

VTT JULKAISUJA – PUBLIKATIONER 824

# **Elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelun verifiointi**

Risto Hienonen & Matti Karjalainen

VTT Automaatio

Raija Lankinen

Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu



---

VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS  
ESPOO 1997

ISBN 951-38-4535-4

ISSN 1235-0613

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O. Box 2000,  
FIN-02044 VTT Finland  
phone internat. +358 9 4561, fax +358 9 456 4374

VTT Automaatio, ProTechno, Otakaari 7 B, PL 13051, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7042, internet: <http://www.vtt.fi/aut/>

VTT, Automation, ProTechno, Otsvängen 7 B, PB 13051, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7042, internet: <http://www.vtt.fi/aut/>

VTT, Automation, ProTechno, Otakaari 7 B, P.O. Box 13051, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 9 4561, telefax +358 9 456 7042, internet: <http://www.vtt.fi/aut/>

Tekninen toimitus Leena Ukskoski

LIBELLA PAINOPALVELU OY, ESPOO 1997

Hienonen, Risto, Karjalainen, Matti & Lankinen, Raija. Elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelun verifiointi. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja – Publikationer 824. 85 s.+ liitt. 13 s.

**UDK** 621.38:536.5

**Avainsanat** thermal design, verification, thermal audite, electronic equipment, electronics, cool, quality, quality control, thermal model, temperature measurement, tests, environmental tests, Finland

## TIIVISTELMÄ

Hankkeessa “Elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelun verifiointi” tutkittiin mitä metodologiaa olisi tarkoituksenmukaista soveltaa elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelun tulosten oikeellisuuden varmentamisessa. Hanke on osa Teknologian kehittämiskeskuksen, TEKESin, tukemaa tutkimusyhteistyötä, Cool Electronics. Hanke toteutettiin VTT Automaatiossa yhteistyössä Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun, Nokia Research Centerin ja ABB Industry Oy:n Teknologiaosaston kanssa.

Elektroniikkalaitteen lämpöteknisellä suunnittelulla vaikutetaan voimakkaasti laitteen kokonaiskustannuksiin, luotettavuuteen, ympäristön sietoisuuteen, komponentti- ja materiaalivalintoihin sekä tuotteen ergonomiaan. Julkaisussa esitetään lämpösuunnittelun oikeellisuuden varmistamisessa käytettävä yleinen verifiointimenettely, jonka avulla tarkistetaan lämpösuunnittelulle asetetut tavoitteet, ympäristövaatimukset, toteutustekniikka, simulointitekniikka ja mallinnus sekä suunnittelutuloksen varmentamisessa tarvittavat mittausmenetelmät ja testaus.

Verifiointimenettelyä voi soveltaa kaikenlaisiin elektroniikkatuotteisiin järjestelmätasolta aina komponenttitasolle asti. Laadittu menettely soveltuu käytettäväksi yritysten laatujohtajien osana. Julkaisu sisältää myös tietoa siitä, kuinka mittaukset ja testit kyketään osaksi verifiointia. Lisäksi kuvataan ilman lämpötilan, virtausten ja paineen mittausmenetelmiä.

Tämä raportti on saatavissa sekä suomen- että englanninkielisenä (VTT Publications 320).

## ALKUSANAT

Elektroniikan lämpösuunnittelusta on tullut yksi tärkeistä suunnittelun osa-alueista, joilla varmistetaan tuotteen luotettavuus ja sen myötä kilpailukyky vaativilla elektroniikkamarkkinoilla. Elektroniikan pakkaustiheys on kaikilla tärkeillä tuotealueilla, tietoliikennelaitteissa, tietokoneissa, automaatioissa ja tehoelektroniikassa noussut niin suureksi, ettei väistämättä syntyviä hukkathejoja voida enää poistaa laitteista ja komponenteista ilman kehittyntä lämmönsiirto- ja jäähdytystekniikkaa.

Tämän projektin tavoitteena on ollut kehittää tämän vaikeasti hallittavan lämpösuunnittelun avuksi verifiointimenettely, jonka avulla sekä kokenut että aloitteleva suunnittelija voivat tarkistaa käyttämänsä lämpösuunnittelutekniikan oikeellisuuden ja suunnittelun tavoiteasettelun sekä tulosten arvioinnin. Lämpösuunnittelutekniikka ja siinä käytettävät ohjelmistot ovat vasta aivan viime vuosina saavuttaneet sellaisen teknisen tason, että alkaa olla mahdollisuuksia toteuttaa tehokkaita ratkaisuja suhteellisen suurella onnistumistodennäköisyydellä.

Koska lämpösuunnittelutyökaluissa ja laskentatekniikassa on vielä paljon puutteita, joista vähäisin ongelma-alue eivät ole puutteelliset tiedot komponenttien ja materiaalien lämpöteknisistä ominaisuuksista, on laskennan ja simuloinnin tukena käytettävä myös kehittyntä mittaus- ja testaustekniikkaa. Julkaisu sisältää myös tietoa siitä, kuinka mittaukset ja testit kyketään osaksi verifiointia. Lisäksi kuvataan myös ilman lämpötilan, virtausten ja paineen mittausmenetelmiä.

Hanke toteutettiin nimellä “Elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelun verifiointi” osana Teknologian kehittämiskeskuksen, TEKESin, tukemaa tutkimusyhteistyötä “Cool Electronics”, joka käynnistyi toukokuussa 1996. Hankkeen ovat rahoittaneet TEKES, VTT Automaatio, ABB Industry Oy Teknologiaosasto sekä Nokia.

Hankkeen johtoryhmän lisäksi sen taustatukena on toiminut KOTEL ry:n työryhmä TR 18 Lämmön ja kosteuden hallinta elektroniikassa, jonka kokouksissa laadittiin verifiointin ja tämän julkaisun sisältörunko. Lisäksi joulukuussa 1996 järjestettiin KOTEL ry:n kanssa seminaari “Mittaustekniikka elektroniikan lämpösuunnittelussa”. Verifiointimenettelyä testattiin käytännössä kolmen lämpösuunnitteluprojektin avulla, joista yksi koski avaruudessa toimivan maaperäkaivurin, yksi pienitehoisen taajuusmuuttajan ja yksi isohkon tropiikissa käytettävän elektroniikkakaapin lämpösuunnittelua.

