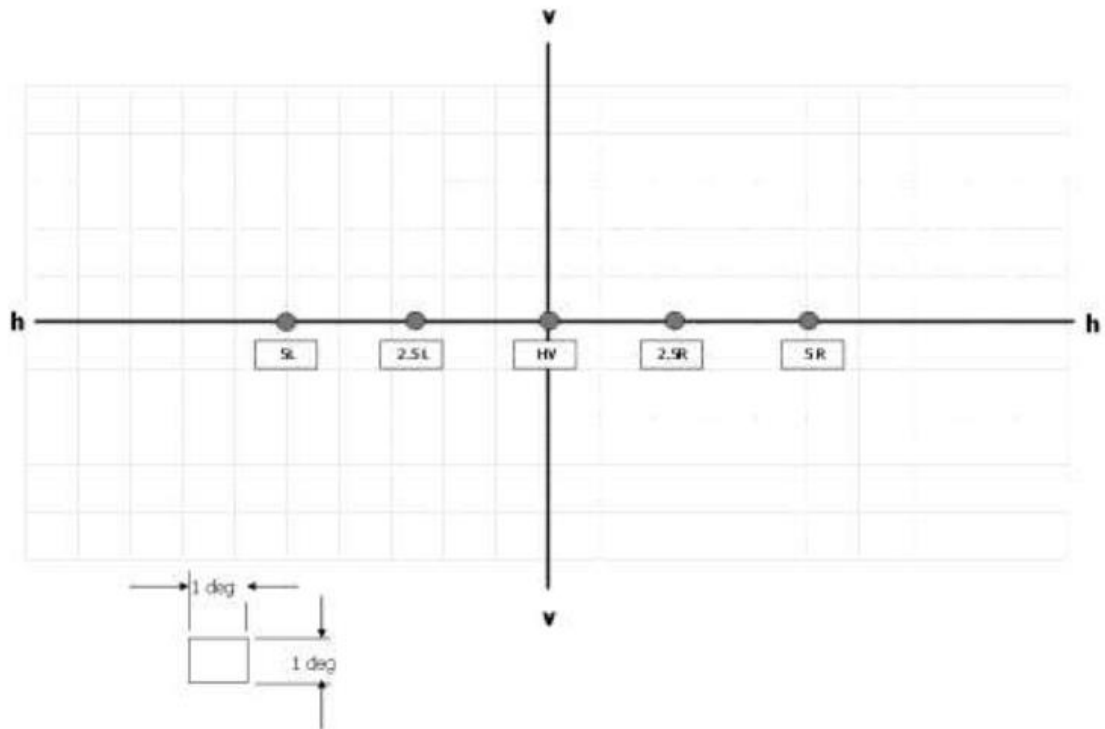
Kuva 13. Pallokoordinaatiston mittausjärjestelmä [28].

Kaukovalolle annetut yksilöidyt määräykset alkavat kohdasta 6.3:

Ainoastaan kaukovalon sisältävän ajovalon valovoiman mittauksessa on valaisin kohdistettava siten, että suurimman valovoimakkuuden omaava pinta-ala on kohdistettu H-H ja V-V linjojen leikkauspisteeseen. Sellaisen valaisimen täytyy täyttää vain kohdan 6.3 kohdassa tarkoitetut vaatimukset. Jos kaukovalon tuottamiseen käytetään useampaa kuin yhtä valonlähdettä, valovoiman enimmäisarvo (I_M) on määritettävä käyttämällä kaikkia valon tuottamiseen osallistuvia valonlähteitä [28].

Lisäksi kaukovalon valovoimakkuuden jakaumalle määritellään vaatimukset kaukovalojen testauspisteiden (kuva 14) ja (taulukko 2) mukaan.

Driving-beam test points



Kuva 14. Kaukovalon testauspisteet [28].

Taulukko 2. Valovoimakkuuden testauspisteiden koordinaatit sekä vaadittavat valovoimakkuudet [28].

		<i>Class A Headlamp</i>	<i>Class B Headlamp</i>
<i>Test point</i>	<i>Angular coordinates - Degrees</i>	<i>Required luminous intensity cd</i>	<i>Required luminous intensity cd</i>
		<i>Min</i>	<i>Min</i>
I_{max}		27,000	40,500
H-5L	0.0, 5.0 L	3,400	5,100
H-2.5L	0.0, 2.5 L	13,500	20,300
H-2.5R	0.0, 2.5 R	13,500	20,300
H-5R	0.0, 5.0 R	3,400	5,100

”6.3.3.1 Suorien h-h ja v-v leikkauspisteen HV on sijaittava alueella, jonka rajaa isoluk-sikäyrä, joka vastaa 80 prosenttia enimmäisvalovoimasta (I_{max})” [28].

Kaukovalaisimen fotometrisessä mittauksessa käytetään CIE-standardin mukaista va-laistusvoimakkuuden pistemittaustekniikkaa, jossa valovoima jakautuu tietylle mittata-solle, joko horisontaalasti tai vertikaalasti (kuva 13 ja kuva 14) [29]. Ajoneuvon kaukova-laisimien mittaus perustuu pistemittauksen yhtälöön

$$E_{25m} = \frac{I_{(h,v)} \cos \gamma}{r^2}, \quad (8)$$

jossa E_{25m} on valaistusvoimakkuus pisteessä HV lukseina, $I_{(h,v)}$ on valaisimen valovoi-makkuus nuolen osoittamaan suuntaan, γ on valon tulokulma ja r^2 on valaisimen etäi-syyden neliö mittaustasoon nähden [28]. E-säännön mukainen valaisimien virallinen tes-taus vaatii kulmafotometrisen (goniofotometri) mittalaitteiston.

