16 Lämpökuvauksen teoria

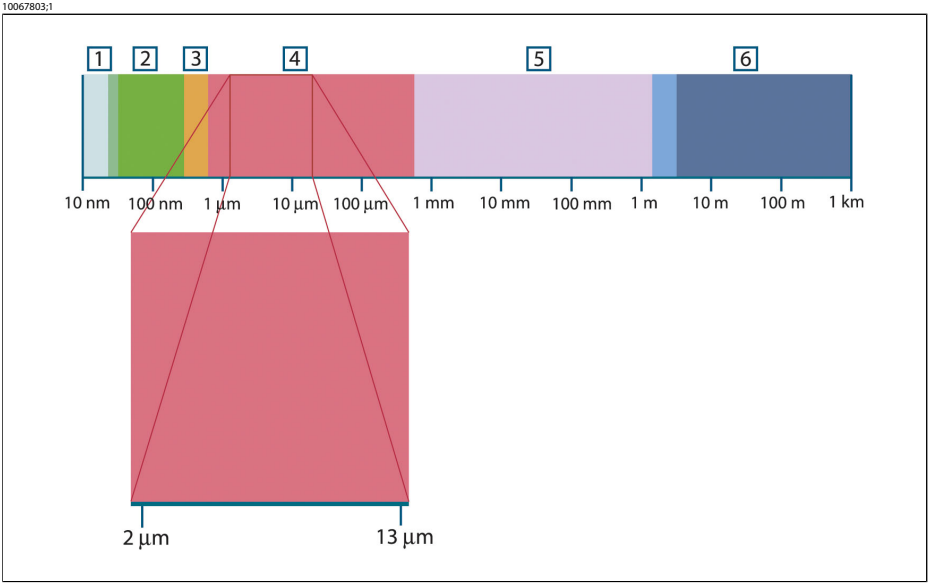
16.1 Johdanto

Infrapunasäteily ja siihen liittyvä lämpökuvauksen tekniikka ovat monille lämpökameran käyttäjille aiheina uusia. Tässä osassa tutustutaan lämpökuvauksen teoriaan.

16.2 Sähkömagneettinen spektri

Sähkömagneettinen spektri jaetaan mielivaltaisesti aallonpituusalueisiin, joita kutsutaan *kaistoiksi* ja jotka erotetaan niiden tapojen perusteella, joilla kyseistä säteilyä voidaan tuottaa ja havaita. Sähkömagneettisen spektrin eri kaistojen säteily on periaatteessa samanlaista. Niitä koskevat samat lait ja niitä erottaa ainoastaan aallonpituus.

10067803;1



Kuva 16.1 Sähkömagneettinen spektri. **1:** Röntgensäteily; **2:** Ultraviolettisäteily; **3:** Näkyvä valo; **4:** Infrapunasäteily; **5:** Mikroaallot; **6:** Radioaallot.

Lämpökuvauksessa hyödynnetään sprektrin infrapunaista kaistaa. Lyhytaaltojen puoleisessa päässä infrapunaisen alue rajoittuu tummanpunaiseen, joka on silmin nähtävissä. Pitkien aaltojen puolella infrapunakaista yhtyy mikroaaltojen radiotaajuuksiin, jotka ovat millimetrialueella.

Infrapunakaista jaetaan edelleen neljään kapeampaan kaistaan, joiden rajat on valittu mielivaltaisesti. Nämä ovat: *lähi-infrapunakaista* (0,75 — 3 µm), *keski-infrapunakaista* (3 — 6 µm), *pitkäaaltokaista* (6 — 15 µm) ja *ääri-infrapunakaista* (15 — 100 µm). Siitä

huolimatta, että aallonpituudet ilmoitetaan mikrometreinä (µm), muut mittayksiköt ovat edelleen käytössä tämän spektrin alueen aallonpituuksien mittaamisessa, *mm*. nanometri (nm) ja Ångström (Å).

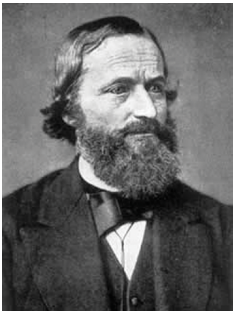
Eri aaltoalueiden mittaukset ovat yhteydessä toisiinsa seuraavasti:

$$10\ 000\ \text{Å} = 1\ 000\ \text{nm} = 1\ \mu = 1\ \mu\text{m}$$

16.3 Mustan kappaleen lähettämä säteily

Musta kappale määritellään kohteeksi, joka absorboi kaiken itseensä kohdistuvan säteilyn millä tahansa aallonpituudella. Nimitys *musta* säteilevän kappaleen yhteydessä on ilmeisen harhaanjohtava ja saa selityksensä Kirchhoffin laissa (*Gustav Robert Kirchhoff*, 1824–1887), jonka mukaan kappale, joka pystyy absorboimaan kaiken säteilyn millä tahansa aallonpituudella pystyy myös lähettämään säteilyä.