Hankkeen johtoryhmässä ovat olleet:

Risto Hienonen	VTT Automaatio	puheenjohtaja
Tuija Järvinen	Nokia Research Center	
Vesa Kyyhkynen	ABB Industry Oy Teknologiaosasto	
Raija Lankinen	Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Ener- giatekniikan osasto	

Hankkeen käytännön toteutuksesta ja raportin lukujen 1-2, 3.1 ja 3.2 sekä 6.1-6.3 laadinnasta vastasi projektipäällikkönä ja tekijänä dipl. ins. Risto Hienonen VTT Automaatiosta. Dipl. ins. Matti Karjalainen VTT Automaatiosta kirjoitti luvut 3.3-3.6, 4 ja 5 sekä dipl. ins. Raija Lankinen LTKK:n Energiatekniikan osaston Lämpö- ja ympäristötekniikan laitokselta kirjoitti luvut 6.4-6.6 ja liitteen 1.

KOTEL ry:n työryhmässä TR 18 Lämmön ja kosteuden hallinta elektronii-  
kassa ovat verifiointimenettelyn sisältörunkoa valmisteleviin aivoriihiin  
osallistuneet:

Risto Hienonen	VTT Automaatio
Tuija Järvinen	Nokia Research Center
Matti Karjalainen	VTT Automaatio
CAI Kabrell	Nokia Research Center
Matti Kokko	Nokia Telecommunications Oy Radio Access Systems
Mario Lopez-Jorkama	VTT Automaatio
Liisa Nyblom	Finnyards Oy Elektroniikka
Kari Ojala	Nokia Research Center
Anu Parviainen	Nokia Telecommunications Oy Fixed Access Systems

Tutkimuksen johtoryhmän ja omasta puolestani kiitän kaikkia hankkeeseen osallistuneita ja katselmuksissa sekä tiedonhankinnassa auttaneita sekä rahoittajia heidän tuestaan hankkeelle.

Espoossa 29.8.1997



Risto Hienonen  
projektipäällikkö

Yhteystiedot:

**VTT Automaatio**  
**ProTechno**

**PL 13051**  
**02044 VTT, Finland**

**puhelin** (09) 456 6534  
**faksi** (09) 456 7042  
**Internet** **Risto.Hienonen@vtt.fi**  
**Matti.Karjalainen@vtt.fi**  
**Raija.Lankinen@lut.fi**

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ	3
ALKUSANAT	4
1 LÄMPÖSUUNNITTELUN VERIFIOINNIN TARKOITUS	8
2 VERIFIOINTI	10
2.1 Verifioinnin liittäminen tuotekehitykseen	10
2.2 Verifioinnin sisältötason valitseminen	11
2.3 Verifioinnin suunnittelu ja organisointi	14
3 LÄMPÖSUUNNITTELU	21
3.1 Lämpösuunnittelun tavoitteet	21
3.2 Lämpösuunnittelun fysikaalinen perusta	23
3.3 Lämpösuunnittelun dokumentointi	25
3.4 Tehtävän määrittely ja reunaehdot	26
3.5 Suunnittelutyö	28
3.6 Suunnittelutulosten esittäminen	30
4 MALLINNUS	31
4.1 Mallinnuksen tarkkuustaso	31
4.2 Lämpömallin laatu	31
4.3 Mallinnuksen ongelmia	33
4.4 Suunnittelutavoitteet ja mallinnus	34
4.5 Mallinnustyökalun valinta	35
4.6 Fysikaaliset lähtötiedot	35
4.7 Mallinnuksen periaatteita	36
4.8 Lämpörajäpinnat	38
5 KOMPONENTTITASON VERIFIOINTI	41
5.1 Komponentit lämpösuunnittelussa	41
5.2 Komponenttien mallintaminen	42
5.3 Komponenttien mittaus ja mallinnus	45
Luvun 5 lähteet	47

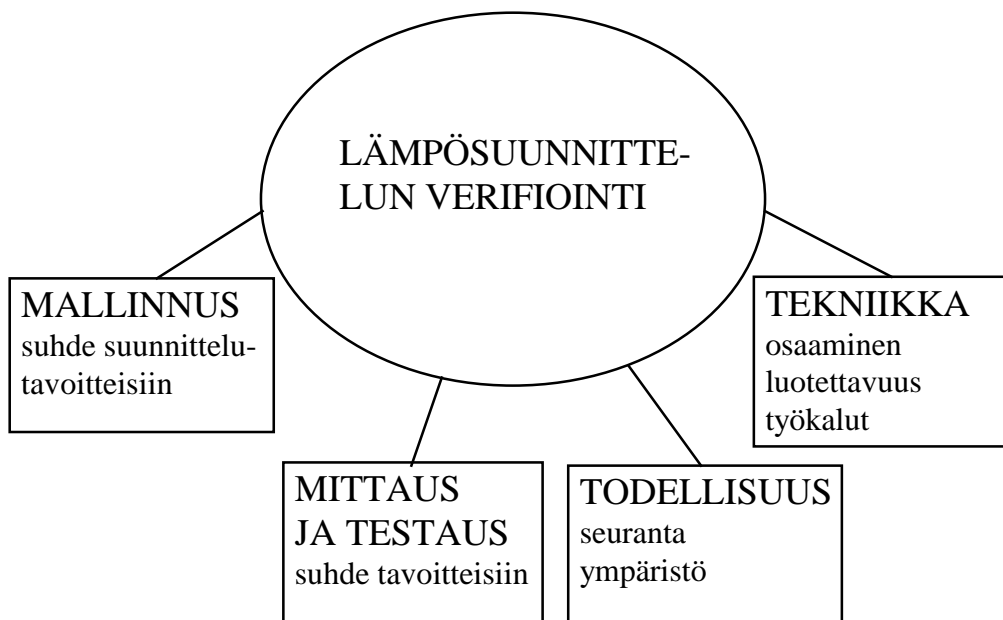
6 KOKEELLINEN VERIFIOINTI	48
6.1 Mittausten ja testien käyttö verifiointissa	48
6.2 Mittaukset verifiointissa	52
6.3 Pintalämpötila	55
6.3.1 Verifiointikohteiden valinta	55
6.3.2 Mittausajankohdan valinta	57
6.3.3 Laitteen ulkopinnan lämpötila	58
6.3.4 Laitteen sisäosien pintalämpötilat	60
6.3.5 Komponenttilevyn pintalämpötila	62
6.3.6 Komponentin pintalämpötila	64
6.4 Ilman lämpötilan mittaus	66
6.5 Ilman virtausmittaus	73
6.5.1 Virtausmittauksen periaate	73
6.5.2 Mittausmenetelmän valintaan vaikuttavat tekijät	75
6.5.3 Kiinteästi asennettavat tilavuusvirtausmittarit	75
6.5.4 Paikallisen virtausnopeuden mittaus	78
6.6 Paineen ja paine-eron mittaus	82
Luvun 6 lähteet	85
LIITE 1 LÄMPÖSUUNNITTELUN PERUSTEET	

