

# SÄHKÖLAITTEISTOJEN LÄMPÖKAMERAKUVAUKSET



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Valkeakoski, sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma

Syksy, 2019

Esa Rintakumpu

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Hämeen ammattikorkeakoulu, Valkeakoski

---

<b>Tekijä</b>	Esa Rintakumpu	<b>Vuosi</b> 2019
<b>Työn nimi</b>	Sähkölaitteistojen lämpökamerakuvaukset	
<b>Työn ohjaaja</b>	Raine Lehto	

---

## TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Kiwa Inspecta Oy:lle koulutuskokonaisuus lämpökameran hyödyntämisestä sähkölaitteistojen tarkastuksissa. Työ jakautui kahteen osaan: opetusmateriaaliin ja kirjalliseen teoriaosioon. Opetusmateriaalissa perehdyttiin laajemmin lämpökameroiden tekniikkaan, lämpökuvien ottamiseen, tulkintaan sekä tulosten raportointiin. Teoriaosiossa tarkasteltiin lämpökuvaukseen liittyviä lämpöopin keskeisiä käsitteitä ja lakeja sekä niiden hyödyntämistä mittauksissa.

Teorian lisäksi kirjallisessa osiossa vertailtiin lämpökameroiden ominaisuuksia keskittyen lähinnä lämpökuvan laatuun vaikuttaviin asioihin. Näitä olivat resoluutio, lämpöherkkyys (NETD) ja pikselierottelukyky (IFOV), joihin perustuen pohdittiin ominaisuuksiltaan sopivinta kameraa sähkölaitteistojen tarkastuksiin. Johtopäätöksenä oli, että lämpökamera kannattaisi olla jonkin verran ST-kortin vaatimuksia parempi. Lämpökuvista vikakohtien löytäminen ja analysointi olisi tällöin helpompaa ja luotettavampaa.

Työssä tutkittiin myös, miten lämpöopin teoriaa kannattaa hyödyntää lämpökameramittauksissa sekä lämpökuvien analysoinnissa. Huomattiin, että teorian soveltaminen käytäntöön parantaa lämpökuvien laatua sekä helpottaa mahdollisten vikakohtien löytymistä. Opinnäytetyön edetessä huomattiin myös, että teoriaosaamisen lisäksi lämpökameralla tehtävät mitaukset vaativat myös käytännön kokemusta ja näkemystä tutkittavista sähkölaitteistoista sekä niiden erityispiirteistä.

**Avainsanat** Infrapunasäteily, lämpökuvauus, sähköturvallisuus

**Sivut** 33 sivua

Degree Programme in Electrical and Automation Engineering  
Häme University of Applied Sciences, Valkeakoski

---

<b>Author</b>	Esa Rintakumpu	<b>Year</b> 2019
<b>Subject</b>	Thermal Imaging of Electrical Equipment	
<b>Supervisor</b>	Raine Lehto	

---

ABSTRACT

The aim of the project was to create educational material on the use of thermal cameras in electrical equipment inspection for Kiwa Inspecta Oy. The work was divided into two parts: the teaching material and a written theoretical part. The teaching material focuses extensively on the technology of thermal cameras, on taking thermal images, and on the interpretation and reporting of the results. The theoretical part gives an overview of the main concepts and laws of thermodynamics related to thermal imaging and on utilizing these theories in measurement.

In addition to theory, the written part of the thesis compares the key features of different thermal cameras, focusing mainly on factors affecting the quality of the thermal image. These include detector resolution, thermal sensitivity (NETD), and spatial resolution (IFOV), which were used for finding the most suitable camera for the inspection of the electrical equipment. The conclusion was that the thermal camera could be slightly better than stated in the Finnish ST-card requirements. This would make finding and analyzing the fault points in thermal images easier and more reliable.

In the project it was also examined how to utilize the theory of thermodynamics in thermal camera measurements and in the analysis of thermal images. It was noted that applying theory to practice improves the quality of thermal images and facilitates the discovery of possible faults. It was also found that besides theoretical knowledge, measurements with a thermal camera also require practical experience and an understanding of the specific characteristics of the electrical equipment being inspected.

**Keywords** Electrical safety, IR-radiation, thermal imaging

**Pages** 33 pages

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	LÄMPÖKUVAUKSEN TEOREETTINEN PERUSTA .....	1
2.1	Lämpöenergia.....	1
2.2	Sähkömagneettinen säteily.....	4
2.3	Infrapunasäteily.....	6
2.4	Säteilylait .....	7
2.5	Emissiivisyys .....	11
2.6	Matriisi-ilmaisun.....	14
3	LÄMPÖKAMEROIDEN VERTAILUSUUNNITELMA .....	16
4	LÄMPÖKAMERAVERTAILUN TULOKSET.....	18
4.1	Lämpökamerakuvien vertailu.....	18
4.2	Teorian huomioiminen lämpökuvauksissa.....	24
5	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	29
	LÄHTEET.....	31

## 1 JOHDANTO

Tässä raportissa tavoitteena on perehtyä laajemmin lämpökuvauksen fysiikkaaliseen teoriaperustaan. Työssä myös vertaillaan teorian pohjalta viittä erilaista lämpökameraa. Pääpaino vertailussa on lämpökameroiden kuvanlaatuun vaikuttavissa ominaisuuksissa. Raportin kokeellisessa osiossa havainnoidaan lisäksi myös muutamia lämpöopin ilmiöitä, jotka kannattaa huomioida mittauksia tehdessä sekä lämpökuvia analysoitaessa.

Tämä raportti on osa laajempaa opinnäytetyötä, jossa suunniteltiin Kiwa Inspecta Oy:lle koulutuskokonaisuus lämpökameroista ja niiden hyödyntämisestä sähkölaitteistojen tarkastuksissa. Itse koulutusmateriaalissa näkökulma on laajempi kuin tässä raportissa. Siinä on teorian lisäksi käsitelty tarkemmin myös lämpökameroiden tekniikkaa, lämpökuvien ottamista ja tulkintaa sekä raportointia. Opetuskokonaisuuden tarkoituksena on tuoda esille kattavasti ja käytännönläheisesti lämpökameramittauksiin liittyviä keskeisiä asioita, jotta kameraa voidaan hyödyntää sähkölaitteistojen tarkastuksissa tehokkaasti ja turvallisesti.

## 2 LÄMPÖKUVAUKSEN TEOREETTINEN PERUSTA

### 2.1 Lämpöenergia

Lämpö on atomien ja molekyylien eli aineen rakenneosasten energiaa ja sen yksikkönä on joule. Atomi- ja molekyyllitasolla tarkasteltuna lämpö on lähinnä rakenneosien värähtelyä eli hiukkasten liike- ja pyörimisenergiaa. Lämpötila puolestaan kertoo mitattavan kappaleen atomien ja molekyylien keskimääräisen energian eli sitä ei voida mitata yksittäisestä atomista tai molekyylistä vaan ainoastaan suuremmasta hiukkasjoukosta. Lämpötilan mittaamiseen käytetään useampia yksiköitä tunnetuimpina celsiusaste ( $^{\circ}\text{C}$ ) ja kelvin (K).

Termodynaamisesta lämpötila-asteikosta puhuttaessa tarkoitetaan kelvinasteikkoa. Se on SI-järjestelmän perussuure, joka määritellään kahden peruspisteen, absoluuttisen nollapisteen (0 K) ja veden kolmoispisteen (273,16 K), avulla. Absoluuttisessa nollapisteessä rakenneosasten värähtely on minimissään ja systeemillä on ainoastaan ns. nollapiste-energiaa, joka on systeemin pienin mahdollinen energia. Veden kolmoispisteessä kaikki kolme olomuotoa, neste, kiinteä ja kaasu, ovat tasapainossa. Kelvinasteikkoa (T) ja celsiusasteikkoa (t) voidaan helposti käyttää rinnakkain, koska lämpötilamuutos on sama sekä kelvineissä että celsiusasteina ( $\Delta T = \Delta t$ ). (Young & Freedman 1996, 465; Inkinen & Tuohi 2002, 353)

Lämpöenergia voi siirtyä kolmella eri tavalla: johtumalla, kuljettumalla (konvektio) ja säteilemällä. Monesti termodynaamisissa systeemeissä esiintyy näitä kaikkia siirtymistapoja. Johtumisessa lämpö siirtyy atomien ja molekyylien törmätessä toisiinsa ja luovuttamalla energiaansa eteenpäin viereisille rakenneosasille. Kuljettumista puolestaan tapahtuu helpoimmin nesteissä ja kaasuissa, joissa lämpöenergiaa siirtyy aineen mukana esimerkiksi lämpimän veden virratessa putkistossa. Lämpö voi myös siirtyä sähkömagneettisen säteilyn avulla. Säteilystä lämpöä siirtyy ilman kuljettavaa väliainetta. Kaikki kappaleet, jotka ovat absoluuttisen nollapisteen ( $0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) yläpuolella, lähettävät lämpösäteilyä ympärilleen. Tätä säteilyä voidaan puolestaan mitata lämpökameran avulla. (Fagerholm 1986, 255 – 259)

Lämpöopin teoriassa perustana ovat termodynamiikan pääsäännöt, jotka kertovat perusteet lämpöenergian käyttäytymiselle. Nollas pääsääntö kertoo, että lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan. Tämä tarkoittaa sitä, että kosketuksissa olevat kappaleet saavuttavat ajan mittaan saman lämpötilan eli termodynaamisen tasapainon (Hautala & Peltonen 2001, 188).

Ensimmäinen pääsääntö puolestaan kertoo energian säilyvän myös termodynaamisissa systeemeissä. Energiaa ei siis synny eikä häviä, se vain muuttuu muodosta toiseen. Ensimmäisessä pääsäännössä käytetään termiä sisäenergia, joka kertoo systeemin kokonaisenergian. Sisäenergian suuruutta ei voida määrittää, mutta sen muutos voidaan mitata tai laskea kaavalla

$$\Delta U = \Delta Q + W \quad (1)$$

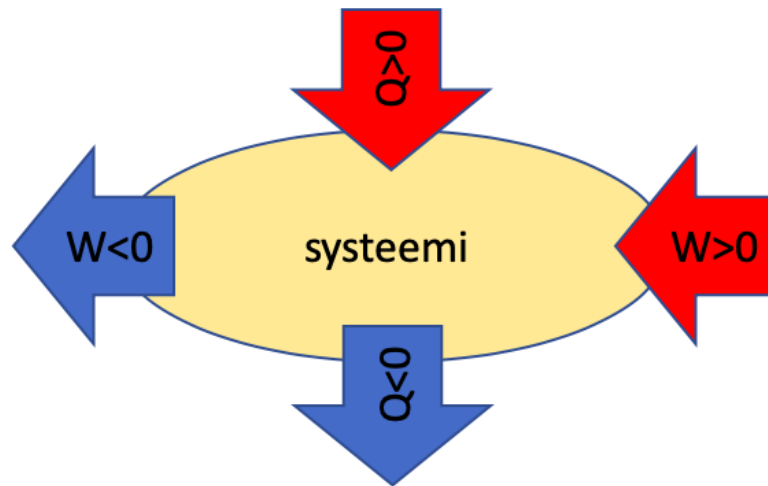
missä

$\Delta U$  = sisäenergian muutos

$\Delta Q$  = lämpöenergian muutos

$W$  = tehty työ

Ensimmäinen pääsääntö siis kertoo, että termodynaamisen systeemin sisäenergia muuttuu saman verran kuin systeemiin tuodaan lämpöä tai siitä poistuu lämpöä. Samoin sisäenergian muutokseen vaikuttaa myös, tekeekö systeemi työtä vai tehdäänkö systeemiin työtä. Tehty työ liittyy lähinnä kaasumaisiin systeemeihin. Jos kaasu laajenee, niin se tekee työtä ja sisäenergia vähenee. Kaasun sisäenergia voi myös lisääntyä, jos kaasuun tehdään työtä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kaasua puristetaan kokoon, jolloin sen energia lisääntyy. Ensimmäiseen pääsääntöön liittyvät merkkisäännöt ovat esitettyinä kuvassa 1. (Young & Freedman 1996, 539)



Kuva 1. Merkkisäännöt termodynamiikan 1. pääsääntöön.

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan systeemi etenee kohti todennäköisintä tilaa eli kohti suurempaa epäjärjestystä. Toinen pääsääntö voidaan esittää usealla eri tavalla. Lämpökameralla tehtävissä mittauksissa tärkein muoto on, että lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Näin ollen nollas ja toinen pääsääntö täydentävät toisiaan tässä tapauksessa. Kolmas pääsääntö puolestaan kertoo, että absoluuttista nollapistettä ei voida koskaan saavuttaa eli on mahdotonta päästä tilanteeseen, jossa systeemin rakenneosien liike olisi nolla. (Potter & Somerton 1993, 98 – 101; Jaakkola 2014)

Joulen laki yhdistää sähköenergiaa ja lämpöenergian toisiinsa. Energian säilymislain mukaan energiaa ei synny eikä häviä, se vain muuttuu muodosta toiseen. Joulen lakiin liittyy kaava

$$P = RI^2 \quad (2)$$

missä

P = sähköteho

R = resistanssi

I = virta

Joulen laki kertoo, millä teholla systeemissä, jossa on resistanssia, sähköenergia muuttuu lämpöenergiaksi (Hautala & Peltonen 2001, 280). Toisin sanoen kaikissa kappaleissa, joilla on resistanssia, osa sähköenergiasta muuttuu lämpöenergiaksi. Joulen laista myös nähdään, että virran kaksinkertaistuksessa teho nelinkertaistuu. Virran kaksinkertaistumisen seurauksena myös lämpenemä nelinkertaistuu. Tämä on tärkeä muistaa sähkölaitteita tutkittaessa lämpökameran avulla.