10398803;1



Kuva 16.2 Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887)

Säteilylähteenä toimivan mustan kappaleen rakentaminen on periaatteessa hyvin yksinkertaista. Läpinäkymättömästä absorboivasta materiaalista valmistetun isotermisen ontelon aukko on säteilyominaisuuksiltaan miltei täydellinen musta kappale. Kaiken säteilyn itseensä imevän kappaleen rakentamisen käytännön yksi sovellus on valotiivis laatikko, jonka yhdellä sivulla on aukko. Kaikki aukosta laatikon sisään tuleva säteily siroaa ja absorboituu toistuvasti heijastuessaan siten, että vain äärimmäisen pieni osa siitä voi päästä ulos. Näin saavutettava aukon mustuus (säteilemättömyys) on lähes mustan kappaleen luokkaa ja miltei täydellinen kaikilla aallonpituuksilla.

Jos kyseisen kaltaiseen isotermiseen onteloon asennetaan sopiva säteilijä, muodostuu *ontelosäteilijäksi* kutsuttu kohde. Tasaiseen lämpötilaan lämmitetty isoterminen ontelo muodostaa säteilylähteenä mustan kappaleen, jonka ominaisuudet määräytyvät yksinomaan ontelon lämpötilan perusteella. Kyseisen kaltaisia ontelosäteilijöitä käytetään usein mm. laboratorioissa säteilylähteinä termografisten mittalaitteiden kalibroinnissa tarvittavina lämpötilan vertailupisteinä. Näin myös FLIR Systemsin kameroiden tapauksessa.

Mikäli mustan kappaleen lähettämän säteilyn lämpötila ylittää 525 °C (977 °F), lähde alkaa muuttua näkyväksi siten, että se paljaalla silmällä tarkasteltuna lakkaa olemasta musta. Säteilijä muuttuu ensin punahehkuiseksi, sitten väri lämpötilan edelleen noustessa muuttuu oranssin kautta keltaiseksi. Kappaleen niin kutsutun *värilämpötilan* määritelmä on se lämpötila, johon musta kappale tulee lämmittää, jotta saavutetaan sama näkyvä aallonpituus.

Kolme lauseketta, jotka kuvaavat mustan kappaleen lähettämää säteilyä.

16.3.1 Planckin laki

10399203;1

Kuva 16.3 Max Planck (1858–1947)

Max Planck (1858–1947) kuvasi mustasta kappaleesta peräisin olevan säteilyn aallonpituuksien jakautumisen seuraavan kaavan avulla:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5\left(e^{hc/\lambda kT} - 1\right)} \times 10^{-6}\left[Watt/m^2\mu m\right]$$

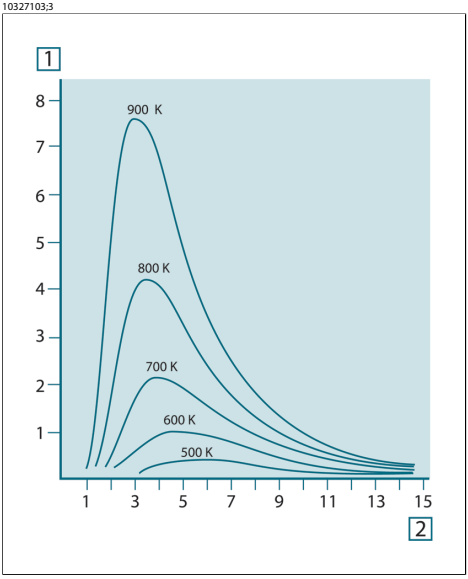
jossa:

$W_{\lambda b}$	Mustan kappaleen säteilyteho aallonpituudella λ.
c	Valon nopeus = 3×10^8 m/s
h	Planckin vakio = 6.6×10^{-34} Js.
k	Boltzmannin vakio = 1.4×10^{-23} Joule/°K.
T	Mustan kappaleen absoluuttinen lämpötila (°K).
λ	Aallonpituus (µm).

HUOM: Käytetään kerrointa 10^{-6}, koska käyrien kuvaama lähtevä säteily on ilmoitettu muodossa W/m²µm. Jos kerroin jätetään pois, mittayksikkö on W/m²µm.

Planckin kaavaa käyttäen eri lämpötilojen pohjalta muodostetut graafiset kuvaajat muodostavat joukon käyriä. Kunkin Planckin käyrän säteilyteho on nolla, kun λ = 0, saavuttaa sitten nopeasti ääriarvon aallonpituudella $\lambda_{maks.}$ ja tämän ohitettuaan lähestyy jälleen nollaa erittäin pitkillä aallonpituuksilla. Mitä korkeampi lämpötila, sitä lyhyemmällä aallonpituudella ääriarvo saavutetaan.