Yksittäisen kaukovalon maksimivalovoimakkuus I_M ei saa missään tilanteissa ylittää 215000 cd. Lisäksi maksimivalovoimakkuudelle lasketaan referenssiluku I'_M jakamalla I_M arvo luvun 4300 suhteen (9). Tulokset pyöristetään referenssilukuihin: 7.5, 10, 12.5, 17.5, 20, 25, 27.5, 30, 37.5, 40, 45 ja 50. Kaukovalon mitattu vertailuarvo eli referenssi-luku täytyy ilmoittaa valaisimen tyyppihyväksyntämerkinnässä. [28.]

5.5.3 Tyyppihyväksynnässä huomioitavaa

Laserlisävalojen valmistajien ilmoittamista suureista (liite 2 ja liite 3) voidaan laskea va-lon intensiteetti eli valovoimakkuus (I) kertomalla valaisimen valaistusvoimakkuus (E) valokantaman (D) neliöllä

$$I = E \times D^2. \quad (9)$$

Prototyypin 1. -laservaloissa laskettu valon intensiteetti olisi tällöin 4405801 cd, joka ylit-tää E-säännössä määrätyn tyyppihyväksyntätestauksen valon maksimi-intensiteetin yli 20 kertaisesti. Prototyypin 2. -laserlisävalojen laskennallinen valon intensiteetti olisi puo-

lestaan 956484 cd, joka myös ylittää vastaavan valon maksimi-intensiteetin yli 4 kertaisesti. Valmistajien omiin mittauksiin on kuitenkin syytä asennoitua varauksella, sillä valmistajat saattavat ilmoittaa tuotteidensa suorituskyvystä turhan optimistisia lukemia. Lisäksi laskennallisilla arvoilla saadaan korkeintaan suuntaa antava kuva valaisimien valaistusominaisuuksista. Valaisimien virallisen tyyppihyväksynnän mukainen testaus vaatisi goniofotometrisen mittaustaitteiston. Tiedossa ei myöskään ole millaisella laitteistolla valmistajat ovat valaisimaan testanneet.

5.6 Tyyppihyväksyntäprosessi

Tyyppihyväksyntäprosessi on jaettu seitsemään vaiheeseen, joiden vaatimukset tyyppihyväksyntää hakevan tuotteen tulee täyttää. Hyväksyntäprosessin vaiheet pysyvät samoina tyyppihyväksynnän sääntöperustasta riippumatta. [30.]

5.6.1 Tarpeellisuus

Tyyppihyväksyntäprosessi lähtee liikkeelle selvittämällä, tarvitseeko tieliikennekäyttöön valmistettu tuote ylipäättään tyyppihyväksyntää. Tyyppihyväksynnästä on kuitenkin hyötyä, jos tuote on tarkoitus lanseerata myös muissa EU-maissa.

EY- ja EU-tyyppihyväksytyt ajoneuvot ovat tieliikennelaillisia kaikissa EU-maissa ilman erinäisiä kansallisia lisävaatimuksia. Sama sääntö koskee E-hyväksytyjä ajoneuvon komponentteja ja lisävarusteita. Ajoneuvoihin asennettavien komponenttien ja järjestelmien tyyppihyväksyntävaatimukset löytyvät puitedirektiiveistä ja -asetuksista. [30.]

5.6.2 Tekniset vaatimukset

Tyyppihyväksyntää hakevan on syytä ottaa etukäteen selvää, millaista sääntelyä tyyppihyväksyttävään tuotteeseen sovelletaan, jotta ajoneuvon, järjestelmän tai sen osan käytämiselle tieliikenteessä ei koituisi rajoituksia. Tuotteen käyttökohteesta tai tarkoituksesta riippuen voi tuotteen testaukseen, teknisiin ominaisuuksiin ja toteutukseen liittyä lisävaatimuksia. Jälkikäteen tehtävät lisätestaukset aiheuttavat hakijalle ylimääräisiä kustannuksia ja viivästymisiä.

Tyyppihyväksyntää haettavasta tuotteesta edellytetään dokumentaatiota tyyppihyväksyntähakemuksen yhteydessä, jotta tutkimuslaitos saa tarvittavat tiedot tuotteen käyttötarkoituksesta. Dokumentaation avulla testauslaitos pystyy myös arvioimaan tuotteen kohdistuvan testauksen laajuuden ja tarvittaessa auttamaan hyväksynnän hakijaa. [30.]

5.6.3 Tuotannon vaatimuksenmukaisuuden valvonta

Ennen EY-, EU- tai E-tyyppihyväksynnän myöntämistä Liikenne- ja viestintävirasto Traficom edellyttää, että hakija solmii sopimuksen tuotannon vaatimustenmukaisuuden valvonnasta. Sopimus on tehtävä nimetyn tutkimuslaitoksen kanssa ja sopimus liitetään tyyppihyväksyntähakemusta koskeviin asiakirjoihin. Traficom voi tehdä hakijan kanssa sopimuksen tuotannon vaatimustenmukaisuuden valvonnasta, mikäli nimettyä tutkimuslaitosta ei löydy valvontaa suorittamaan.