# 1 LÄMPÖSUUNNITTELUN VERIFIOINNIN TARKOITUS

Elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelu on yksi tärkeä tuotesuunnittelun osa-alue, jonka avulla vaikutetaan ratkaisevasti laitteen luotettavuuteen ja käyttööminaisuuksiin. Lämpösuunnitteluun liittyy läheisesti laitteen mekaniikan ja ympäristöolosuhteiden sietoisuuden suunnittelu sekä mittaukset ja testaus, joiden avulla todetaan saavutetut suunnittelutulokset. Varsinaisen lämpösuunnittelun verifiointilla tarkoitetaan niitä menettelyjä, joiden avulla varmistetaan, että lämpösuunnittelun tulokset vastaavat asetettuja tavoitteita ja suunnitelman mukainen fyysinen laite toimii asetettujen tavoitteiden mukaisesti niissä käyttöolosuhteissa, joihin laite joutuu elinjaksensa aikana.

Verifiointin tarkoituksena on varmistaa

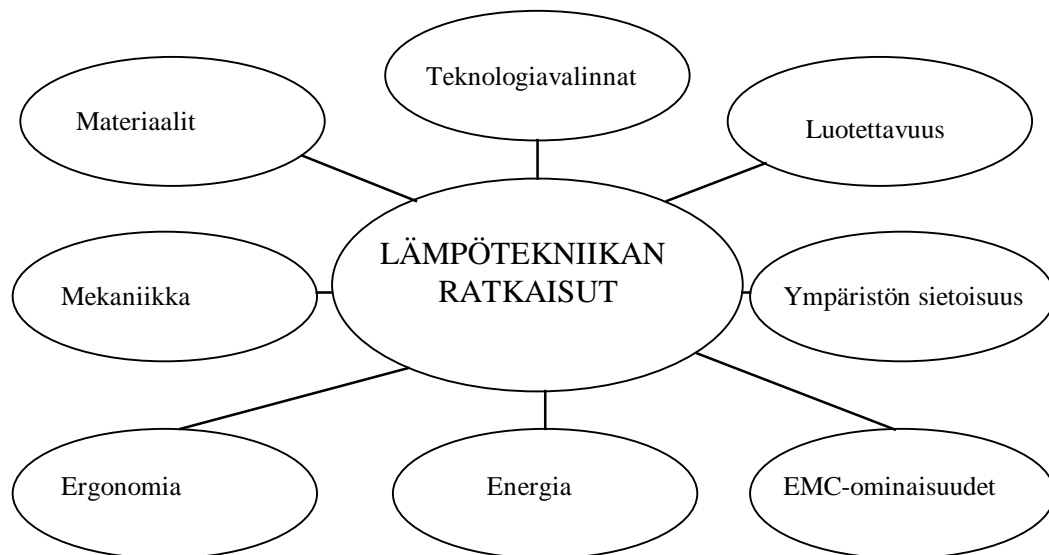
- tuotesuunnittelun tarkoituksenmukaisuus ja tulosten oikeellisuus
- että suunnitelma ja laite ovat lämpösuunnittelutavoitteiden mukaiset
- käytetyn suunnittelumallin kelpoisuus ao. tehtävään
- oikean mittaus- ja testaustekniikan käyttö
- mahdollisten luotettavuusriskien olemassaolon havaitseminen
- tuotesuunnittelun eri osa-alueiden tavoitteiden yhteensovittaminen
- suunnittelun tavoiteasettelu korjaavia toimenpiteitä varten.



Kuva 1. Lämpösuunnittelun verifiointikohteet.



Lämpösuunnittelu ja sen verifiointi on elimellinen osa koko tuotekehitysprosessia, koska tuotteen lämpötekniset ratkaisut vaikuttavat ratkaisevasti siihen teknologiaan, mitä tuotteissa täytyy tai voidaan käyttää. On tärkeää, että lämpötekniset, mekaaniset, ergonomiset ja EMC-tekniset ominaisuudet käsitellään keskenään samassa tahdissa tuotekehityksen muiden osa-alueiden kanssa.



*Kuva 2. Lämpötekniikan vaikutukset tuotteeseen.*

Laitteiden lämpötekniset ominaisuudet vaikuttavat tuotteen perusluotettavuuteen. Elektroniikan vioista usein valtaosa liittyy jollain tavalla lämpörausitukseen ja liialliseen kosteuteen (kuva 4 sivulla 21). Lähes kaikki komponenttien ja materiaalien ominaisuudet muuttuvat ympäristön lämpötilan ja kosteuden mukana. Näiden muutosten hallinta on tärkeä osa tuotesuunnittelua ja ne on otettava huomioon myös lämpösuunnittelussa. Lisäksi lämmön poistaminen laitteesta rajoittaa aina mahdollisuuksia suunnitella mekaniikkaa, ergonomiaa, EMC-suojauksia ja varsinaista piiritekniikkaa. Toisaalta lämpötekniisin ratkaisuin voidaan olennaisesti parantaa tuotteen toimivuutta, luotettavuutta ja korroosionsietoa, jos ne otetaan osaksi suunnittelutavoitteita. Verifiointissa käydään läpi nämä seikat tavoitteena varmistaa tuotteen tavoitteenmukaisuus ja paljastaa merkittävimmät riskit.