10327103;3



Kuva 16.4 Planckin lain mukainen mustan kappaleen lähettämä säteilyteho eri absoluuttisissa lämpötiloissa. **1:** Säteilyteho (W/cm^2 × 10^3(µm)); **2:** Aallonpituus (µm)

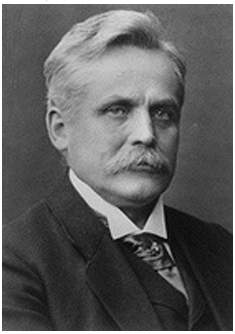
16.3.2 Wienin siirtymälaki

Derivoimalla Planckin kaavaa λ ja määrittämällä maksimikohta saadaan:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}[\mu m]$$

Tämä on Wienin kaava (*Wilhelm Wien*, 1864–1928), joka ilmaisee matemaattisesti sen yleisen havainnon, jonka mukaan lämpötilan noustessa lämpösäteilijän väri vaihtuu punaisesta oranssin kautta keltaiseen. Värin aallonpituus on sama, joka saadaan laskennallisesti kaavasta $\lambda_{maks.}$. Minkä tahansa mustan kappaleen lämpötilan kaavan $\lambda_{maks.}$ mukaisen arvon hyvä likiarvo saadaan soveltamalla nyrkkisääntöä 3 000/T µm. Näin siis erittäin kuumat tähdet, kuten Sirius (11 000 K), joka lähettää sinivalkoista valoa, säteilevät eniten paljaalle silmälle näkymättömällä ultraviolettikaistalla, jonka aallonpituus on 0,27 µm.

10399403;1

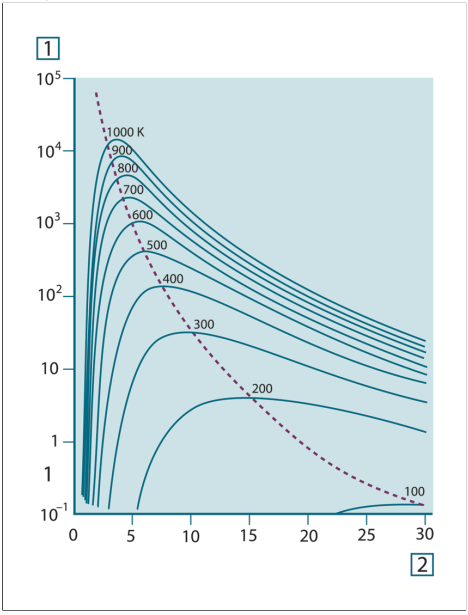


Kuva 16.5 Wilhelm Wien (1864–1928)

Aurinko (noin 6 000 K) lähettää keltaista valoa, jonka huipputeho sijoittuu aallonpituudelle noin 0,5 µm, joka on näkyvän spektrin keskivaiheilla.

Huoneenlämpötilassa (300 K) säteilytehon huippu sijoittuu kaukoinfrapunan kaistalle aallonpituudelle 9,7 µm, kun taas nestemäisen typen lämpötilassa (77 K) miltei merkityksettömän säteilytehon huippu sijoittuu aallonpituudelle 38 µm, joka edustaa ääri-infrapunan kaistaa.

10327203;3



Kuva 16.6 Planckin käyrät, jotka on piirretty puolilogaritmiselle asteikolle 100 K — 1000 K. Pisteviiva edustaa Wienin siirtymälain kuvaamaa, kunkin lämpötilan maksimisäteilytehon sijaintia. **1:** Säteilyteho (W/cm^2 (µm)); **2:** Aallonpituus (µm).

16.3.3 Stefan-Boltzmannin laki

Integroimalla Planckin kaava arvosta λ = 0 arvoon λ = ∞ saadaan mustan kappaleen kokonaissäteilyteho (W_b):

$$W_b = \sigma T^4 \ [\mathrm{Watt/m^2}]$$

Tämä on Stefan-Boltzmannin kaava (*Josef Stefan*, 1835–1893, ja *Ludwig Boltzmann*, 1844–1906), jonka mukaan mustan kappaleen kokonaissäteilyteho kasvaa verrannollisesti absoluuttisen lämpötilan neljänteen potenssiin. Graafisesti kuvattuna W_b on Planckin käyrän alapuolella oleva tiettyä lämpötilaa vastaava alue. Voidaan osoittaa, että säteilyteho välillä λ = 0 — $\lambda_{maks.}$ on vain 25 % kokonaistehosta, joka on suunnilleen auringon näkyvän valon alueella lähettämän säteilyn määrä.