Tuotannon vaatimustenmukaisuuden CoP (Conformity of Production) valvonnalla pidetään huoli, että valmistajalla tuotannossa olevat tuotteet vastaavat alkuperäisen hyväksytyyn tyyppiin kanssa. Uusien käyttöön otettavien tuotteiden on täytettävä voimassa olevat hyväksyntävaatimukset.

Hyväksynnän hakijan täytyy osoittaa Liikenne- ja viestintävirastolle, että se käyttää EN ISO 9001:2008, EN ISO 9001:2015 tai ISO TS 16949:2009 laadunhallintaa käsittelevien standardien mukaista laadunhallintajärjestelmää. Näin varmistutaan hyväksytyin ajoneuvon, järjestelmän tai sen erillisen osan vastaavan tyyppihyväksynnän mukaisuutta myös tuotannossa. [30.]

5.6.4 Tutkimuslaitoksen tekemä testaus

Ennen kuin tyyppihyväksyntää voidaan myöntää, on sen edellytyksenä hyväksytysti suoritettu tyyppihyväksyntätestaus. Testauksen tulee suorittaa tutkimuslaitos, jonka jäsenvaltion tyyppihyväksyntävirasto Liikenne- ja viestintävirasto on nimennyt.

Nimetty tutkimuslaitos on pätevä suorittamaan ajoneuvoille ja niiden komponenteille direktiivien, asetusten ja/tai E-sääntöjen mukaista testausta. Lisäksi nimetty tutkimuslaitos voi valvoa valmistajien tuotannon vaatimustenmukaisuutta. Nimetyt tutkimuslaitokset jaetaan direktiivin 2007/46/EY mukaisesti eri luokkiin A-D, niiden suorittaman toiminnan perusteella:

- **Luokka A.** Kun testit tehdään omissa, valmistajan tai kolmannen osapuolen tiloissa.
- **Luokka B.** Kun testien valvonta tehdään valmistajan tai kolmannen osapuolen tiloissa.
- **Luokka C.** Kun tarkastukset liittyvät tuotannon vaatimuksenmukaisuuteen ja valmistajan laadunhallintajärjestelmän valvontaan.
- **Luokka D.** Kun tarkastus, testaus tai tämän valvonta keskittyy tuotannon näytteisiin.

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom nimeää ja ilmoittaa tyyppihyväksyntäviranomaisena Suomessa direktiivien mukaista testausta tekevät tutkimuslaitokset EU-komissiolle. E-sääntöjen mukaista testausta tekevät tutkimuslaitokset ilmoitetaan puolestaan Yhdistyneiden kansakuntien pääsihteerille.

Tutkimuslaitoksen täytyy antaa testattavasta tuotteesta tutkimusraportti, joka kirjoitetaan testitulosten pohjalta. Tutkimusraportissa käy ilmi, minkä säädöksen ja säädösversion mukaisesti testaus on suoritettu sekä tutkimuslaitostunnus. Testitulosten esittämiselle on asetettu säädöksissä usein muotovaatimuksia. [30.]

5.6.5 Tyyppihyväksyntähakemus

Tyyppihyväksyntähakemuksen tekeminen suositellaan tehtäväksi sähköisesti Traficommin sähköisellä lomakkeella. Sähköiset hakemukset kirjautuvat automaattisesti Traficommin asianhallintajärjestelmiin. [30.]

5.6.6 Tuotannon vaatimustenmukaisuuden valvonnan alkuarviointi

Tuotannon vaatimustenmukaisuuden valvonnan alkuarviointi täytyy olla suoritettu, ennen, kuin tuotteelle voidaan myöntää tyyppihyväksyntä. Tyyppihyväksynnän myöntämistä ei estä alkuarvioinnissa mahdollisesti havaitut vähäiset puutteet. [30.]

5.6.7 Tyyppihyväksynnän myöntäminen

Tyyppihyväksyntä myönnetään, kun tuote vastaa tyyppihyväksynnälle asetettuja vaatimuksia tyyppihyväksyntätestauksen suhteen sekä tuotteen tuotannon vaatimuksenmukaisuuden valvonta on hoidettu asianmukaisesti. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom kirjoittaa hyväksyttävälle tuotteelle tyyppihyväksyntätodistuksen ja antaa sille päätöksensä. Traficom ilmoittaa myönnettyt ajoneuvojen ja niiden komponenttien EY- ja EU-tyyppihyväksyntöjen tiedot muiden maiden viranomaisille. [30.]

6 Yhteenveto

Insinööriyössä selvitettiin kahden eri valmistajan prototyyppiasteella olevien laserlisävalojen sisältämän laserin turvallisuusnäkökulmia sekä kartoitettiin laserlisävalojen lainsäädännöllinen soveltuvuus ja käyttö Suomen tieliikenteessä. Selvityksessä tukeuduttiin viimeisimpään voimassa olevaan lainsäädäntöön, määräyksiin sekä standardeihin. Lisäksi käytettiin hyväksi asiantuntijoiden näkemyksiä ja alan kirjallisuutta.