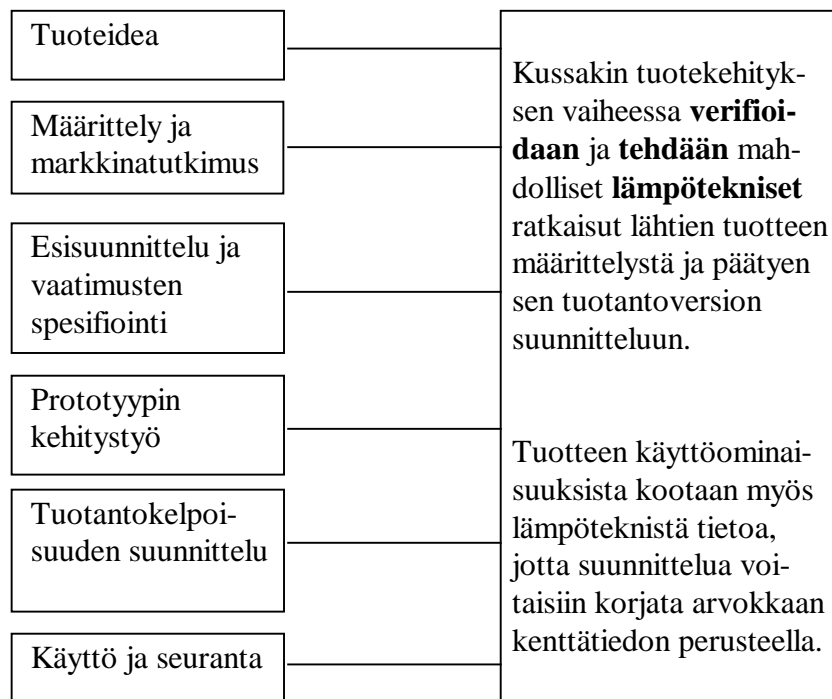
Seuraavassa esitetään, kuinka lämpösuunnittelu ja sen verifiointi sijoitetaan luontevasti osaksi tuotteen määrittelyä ja kehitystä, jotta lämpötekniset rajoitukset ja toisaalta lämpötekniikan hyväksikäytön mahdollisuudet tulevat otetuksi huomioon ennen kuin tehdään “sitovia” ratkaisuja, jotka muuten johtaisivat huonoon luotettavuuteen tai epätaloudelliseen toteutukseen.

## 2 VERIFIOINTI

### 2.1 VERIFIOINNIN LIITTÄMINEN TUOTEKEHITYKSEEN

Verifiointi toteutetaan tuotekehityksen ja lämpösuunnittelun eri vaiheissa asteittain etenevänä useampivaiheisena prosessina suunnittelun etenemisen myötä, jotta suunnittelua voidaan tarvittaessa muuttaa ja suunnata uudelleen. Jotta verifiointista saataisiin täysi hyöty, tulee se ja lämpösuunnittelu sisällyttää tuotekehitysprosessiin alusta alkaen, ts. lämpösuunnittelun asiantuntijan tulee osallistua tuotteen määrittelyyn ja kehitystyöhön alusta alkaen.

Verifiointin tulee olla luonteeltaan aktiivista suunnittelun tasoa parantavaa eikä pelkästään passiivista valmiiden ratkaisujen tarkastamista. Kun tuotteen ideointivaiheessa ja suunnittelun edetessä asetetaan kysymyksiä siitä, mitä kaikkea lämpötekniikan avulla voidaan tehdä tuotteen ominaisuuksien parantamiseksi ja mitä ei kannata tehdä, saavutetaan selvästi parempi kokonaistulos kuin vain passiivisella annettujen vaatimusten toteuttamisella.



Kuva 3. Lämpösuunnittelun verifiointin liittäminen tuotekehitykseen.

Näinollen verifiointissa tarkastellaan lämpösuunnittelun tavoiteasettelua, suunnittelua itseänsä ja sen tuloksia eri näkökulmista:

- lämpötekniset vaatimukset tuotteelle
- lämpötekniikan kattava hyväksikäyttö, onko hyödynnetty erilaisia mahdollisuuksia parantaa tuotetta
- lämpösuunnittelun oikeellisuus, perusvirheiden tunnistaminen
- mittaustulokset
- onko vielä jotain muuta parannettavaa teknisesti tai/ja taloudellisesti.

Verifiointin onnistumisen edellytyksenä on se, että verifioija perehtyy käsillä olevaan tapaukseen selvittämällä itselleen, mikä on ollut suunnittelun yleinen tavoite, millainen kyseinen tuote on, mikä on tuotekehityksen kokemukseräinen tausta, jne. Kun verifiointitehtävästä on muodostettu tarkoituksenmukainen kuva, voidaan lähteä suunnittelemaan itse verifiointiprosessia, joka soveltuu kyseisen projektin sisältöön.

Verifiointikatselmuksiin kannattaa ottaa mukaan sekä lämpösuunnittelijoita että muiden tuotekehityksen osa-alueiden edustajia siten, että katetaan riittävästi ne tuotekokonaisuuden hallintaan tarvittavat osaamisalueet, jotka ovat riippuvaisia myös lämpösuunnittelun onnistuneisuudesta. Suunnittelun lämpötekniisiä yksityiskohtia verifioitaessa tuo lisäarvoa ulkopuolisen lämpösuunnittelijan mukaanotto katselmukseen.

## 2.2 VERIFIOINNIN SISÄLTÖTASON VALITSEMINEN

Elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelun verifiointi tehdään laitteen suunnitteluvaiheen mukaan eri sisältötasoilla.

*Tavoitteenasettelussa* päähuomio on selvittää, mitkä ovat ne fyysiset olosuhteet, joissa tuotetta käytetään, mitkä ovat tuotteen sisäiset olosuhteet ja millaiset tekniset mahdollisuudet on toteuttaa tavoitteita lämpöteknisin keinoin ottaen huomioon esim. mekaniikan ja käytettävissä olevien komponenttien asettamat rajoitukset.

*Suunnittelun alkuvaiheessa* tarkistetaan olemassa oleva kokemukseräinen tietämys sekä käytettävissä olevat materiaalien ja komponenttien lämpötekniset tiedot. Tässä vaiheessa pyritään sopimaan myös niistä suunnittelumarginaaleista, joita lämpösuunnittelussa sovelletaan. Kun suunnittelu etenee kohti konkreettista ja tarkoin määriteltyä fyysistä toteutusta, verifiointin tarkkuustasoa ja fysikaalisuutta lisätään. Päähuomio on materiaali- ja komponenttietojen valinnassa, suunnittelun lämpötekneisissä ratkaisuissa,

mahdollisen mallin oikeellisuuden tarkistamisessa ja sitten simulointien ja mahdollisten alustavien testien tulosten arvioinnissa suhteessa tavoitteisiin.