10399303;1

Kuva 16.7 Josef Stefan (1835 — 1893) ja Ludwig Boltzmann (1844 — 1906)

Jos ihmisruumiin säteilemä teho lasketaan Stefan-Boltzmannin kaavan mukaan lämpötilan ollessa 300 °K ja antamalla ulkopinta-alaksi noin 2 m^2, saadaan 1 kW. Tämä on niin suuri tehohäviö, että se on jotenkin kompensoitava. Tämä tapahtuu ensinnäkin lisäämällä ympäristön heijastaman säteilyn määrää nostamalla lämpötila huoneenlämpöiseksi, mikä ei poikkea liikaa ruumiinlämpötilasta, ja toiseksi luonnollisesti käyttämällä vaatetusta.

16.3.4 Mustista kappaleista poikkeavat säteilylähteet

Toistaiseksi on käsitelty ainoastaan mustia kappaleita säteilijöinä ja niiden lähettämää säteilyä. Todellisen maailman esineet eivät juuri toteuta esiteltyjä lakeja merkittävillä aallonpituuskaistoilla, vaikkakin ne voivat toimia mustien kappaleiden tavoin tietyillä spektrin alueilla. Esimerkiksi jotkin maalityypit vaikuttavat näkyvässä valossa täysin *valkoisilta*, mutta muuttuvat selvästi *harmaiksi*, jos niihin kohdistetaan aallonpituudeltaan noin 2 µm säteilyä, ja yli 3 µm:n alueella ne näkyvät miltei *mustina*.

On olemassa kolme ilmiötä, jotka toteutuessaan voivat estää todellisen maailman kappaleita toimimasta mustan kappaleen tavoin: osa sisääntulevasta säteilystä α voi absorboitua, osa ρ voi heijastua ja osa τ siirtyä. Koska jokainen näistä tekijöistä on enemmän tai vähemmän riippuvainen aallonpituudesta, käytetään alaindeksiä λ, joka ilmaisee näiden riippuvuuden spektrin alueesta. Täten:

- absorptiosuhde α_λ= kohteeseen absorboitunut säteily jaettuna kohteeseen tulleella säteilyllä.
- heijastussuhde ρ_λ = kohteen heijastama säteily jaettuna kohteeseen tulleella säteilyllä.
- läpäisysuhde τ_λ = kohteen läpi siirtyvä säteily jaettuna kohteeseen tulleella säteilyllä.

Koska näiden kolmen tekijän summan on aina vastattava kunkin aallonpituuden kokonaismäärää, saadaan relaatio:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

Läpinäkymättömien materiaalien tapauksessa $\tau_\lambda = 0$, jolloin relaatio pelkistyy muotoon:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

Tietyssä lämpötilassa olevan kohteen tuottaman mustan kappaleen säteilytehon osan ε kuvaamiseksi tarvitaan emissiivisyydeksi kutsuttu lisätekijä. Näin saamme määritelmän:

emissiivisyys ε_λ= kappaleen säteilytehon suhde vastaavan lämpöisen ja vastaavaa aallonpituutta lähettävän mustan kappaleen säteilytehoon.

Matemaattisesti tämä voidaan ilmoittaa kohteen ja mustan kappaleen säteilytehojen suhteena seuraavasti:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda o}}{W_{\lambda b}}$$

Yleisesti säteilylähteet jakautuvat kolmeen tyyppiin, jotka eroavat toisistaan sen suhteen, miten niiden säteilyteho vaihtelee aallonpituuden mukaan.

- musta kappale, jonka $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$
- harmaa kappale, jonka $\varepsilon_\lambda = \varepsilon =$ vakio, jonka arvo on alle 1
- selektiivinen säteilijä, jonka ε vaihtelee aallonpituuden mukaan

Kirchhoffin lain mukaan kappaleen emissiivisyys ja absorptiosuhde ovat yhtä suuret kaikissa lämpötiloissa ja kaikilla aallonpituuksilla kappaleen materiaalista huolimatta. Toisin sanoen:

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

Tästä seuraa, että läpinäkymättömän materiaalin (koska $\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$):

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

Erittäin kiiltävien materiaalien ε_λ lähestyy nollaa siten, että täysin heijastavan materiaalin (*ts.* täydellisen peilin tapauksessa) suhteen pätee:

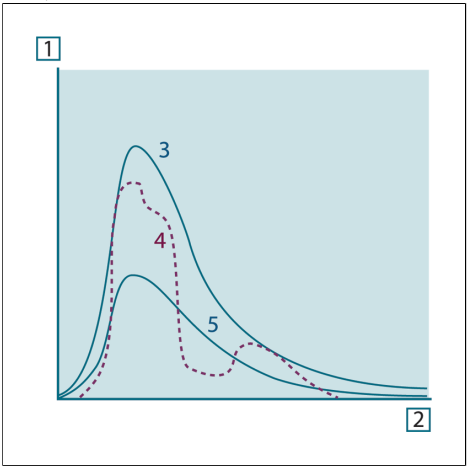
$$\rho_\lambda = 1$$

Harmaan säteilijäkappaleen tapauksessa Stefan-Boltzmannin kaava on muotoa:

$$W = \varepsilon\sigma T^4 \; [\mathrm{Watt/m^2}]$$

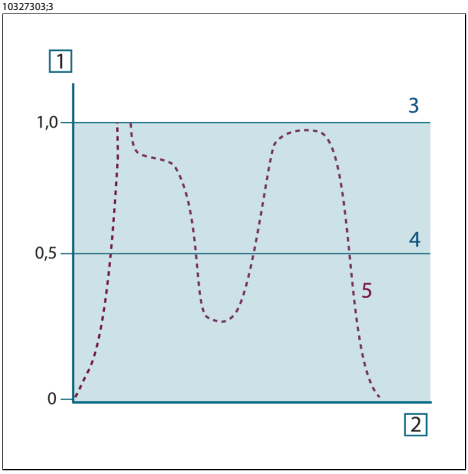
Tämä ilmoittaa, että harmaan säteilevän kappaleen koko säteilyteho on sama kuin vastaavassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen säteilyteho vähennettynä verrannollisesti harmaasta kappaleesta lähtöisin olevan ε:n arvolla.

10401203;1



Kuva 16.8 Kolmen säteilijätyypin säteilyteho. **1:** säteilyteho; **2:** aallonpituus; **3:** musta kappale; **4:** selektiivinen säteilijä; **5:** harmaa kappale.

10327303;3



Kuva 16.9 Kolmen säteilijätyypin emissiivisyys. **1:** emissiivisyys; **2:** aallonpituus; **3:** musta kappale; **4:** harmaa kappale; **5:** selektiivinen säteilijä.

16.4 Lämpösäteilyä puoliläpäisevät materiaalit

Seuraavaksi tarkastellaan ei-metallista, puoliläpäisevää kappaletta, esimerkiksi paksua tasaista muovilevyä. Levyä lämmitettäessa massan sisään kehittyvä säteily pyrkii kohti kappaleen pintoja materiaalin lävitse, johon se osittain absorboituu. Lisäksi sen saapuessa pintaan osa säteilystä heijastuu takaisin kappaleen sisäosiin. Tämä takaisin heijastuva säteily absorboituu jälleen osittain, mutta osa siitä saavuttaa toisen pinnan, jonka lävitse suurin osa siitä poistuu osan heijastuessa uudelleen takaisin. Vaikka kappaleessa etenevät heijastukset heikkenevät jatkuvasti, ne on kaikki huomioitava levyn kokonaisemittanssia määritettäessä. Laskettaessa yhteen tuloksena oleva geometrinen sarja saadaan puoliläpäisevän levyn tehokkaaksi emissiivyydeksi:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{(1-\rho_\lambda)(1-\tau_\lambda)}{1-\rho_\lambda\tau_\lambda}$$

Levyn muuttuessa läpinäkyväksi tämä kaava supistuu yhteen kaavaan:

$$\varepsilon_\lambda = 1-\rho_\lambda$$

Tämä viimeksi annettu relaatio on erityisen käyttökelpoinen, koska heijastussuhteen mittaaminen usein on helpompaa kuin emissiivisyyden mittaaminen suoraan.

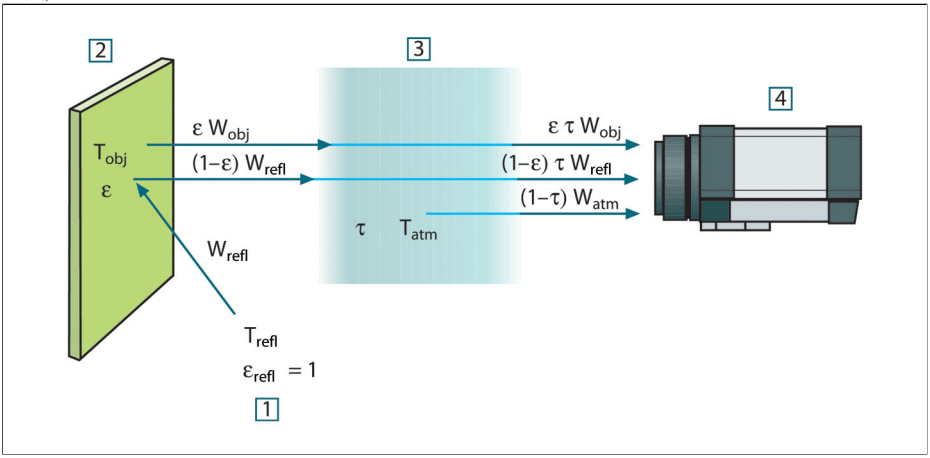
17 Mittauskaava

Kuten jo mainittu, kohteeseen käännetty kamera ottaa vastaan myös muusta, kuin kohteesta peräisin olevaa säteilyä. Osa säteilystä on peräisin kohteen pinnan heijastamasta ympäristöstä. Mittausreitin kaasukerros vaimentaa kumpaakin säteilyn komponenttia jossain määrin. Tässä vaiheessa on huomioitava kolmas säteilykomponentti, eli itse ilma.