Useasti lämpökuvasta tehtäessä ei mittauksen aikainen kuormitustilanne ole nimelliskuormituksen suuruinen. Tällöin voidaan teoreettisesti laskea järjestelmän tai komponenttien lämpenemiä. Näin voidaan arvioida ku-

vaushetken tilanteen perusteella mahdolliset ongelmatilanteet tulevaisuudessa. Arviointiin voidaan käyttää kaavoja 3 ja 4, jotka perustuvat Joulen lakiin. Nämä kaavat toimivat parhaiten liitoksiin ja kaapeleihin. (Hietanen 2019)

$$\Delta T_{\text{todellinen}} = T_{\text{mitattu}} - T_{\text{ympäristö}} \quad (3)$$

$$\Delta T_{\text{uusi kuorma}} = \Delta T_{\text{todellinen}} \cdot \left( \frac{I_{\text{uusi kuorma}}}{I_{\text{mitattu}}} \right)^2 \quad (4)$$

missä

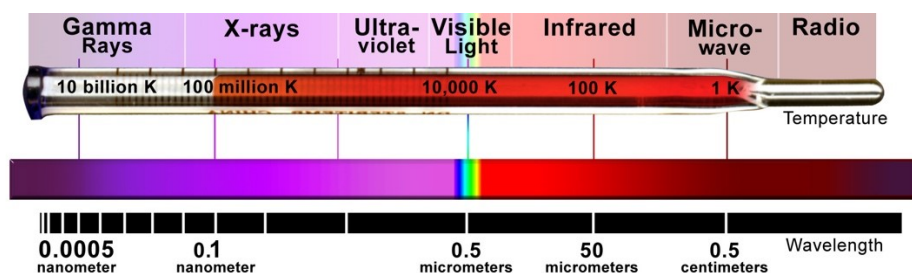
T = lämpötila

$\Delta T$  = lämpötilan muutos

I = virta (yleensä käytetään prosenttiosuuksia verrattuna maksimikuormitukseen)

## 2.2 Sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettisen säteilyn perhe koostuu kuvan 2 mukaisesti gammasäteilystä, röntgensäteilystä, ultraviolettisäteilystä, näkyvästä valosta, infrapunasäteilystä, mikroaalloista sekä radioaalloista. Ne eroavat toisistaan aallonpituudeltaan ja taajuudeltaan.



Kuva 2. Sähkömagneettisen säteilyn spektri (CXC 2014).

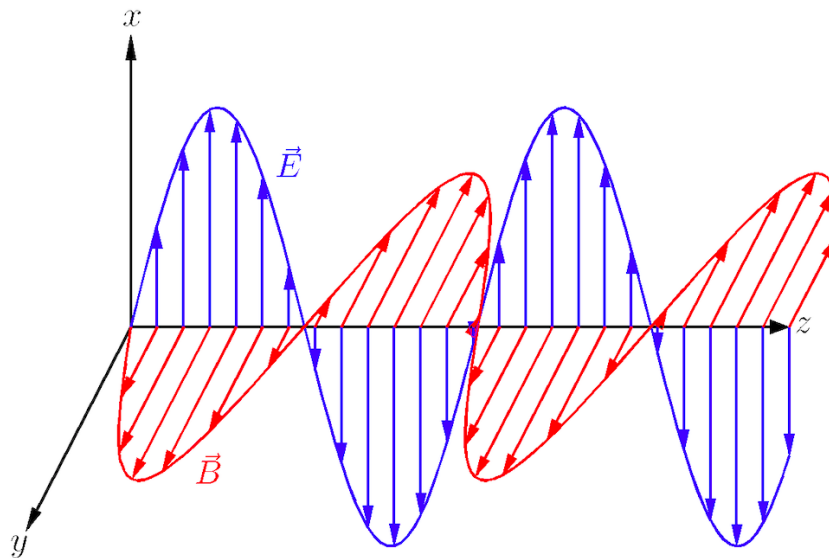
Sähkömagneettisessa säteilyssä sähkökenttä ja magneettikenttä värähtelevät toisiaan ja etenemissuuntaansa vastaan kuvan 3 mukaisesti. Sähkömagneettista säteilyä voidaan mallintaa sekä aaltomallilla että hiukkasmallilla riippuen tarkasteltavasta ilmiöstä. Sähkömagneettisen säteilyn yhteydessä puhutaankin usein aaltohiukkasdualismista.

Sähkömagneettisen aaltoliikkeen etenemistä voidaan tarkastella aaltomallin avulla. Säteily etenee valonnopeudella ja sitä voidaan kuvata aaltoliikkeen perusyhtälöllä (5), jonka mukaan taajuus ja aallonpituus ovat kääntäen verrannolliset. Toisin sanoen aallonpituuden pienentyessä taajuus kasvaa ja päinvastoin (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2000, 185).

$$c = f\lambda \quad (5)$$



missä  
 $c$  = nopeus (valon nopeus 299 792 458 m/s)  
 $f$  = taajuus  
 $\lambda$  = aallonpituus



Kuva 3. Sähkömagneettinen kenttä (Wolski 2011).

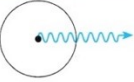
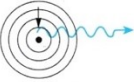
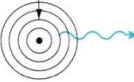
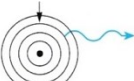

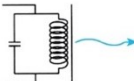
Hiukasmallilla puolestaan voidaan kuvata sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutusta kohtaamansa aineen kanssa. Mallin mukaan sähkömagneettinen säteily koostuu pienistä massattomista hiukkasista. Näitä hiukasia kutsutaan fotoneiksi eli valon/säteilyn kvanteiksi. Kvanttiteorian mukaan kvantti on pienin energiapaketti, ja sitä ei voida enää jakaa pienemmiksi osiksi. Kvantin energia riippuu säteilyn taajuudesta ja sen laskemiseen voidaan käyttää kaavaa 6. (Young & Freedman 1996, 1156)

$$E = hf \quad (6)$$

missä  
 $E$  = kvantin (fotonin) energia  
 $h$  = Planckin vakio ( $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$  Js)  
 $f$  = taajuus

Kaavan 6 mukaan taajuuden kasvaessa säteilyn energia ja samalla ionisointikyky sekä läpitukenisuus kasvavat. Jokainen säteilylaji siis eroaa toisistaan aallonpituudeltaan ja taajuudeltaan. Tämä vaikuttaa kyseisen säteilylajin ominaisuuksiin sekä myös siihen, miten ja missä kyseinen säteilylaji syntyy ja miten sitä voidaan hyödyntää.

Sähkömagneettisen säteilyn eri lajien syntymekanismit ja ominaisuudet ovat esitettynä kuvassa 4. Siitä nähdään, että mitä lähempänä atomiydintä säteily syntyy sitä energettisempää ja läpitukenkevampaa se on. Infrapunasäteily, mikroaallot ja radioaallot puolestaan eivät synny atomin elektronikuorilla vaan aineen rakenneosasten ja sähköisten värähtelyjen kautta.

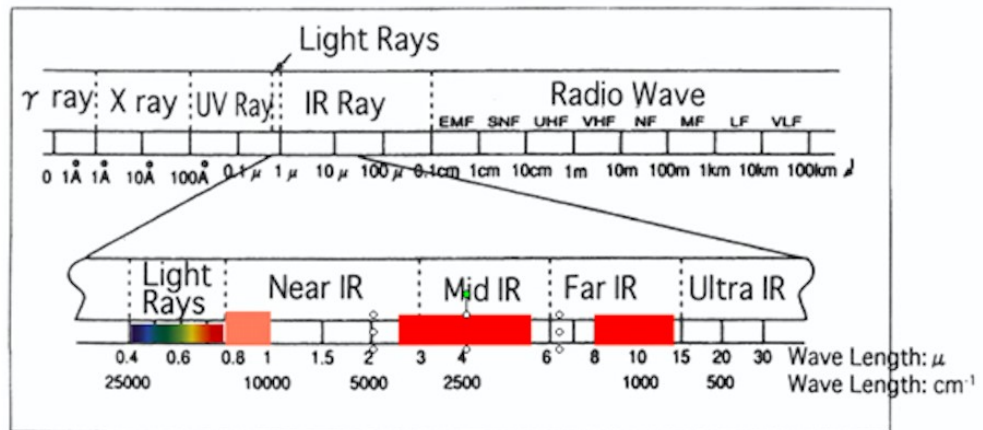
Säteilylaji	Aallonpituus	Synty		Ominaisuudet, käyttö
gammäsäteily	10 – 10 <sup>4</sup> fm	mm. atomin ytimessä		ionisoivaa, läpätunkevaa, läpivalaisuun, sädehoitoon
röntgensäteily	10 – 10 <sup>4</sup> pm	mm. atomissa, lähellä ydintä		ionisoivaa, kohtalaisen läpätunkevaa, läpivalaisuun
ultravioletti-säteily	4 – 400 nm	atomissa, uloimmilla elektronikuorilla		valottaa filmin, synnyttää loistevalon
näkyvä valo	400 – 700 nm	atomissa, uloimmilla elektronikuorilla		näkyvä valaistus, valottaa filmin
infrapunasäteily	700 nm – 1 mm	molekyylin sisäisessä värähtelyssä		valottaa erikoisfilmin, "lämmintä"
radioaallot	1 mm – 100 km	antennissa värähtelyjen kautta		viestintäaallot, radio, televisio, tutka

Kuva 4. Sähkömagneettisen säteilyn synty ja ominaisuudet (Lehto & Luoma 2001, 23).

### 2.3 Infrapunasäteily

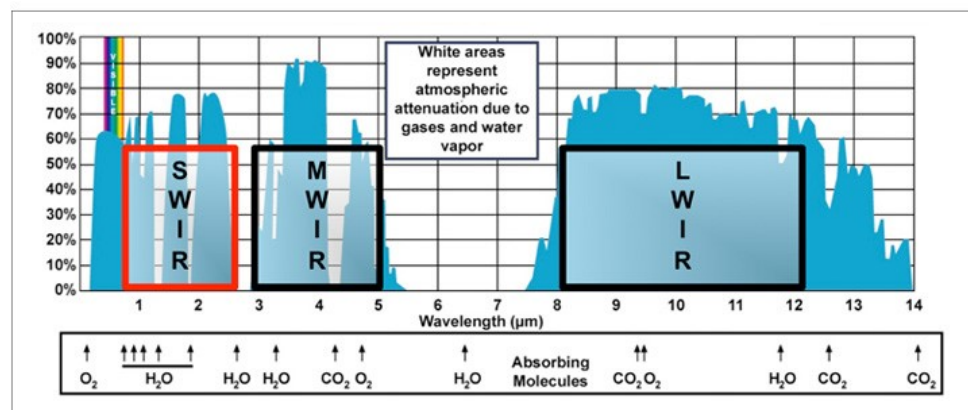
Kaikki kappaleet, jotka ovat absoluuttisen nolapisteen yläpuolella, lähettävät eli emittoivat sähkömagneettista säteilyä. Ihmissilmä erottaa sähkömagneettisen säteilyn lajeista ainoastaan näkyvän valon alueen, joka on noin 380 nm – 760 nm eli violetista valosta punaiseen valoon. Kuten kuvasta 2 huomataan, eri säteilylajeja vastaa erilainen lämpötila. Infrapunasäteilyn lämpötila-alue osuu maapallolla keskimäärin vallitsevien lämpötilojen alueelle. Tämä tarkoittaa sitä, että lähes kaikki kappaleiden lähettämä energia on infrapunasäteilyä, jota ihmissilmällä ei näe. Lämpökameralla puolestaan voidaan mitata tätä infrapuna-alueen säteilyä, josta muodostuu kameran näytölle lämpökuvaa.

Sähkömagneettisen säteilyn lajien jaotus ei ole tarkkarajainen. Infrapuna-alue osuu näkyvän valon ja mikroaaltoalueen väliin ja menee myös osittain päällekkäin niiden aallonpituuksien kanssa. Kuvat 5 ja 6 kertovat, että infrapuna-alue voidaan vielä jakaa pienempiin kaistoihin. Lähi-infrapunakaista (NIR) rajoittuu tumman punaiseen, joka on jo silmin nähtävissä. Tätä kaistaa hyödyntävät mm. kaukosäätimet. Keski-infrapunakaista jaetaan usein kahteen osaan lyhytaaltokaistaksi (ShortWave-IR) ja keskiaaltokaistaksi (MediumWave-IR). Pitkäaaltokaistaa (Far IR tai LongWave-IR) lämpökamerat useimmiten mittaavat. Sen aallonpituusalue on noin 8 – 14  $\mu\text{m}$ . Viimeisenä on ääri-infrapuna-alue (Ultra IR tai VeryLongWave-IR), joka menee jo osittain mikroaaltoalueelle.



Kuva 5. Infrapunasäteilyn alue (Catena n.d).

Kuvassa 6 on esitetty tarkemmin ilmakehän vesihöyryn ja hiilidioksidin vaikutus infrapunasäteilyn absorptiolle. Keski- ja pitkäaaltokaistan välissä (noin 5 – 8  $\mu$ m) olevaa infrapunasäteilyä ilmakehän vesihöyry absorboi voimakkaasti. Kuvasta nähdään, että 8  $\mu$ m:stä ylöspäin absorption vaikutus on varsin vähäistä ja tämä onkin syy, miksi siviilikäytössä olevat lämpökamerat mittaavat juuri tätä aluetta.



Kuva 6. Ilmakehän aiheuttaman IR-säteilyn vaimennus (Sensors Unlimited 2019).