*Suunnittelun loppuvaiheen* verifiointissa keskitytään lopullisten suunnitteluratkaisujen ja testaustulosten arviointiin ja päätöksiin mahdollisista tuotteen korjaavista toimenpiteistä. Osana valmiin päätökseen saatetun tuotekehityksen verifiointia sovitaan, millä tavalla tuotteen toimintaa seurataan asiakaspalautteen perusteella esim. takuuajana.

## **Verifiointin toteutus tuotesuunnittelun eri vaiheissa**

### **1 Laitteen lämpösuunnittelutavoitteiden asettaminen**

Tavoiteasettelun yhteydessä varmistetaan, että lämpösuunnittelu on mukana kaikissa tuotekehitysvaiheissa.

Määritellään tavoitteiden konkreettinen sisältö (tehot, lämpötilat, mekaniikka, materiaalit, käyttöolosuhteet, testattavuus, muut tapauskohtaiset vaatimukset ja kannanotto rakennemallien sekä testien käyttämiseen).

Tarkistetaan tavoitteiden mielekkyys ja fysikaaliset rajat.

Verrataan tavoitteita kokemuksiin ja kenttätietoihin.

Tarkistetaan, käytetäänkö lämpötekniikkaa hyväksi tavoitteellisesti ja onko tavoitteisiin osattu ottaa tuotteen ominaisuuksia, joita voi parantaa lämpötekniikan avulla (esim. ympäristösietoisuus, luotettavuus). Yhtenä perusajatuksena voisi olla aikaansaada lämpösuunnittelun avulla laitteen sisälle mahdollisimman lievät olosuhteet komponenteille.

Onko käyttöolosuhteiden (ympäristön) vaikutukset otettu huomioon?

Hahmotetaan suunnittelun yleinen tarkkuustaso.

Sovitaan verifiointiajankohdat ja menetelmät sekä sidotaan ne muuhun suunnitteluun.

## 2 Suunnittelun alkuvaiheen toimenpiteitä

---

Suunnittelutekniikan ja työkalujen valinta.

Reunaehtojen tunnistaminen (konstruktio, ympäristö, yms.).

Komponenttien ja materiaalien lämpöominaisuuksien valinta.

Rajapintojen määrittelyt, mekaniikka, materiaalit.

Lämpötekniisten suunnittelumarginaalien määrittely tavoitteena varmistaa, että komponenttien valmistajan sallimia sisäisiä lämpötiloja ei ylitetä missään käyttöolosuhteissa, ja/tai omat luotettavuuden parantamiseen tähtäävät lisävaatimukset lämpötiloille (derating) toteutuvat.

Arvioidaan mahdollisen mallin soveltuvuus kyseisen tyyppisen tehtävän ratkaisuun ja suunnitelmien oikeellisuus.

Arvioidaan rakennemalleista (esim. pahvimalleista) saatujen tulosten käyttökelpoisuus suhteessa todelliseen tuotteeseen.

Tarkistetaan tuotteen fyysisen toteutuksen ja mallin riittävä yhteensopiavuus.

Arvioidaan suunnittelun ja testien esitulosten suhde tavoitteisiin.

## 3 Suunnittelun keskivaiheen toimenpiteitä

---

Kun kaikki olennaiset reunaehdot, rajapinnat, suunnittelumarginaalit ja mahdollinen malli ovat yksilöidyt lähelle tavoiteasettelun asettamia vaatimuksia, käydään ne ja käytettävissä olevat tulokset läpi yksityiskohteisesti sekä verrataan niiden vastaavuutta fyysisen toteutukseen.

Arvioidaan mahdollisia lämpösuunnittelun virhelähteitä.

Tehdään mahdollisuuksien mukaan mittauksia ja testejä vastaavalle laitemallille ja käytetään tässä apuna myös rakennemalleja.

Tehdään päätökset mahdollisista muutoksista itse suunnittelun jatkamiseen ja suunnittelutavoitteisiin.

## 4 Valmis suunnitelma ja tuote

Lopulliset reunaehdot, rajapinnat, suunnittelumarginaalit ja mahdollinen malli ovat määritellyt ja lämpösuunnitelmaa on korjattu sellaiseksi kuin se vallitsevassa tilanteessa on mahdollista. Tarkastetaan kaikki näihin liittyvät asiat.

Verrataan suunnittelun tuloksia asetettuihin tavoitteisiin.

Tehdään sovitut mittaukset ja testit sekä verrataan niiden tuloksia lämpösuunnittelun ja mahdollisen mallin antamiin simulointituloksiin.

Teetetään tarvittaessa tuotteen hyväksyntätestejä ja mittauksia ulkopuolisella testaajalla taikka asiakkaalla.

Tehdään päätökset suunnittelutuloksen hyväksymisestä ja/tai mahdollisista korjaavista toimenpiteistä.

## 5 Kenttätietojen hyväksikäyttö

Tarkistetaan suunnitelmat kenttätietojen hyväksikäyttöön. Selvitetään onko suunniteltu tiedon keruuta ja miten se aiotaan toteuttaa.

Verrataan kentältä saatavia seuranta- ja vikatietoja lämpösuunnittelun ja testien tuloksiin ja analysoidaan, mistä mahdolliset erot johtuvat, lämpösuunnittelun epätarkkuudesta, komponenttien tai materiaalien ominaisuuksista vaiko laitekonstruktion tehdyistä muutoksista tuotannon yhteydessä?

Kenttätietoihin liittyy myös palaute koskien mm. seuraavia osa-alueita: ympäristöolosuhteet, mekaniikka, ergonomia, turvallisuus, inhimilliset tarpeet, EMC, sähkösuunnittelu ja materiaalien vanheneminen. Kaikilla näillä seikoilla on oma vaikutuksensa lämpösuunnitteluun.

Tarkistetaan, että kentältä saatuja kokemuksia hyödynnetään seuraavassa tuotekehitysvaiheessa ja uusien tuotteiden lämpösuunnittelussa.

### 2.3 VERIFIOINNIN SUUNNITTELU JA ORGANISOINTI

Lämpösuunnittelun verifiointimenettely kannattaa suunnitella projektikohtaisesti ja kytkeä osaksi muuta tuotekehitysprosessia. Kunkin tuotekehitysprojektin luonne, laajuus ja olemassa olevat tiedot aikaisemmista tuotteista vaikuttavat siihen, miten verifiointi kannattaa tehdä.