Tuloksena saatiin kattava paketti laserlisävaloille asetetuista turvallisuutta ohjaavista standardeista ja lainsäädäntöä koskevista vaatimuksista tieliikenteessä. Työssä pureuduttiin myös syvällisesti laserlisävalojen sisältämään laser- ja LED-tekniikkaan, niiden toimintaperiaatteisiin sekä selostettiin tieliikennetyyppihyväksynnän prosessia. Laserlisävalot voidaan tyyppihyväksyttää tieliikenteeseen samoilla kriteereillä, kuin perinteiset ajoneuvon lisävalot, kunhan ne täyttävät niihin kohdistuvien E-sääntöjen vaatimukset. Lisäksi laserlaitteita sisältäville tuotteille on asetettu tarkat turvallisuusmääräykset standardien ja lainsäädännön muodossa. Näiden vaatimusten täytyttyä voidaan laserlisävalojen katsoa olevan turvallisia ja asianmukaisia tieliikennekäytössä.

Tulevaisuus näyttää yleistyykö laservalotekniikka ajoneuvovalaisimissa ja tullaanko niitä soveltamaan ajoneuvotekniikassa laajemmin. Ainakaan nykyisenlaisena laservalaisimet ajoneuvoissa tuskin tulevat täysin LED-valaisimia syrjäyttämään, koska LEDejä tarvitaan edelleen tukemaan laserin suhteellisen kapeaa valokeilaa.

Selvityksen avulla työntilaajayritys voi ohjeistaa laserlisävalojen valmistajia tuotteelle kohdistuvista vaatimuksista tieliikennelainsäädännön ja turvallisuusvaatimusten mukaisesti sekä kartoittaa laserlisävalojen valmiutta tyyppihyväksyttäväksi. Molempien laserlisävalojen laatuvaikutelma on hyvä. Erityisesti prototyyppi 2. -laserlisävaloissa käytetty SMD-laseryksikkö vakuutti konstruktiollaan. SMD-laser vaikuttaakin pitkän kehitystyön tulokselta. Prototyyppi 1. -laserlisävalojen laseryksikön konstruktio on huomattavasti yksinkertaisempi ja täten myös kookkaampi.

Mikäli laserlisävalot ylittävät valaisinmittauksissa E-säännön mukaisen referenssirajan, voitaisiin laserlisävalojen laseryksikköön tarvittaessa soveltaa PWM-ohjattua (Pulse-width Modulation) jännitteensyöttöä. Pulssiohjausmodulaation avulla pystytään alentamaan valon intensiteettiä eli valovoimakkuutta, jota molemmat laseryksiköt myös tukevat. Vaihtoehtoisesti laserin eteen voitaisiin asentaa koveran mallinen linssi, jonka avulla laserin valokeilaa saadaan hajautettua laajemmalle alalle. Valaisimen avaruuskulman kasvaessa valon intensiteetti pienenee. Tuotteen hyväksytyyn tyyppihyväksyntätestauksen lisäksi edellytetään, että tuotteen tuotannon laatu ja sen valvonta vastaavat tyyppihyväksynnän vaatimaa tasoa. Hylätty tyyppihyväksyntä aiheuttaa valmistajalle luonnollisesti ylimääräisiä kustannuksia ja mahdollisia viivästyksiä tuotteen markkinoille lanseeraukselle.

Käyttöturvallisuuden suhteen parempaa näkyvyyttä tieosuudella voidaan automaattisesti pitää turvallisuutta parantavana tekijänä. Vastaavasti entistä tehokkaammat ja pidemmälle kantavat valaisimet saattavat kuitenkin aiheuttaa häikäistymistä ja jälkikuvia vastaantuleville kanssa-autoilijoille. Valokantaman ollessa reilusti yli kilometrin joudutaan kaukovalot myös sammuttamaan huomattavasti aikaisemmin vastaantulijan kohdalle sattuessa. Tämän haitan pienentämiseksi voitaisiin laserlisävalojen LED- ja laseryksiköiden johdotukset kytkeä toisistaan riippumattomiksi. Tällöin laseryksikön päältä pois kytkemisen jälkeen muuten pimeäksi jäävää tietä voitaisiin valaista vielä hetken pelkillä laserlisävalojen LED-valoilla. Nykyisenlaisena kumpikaan laserlisävalokonstruktio ei suoraan

tue tällaista valojen kytkentävaihtoehtoa. Laserlisävalojen suunnittelussa olisi myös hyvä ottaa huomioon laseryksikön mahdollinen vaurioituminen esimerkiksi kolaritilanteessa. Prototyyppi 1. -laserlisävalojen laseryksikön konstruktio saattaa altistaa puhtaan laser-
valon pääsemisen ulos laitteesta peiliyksikön vaurioituttua. Vastaavassa tilanteessa Prototyyppi 2. -laserlisävalojen SMD-laseryksiköllä puhtaan laser-
valon pääseminen ulos laitteesta ei ole yhtä todennäköistä, koska laser on integroitu komponenttiin.