## 2.4 Säteilylait

Kappaleen lähettämän lämpösäteilyn taajuus ja aallonpituus riippuvat sen lämpötilasta. Kappaleen lähettämä lämpösäteily voi olla infrapuna-alueella, näkyvän valon alueella tai ultraviolettialueella (Al-Azzawi 2007, 32). Max Planck keksi vuonna 1900 nimeään kantavan säteilylain tutkiessaan mustan kappaleen säteilyä. Musta kappale on ideaalisäteilijä eli se emittoi ja absorboi kaikkia aallonpituuksia, mutta se ei heijasta säteilyä pinnastaan. (Young & Freedman 1996, 1256)

Planckin säteilylakia kuvaa kaava 7, joka kertoo, että pienillä aallonpituuksilla kappaleen säteilemä energia lähestyy nollaa. Tämä johtuu kvantittumisesta eli värähtelijän energia voi saada vain tiettyjä diskreettejä arvoja. Energian vaihto aineen kanssa tapahtuu siis tietyn suuruisina energiapaketteinä, kvantteina (fotoneina). (Young & Freedman 1996, 1258)

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (7)$$

missä

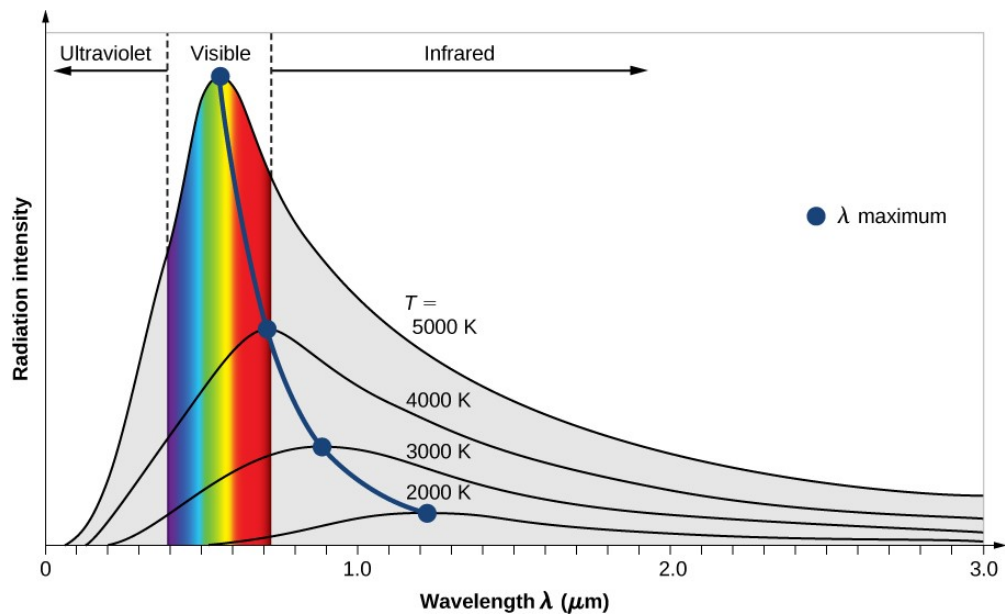
$I(\lambda)$  = säteilyn intensiteettijakauma aallonpituuden funktiona

$T$  = kappaleen lämpötila (kelvineissä)

$\lambda$  = aallonpituus

$k$  = Boltzmannin vakio ( $1,380\,6505 \cdot 10^{-23}$  J/K)

Kuvaan 7 on piirretty Planckin lain mukaisia käyriä eri lämpötilojen arvoilla. Käyrästä nähdään, että suurilla ja pienillä aallonpituuksilla säteilyn intensiteetti lähestyy nollaa. Tietyllä aallonpituudella  $\lambda_{\max}$  saavutetaan maksimi-intensiteetti. Kuvasta nähdään, että mitä korkeampi on lämpötila, sitä pienemmällä aallonpituudella maksimi saavutetaan.



Kuva 7. Mustan kappaleen säteily spektri eri lämpötiloissa (The LibreText Library 2019).

Planckin säteilylakia derivoimalla aallonpituuden suhteen ja laskemalla tästä derivaatan nollakohta voidaan säteilyn maksimiaallonpituus  $\lambda_{\max}$  määrittää.

$$D \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} = 2\pi hc^2 D \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Vakio  $2\pi hc^2$  voidaan jättää derivaatasta pois.

$$\frac{-5\lambda^{-6} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right) - \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}}\right) \cdot \frac{hc}{kT} \cdot \left(-\frac{1}{\lambda^2}\right)}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)^2}$$

Lasketaan derivaatan nollakohta, joka on samalla funktion maksimikohta. Osoittajan avulla saadaan nollakohta määritettyä.

$$\begin{aligned} -5\lambda^{-6} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right) - \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}}\right) \cdot \frac{hc}{kT} \cdot \left(-\frac{1}{\lambda^2}\right) &= 0 \\ -5\lambda^{-6} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right) + \lambda^{-6} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}}\right) \cdot \frac{hc}{\lambda kT} &= 0 \end{aligned}$$

Merkitään  $\frac{hc}{\lambda kT} = x$  ja sievennetään lauseketta.

$$\begin{aligned} -5\lambda^{-6} \cdot (e^x - 1) + \lambda^{-6} \cdot (e^x) \cdot x &= 0 \quad | : \lambda^{-6} \\ -5(e^x - 1) + (e^x) \cdot x &= 0 \quad | : e^x \\ -5(1 - e^{-x}) + x &= 0 \\ -5 + 5e^{-x} + x &= 0 \\ 5e^{-x} &= 5 - x \\ x &= 4,965 \end{aligned}$$

Merkitään  $x = \frac{hc}{\lambda kT}$ , jolloin

$$\frac{hc}{\lambda kT} = 4,965$$

Tästä saadaan ratkaistua sen säteilyn aallonpituus, jolla kappaleen säteilyintensiteetti on maksimissaan. Tämä kaava on nimeltään Wienin siirtymälaki.

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{4,965kT} \quad (8)$$

Wienin siirtymälaki esitetään usein kaavan 9 muodossa (Inkinen & Tuohi 2002, 422).

$$\lambda_{max} = \frac{2898 \mu mK}{T} \quad (9)$$

Laki kertoo tiettyä lämpötilaa vastaavan aallonpituuden eli niin sanotun värilämpötilan. Kuvasta 7 nähdään, että lämpötilan kasvaessa maksimiarvo siirtyy kohti pienempiä aallonpituuksia. Tästä muutoksesta siirtymälaki on saanut nimensä. Alemmissa lämpötiloissa kappaleen lähettämä sähkömagneettinen säteily on infrapuna-alueella, mutta lämpötilan kasvaessa kappaleen väri muuttuu punahehkuisesta oranssiksi. Lämpötilaa edelleen nostettaessa ja maksimin siirtyessä kohti sinivioletisia aallonpituuksia väri

muuttuu lopulta valkohehkuseksi. Tämä johtuu yhdistävästä eli additiivisesta värien sekoittumisesta, joka on seurausta eri väristen valojen (aallonpituuksien) sekoittumisesta. Kuvasta 7 voidaan myös päätellä, että lähesyttävässä näkyvän valon aluetta lämpötilat kasvavat voimakkaasti. Lämpökameroilla toimitaan pääasiassa matalammilla lämpötiloilla ja niiden mitausalue onkin parhaimmillaan pitkäaaltokaistalla.

Planckin säteilylaista voidaan johtaa mustan kappaleen säteilyteho pinta-alaa kohti (intensiteetti) integroimalla.

$$I = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} d\lambda$$

Merkitään  $\frac{hc}{\lambda kT} = x$ , joten

$$\lambda = \frac{hc}{xkT}$$

ja

$$d\lambda = -\frac{hc}{x^2 kT} dx$$

Sijoitetaan ylläolevat lausekkeet integraalilausekkeeseen.

$$I = 2\pi hc^2 \int_{\infty}^0 \frac{-\frac{hc}{x^2 kT}}{\left(\frac{hc}{xkT}\right)^5 (e^x - 1)} dx$$

$$I = 2\pi hc^2 \int_0^{\infty} \frac{\frac{hc}{x^2 kT}}{\frac{h^5 c^5}{x^5 k^5 T^5} (e^x - 1)} dx$$

$$I = \frac{2\pi k^4 T^4}{h^3 c^2} \int_0^{\infty} \frac{x^3}{(e^x - 1)} dx$$

Lasketaan integraali

$$I = \frac{2\pi k^4 T^4}{h^3 c^2} \cdot \frac{\pi^4}{15} = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} T^4$$

Merkitään vakioita  $\frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} = \sigma$ , joten saadaan Stefan-Boltzmannin laki

$$I = \sigma T^4 \quad (10)$$

Lain mukaan kappaleen säteilemä teho pinta-alayksikköä kohti on suoraan verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. Verrannollisuuskertoimen arvo on  $\sigma = 5,670\,400 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$  ja sitä kutsutaan Stefan-Bolzmännin vakioksi. Stefan-Bolzmännin lakia voidaan soveltaa joko määritetäessä kappaleen pintalämpötiloja tai emittoituvan säteilyn voimakkuutta. (Al-Azzawi 2007, 33)

## 2.5 Emissiivisyys

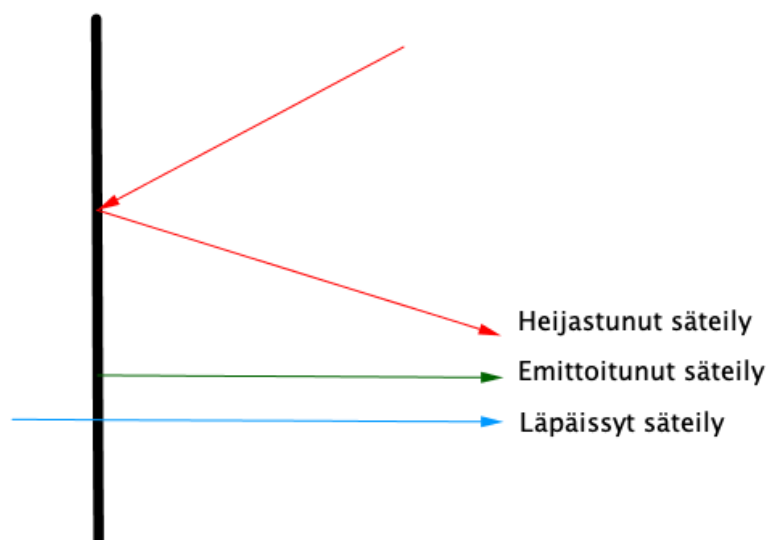
Stefan-Bolzmännin laki mallintaa ideaalisen säteilijän eli mustan kappaleen emittoimaa säteilyä. Käytännössä todellisen maailman kappaleet harvoin käyttäytyvät ideaalisen säteilijän tavoin eli eivät heijastaisi yhtään säteilyä. Usein puhutaankin harmaista kappaleista, joiden säteilyominaisuudet ovat riippuvaisia paitsi pinnan luonteesta myös saapuvan säteilyn aallonpituudesta. (Inkinen & Tuohi 2002, 419)

Osa kappaleeseen tulevasta säteilystä voi todellisuudessa absorboitua  $\alpha$ , heijastua  $\rho$  tai läpäistä  $\tau$  kappaleen kuvan 8 mukaisesti. Nämä kaikki kolme ilmiötä riippuvat myös säteilyn aallonpituudesta. Tässä oletetaan, että sirronnan vaikutus lämpösäteilyn alueella on vähäinen, joten sitä ei ole huomioitu lausekkeissa. Absorboitumista, heijastumista ja läpäisyä kuvaavilla suhdeluvuilla on aina voimassa relaatio. (Al-Azzawi 2007, 33 - 35)

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (11)$$

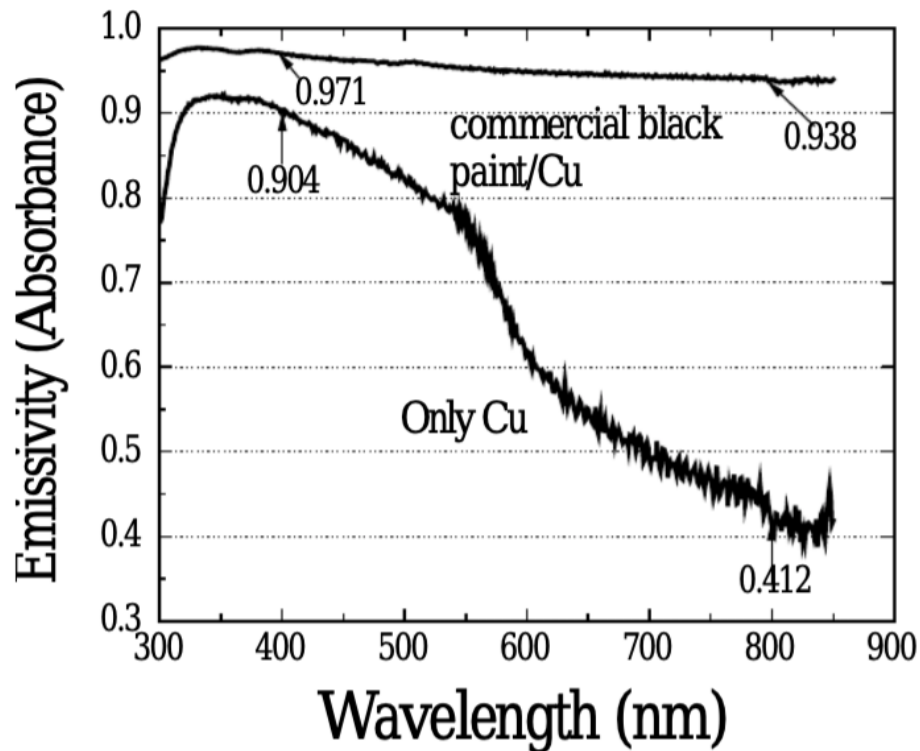
Jos kappale on läpinäkymätön, niin  $\tau = 0$  ja yllä oleva relaatio saa muodon

$$\alpha + \rho = 1 \quad (12)$$



Kuva 8. Kappaleesta mitattu kokonaissäteily.

Emissiivisyys eli emissiokerroin kertoo kappaleen säteilytehon suhteen samassa lämpötilassa olevan ideaalisen säteilijän säteilytehoon. Emissiokerroin on aina välillä 0 – 1. Mitä pienempi kerroin on, sitä heijastavampi on kappale, ja sitä kauempana se on ideaalisesta säteilijästä. Emissiokertoimen suuruus riippuu myös säteilyn aallonpituudesta. Kuvassa 9 on esitetty maalatun ja maalaamattoman kuparin emissiokertoimen muuttuminen eri aallonpituuksilla. (Inkinen & Tuohi 2002, 419)



Kuva 9. Kuparin emissiivisyys aallonpituuden funktiona (Oliva, Maldonado, Diaz & Montalvo 2013).