Seuraava mittaustilanteen kuvaus on toistaiseksi melko tarkka todellisten olosuhteiden kartoitus. Huomiotta on jätetty mm. auringonvalon sironta ilmassä tai näkökentän ulkopuolisesta voimakkaasta säteilylähteestä peräisin oleva hajasäteily. Tämänkaltaisille häiriöille on vaikea antaa numeroarvoa, mutta useimmissa tapauksissa niiden merkitys on mitättömän pieni. Sikäli kun niitä ei voida jättää huomiotta, mittaustilanne on todennäköisesti sellainen, että häiriön vaara on ilmeinen etenkin kokeneelle operaattorille. Tässä tapauksessa operaattorin tehtävä on muuttaa mittaustilannetta siten, että häiriötekijöiden vaikutus voidaan eliminoida, mm. muuttamalla kameran suuntaa kohteeseen tai sulkemalla pois voimakkaat säteilylähteet.

Jos hyväksymme edellä esitetyn, voimme käyttää mainittua lukua ja johtaa kaavan, jolla kohteen lämpötila voidaan laskea kalibroidun kameran antamasta mittaustuloksesta.

10400503;1



Kuva 17.1 Tavanomaisen lämpötilan mittaustilanteen esitys kaaviona.**1:** Ympäristö; **2:** Kohde; **3:** ilma; **4:** Kamera

Oletetaan, että säteilyteho W, joka on peräisin mustasta kappaleesta, jonka lämpötila on T_{source} saa lyhyellä etäisyydellä aikaan kameran mittaussignaalin U_{source}, joka on verrannollinen tulosignaaliin (kameran lineaarinen teho). Näin saadaan (yhtälö 1):

$$U_{source} = CW(T_{source}), \text{or with simplified notation: } U_{source} = CW_{source}$$

, jossa C on vakio.

Jos lähteenä käytetään harmaata kappaletta, jonka emittanssi on ε, vastaanotettu säteily olisi näin εW_{source}.

Nyt voidaan kirjoittaa säteilytehon kolme yhteistä tekijää:

1 – Kohteesta peräisin oleva säteily = $\varepsilon\tau W_{obj}$, jossa ε on kohteen emittanssi ja τ ilman läpäisysuhde. Kohteen lämpötila on T_{obj}.

2 – Ympäristöstä heijastunut säteily = $(1 - \varepsilon)\tau W_{refl}$, jossa (1 – ε) on kohteen heijastuskerroin. Ympäristölähteiden lämpötila on L_{hei}.

Tässä oletetaan, että lämpötila T_{heij} on sama kaikille säteileville pinnoille, jotka vaikuttavat kohteeseen tämän pinnalta nähtävältä puolipallolta. Tämä on joskus luonnollisesti todellisen tilanteen pelkistys. Toisaalta käyttökelpoisen kaavan saaminen edellyttää yksinkertaistuksia, ja L_{hei} voi – ainakin teoriassa – saada arvon, joka edustaa kompleksisen ympäristön tehollista lämpötilaa.

On myös huomioitava tehty oletus, jonka mukaan ympäristön emittanssi = 1. Tämä on Kirchhoffin lain mukaan oikein: kaikki ympäristön pintoihin törmäävä säteily absorboituu lopulta samoihin pintoihin. Näin emittanssi = 1. (On huomattava, että viimeksi esitetyssä arvioitavan kohteen oletetaan olevan täydellisen pallon sisällä.)

3 – Ilmasta peräisin oleva säteily = $(1 - \tau)\tau W_{atm}$, jossa (1 – τ) on ilman emittanssi. Ilman lämpötila on L_{ilma}.