Jo aivan työn alkuvaiheilla olisi voitu tukeutua enemmän asiantuntijoiden näkökulmiin ja apuun aineiston laajuuden sekä ajankäytön kannalta. Toisaalta tällöin insinööri-
työssä tehty selvitys ei todennäköisesti olisi ollut itselleni yhtä opettavainen prosessi. Insinööri-
työtä voitaisiin jatkaa testaamalla laserlisävaloja selvityksessä laaditun ohjeistuksen mu-
kaisesti, selvittäen niiden vaatimustenmukaisuutta käytännössä.

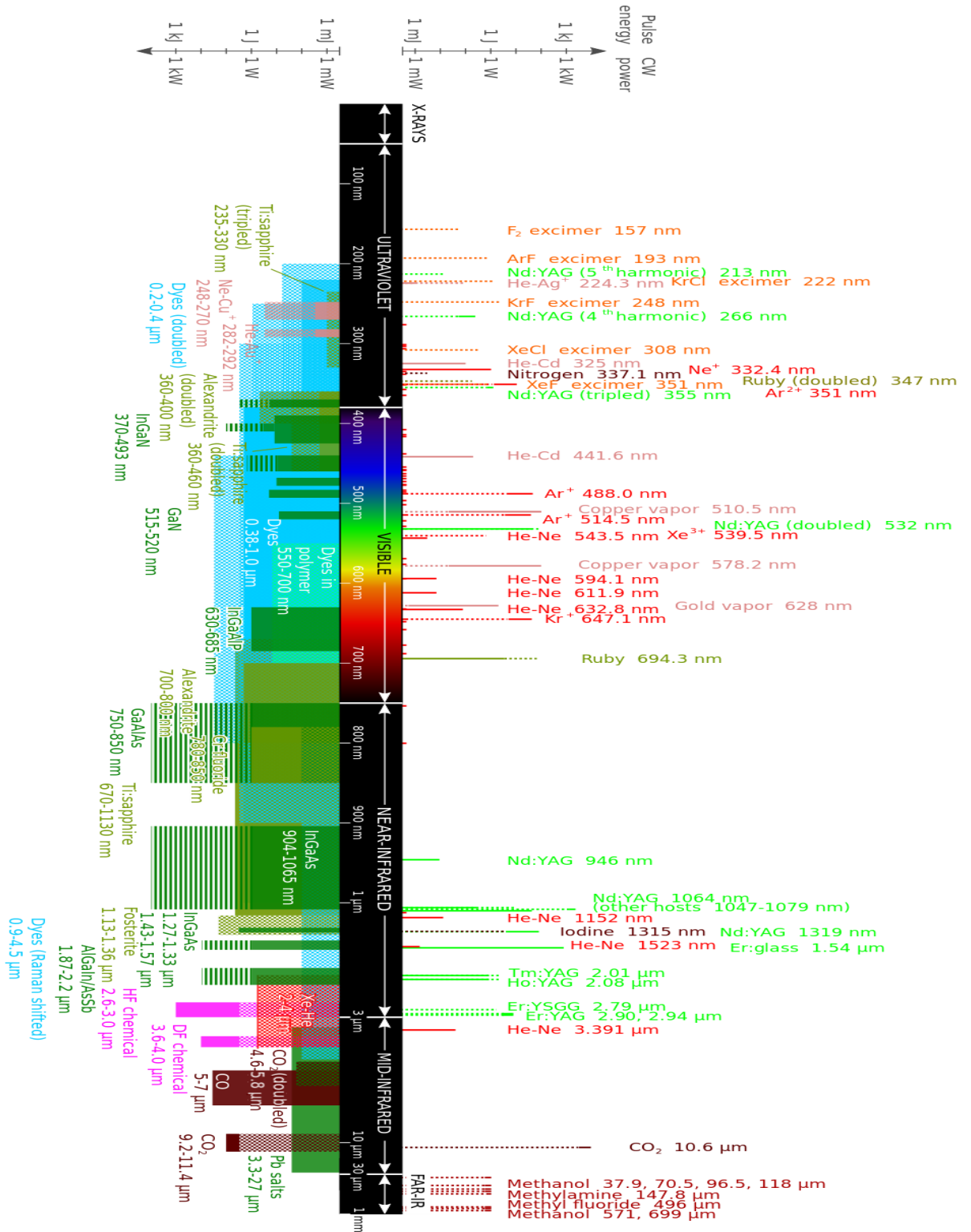
Lähteet

- 1 Nieminen, Arto. 2014. LASER. Verkkoaineisto. <<http://www.kotiposti.net/ajnieminen/lase.pdf>>. Luettu 10.12.2019.
- 2 Hitz, Breck; Ewing, J. J. & Hecht, Jeff. 2001. Introduction to Laser Technology Third Edition. New York: IEEE Press.
- 3 LASER. 2006. Verkkoaineisto. Oulun yliopisto. <<http://web.archive.org/web/20070328152818/http://physics oulu.fi/fysiikka/oj/761104P/2006/38.pdf>>. Luettu 10.12.2019.
- 4 Lehtonen, Saija. 2016. Verkkoaineisto. Laserin perusteet. <<https://docplayer.fi/8429834-13-laserin-perusteet-laser-on-todennakoisesti-tarkein-optinen-laite-joka-on-kehitetty-viimeisten-50-vuoden-aikana.html>>. Luettu 13.12.2019.
- 5 Renk, Karl F. 2012. Basics of Laser Physics. Berlin: Springer cop.
- 6 Sze, Simon Min & Ng, Kwok K. 2007. Physics of Semiconductor Devices 3rd Ed. Hoboken, NJ: Wiley Cop.
- 7 LASER. 2017. Verkkoaineisto. EQuestionsAnswers Inc. <<http://www.equestionsanswers.com/notes/laser.php>>. Luettu 7.1.2020
- 8 Laser, Types and Components of Laser. 2018. Verkkoaineisto. Electrical 4 U. <<https://www.electrical4u.com/laser-types-and-components-of-laser/>>. Luettu 6.1.2020.
- 9 Coherence. 2006. Verkkoaineisto. University of Vienna. <<https://interactive.quantumnano.at/advanced/molecular-beams/coherence/>>. Luettu 15.2.2020
- 10 Components of electromagnetic spectrum. 2013. Verkkoaineisto. Radio2Space. <<https://www.radio2space.com/components-of-electromagnetic-spectrum/>>. Luettu 23.2.2020.
- 11 Product Show. Verkkoaineisto. Blue Lake. <<http://www.bl-light.com/En/productShow.asp?id=39>>. Luettu 10.3.2020.
- 12 LaserLight SMD. Verkkoaineisto. SLD Laser. <<https://www.sldlaser.com/products/laserlight-smd>>. Luettu 10.3.2020.

- 13 Overton, Gail. 2017. Verkkoaineisto. Laser Lightning: White-light lasers challenge LEDs in directional lightning applications. <<https://www.laserfocus-world.com/lasers-sources/article/16548296/laser-lighting-whitelight-lasers-challenge-leds-in-directional-lighting-applications>>. Luettu 10.1.2020.
- 14 Mottier, Patrick. 2009. LEDs for Lightning Applications. London: Hoboken, NJ: Wiley cop.
- 15 Light Emitting Diode (LED). Verkkoaineisto. Circuit globe. <<https://circuitglobe.com/light-emitting-diode-led.html>>. Luettu 21.2.2020.