Koska lämpöteknisillä ratkaisuilla on suuria vaikutuksia esim. elektroniikkatuotteen mekaniikkaan ja komponenttivalintaan, on *ensimmäiset katsel-*

*mukset* sovittava jo tuotteen varhaiseen *ideointi- ja määrittelyvaiheeseen* ja suunnittelutyön alkuosaan. Näissä alkuvaiheen katselmuksissa tarkistetaan lämpötekniisten ominaisuuksien yleiset vaikutukset tuotteeseen ja tuotekehitykseen. Tärkeää on sopia lämpösuunnittelun organisoinnista sekä niistä katselmuksista, joissa käsitellään lämpösuunnittelun tuloksia ja vaikutuksia tuotteeseen. Samalla sovitaan myös lämpösuunnittelun tavoitteet ja sisällön laatu ja laajuus sekä otetaan alustavasti kantaa siihen, millaisia kokeellisia mittauksia ja testejä käytetään lämpösuunnittelun verifiointin tukena.

*Verifiointin sisällön* ja menettelytapojen määrittelyä varten on alle koottu luettelo niistä asioista, jotka olisi otettava mukaan katselmuksiin. Sen mukaan, mihin tuotteen kehitysvaiheeseen ao. katselmus liittyy, käsitellään eri asiakohtia tarpeellisessa laajuudessa.

Samalla on pidettävä mielessä *verifiointikohteen oma olemus* eli se, onko kyse suppeasta komponenttilevytason vai laajasta järjestelmätason taikka jostain näiden välillä olevasta verifiointista. Hahmotellaan, kuinka kyseisessä tapauksessa verifiointi olisi tehtävä, määritellään, kuinka tarkka verifiointin on oltava, minkätyyppisiä mittauksia ja testejä on käytettävä ja ketkä osallistuvat verifiointin toteutukseen.

Tarkistetaan, mitä *aikaisempaa suunnittelu- ja testaustietoa* ko. tuotteesta on olemassa ja ovatko tiedot edelleenkin käyttökelpoisia uuden suunnittelutyön verifiointin yhteydessä. Tässä vaiheessa määritellään verifiointin itsensä kustannustaso ja se riskitaso, jolla tuote kelpuutetaan tuotantoon.

*Verifioijan rooliin* ei kuitenkaan kuulu tuotteen suunnittelu, koska suunnittelija vastaa suunnitteluprosessista ja sen tuloksista ja myös huolehtii työnsä organisoinnista. Verifioija auttaa toiminnallaan suunnittelutyön edistymistä kohti tavoiteltua lopputulosta.

## **Verifiointiprosessin yleinen sisältö**

### **1 Verifiointikohteen määrittely**

Rajataan se osa tuotekehityksestä, johon verifiointi kohdistuu, ja perehdytään ao. kohteeseen ja sille asetettuihin yleisiin tavoitteisiin. Sekä tuotteen suunnittelijoiden että verifioijien on perehdyttävä riittävässä laajuudessa kyseiseen tuotteeseen, jotta voitaisiin rajata itse verifiointiprosessin sisältö tarkoituksenmukaiseen laajuuteen suhteessa tuotekehitysprojektiin ja voitaisiin myös suunnata se teknisesti tärkeisiin kohteisiin.

## 2 Katselmointiajankohdat

Lämpösuunnittelun verifiointi aloitetaan tuotteen tai tuotekehitysprojektin ideointi- ja määrittelyvaiheessa, jossa asetetaan kehitystyön tavoitteet. Lämpösuunnittelun katselmoinnit sovitetaan ao. projektin ratkaisuvaiheisiin, joita voivat olla esim. tavoiteasettelu, materiaali- ja komponenttietojen valinta, suunnitteluperiaatteiden valinta, työkalujen valinta ja mallin hahmottelu, simulointitulosten analysointi, mittausten ja testien arviointi, valmiin suunnittelutuloksen arviointi ja kenttätietojen keruun suunnittelu. On tärkeää sovittaa katselmukset riittävän varhaisiin vaiheisiin, jotta tuotekehityksen eri haaroissa tehtävien ratkaisujen vaikutukset voitaisiin ottaa huomioon mahdollisimman hyvin.

## 3 Organisaatio

Sovitaan niistä henkilöistä, jotka osallistuvat suunnitteluprosessiin ja lämpösuunnittelun verifiointiin. Osallistujina on oltava eri vaiheiden katselmuksissa soveltuvin osin tuotekehitysprojektin päällikkö, lämpösuunnittelun projektipäällikkö ja laatuvaastava, jolle on delegoitu lämpösuunnitteluvastuu, sekä tarpeellisessa määrin muita suunnittelijoita ja laatuvaastuuhenkilöitä, joille kuuluu vastuu muista suunnittelun osa-alueista kuten, sähköinen, mekaaninen, EMC- ja ympäristösietoisuuden suunnittelu.

Myös komponenttien ja materiaalien valinnasta vastaavien henkilöiden on osallistuttava soveltuviin katselmointeihin. Suotavaa on käyttää etenkin lämpösuunnittelussa käytettyjen periaatteiden, laskentamenettelyjen, mallinnuksen ja simuloinnin katselmoinnissa mahdollisia ulkopuolisia asiantuntijoita, joilla on riittävä osaaminen vastaavasta suunnittelusta.

Kun tuotekehitys on jaettu eri organisaatioyksiköille tai delegoitu osittain alihankkijoille, olisi varmistettava, että näiden kanssa sovitaan riittävässä määrin lämpösuunnittelua sivuavien tietojen vaihdosta ja mahdollisista katselmoineista. Erityisen tärkeää tällöin on huolehtia niistä toimitusrajapintojen määrittelyistä, joista kukin organisaatioyksikkö vastaa. Projektipäällikön tehtävänä on varmistaa, että näissä rajapinta-asioissa toteutetaan riittävä päällekkäisyys, jottei olennaisia asioita jää kahden vastuuyksikön välimaastoon.

Lämpösuunnittelutyön jäsentämisestä työn sisällön mukaan on sovittava alkuvaiheen tuotekatselmusten yhteydessä, jotta eri suunnittelijoilla olisi riittävä kuva kunkin tehtävä- ja vastuualueesta. Tämänkin osa-alueen rajapintojen toimivuus on varmistettava riittäväillä henkilöiden välisillä kontakteilla, jottei suunnitteluun jää "harmaita ei kenenkään alueita".