Kirchhoffin lain mukaan säteilevän kappaleen keskimääräinen absorptiosuhde  $\alpha$  ja emissiivisyys  $\varepsilon$  ovat keskenään yhtä suuret kaikissa lämpötiloissa ja kaikilla aallonpituuksilla materiaalista riippumatta (Wagner 1988, 117; Infradex Oy 2003). Näin ollen kaava 12 saa muodon

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (13)$$

Kirchhoffin laki tarkoittaa, että kappale luovuttaa ja vastaanottaa säteilyä yhtä paljon. Edellytyksenä on, että säteilevä kappale on termisessä tasapainossa ympäristön kanssa. Jos näin ei ole, niin silloin kappale joko lämpenee tai jäähtyy eli absorptio ja emissio eivät ole yhtä suuria. (Inkinen & Tuohi 2002, 420)

Kappaleelle, jonka emissiokerroin on alle 1, voidaan Stefan-Bolzmännin laki kirjoittaa muotoon

$$I = \varepsilon \sigma T^4 \quad (14)$$



Tällaista kappaletta, jonka vakiona pysyvä emissiokerroin on alle 1, kutsutaan harmaaksi säteilijäksi. Kaavan 14 mukaan kappaleen lähettämä säteilyn voimakkuus on siis suoraan verrannollinen kappaleen emissiokertoimeen. (Infradex Oy 2003)

Lämpökamera mittaa aina kappaleesta tulevaa kokonaissäteilyä kuvan 8 mukaisesti. Muista lähteistä peräisin oleva heijastunut säteily voi aiheuttaa suuriakin vääristymiä lämpökuvaan. Lämpökamerakuvauksia tehdessä on siis erityisen tärkeää huomioida emissiivisyyden vaikutus mittauksiin. Pinnolla, joiden emissiokerroin on 0,6 tai alle, todellisen lämpötilan mittaaminen lämpökameralla on vaikeaa tai jopa mahdotonta. Tällöin suurin osa kameran mittaamasta säteilystä voi olla heijastusten aiheuttamia. (Paloniitty 2005, 17) Emissiivisyyteen vaikuttavat säteilyn aallonpituuden ja materiaalin lisäksi myös pintalämpötila ja kuvauskulma (Paloniitty, Paloniitty & Haimilahti 2018, 17).

Sähkölaitteistojen lämpökuvauksia tehtäessä parhaita materiaaleja ovat johteiden eristeet, posliinieristeet ja maalatut pinnat, kuten taulukosta 1 huomataan. Jos tutkittavasta kohteesta ei löydy sopivia mittauskohtia, voi niitä tehdä liimaamalla esimerkiksi sähköteippiä mitattaviin kohtiin. Näin saadaan emissiokerroin sellaiseksi, että lämpökameramittaukset ovat luotettavia. (Rousku 2017, 86)

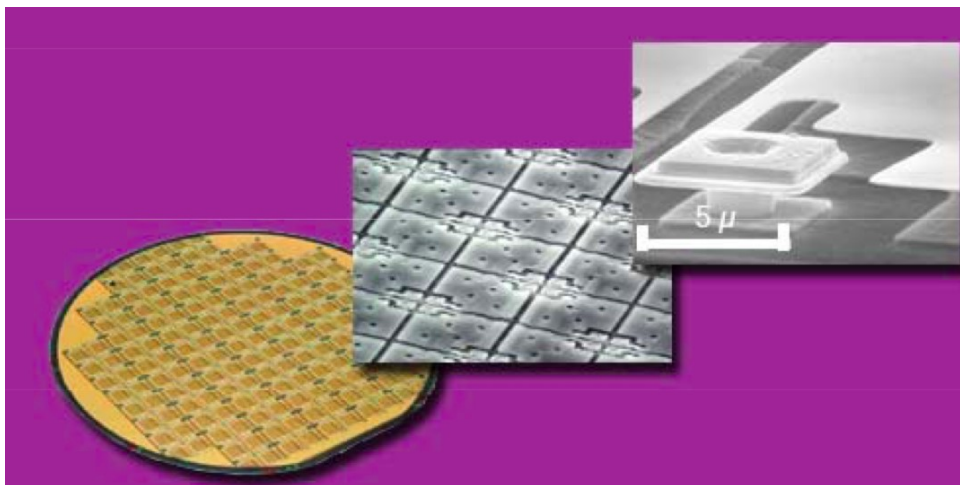
Taulukko 1. Materiaalien emissiokertoimia (ST 53.62/2014, 5).

Ihmisen iho	0,98
Vesi	0,98
Sähköteippi	0,95
Maali	0,90
Paperi	0,90
Posliini, lasitettu	0,92
Posliini , kiiltävä valkoinen	0,70–0,75
Kupari (hapettunut)	0,68
Kupari (kiilloitettu)	0,02
Alumiini (kiilloitettu)	0,05
Alumiini, voimakkaasti hapettunut	0,20–0,30
Alumiini, karkeistettu	0,18
Volframi, hehkulanka	0,39

## 2.6 Matriisi-ilmaisim

Lämpökameroissa käytetään lämpösäteilyn mittaamiseen matriisi-ilmaisimia (Focal Plane Array, FPA). Niitä on kahdenlaisia: kvantti- eli fotoni-ilmaisim ja lämpöilmaisim. Fotoni-ilmaisimissa säteilyn osuessa puolijohteeseen syntyy valosähköilmiön seurauksena elektroneja. Puolijohteen sähkönjohtavuuden muutos puolestaan on suoraan verrannollinen mitattavan kappaleen lähettämään lämpösäteilyyn. Fotoni-ilmaisinta käytettäessä se on jäädytettävä noin 80 K – 120 K lämpötilaan, jolloin sen käyttäminen on hankalampaa ja hitaampaa kuin lämpöilmaisinta käytettäessä. (Palmer Wahl 2007)

Nykyään lämpökameroissa yleisesti käytetään lämpöilmaisinta, joka on jäädyttämätön mikrobolometri-matriisi. Sen toiminta perustuu siihen, että lämpösäteilyn osuessa ilmaisimeen sen lämpötila muuttuu ja samalla muuttuu myös materiaalin resistiivisyys. Tämä resistiivisyyden muutos voidaan mitata ja sen avulla voidaan muodostaa lämpökuva. Matriisin jokaisella kuvapisteellä (pikselillä) on oma ilmaisim, joten lämpökameralla voidaan mitata useamman kohdan lämpötilaa samanaikaisesti. Kuvassa 10 on esitetty matriisi-ilmaisimen rakenne. (Runciman 2014, 78-7; Palmer Wahl 2007)



Kuva 10. Matriisi-ilmaisim FPA (Palmer Wahl 2007).

Lämpökameroiden mikrobolometrit eroavat toisistaan resoluutioltaan, erottelukyvyltään ja herkkyydeltään. Resoluutio kertoo mittapisteiden eli pikseleiden määrän ilmaisimissa. Pienin resoluutio, joka täyttää ST-kortin vaatimukset sähkölaitteistojen tarkastusten osalta on 19200 pikseliä, esimerkiksi 160x120 (ST 53.62 2014, 6).

Vaikka pikseleiden lukumäärä matriisissa eri kameroilla olisi sama, voi kuvanlaatu kuitenkin olla erilainen. IFOV-arvo kertoo pikselierottelukyvyn eli kuinka suuri on yhden pikselin koko, kun kuvausetäisyys on 1 metri. IFOV-arvoon vaikuttaa siis resoluution lisäksi lämpökamerassa olevan linssin au-

keamiskulma. Pienin alue, jonka pintalämpötila voidaan luotettavasti mitata, on 2 – 3 pikseliä. Tämän takia lämpökuvaus kannattaa tehdä mahdollisimman läheltä, jotta voidaan varmistua, että kuvattava kohde on suurempi kuin kameran pienin mitta-alue. (Hietanen 2019)

NETD-arvo (Noise Equivalent Temperature Difference) ilmaisee lämpökameran lämpöherkkyyden. Se kertoo, kuinka suurilla lämpötilaeroilla ilmaisimen matriisi pystyy erottamaan. Mitä pienempi ilmaisimen NETD-arvo on, sitä selkeämmän ja yksityiskohtaisemman kuvan lämpökamera muodostaa. ST-kortin vähimmäisvaatimus NETD arvolle on 0,1 K. Tämä tarkoittaa, että kameralla voidaan erottaa 0,1 kelvinin lämpötilaerot. (Hietanen 2017, 28)

Lämpökameran linssien materiaalina käytetään yleisimmin germaniumia, koska tavallinen lasilinssi ei läpäise säteilyä infrapuna-alueella. Germaniumin lämpösäteilyn läpäisykyky on varsin hyvä, mutta sen ominaisuuksia voidaan parantaa vielä esimerkiksi erilaisilla hiilipinnoitteilla. Muita linssimateriaaleja ovat muun muassa sinkkiselenidi (ZnSe), sinkkisulfidi (ZnS), pii (Si) ja kalsiumfluoridi (CaF<sub>2</sub>). Näitä materiaaleja käytetään usein muissa IR-sovelluksissa, kuten spektroskoopeissa ja lasereissa. (Edmund Optics Ltd 2019; Infradex Oy 2019)

Lämpökamera on rakennettu havaitsemaan lämpötilaeroja, mutta itse lämpötilan mittauksessa se ei ole kovinkaan tarkka. Yleensä lämpökameroiden mittaustarkkuudeksi luvataan  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  tai 2 % riippuen, kumpi on suurempi. Vaikka lämpötilaa ei mitata kovin tarkasti, pitää lämpökameran tarkkuus kuitenkin ST-kortin (2014, 7) vaatimusten mukaisesti tarkistaa vähintään kahden vuoden välein. Tarkistus tehdään käyttämällä valmistajan ohjeiden mukaisesti kalibroituja vertailulaitteistoja. Kameran kalibrointi täytyy suorittaa laitevalmistajan hyväksymässä virallisessa kalibrointiyrietyksessä, josta on mahdollista saada kalibrointitodistus.

### 3 LÄMPÖKAMEROIDEN VERTAILUSUUNNITELMA

Opinnäytetyössä tutustuttiin viiteen kameramalliin, joilla kaikilla oli hie-  
man erilaiset ominaisuudet. Kameravertailun tarkoituksena ei ollut asettaa  
erilaisia ja eri merkkisiä kameroita paremmuusjärjestykseen. Lähtökoh-  
tana oli tutkia, miten eri ominaisuudet vaikuttivat lämpökuvan tarkkuu-  
teen ja miten kuvan laatu ja yksityiskohtien erottelukyky muuttuivat ku-  
vattaessa samaa kohdetta eri kameroilla. Kameroiden ominaisuuksista re-  
soluutio (mittapisteiden lukumäärä), NETD-arvo (lämpöherkkyys), IFOV-  
arvo (pikselierottelukyky) sekä FOV-arvo (kameran kuva-alue) olivat kes-  
keisimpiä asioita, joita otetuista lämpökuvista voitiin vertailla.

Lämpökameroiden ominaisuuksien vertailun lisäksi tutkittiin muutamia il-  
miöitä, joita lämpökameroiden kuvista saatiin helposti näkyville. Tällaisia  
olivat kuorman vaikutus lämpötilaan, emissiivisyyden vaikutus lämpöku-  
vaan sekä sen määrittäminen ja erilaiset lämmönsiirtymistavat. Nämä  
kaikki ovat myös asioita, jotka pitää ottaa huomioon käytännössä, kun läm-  
pökameralla tehdään mittauksia. Erityisesti kuvien analysointivaiheessa  
lämpöopin teoriataustan tunteminen helpottaa tulkintaa sekä auttaa löy-  
tämään mahdollisia ongelmakohtia.

Tutkittavat lämpökamerat edustivat kahden tunnetun lämpökameraval-  
mistajan Flirin ja Fluken tuotteita. Kameroiden hintahaarukka oli 600 eu-  
rosta 25 000 euroon, joten tutkittavana oli hyvin erilaisia kameroita, jotka  
oli tehty erityyppisiä käyttötarpeita ajatellen. Vaikka kaikissa kameroissa  
ilmaisimena oli periaatteessa samanlainen jäähdyttämätön mikrobolo-  
metri, niin kuitenkin ilmaisimien ominaisuudet erosivat toisistaan hyvin  
paljon. Kamerat ja niiden ilmaisimien keskeisimmät ominaisuudet on esi-  
tetty taulukossa 2.

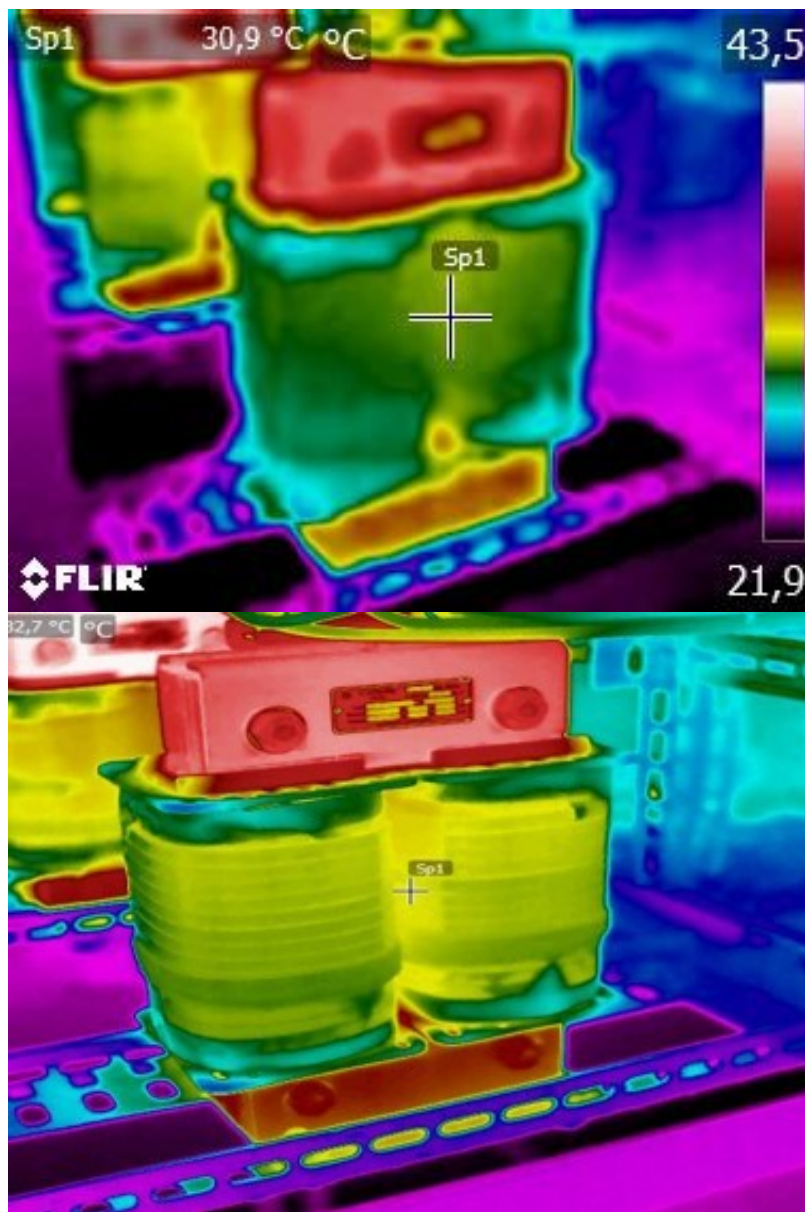
Taulukko 2. Vertailtavat lämpökamerat.