Vastaanotettu kokonaissäteilyteho voidaan näin ilmaista seuraavasti (yhtälö 2):

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} + (1-\varepsilon)\tau W_{refl} + (1-\tau)W_{atm}$$

Kukin tekijä kerrotaan yhtälön 1 vakiolla C ja korvataan tulot CW saman yhtälön mukaisella arvolla U, jolloin saadaan (yhtälö 3):

$$U_{tot} = \varepsilon\tau U_{obj} + (1-\varepsilon)\tau U_{refl} + (1-\tau)U_{atm}$$

Ratkaise yhtälö 3 arvolle U_{obj} (yhtälö 4):

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau}U_{tot} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}U_{refl} - \frac{1-\tau}{\varepsilon\tau}U_{atm}$$

Tämä on kaikissa FLIR Systemsin lämpötilanmittauslaitteissa käytettävä yleinen mittauskaava. Kaavan jännitteet ovat:

Kuva 17.2 Jännitteet

U_{obj}	Laskennallinen kameran lähtöjännite mustalle kappaleelle, jonka lämpötila on T_{obj} eli jännite, joka voidaan muuntaa suoraan halutun kohteen todelliseksi lämpötilaksi.
U_{tot}	Kameran lähtöjännitteen todellinen mittausarvo.
U_{refl}	Teoreettinen kameran lähtöjännite mustalle kappaleelle, jonka tarkkuutuksen mukainen lämpötila on L_{hei}.
U_{atm}	Teoreettinen kameran lähtöjännite mustalle kappaleelle, jonka tarkkuutuksen mukainen lämpötila on L_{ilma}.

Operaattori lisää laskelmassa tarvittavat parametrien arvot:

- kohteen emittanssi ε,
- suhteellinen kosteus,
- L_{ilma}
- kohteen etäisyys (D_{obj})
- kohteen ympäristön (tehollinen) lämpötila, tai ympäristöstä heijastunut säteily L_{hei} ja
- ilman lämpötila on L_{ilma}

Arvojen antaminen saattaa olla ajoittain ongelmallista, koska tavallisesti ei ole käytettävissä helppoa tapaa, jolla emittanssin ja ilman läpäisykertoimen todelliset arvot voidaan selvittää. Kyseiset kaksi lämpötilaa eivät tavallisesti muodostu ongelmallisiksi edellyttäen, että ympäristössä ei ole suuria ja voimakkaita säteilylähteitä.

Luonnollinen kysymys tässä yhteydessä on, miten tärkeää on tuntea näiden parametrien oikeat arvot? Voisi tosin olla mielenkiintoista saada ongelmaan tuntumaa jo tässä vaiheessa tutustumalla pariin erilaiseen mittaustapaukseen ja vertaamalla kolmen säteilytekijän suhteellisia merkityksiä. Näin saadaan käsitys siitä, missä tilanteissa on tärkeää käyttää kunkin parametrin todellista arvoa.

Oheiset kuvat esittävät kolmen säteilyyn vaikuttavan tekijän suhteellisen merkityksen kohteen kolmen lämpötilan, kahden emittanssiarvon ja kahden spektrialueen suhteen: lyhyet ja pitkät aallot. Muut parametrit saavat seuraavat kiinteät arvot:

- $\tau = 0.88$
- L_{hei} = +20 °C (+68 °F)
- L_{hei} = +20 °C (+68 °F)

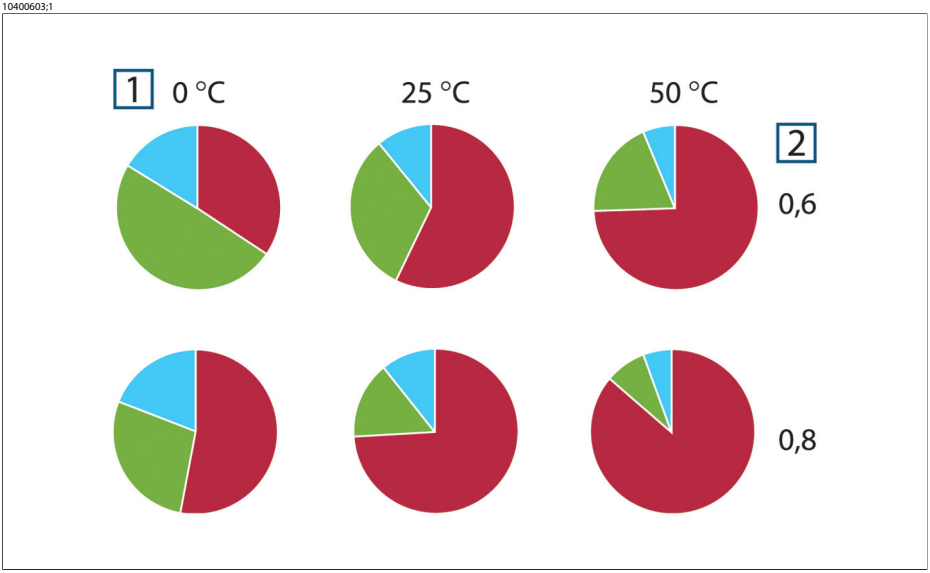
On ilmeistä, että kohteen matalien lämpötilojen mittaaminen on kriittisempää kuin korkeiden lämpötilojen. Tämä siksi, että ensin mainittujen tapauksessa 'häiritsevien'

säteilylähteiden vaikutus on paljon suurempi. Tilanne vaikeutuu entisestään, jos myös kohteen emittanssi on pieni.