<p>4    Raportointimenettely</p>
<p>Verifiointitulosten dokumentointi on välttämätöntä tehtyjen ratkaisujen, testaustulosten ja niihin mahdollisesti liittyvien korjaavien toimenpiteiden varmentamiseksi. Verifiointiraporteissa tulisi mainita käsiteltävien asioiden ohella erilaiset ongelmat ja niiden käsittely, korjaavat toimenpiteet perusteluineen ja uusintatarkastusten tulokset sekä verifiointiin osallistuneiden henkilöiden nimet.</p> <p>Varsinaisen lämpösuunnittelun yhteydessä on hyödyllistä ylläpitää päiväkirjaa (loki) suunnittelun yksityiskohdista ja mahdollisen lämpömallin laadinnasta. Tällainen muistiinmerkitseminen auttaa kokemusperäisen suunnittelutiedon kertymistä. Lisäksi näiden muistiinpanojen tulisi varmistaa se, että toinen lämpösuunnittelija voi niiden avulla päätellä, millä perusteilla tietyt ratkaisut on tehty. Tämä vähentää myös kesken projektin tapahtuvasta suunnittelijan vaihtumisesta aiheutuvaa häiriötä.</p> <p>Testit ja niihin liittyvät mittaukset on syytä suunnitella etukäteen. Hyvät ennakkosuunnitelmat vähentävät riskiä testausvirheiden vuoksi menetettävästä tiedosta taikka testien uusimistarve vähenee oleellisesti. Myös dokumentointityötä ja tulosten analysointityötä voidaan vähentää hyvällä ennakkosuunnittelulla. Mittaustulosten koneelliseen käsittelyyn on aiheellista käyttää resursseja, jolloin voidaan keskittyä mittausten oikeellisuuden kontrollointiin.</p>
<p>5    Lämpösuunnittelu</p>
<p>Varsinaisen lämpösuunnittelun verifiointissa käsittely suunnataan ainakin seuraaviin osa-alueisiin:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- lämpösuunnittelun tavoitteet, reunaehdot ja suunnittelumarginaalit</li> <li>- ympäristösietoisuus, mekaniikka, EMC, yms.</li> <li>- luotettavuustavoitteet ja riskialttiit komponentit</li> <li>- viranomaismääräykset ja yrityksen soveltamat standardit</li> <li>- materiaali- ja komponenttitiedot (lämpötekniikka, vikamekanismit)</li> <li>- lämpötekniset perusratkaisut</li> <li>- laskentatekniikka, mallinnus ja simuloinnit (staattinen, dynaaminen)</li> <li>- mittausten ja testaustarpeiden huomioon ottaminen suunnittelussa</li> <li>- suunnitteludokumentit ja loki sekä tiedostojen varmuuskopioinnit.</li> </ul> <p>Suunnittelussa huomio kiinnitetään valittuihin laskentamenetelmiin ja niiden soveltumiseen ao. tehtävän ratkaisemiseen sekä tehtyjen lämpötekniisten ratkaisujen toimivuuteen. Mallinnuksessa tarkistetaan mallin ja fyysisen toteutuksen riittävä yhteensopivuus, johon liittyy mittauksissa tarvittavien kohteiden määrittely ja toteutus. Huomattava osa suunnittelutyöstä on teknisten yksityiskohtien käsittelyä sekä materiaalitietojen valintaa. Simulointeja käytetään tehtyjen ratkaisujen mielekkyydestä tarkistukseen sekä mahdollisten virheiden paikantamiseen.</p>

## 6 Mittaukset

Mittausten avulla saadaan laitteesta todellista lämpösuunnittelutietoa. Verifiointissa tarkistetaan suunniteltujen mittausten laadulliset ja määrälliset tarpeet suhteessa ao. tuotekehitystehtävään. Mittaustarpeet on tiedostettava jo lämpösuunnittelun yhteydessä, ja suunnittelijan olisi määriteltävä ne kohteet, joita mitataan, ja huolehdittava ao. mittauspisteiden sisällyttämisestä mahdollisiin lämpömalleihin, jotta simulointien tuloksia voitaisiin verrata mittaustietoihin.

Mittausten verifiointi sisältää mm. seuraavat tarkistuskohteet:

- mittaustarpeiden valinta ja liittyminen lämpösuunnitteluun (relevantit suureet: lämpötilat, tehot, ilman virtaus, emissiokerroin)
- mahdolliset materiaalien ja komponenttien mittaukset
- mittausten menetelmät ja niiden tarkkuudet suhteessa suunnitteluun
- mittaustarpeiden toimivuus ja soveltuvuus ao. tehtävään
- mittaustilanteessa esiintyvät virhelähteet (anturointi, ympäristö)
- mittaustarpeiden aikavakioiden huomioon ottaminen
- mittaustulosten kerääminen ja talletus sekä dokumentointi.

Mittausten ennakoivalla suunnittelulla vältetään mittaustilanteessa helposti syntyviä virheitä ja varmistetaan, että suunnittelun verifiointissa tarvittavat tiedot saadaan ao. mittausten yhteydessä. Tässä auttaa harkittujen mittaustulosten valmistelu ennen mittauksiin ryhtymistä.

## 7 Testaus

Testauksessa tuotteen protomalli tai valmis tuote altistetaan halutuille ympäristö- ja käyttötilannetta vastaaville rasituksille. Perustestejä voidaan tehdä laboratorio-olosuhteissa käyttämällä laitetta sen normaaleilla ja/tai maksimaalisilla kuormilla. Sen mukaan, kuinka paljon tietoa halutaan ja tarvitaan, laite altistetaan myös niihin erilaisiin ääriolosuhteisiin, joihin se joutuu käyttöolosuhteissaan. Tyypillisiä lämpösuunnitteluun liittyviä testejä ovat staattiset ja dynaamiset lämpötestit, joihin mahdollisesti liittyy laitteen oman tehonkulutuksen vaihtelu minimistä maksimiin. Tärkeää on varmistaa näiden testien avulla, että tuote

- toimii erilaisissa ääriolosuhteissa
- ei vaurioidu testausolosuhteissa
- toimii luotettavasti suunnitellun käyttöikänsä.

Testien rasiustasoa voidaan nostaa myös tarvittaessa esim. asteittain niin korkealle, että saadaan laite vikaantumaan, jolloin saadaan selville kuinka kaukana ollaan vikaantumisrajasta normaalin spesifikaation rajoilla.