	<p>Flir C2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ RES: 80x60</li> <li>▪ IFOV: 11 mrad</li> <li>▪ FOV: 41° x 31°</li> <li>▪ NETD: 0,1 K</li> </ul>
	<p>Flir E40bx</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ RES: 160x120</li> <li>▪ IFOV: 2,72 mrad</li> <li>▪ FOV: 25° x 19°</li> <li>▪ NETD: 0,045 K</li> </ul>
	<p>Flir T620</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ RES: 640x480</li> <li>▪ IFOV: 0,68 mrad</li> <li>▪ FOV: 25° x 19°</li> <li>▪ NETD: 0,04 K</li> </ul>
	<p>Fluke TiS45</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ RES: 160x120</li> <li>▪ IFOV: 3,9 mrad</li> <li>▪ FOV: 35,7° x 26,8°</li> <li>▪ NETD: 0,09 K</li> </ul>
	<p>Fluke Ti450Pro</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ RES: 320x240</li> <li>▪ IFOV: 1,31 mrad</li> <li>▪ FOV: 24° x 17°</li> <li>▪ NETD: 0,025 K</li> </ul>

## 4 LÄMPÖKAMERAVERTAILUN TULOKSET

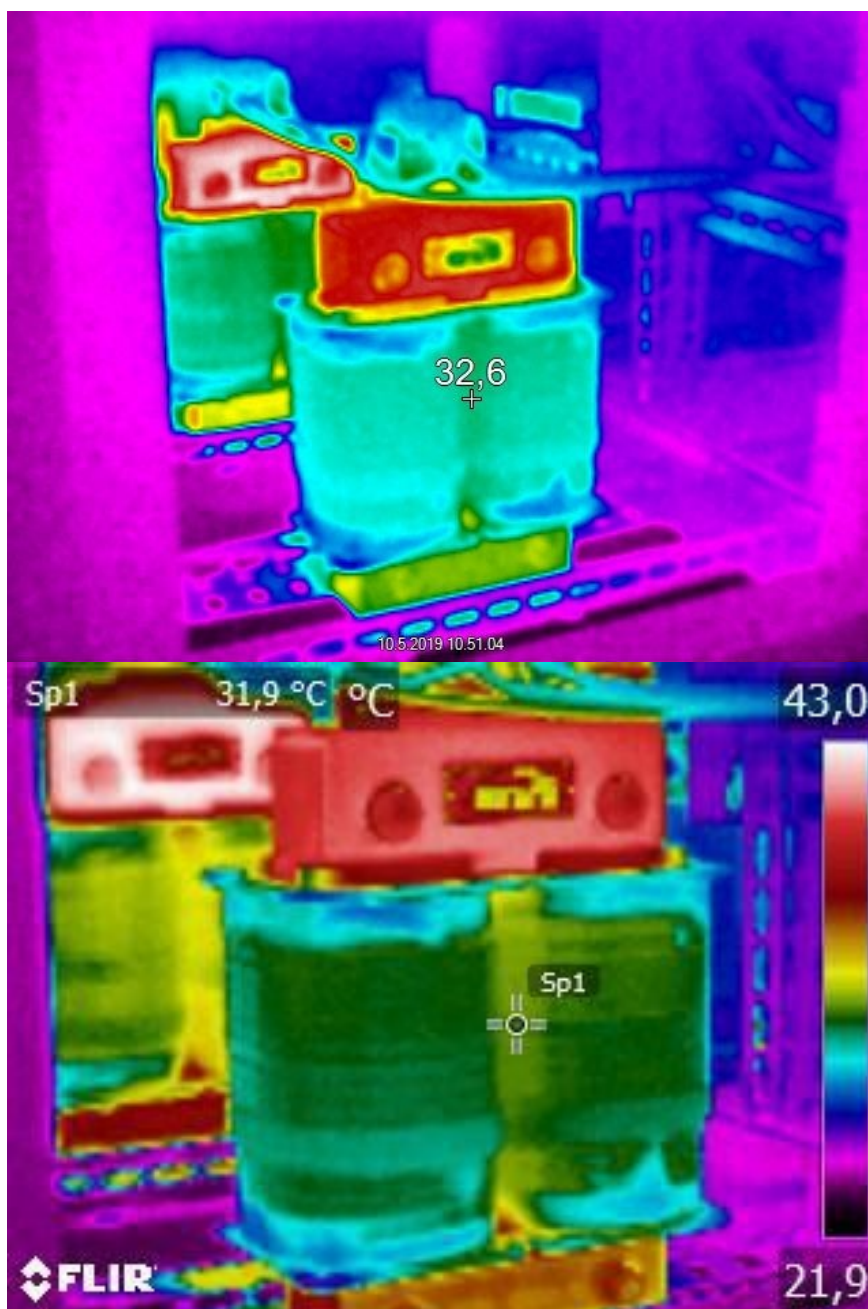
### 4.1 Lämpökamerakuvien vertailu

Tutkimuksen ensimmäisessä osiossa samasta kohteesta otettiin eri kame-roilla lämpökuvia. Kuvausetaisyys kaikissa kuvissa oli noin 1 metri. Ensimmäisessä kuvaparissa (kuva 11) on vertailtavana ominaisuuksiensa puolesta kameroiden ääripäät eli Flirin C2 sekä T620. Kameroiden resoluuti-oissa on huomattava ero, samoin lämpöherkkydessä on selkeä ero. T620:lla otetussa kuvassa kuvattava kohde näyttäisi myös olevan lähempänä. Tämä johtuu erilaisesta linssistä (polttovälistä) ja sen aukeamiskul-masta. T620:lla voidaan siis ottaa samalta etäisyydeltä kuvia, joissa yksi-tyiskohdat erottuvat selkeämmin. Tämä on suuri etu varsinkin tilanteissa, joissa ei päästä kovin lähelle kuvattavaa kohdetta.



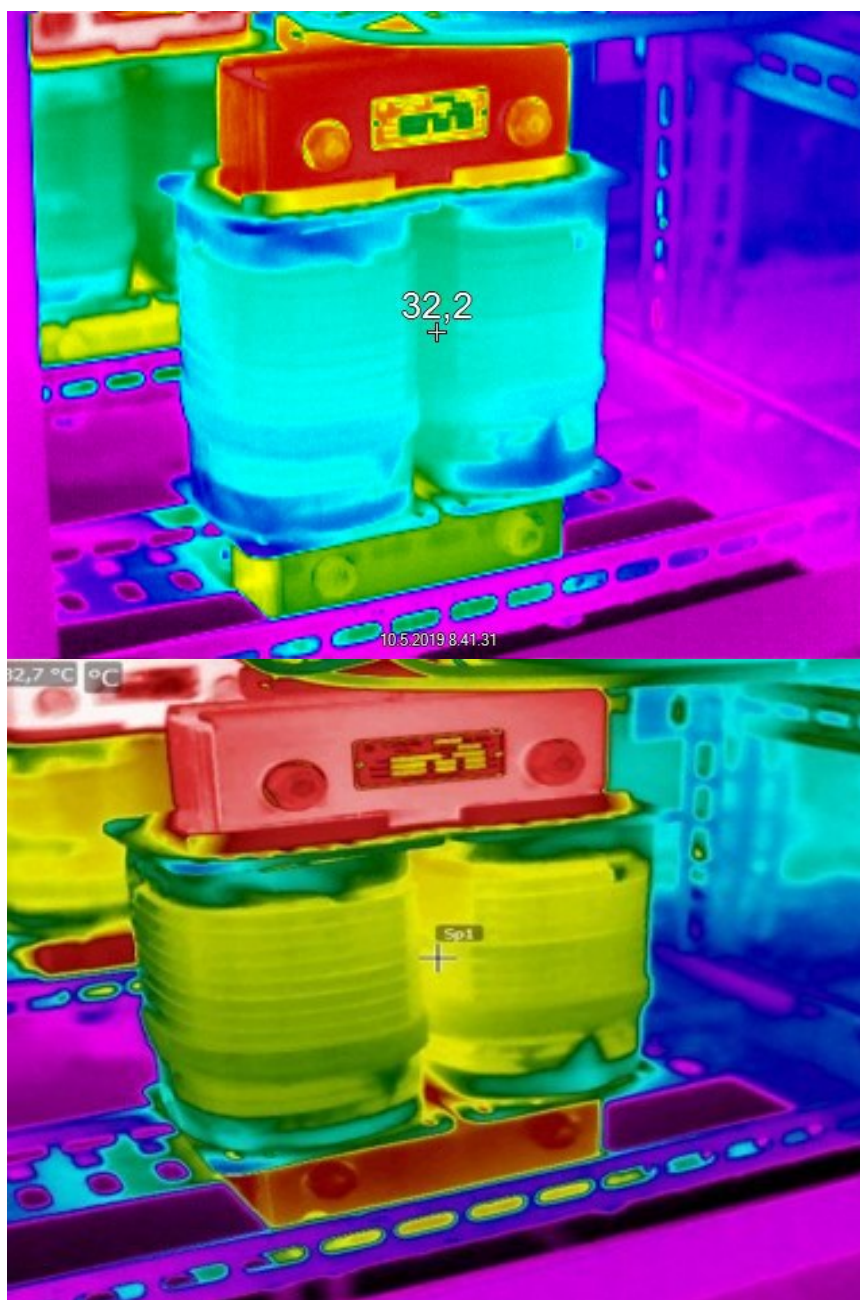
Kuva 11. Lämpökuva Flir C2:lla ja Flir T620:lla otettuna.

Kuvassa 12 molemmilla kameroilla on sama resoluutio, mutta NETD-arvo on E40bx:llä puolet pienempi. Alemmassa kuvassa muuntajan yksityiskohdat näkyvät huomattavasti selkeämmin kuin ylemmässä kuvassa. Tarkempien yksityiskohtien erottuminen johtuu myös E40bx:n paremmasta pikselierottelukyvystä (IFOV). Tämän lisäksi FOV-arvo on erilainen johtuen erilaisesta linssin aukeamiskulmasta, joten alemman kuvan kohde näyttäisi olevan huomattavasti lähempänä. TiS45 on malli, jonka ominaisuudet resoluution ja lämpöherkkyyden (NETD) suhteen täyttävät juuri ja juuri ST-kortin vaatimukset. Vaikka kameroiden ilmaisimet ovat erilaisia, niin niiden mittaamat lämpötilat ovat mittaustarkkuuden ( $\pm 2\text{ °C}$ ) rajoissa kuitenkin samat.



Kuva 12. Lämpökuva Fluke TiS45:lla ja Flirin E40bx:llä otettuna.