- 16 High-brightness Semipolar (2021) blue InGaN/GaN superluminescent diodes for droop-free solid-state lightning and visible-light communications. 2016. Verkkoaineisto. OSA Publishing. <<https://doi.org/10.1364/OL.41.002608>>. Luettu 21.2.2020.
- 17 George, Anthony F.; Al-waisawy, Sara; Wright, Jason T.; Jadwisienczak, Wojciech M. & Rahman, Faiz. 2016. Verkkoaineisto. Laser-driven phosphor-converted white light source for solid-state illumination. <https://www.researchgate.net/publication/297659677_Laser-driven_phosphor-converted_white_light_source_for_solid-state_illumination>. Luettu 25.2.2020.
- 18 Jokela, Kari; Ylianttila, Lasse; Visuri, Reijo & Hietanen, Maila. 2009. Ultravioletisäteily- ja lasersäteily. Helsinki: Säteilyturvakeskus.
- 19 Ylianttila, Lasse. 2020. Erikoistutkija, DI, Ionisoimattoman säteilyn valvonta (NIR), Säteilyturvakeskus, Helsinki. Sähköpostikeskustelu. 13.3.2020.
- 20 SFS/EN -standardit. Verkkoaineisto. SFS-Online. <https://online.sfs.fi/?_ga=2.30634041.789185786.1584800699-1927975163.1582529728&_gac=1.242551350.1584800700.EAlaIQob-ChMlhJf_0-Kr6AIVV-WaCh0HowPsEAAYASAAEgI1yPD_BwE>. Luettu 28.2.2020.
- 21 Säteilyn käytön valvontaviranomaiset. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus Stuk. <<https://www.stuk.fi/stuk-valvoo/sateilyn-kayttajalle/sateilytoiminnan-turvallisuus/sateilyn-kayton-valvontaviranomaiset>>. Luettu 24.2.2020.
- 22 Säteilylaki. 2018. 859/9.11.2018.
- 23 Ajoneuvolaki. 2002. 1090/11.12.2002.
- 24 TRAFI/437519/03.04.03.00/2017. Autojen ja niiden perävaunujen tekniset vaatimukset. Kansallinen määräys. Liikenne- ja viestintävirasto. Luettu 18.3.2020.

- 25 Tyyppihyväksynnän pohjana oleva sääntely. 2019. Turvallisuus- ja liikennevirasto Traficom. Verkkoaineisto. <<https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/tyyppihyvaksynta/saantely>>. Luettu 19.1.2020.
- 26 Alantie, Jussi. 2020. Tarkastaja, Tyyppihyväksyntäyksikkö, Liikenne- ja viestintävirasto, Helsinki. Sähköpostikeskustelu. 12.3.2020.
- 27 E-sääntö 48. 2015. Verkkoaineisto. UNECE. <<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R048r12e.pdf>>. Luettu 27.2.2020.
- 28 E-sääntö 112. 2013. Verkkoaineisto. UNECE. <<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R112r3e.pdf>>. Luettu 2.3.2020.
- 29 21. Valaistustekniikka. 2008. Verkkoaineisto. Oulunseudun ammattikorkeakoulu. <http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/21_Valaistustekniikka.pdf>. Luettu 16.3.2020.
- 30 Tyyppihyväksyntäprosessi. 2019. Verkkoaineisto. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. <<https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/tyyppihyvaksynta/tyyppihyvaksyntaprosessi>>. Luettu 19.1.2020.
- 31 Weber, Marvin J. 1999. Handbook of laser wavelengths. Boca Raton: CRC Press LLC.