Lopulta on vastattava kysymykseen, miten tärkeää on sallia tarkkuutuskäyrän ylimmän pisteen yläpuolella olevan osan käyttö. Tätä kutsutaan ekstrapoloinniksi. Kuvitellaan, että tietyssä tapauksessa saatu mittaustulos on U_{tot} = 4,5 volttia. Kameran korkein tarkkuutuspiste oli luokkaa 4,1 volttia, joka on operaattorin kannalta tuntematon. Näin siis siinäkin tapauksessa, että kohde olisi musta kappale, ts. $U_{obj} = U_{tot}$, ekstrapoloimme tarkkuutuskäyrän suhteen, kun 4,5 volttia muunnetaan lämpötilaksi.

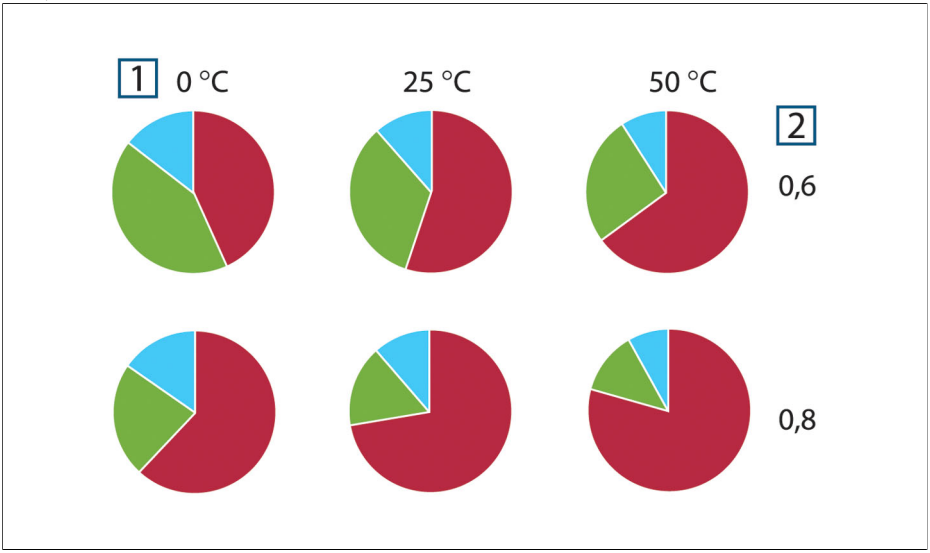
Olettakaamme nyt, että kohde ei ole musta, sen emittanssi on 0,75 ja läpäisykerroin 0,92. Oletamme myös, että yhtälön 4 kahden muun tekijän arvo on yhteensä 0,5 volttia. Laskettaessa U_{obj} yhtälön 4 avulla saadaan tulokseksi U_{obj} = 4,5 / 0,75 / 0,92 – 0,5 = 6,0. Tämä on äärimmäinen ekstrapolointi erityisesti, kun huomioidaan, että videovahvistimen suurin lähtösignaali saattaa olla 5 volttia. Tulee kuitenkin huomioida, että tarkkuutuskäyrän käyttö on teoreettinen menettelytapa, jossa ei tunneta elektronisia tai muita rajoitteita. Luotamme siihen, että mikäli kamerassa ei olisi ollut signaalinrajoituksia ja jos laite olisi kalibroitu selvästi 5 voltin yli, tuloksena saatu käyrä olisi muistuttanut huomattavissa määrin kuin käytetty 4,1 voltin ylittävälle alueelle ekstrapoloitu todellinen käyrä edellyttäen, että käytetty tarkkuutusalgoritmi perustuu FLIR Systemsin algoritmin tavoin säteilyfysiikkaan. Ekstrapoloinnilla on luonnollisesti rajat, joita ei voi ylittää.

10400603;1



Kuva 17.3 Säteilylähteiden suhteelliset voimakkuudet eri mittausolosuhteissa (lyhytaaltokamera). **1:** kohteen lämpötila; **2:** emittanssi; **PUNAINEN:** kohteen säteily; **SININEN:** heijastunut säteily; **VIHREÄ:** ilman säteily. Kiinteät parametrit: τ = 0,88; L_{hei} = 20 °C (+68 °F); L_{ilma} = 20 °C (+68 °F).

10400703;1



Kuva 17.4 Säteilylähteiden suhteelliset voimakkuudet eri mittausolosuhteissa (pitkäaaltokamera). **1:** kohteen lämpötila; **2:** emittanssi; **PUNAINEN:** kohteen säteily; **SININEN:** heijastunut säteily; **VIHREÄ:** ilman säteily. Kiinteät parametrit: $\tau = 0{,}88$; $L_{hei} = 20$ °C (+68 °F); $L_{ilma} = 20$ °C (+68 °F).