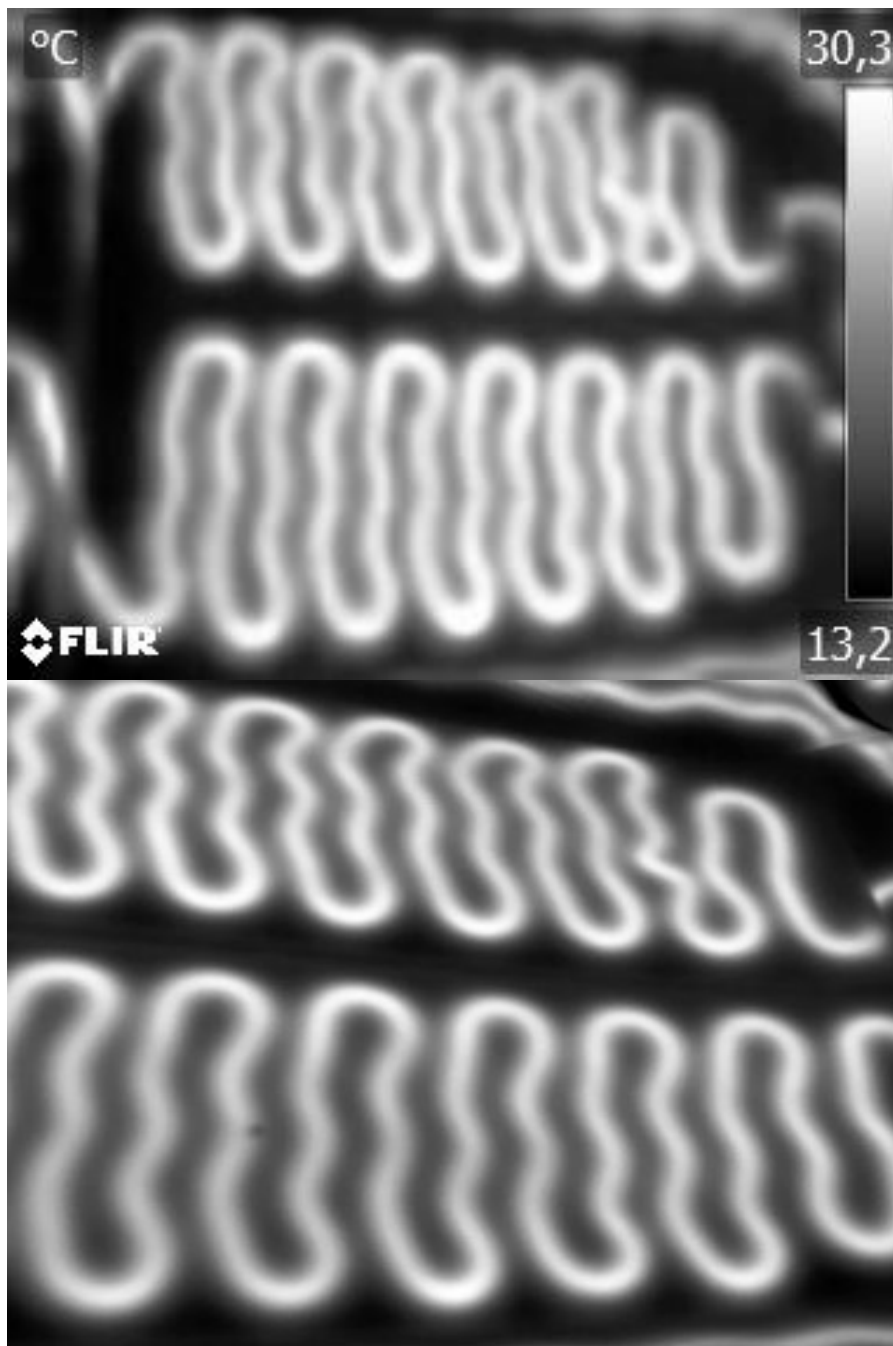
Kuvassa 13 on esitettyä tämän kameravertailun huippumallit. Ti450Prolla resoluutio on huomattavasti pienempi kuin T620:lla. Ti450Pron pikselimäärä on 76 800, kun taas T620:llä vastaava pikselimäärä on 307 200. Ero on kuvasta silmin havaittavissa eli yksityiskohdat erottuvat T620:n kuvasta paremmin. Ero ei kuitenkaan tässä kuvassa ole niin suuri kuin voisi pelkän resoluution perusteella olettaa, koska Ti450Pron lämpöherkkyys on 0,025 kelviniä ja T620:n vastaava arvo on puolestaan 0,04 kelviniä. Näin ollen Ti450Pron pienempi NETD-arvo tarkentaa kuvaa huomattavasti ja yksityiskohdat ovat selvästi näkyvissä. Kameroiden linssien polttoväleistä johtuen kuvat näyttävät, että ne olisi otettu hieman eri etäisyyksiltä. Todellisuudessa kuvausvälys on ollut lähes sama.



Kuva 13. Lämpökuvaa Fluke Ti450Prolla ja Flir T620:lla otettuna.

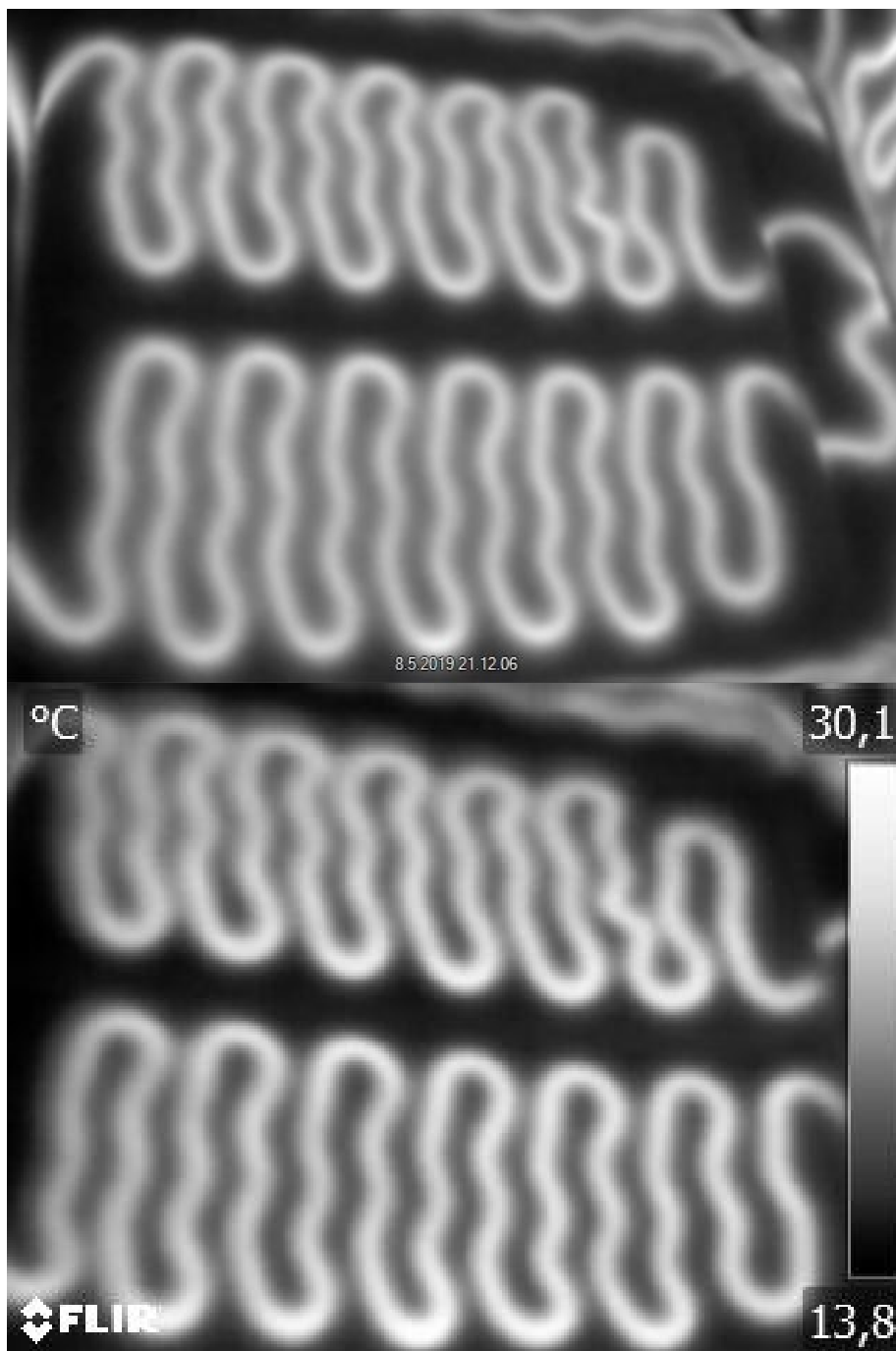


Kuvassa 14 nähdään kameravertailun ääripäät ominaisuuksien suhteen. Mustavalkoisessa kuvassa on edelleen näkyvissä resoluutioiden ero, mutta se ei ole enää niin suuri kuin värillisessä kuvassa. Sopivasti valittu väripaletti havainnollistaa lämpökuvaa huomattavasti. Joissain tapauksissa tosin myös mustavalkoinen lämpökuvakin saattaa olla havainnollinen.



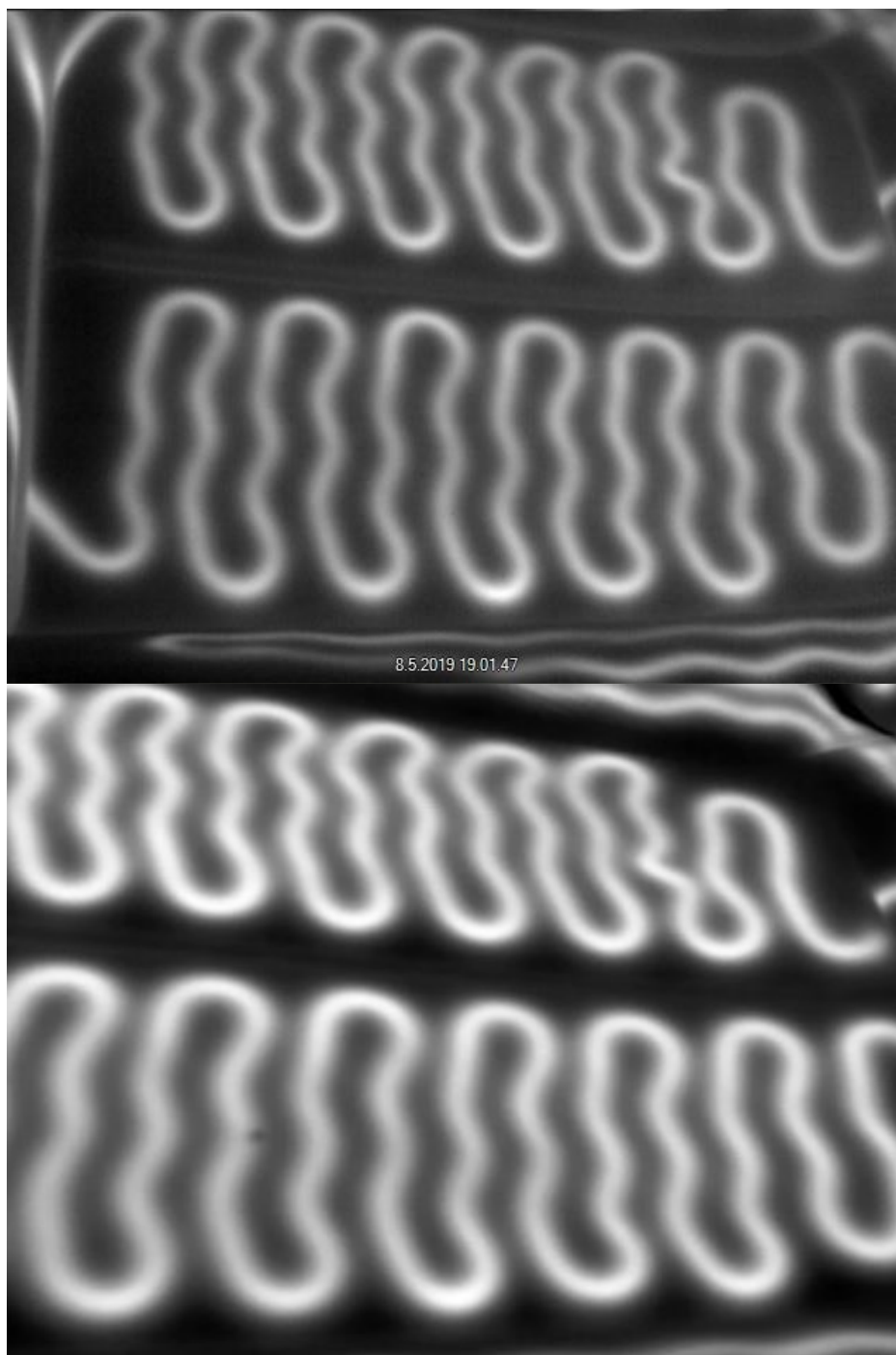
Kuva 14. Mustavalkoinen lämpökuvakin Flir C2:lla ja Flir T620:lla otettuna.

Kuvassa 15 nähdään edelleen, että vaikka kameroilla on sama resoluutio, niin pienempi lämpöherkkyys tarkoittaa jonkin verran alempaa kuvaa. Samoin kuin edellisessä kuvaparissa, ero ei tässäkään kuvaparissa ole enää niin suuri kuin värillisessä kuvassa. Kuvista nähdään myös TiS45:n laajempi linssin aukeamiskulma verrattuna E40Bx:ään.



Kuva 15. Mustavalkoinen lämpökuvaa Fluke TiS45:lla ja Flirin E40bx:llä otettuna.

Kuvan 16 mustavalkoisessa kuvaparissa resoluutioero häviää lähes kokonaan. Ylemmässä kuvassa, joka on otettu Fluken kameralla, yksityiskohdat erottuvat varsin selvästi johtuen pienestä NETD-arvosta. Kuvat on otettu eri aikaan, jolloin penkinlämmittimen lämpötila on ollut hieman erilainen. Myös kuvakulma on kuvissa erilainen. Näinkin pienet erot vaikuttavat jo varsin paljon lopputulokseen. Näin ollen kuvien tarkka vertailu onnistuu ainoastaan suuntaa-antavasti. Kuvista kuitenkin nähdään sama asia kuin kuvasta 13 eli resoluution lisäksi erityisesti NETD-arvo vaikuttaa kuvan laatuun.



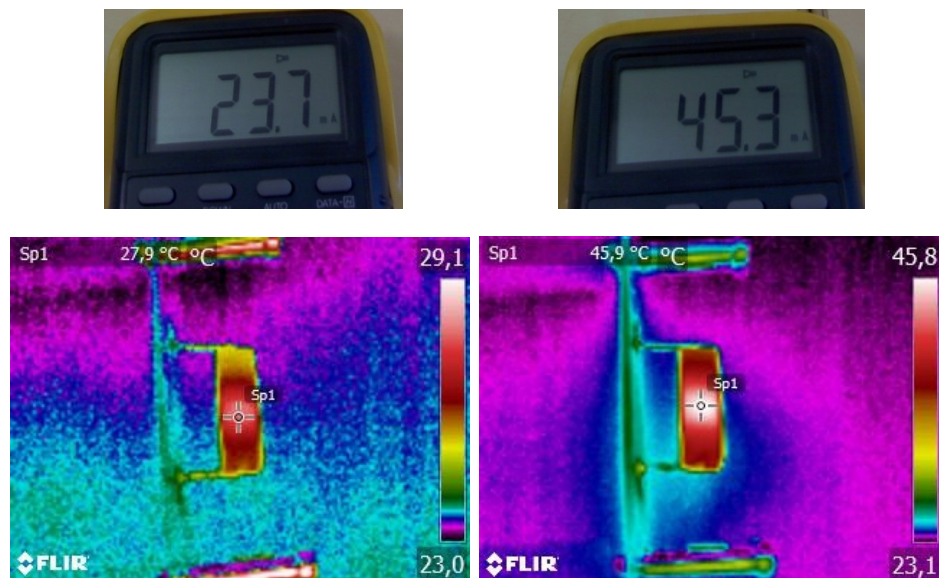
Kuva 16. Mustavalkoinen lämpökuva Fluke Ti450Prolla ja Flir T620:lla otettuna.