Eri lasertekniikat ja niiden sähkömagneettinen spektri [31]

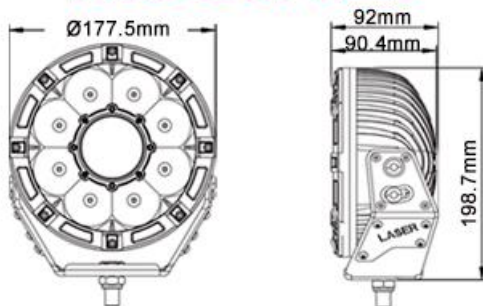


Prototyyppi 1. -lisävalot

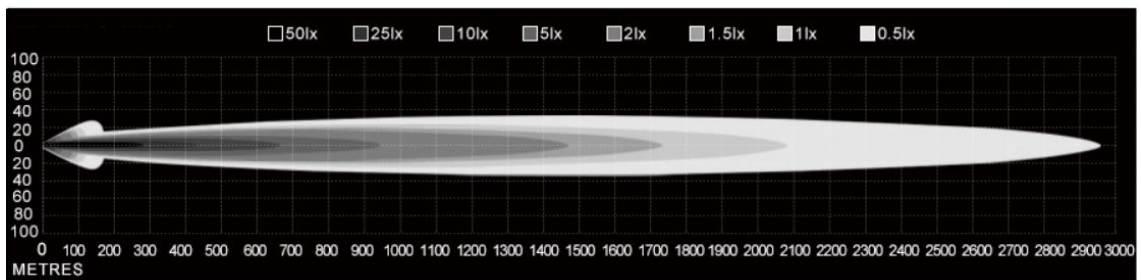
PRODUCT DISPLAY



PRODUCT SIZE



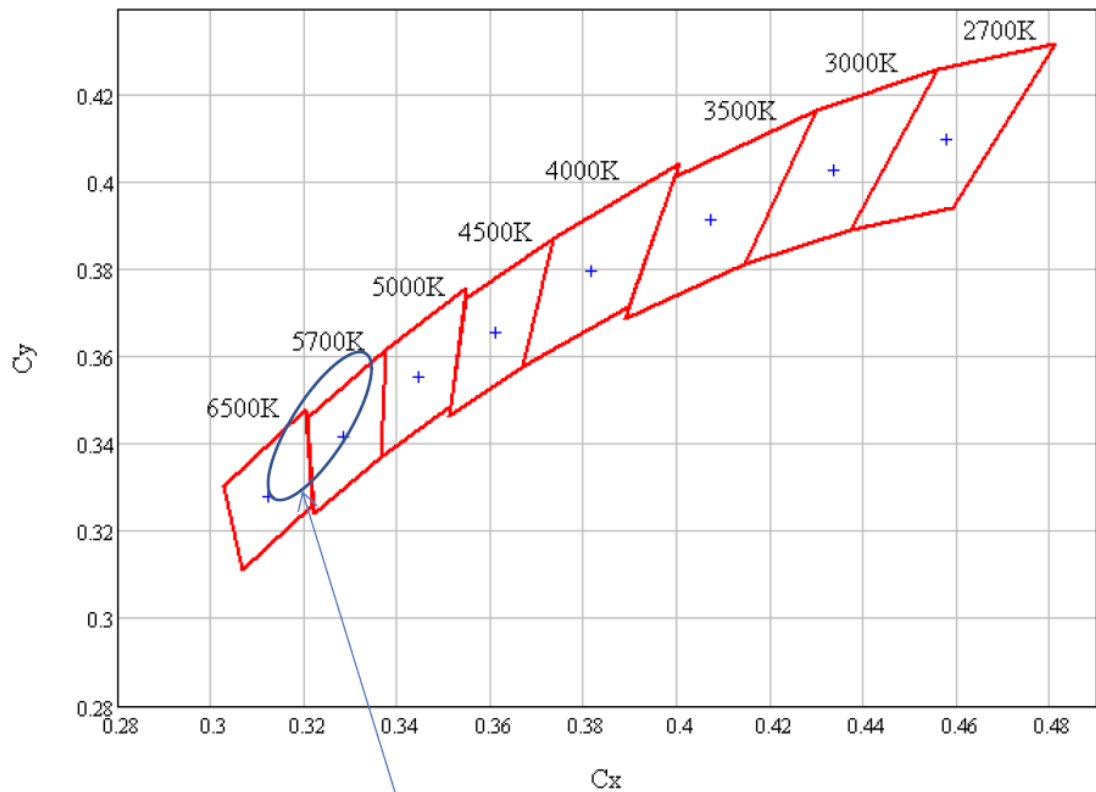
SIZE	LIGHT SOURCE	ELECTRIC CURRENT	WATTAGE	RAW LUMEN	LIGHTING DISTANCE
8.5"	OSRAM CRDP-SH+LASER	12V/7.1A	45W	13000LM	1LUX@2099M