## 4.2 Teorian huomioiminen lämpökuvauksissa

Lämpökameralla mittauksia tehdessä lämpöopin teoriaa kannattaa hyödyntää. Erityisesti kuvia tulkitessa teorian osaamisesta on etua. Sähkövirran ja resistanssin vaikutus tutkittavan kappaleen lämpötilaan on yksi keskeisimmistä asioista, jotka täytyy ottaa huomioon sähkölaitteistojen lämpökuvauksissa. Jos johteet tai komponentit ovat väärin mitoitettuja tai järjestelmässä on esimerkiksi löysä liitos, saattaa lämpötila nousta varsin suureksi. Tämä puolestaan voi aiheuttaa vaaratilanteen, jos vikaa ei huomata ajoissa. Lämpökameraa käyttämällä voidaan ongelmat huomata ajoissa ja puuttua niihin.

Lämpökuvauksia tehtäessä suosituksena on, että kuormitus tulisi olla korkein mahdollinen normaali kuormitus tai vähintään 40 % maksimikuormituksesta. Tämän lisäksi kuorman tulisi olla päällä vähintään 30 minuuttia ennen mittausten tekemistä. Mikäli kuormitus on alle 20 %, ei mittauksia tulisi tehdä ollenkaan. Ongelmakohtien lämpötila ei pienellä kuormituksella nouse riittävän korkeaksi, jotta ne voitaisiin luotettavasti löytää. (Sähköinfo Oy 2015)

Kuvassa 17 on esitettyä 220  $\Omega$ :n vastuksen lämpötilat kahdella eri kuormituksella. Joulen lain mukaan virran kaksinkertaistuessa tehonkulutus nelinkertaistuu. Kuvan 17 tilanteeseen voidaan soveltaa kaavaa 4, jonka mukaan virran kaksinkertaistuessa lämpenemä nelinkertaistuu. Kaava 4 pätee parhaiten liitoksiin ja kaapeleihin, mutta sitä voidaan soveltaa tietyissä tilanteissa myös muihin yksinkertaisiin komponentteihin, kuten vastuksiin.



Kuva 17. Vastuksen lämpötilat kahdella eri kuormituksella.

Mittaustilanteessa ympäristön lämpötila oli 23°C, joten

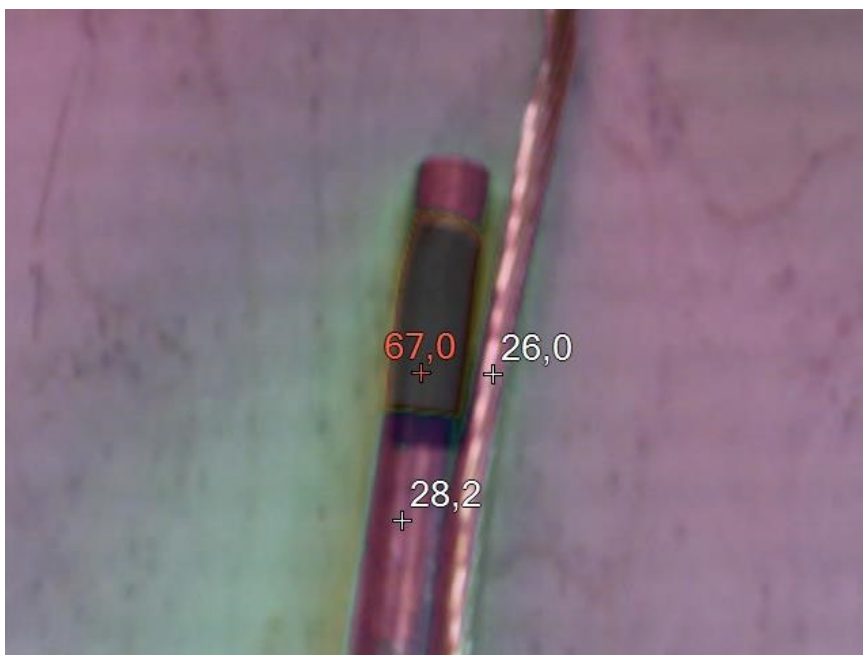
$$\begin{aligned}\Delta T_{\text{todellinen}} &= T_{\text{mitattu}} - T_{\text{ympäristö}} = 27,9^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C} = 4,9^{\circ}\text{C} \\ \Delta T_{\text{uusi kuorma}} &= \Delta T_{\text{todellinen}} \cdot \left(\frac{I_{\text{uusi kuorma}}}{I_{\text{mitattu}}}\right)^2 \\ &= 4,9^{\circ}\text{C} \cdot \left(\frac{45,3\text{mA}}{23,7\text{mA}}\right)^2 = 17,9^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Joten uusi lämpötila tämän mallin mukaan olisi

$$27,9^{\circ}\text{C} + 17,9^{\circ}\text{C} = 45,8^{\circ}\text{C}$$

Matemaattinen malli osui varsin lähelle lämpökameralla mitattua arvoa, joka oli 45,9°C. Tutkimuksessa huomattiin, että mallin pätevyysalue on rajallinen. Mentäessä reilusti yli 100°C:een lämpötiloihin alkaa matemaattisen mallin ennustaman ja todellisen lämpötilan ero kasvaa. Tämä johtuu luultavasti suurimmaksi osaksi ympäristön lämpötilan ja muiden olosuhteiden vaikutuksesta. Lämpöopin periaatteiden mukaisesti mitä suurempi on lämpötilaero, sitä voimakkaammin lämpöenergiaa siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan eli tässä tapauksessa ympäristöön. Tämän lisäksi myös komponentti itsessään ja erityisesti sen lämmöntuotanto vaikuttaa, miten hyvin malli ja todellisuus vastaavat toisiaan. Kuten on jo aikaisemmin todettu, niin malli toimii parhaiten yksinkertaisille komponenteille, mutta sillä voidaan kuitenkin tietyissä rajoissa arvioida myös muidenkin komponenttien lämpenemiä.

Lämpökuvauksia tehtäessä on kiinnitettävä huomiota kuvattavaan pintaan ja arvioitava sen emissiokerrointa. Heijastavia pintoja on vaikea kuvata ja yleensä ne antavat virheellisiä lämpötilan arvoja. Kuvassa 18 on kuvattu lämmitettyä kupariputkea sekä samaan lämpötilaan lämmitettyä kuparijohdinta. Putki on osittain hapettunut, jolloin sen emissiivisyys vaihtelee eri osissa. Putkeen on laitettu sähköteippiä, jonka emissiokerroin tiedetään (0,95) ja sen mukaan kamera on myös säädetty. Kuvasta 18 nähdään, että mitä pienempi on emissiokerroin, sitä pienempi on lämpökameran mittaama lämpötila. Todellinen lämpötila näkyy kuvassa sähköteipin kohdalla eli se on 67°C.



Kuva 18. Lämpökuva kupariputkesta ja kuparijohteesta, joiden emissio-kerroin vaihtelee.

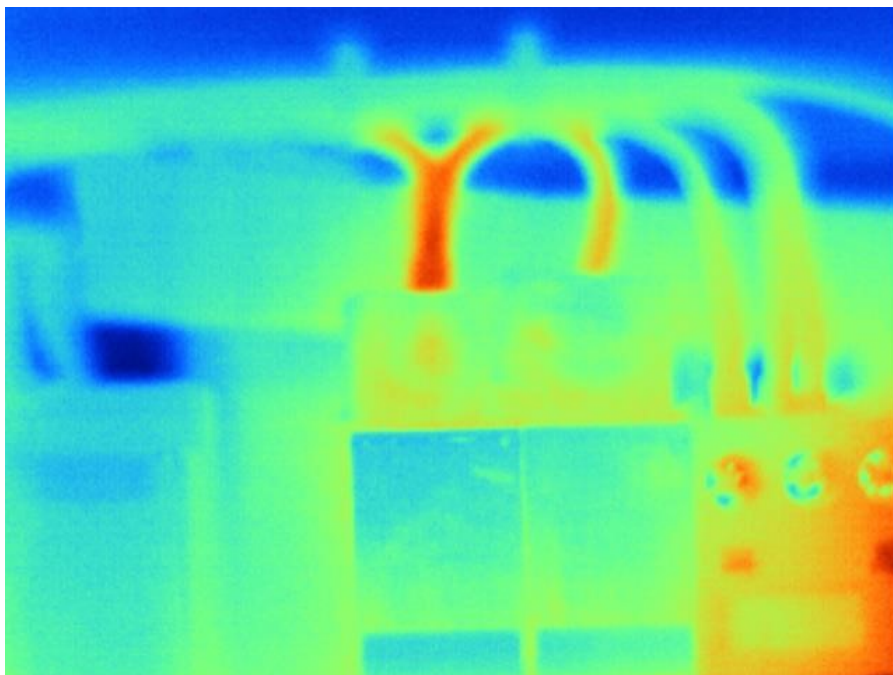
Materiaalin emissiivisyys voidaan määrittää kuvan 19 mukaisesti. Kuvassa punaisella näkyy piste, jonka emissiivisyys tiedetään. Näin ollen kamerasmittaama lämpötila mittaustarkkuuden rajoissa on oikea. Ylimmän pisteen emissioerointa muutettiin siten, että kyseisen pisteen lämpötila näytti samaa lukemaa kuin punaisen referenssipisteen lämpötila. Kirkkaan kuparin emissiivisyys tässä tapauksessa on siis noin 0,08.



Kuva 19. Kuparin emissiokertoimen määrittäminen lämpökameran avulla.

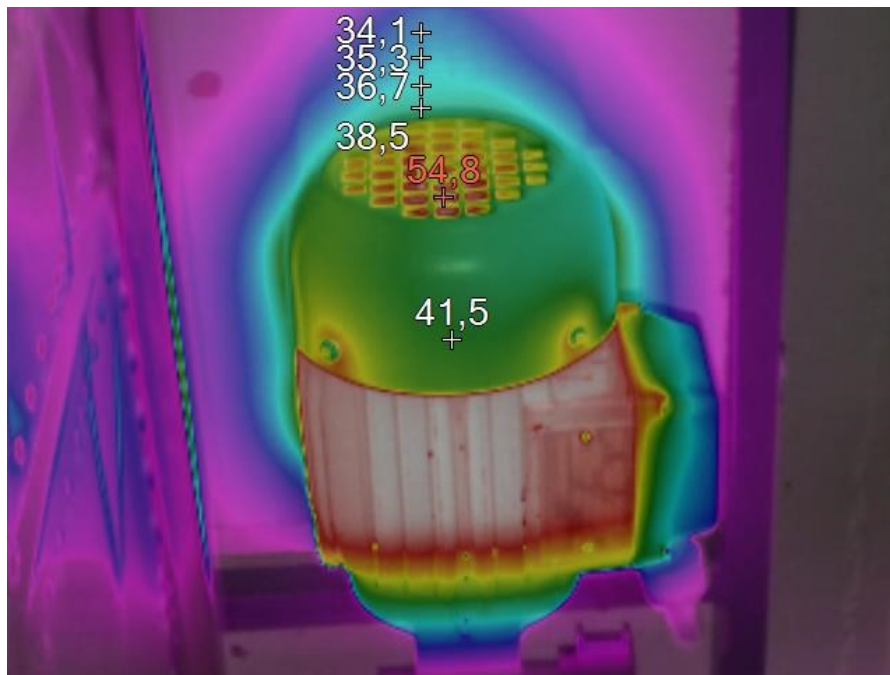
Kuvasta 19 huomataan myös, että hapettuneemman kohdan lämpötila on hieman suurempi ( $28,2^{\circ}\text{C}$ ) kuin vastaavalla kirkkaammalla kohdalla ( $26^{\circ}\text{C}$ ). Tästä voidaan päätellä, että hapettuneemman kohdan emissiivisyys on suurempi. Kuvassa molempien pisteiden emissiokertoimet ovat kuitenkin virheellisiä, koska niiden lämpötilat ovat huomattavasti alhaisempia kuin mitä todellinen lämpötila on. Tämä on hyvä esimerkki siitä, että sähkölaitteistoja kuvattaessa samassa kuvassa on yleensä erilaisia materiaaleja, jolloin emissiokertoimet ovat erilaisia. Tämä on syytä ottaa huomioon lämpökuvia analysoitaessa.

Lämpökuvia tulkittaessa on lämmönsiirtymistavoilla myös merkitystä. Kuvasta 20 nähdään, että vasempaan johdonsuojakatkaisijaan kiinnitetty johdin on selkeästi muita kuvassa olevia johteita kuumempi. Koska johteen lämpötila laskee johdonsuojasta pois päin mentäessä, niin vikakohdan voidaan päätellä olevan johdonsuojassa. Kyseessä on löystynyt liitos, jonka seurauksena liitoksen lämpötila on noussut lisääntyneen resistanssin vaikutuksesta. Lämpö siis johtuu vikakohdasta pois päin termodynamiikan 2. pääsäännön mukaisesti.



Kuva 20. Löysä liitos johdonsuojakatkaisijassa.

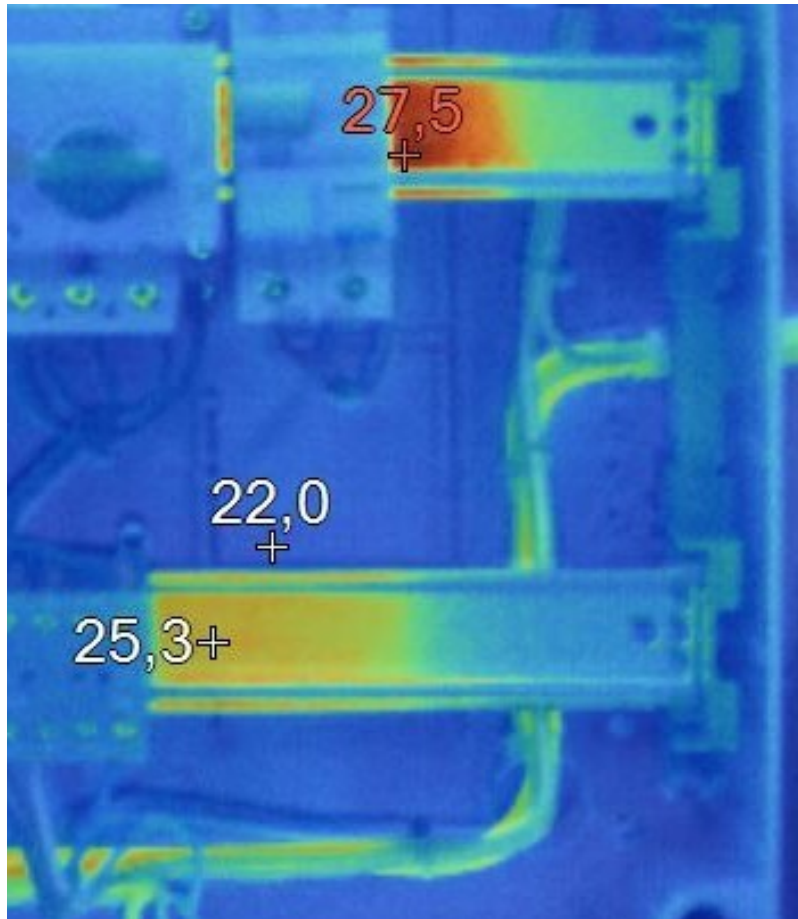
Lämpö voi myös siirtyä konvektiolla tietyissä tilanteissa. Tämä havaitaan kuvasta 21, jossa jäähtymisvaiheessa oleva ylikuumentunut moottori lämmittää ympäröivää ilmaa. Lämmin ilma kohoaa ylöspäin, joten lämpö kulkeutuu ilman mukana lämmittäen ylempänä olevia komponentteja. Lämmön siirtymistä konvektion avulla esiintyy usein kuvattaessa kiinteistöjä ja niiden vuotavia rakenteita.



Kuva 21. Lämpö siirtyy konvektiolla lämmenteestä moottorista.

Lämpökameralla mitataan kappaleen lähettämää säteilyä, josta osa voi olla myös kappaleen heijastamaa säteilyä kaavan 13 mukaisesti. Lämpökameramittauksia tehdessä on tärkeää, että nämä mahdolliset heijastukset huomioidaan kuvaa otettaessa. Heijastuksia voi tulla esimerkiksi valaisimista tai mittaajasta itsestään. Lämpökuvaa otettaessa onkin muistettava, että kuvaa ei kannata ottaa kohtisuoraan kohteesta vaan  $15^\circ - 45^\circ$ :een kulmassa. Tällöin ainakin kuvaajan oma lämpöheijastusta voidaan vähentää. Kuvassa 22 on esimerkki tilanteesta, jossa kuvaajan oma lämpö heijastuu kuvattavan keskuksen din-kiskosta. Jos kuvaustilanteessa epäilee kuumen tai kylmän kohdan olevan heijastuma, kannattaa siirtyä hieman. Jos kyseinen kohta myös siirtyy tai muuttuu, on kyseessä heijastuma (Hietanen 2017, 21). Lämpökamerakuvia tulkittaessa kannattaa välttää heijastuksia siitäkin syystä, että niiden takia saattaa mahdolliset vikakohdat jäädä huomaamatta.





Kuva 22. Kuvaajan oma lämpöheijastuma kiinnityskiskosta.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lämpökamera on hyvä apuväline tarkastettaessa sähkölaitteistojen toimintaa ja etsittäessä mahdollisia vikakohtia. Kameroilla voidaan mitata suuriakin alueita nopeasti ja turvallisesti. Ennen kuvausten aloittamista kannattaa kuitenkin tutustua kuvaamisen perusteisiin sekä lämpökameran toimintaan. Kameran valinnassa kannattaa kiinnittää resoluution lisäksi huomiota myös mittalaitteen lämpöherkkyyteen (NETD) sekä pikselierottelukykyyn (IFOV). Myös kameran linssin polttoväli ja sen aukeamiskulma määrittävät, millaisia kuvia kyseisellä kameralla saadaan. Linssin valinnassa kannattaa pohtia, mitä tullaan kuvaamaan ja kuinka lähellä tai kaukana kuvattavat kohteet ovat. Joissakin kameramalleissa on mahdollista myös hankkia useita linsskejä, joita voidaan vaihtaa kuvaustilanteen mukaan.

Kameroiden kuvanlaatua vertailtaessa huomio kiinnittyi siihen, miten suuri merkitys NETD-arvolla oli kuvan tarkkuuteen. Tietenkin suuri resoluutio oli perusta tarkalle lämpökuvulle, mutta pieni herkkyys lämpötilaeroille kasvatti lämpökuvassa yksityiskohtien määrää jo todella paljon. Toinen huomio, joka testimittauksissa nousi esiin, oli kameran hinta. Tietenkin kalliimassa kamerassa ominaisuudet ovat aina paremmat ja myös kuvan laatu

on tällöin parempi. Ero kuvan laadussa kalleimman ja keskihintaisen kameran välillä oli kuitenkin yllättävän pieni.

ST-kortin vaatimukset lämpökameroille eivät ole sähkölaitteistojen kuvauksissa kovinkaan suuret. Tämän opinnäytetyön testimittausten perusteella huomattiin, että resoluution ja lämpöherkkyyden pienen lisäämisen seurauksena lämpökuvien tulkinta helpottui ja nopeutui. Myös vikakohtien löytyminen helpottui huomattavasti yksityiskohtien paremman erottumisen takia.

Lämpökameramittauksia tehtäessä kannattaa myös lämpöopin teoria pitää mielessä. Mittauksia tehtäessä käy helposti niin, että materiaalien erilaisten emissiivisyyksien tai heijastusten takia jää oleellisia asioita huomioida. Sähkölaitteistoissa useasti viat syntyvät hiljalleen, jolloin alkuvaiheessa niiden löytäminen on haasteellista varsinkin, jos kuormat eivät ole suuria. Myös yksittäisistä lämpökuvista vian tulkitseminen on hankalaa, jos ei ole aikaisempia referenssikuvia, joihin uusia kuvia voidaan verrata.

Lämpöopin teorian merkitys on suuri myös kuvien analysointivaiheessa. Lämpöenergian siirtymistavat sekä lämpöopin pääsäännöt ovat erityisen tärkeitä tulkittaessa kuvia ja paikallistettaessa vikakohtia. Kannattaa myös muistaa, että pelkät kuumat kohdat eivät suoraan paljasta vikakohtaa, vaan lämpö saattaa johtua kauempaakin. Myös kylmät kohdat voivat joissain tilanteissa kertoa ongelmista sähkölaitteistossa. Koska lämpö siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan, niin tietyissä tilanteissa komponentti ei näytä lämpökuvassa niin kuumalta kuin mitä se itse lämpöä tuottaa. Esimerkkinä tällaisesta tilanteesta on komponentti, joka altistuu tuulelle tai sateelle. Lämpö siis johtuu ja kuljettuu itsestään kohti matalampia lämpötiloja.

Lämpökameramittauksia tehtäessä lämpö- ja sähköopin teorioiden lisäksi myös tietämys itse kuvattavasta sähkölaitteistosta ja sen erityispiirteistä on tärkeää. Esimerkiksi osa komponenteista toimii normaalistikin korkeammassa lämpötiloissa kuin toiset ja tämä on mittaajan tiedettävä. Lämpökamerakuvauksia tehtäessä tarvitaan siis teoriaosaamisen lisäksi myös runsaasti käytännön kokemusta erilaisista mittaustilanteista ja laitteistoista.

Tässä opinnäytetyössä keskeisimpänä osana oli opetusmateriaalin tekeminen lämpökuvauksen hyödyntämisestä sähkölaitteistojen tarkastuksissa. Teoreettinen osio syntyi täydentämään, tukemaan ja syventämään opetusmateriaalissa käsiteltyjä teemoja. Tulevaisuudessa opetusmateriaalia voi vielä helposti täydentää esimerkiksi sopivilla lämpökuvilla erilaisista laitteistojen vikatilanteista. Myös käytännön mittausten kautta syntyneitä sopivia käytänteitä saattaa tulla esiin ja ne on helppo jakaa tämän koulutusmateriaalin kautta eteenpäin.

## LÄHTEET

- Al-Azzawi, A. (2007). *Light and Optics*. Boca Raton: CRC Press.
- Catena, G. (n.d). Catena & Thermography. Haettu 28.5.2019 osoitteesta [http://www.treethermography.it/infrared\\_radiation.htm](http://www.treethermography.it/infrared_radiation.htm)
- CXC (Chandra X-ray Center). (2014). Chandra X-ray Observatory. Haettu 27.5.2019 osoitteesta [http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/elec\\_mag\\_spec.html](http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/elec_mag_spec.html)
- Edmund Optics Ltd. (2019). The Correct Material for Infrared (IR) Applications. Haettu 6.6.2019 osoitteesta <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/the-correct-material-for-infrared-applications/>
- Fagerholm, N. (1986). *Termodynamiikka*. Espoo: Otatieto Oy.
- Hautala, M. & Peltonen, H. (2001). *Insinöörin (AMK) fysiikka osa I*. Lahti: Lahden Teho-Opetus Oy.
- Hietanen, M. (2019). Fluke -lämpökameraseminaari. Seminaariesitys 7.3.2019. Fluke Finland Oy.
- Hietanen, M. (2017). Lämpökameroiden toiminta. Teoksessa H. Rousku (toim.) *Sähkölaitteiston lämpökuvaus*. Espoo: Sähköinfo Oy, 23 – 35.
- Infradex Oy. (2003). Lämpökuvauksen teoria. Haettu 31.3.2019 osoitteesta <https://www.infradex.com/wp-content/uploads/2016/08/teoria.pdf>
- Infradex Oy. (2019). Lämpökameran toiminta. Haettu 6.6.2019 osoitteesta <https://www.infradex.com/lamposateily-ja-lampokamera/>
- Inkinen, P. & Tuohi, J. (2002). *Momentti 1 Insinöörifysiikka*. Helsinki: Otava.
- Jaakkola, P. (2014). Termodynamiikan perusteet -opintomoniste. TUT. Haettu 7.6.2019 osoitteesta <http://www.students.tut.fi/~jaakkol4/ltplusplus/opintomonisteet/termodynamiikka.pdf>
- Lehto, H. & Luoma, T. (2001). *Fysiikka 5 Moderni fysiikka*. Helsinki: Tammi.

Oliva, A., Diaz, E., Maldonado, R. & Montalvo, A. (2013). A high absorbance material for solar collectors' applications. Third Congress on Materials Science and Engineering. IOP Publishing. Haettu 31.5.2019 osoitteesta [https://www.researchgate.net/publication/258805650\\_A\\_high\\_absorbance\\_material\\_for\\_solar\\_collectors'\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/258805650_A_high_absorbance_material_for_solar_collectors'_applications)

Paloniitty, S. (2005). *Rakennuksen lämpökuvaus*. (e-julkaisu). Hämeenlinna: HAMK.

Paloniitty, S., Paloniitty, J. & Haimilahti, J. (2018). *Lämpökuvaus rakentamisessa*. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Palmer Wahl Instrumentation Group. (2007). The Evolution of Thermal Imaging Cameras. Haettu 3.6.2019 osoitteesta <http://instrumentation.com/PDFS/EvolutionThermalImagingCameras.pdf>

Peltonen, H., Perkkiö, J. & Vierinen, K. (2000). *Insinöörin (AMK) fysiikka osa II*. Lahti: Lahden Teho-Opetus Oy.

Potter, M. & Somerton, G. (1993). *Schaum's outline of theory and problems of thermodynamics for engineers*. New York: McGraw-Hill.

Rousku, H. (2017). Sähkölaitteiston lämpökuvauksen suorittaminen. Teoksessa H. Rousku (toim.) *Sähkölaitteiston lämpökuvaus*. Espoo: Sähköinfo Oy, 73 – 98.

Runciman, H. (2014). Thermal Imaging. Teoksessa G. Webster & H. Eren (toim.) *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 78-1 – 78-11.

Sensors Unlimited. (2019). Third Infrared Window. Haettu 28.5.2019 osoitteesta <http://www.sensorsinc.com/technology/third-infrared-window>

ST 53.62. (2014). Sähkölaitteistojen lämpökuvaus. Espoo: Sähkötieto ry.

Sähköinfo Oy. (2015). Sähkölaitteistojen lämpökuvaukset, sähköasennuspäivä 2015). Haettu 4.6.2019 osoitteesta [https://caruna-cms-prod.s3-eu-west-1.amazonaws.com/sahkolaitteistojen\\_lampokuvaukset.pdf?c4Yd4THwh1RaxRR7rfRqy5H3U3jCDNnY](https://caruna-cms-prod.s3-eu-west-1.amazonaws.com/sahkolaitteistojen_lampokuvaukset.pdf?c4Yd4THwh1RaxRR7rfRqy5H3U3jCDNnY)

The LibreTexts Library. (2019). Blackbody radiation. Haettu 28.5.2019 osoitteesta [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University\\_Physics/Book%3A\\_University\\_Physics\\_\(OpenStax\)/Map%3A\\_University\\_Physics\\_III\\_-\\_Optics\\_and\\_Modern\\_Physics\\_\(OpenStax\)/6%3A\\_Photons\\_and\\_Matter\\_Waves/6.1%3A\\_Blackbody\\_Radiation](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/6%3A_Photons_and_Matter_Waves/6.1%3A_Blackbody_Radiation)

Young, H. D. & Freedman, R. A. (1996). *University Physics*. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, INC.

Wagner, W. (1988). *Lämmönsiirto*. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Wolski, Andrzej. (2011). Theory of electromagnetic fields. Haettu 27.5.2019 osoitteesta  
<https://cds.cern.ch/record/1400571/plots>