Prototyyppi 2. -laserlisävalot**Laser+ 15W Osram**

7.4m, 17480LUX (1748x10) from the test result
1LUX is 978 Meters from the formula for conversion
 $\sqrt{(7.4 \times 7.4 \times 17480)} = 978$ Meters

Prototyyppi 2. -lisävalojen SMD-laser

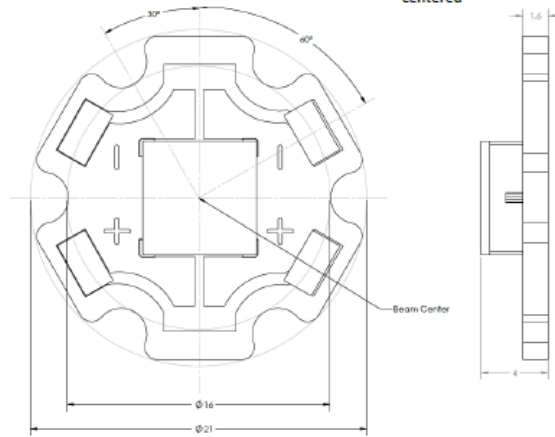
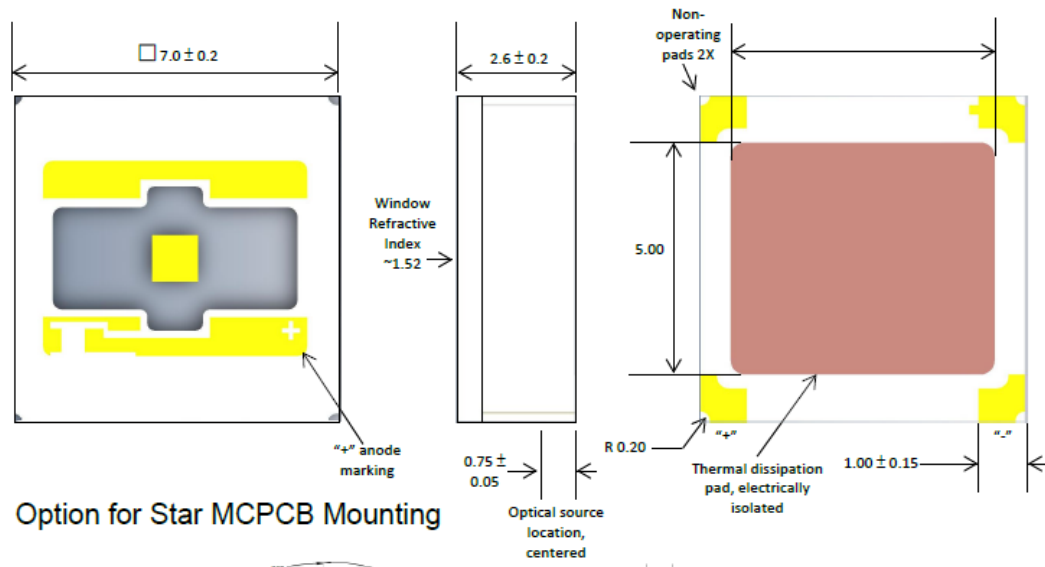


SMD Color Fills Range from 5300K to 6500K

Photometric and Electrical Characteristics under operating conditions*

Attribute	unit	min	nom	max
Luminous Flux	lm	400	450	510
Luminous Intensity	cd	127	143	162
Peak Luminance	cd/mm ²		1000	
Spot size x (FWHM)	mm		0.25	
Spot size y (FWHM)	mm		0.45	
Viewing Angle	degrees		120	
Position Tolerance of Emission Spot Center (Peak Luminance Maximum) in X direction	mm	-0.100		0.100
Position Tolerance of Emission Spot Center (Peak Luminance Maximum) in Y direction	mm	-0.100		0.100
Position Tolerance of Emission Spot Center (Peak Luminance Maximum) in Z direction	mm	-0.100		0.100
Color Point x **		0.310	0.320	0.340
Color Point y **		0.328	0.345	0.365
Correlated Color Temperature	K	5300	6000	6500
Color Rendering Index (CRI)			70	
Drive Current	A		1.65	
Operating Voltage	V	8.3	8.7	9.1
ESD Resistance (HBM Level 1)			2kV	
Thermal Resistance (j to case)	K/W		4	
Pulse Rise and Fall Time	ns		0.5	

SMD Part Mechanical Layouts



NOTES:
1. Dimensions for indication only

E-sääntö 48:n määrittelemät valkoisen valon x, y -koordinaatit [27]

2.29. *Colour of the light emitted from a device*

2.29.1. "White" means the chromaticity coordinates (x,y)⁴ of the light emitted that lie inside the chromaticity areas defined by the boundaries:

W ₁₂	green boundary	$y = 0.150 + 0.640 x$
W ₂₃	yellowish green boundary	$y = 0.440$
W ₃₄	yellow boundary	$x = 0.500$
W ₄₅	reddish purple boundary	$y = 0.382$
W ₅₆	purple boundary	$y = 0.050 + 0.750 x$
W ₆₁	blue boundary	$x = 0.310$

With intersection points:

	x	y
W ₁	0.310	0.348
W ₂	0.453	0.440
W ₃	0.500	0.440
W ₄	0.500	0.382
W ₅	0.443	0.382
W ₆	0.310	0.283