Lämpösuunnittelun itsensä kannalta oleellista on varmistaa, että tuotteen lämpötekniiset arvot (lämpötilat, häviötehot, ilman virtaukset, jne) ovat testeissä suunnitelmien mukaiset. Samalla on pidettävä huoli, että myös testausympäristön arvot ovat testauspesifikaation mukaiset.

Testeissä on aiheellista mitata todellisia lämpötekniisiä parametreja, (lämpötiloja, virtauksia, jne), jotta voitaisiin nähdä, kuinka lähellä suunnittelutavoitteita ollaan. Pelkkä toimii/ei toimi tiedon kerääminen testeistä saattaa aiheuttaa suuria virhearvioiteja tuotteen toimivuuden arvioinnissa.

Verifiointissa käydään läpi testausuunnitelmat ja testien tulokset sekä arvioidaan, ovatko testit riittäviä kuvaamaan ao. tuotteen ympäristörasituksia. Samoin tarkistetaan mahdollisten puutteiden aiheuttamat korjaavat toimenpiteet sekä arvioidaan testien uusimistarve.

## 8 Suunnittelu- ja testaustulosten arviointi

Käytännössä tuotekehitysprojektin valmistuessa olisi järjestettävä lopputuloksen varmentamiseksi katselmus, jossa käydään läpi yhteenvedonomaisesti saavutetut suunnittelutulokset sekä ao. laitteelle tehtyjen testien tulokset sekä verrataan niitä asetettuihin lämpötekniisiin ym. tavoitteisiin. Harvoin suunnittelussa saavutetaan aivan kaikkia tavoitteita osittain teknisten syiden vuoksi ja osittain erilaisten aikataulu-, kustannus- yms. rajoitusten vuoksi. Toisaalta vasta tuotannosta asiakkaalle menneistä tuotteista voidaan saada relevanttia tietoa tuotteen käyttäytymisestä käyttöolosuhteissa. Tähän esim. takuuajkaisiin korjauksiin liittyvän kenttäpalautteen hyväksikäyttöön kannattaa kiinnittää huomiota, koska vain tällä tavalla suunnittelija voi saada tietoa kuinka suunnittelu toimii todellisissa käyttöolosuhteissa ja voi kehittää lämpötekniisiä ratkaisujaan.

Loppukatselmoinnissa käytäviä tarkistuskohteita ovat mm.

- suunnittelutavoitteiden toteutuminen
- tavoitteiden muutostarve tulevaisuuden tarpeita silmällä pitäen
- suunnitteluratkaisujen toimivuus ao. tuotteessa
- testausuunnitelmat ja niiden aiheuttamat toimenpiteet
- korjaavat toimenpiteet koskien tuotetta ja lämpösuunnittelua
- kentältä saatavan palautetiedon kerääminen ja käsittely
- erilaisten suunnitteluun ja tuotteeseen liittyvien uusien mahdollisuuksien avaavien ideoiden kirjaaminen tulevia tarpeita varten.

Verifiointi keskittyy yleensä asetettujen tavoitteiden ja tiettyjen hyväksi tunnettujen suunnittelusääntöjen noudattamisen tarkistamiseen. Verifiointia voidaan viedä tätä pitemmälle ja parantaa tuotekehityksen tuloksia, mikäli siinä myös kyseenalaistetaan totuttuja ratkaisuja ja etsitään aktiivisesti parempia keinoja tuotteen ominaisuuksien parantamiseksi.

Tuotekehityksen tavoiteasettelun uudelleenarviointia on syytä tehdä suunnittelun edetessä, jolloin voidaan päästä alkuperäisiä tavoitteita parempaan kokonaistulokseen tuotteen laadussa. Tämän vuoksi olisi hyödyllistä käydä nämä uudelleenarvioinnit läpi yhdessä eri suunnittelualueisiin keskittyneiden suunnittelijoiden kesken.

Tavoiteasettelun itsensä arviointi on tärkeä osa tuotteen verifiointia. Siinä käydään läpi tehot, lämpötilat, mekaniikka, materiaalit, käyttöolosuhteet, testattavuus ja kannanotot mahdollisten rakennemallien käyttämisestä. Lisäksi tarkistetaan erilaisiin ympäristötekijöihin, ergonomiaan, materiaalien vanhenemiseen, turvallisuusvaatimuksiin, EMC-rajoituksiin, energian säästöön, yms. liittyvien asioiden vaikutus lämpösuunnittelun tavoitteisiin.

Komponenttien rasitustason hallitsemiseksi on tunnistettava vikaherkimmät komponentit ja niihin kohdistuvien poikkeuksellisten rasitusten, kuten ylijännitteiden, lämpötilan vaihtelun, mekaanisen jännityksen, kosteuden ja ilmansaasteiden, aiheuttamat rajoitukset ja vaatimukset lämpösuunnittelulle.

Esimerkkinä riskialttiista lämmönpoistotekniikasta on suurehkojen jatkuvien lämpötilanvaihteluiden aikaansaaminen taikka ylisuuren pakotetun konvektion käyttö, joilla voidaan tahattomasti kiihdyttää erilaisia vikamekanismeja.

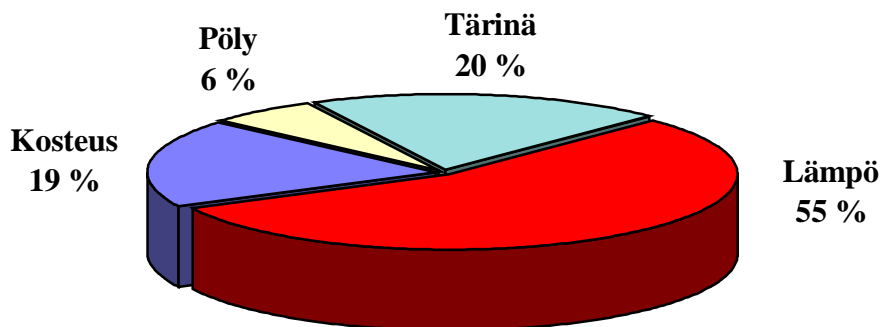
Lämmönsiirtotekniikka itsessään ei saisi merkittävästi alentaa laitteen luotettavuutta. Tämän vuoksi myös lämmönsiirtokomponenttien (puhaltimien, lämmönvaihtimien jne.) oma luotettavuus on tunnettava yhtä hyvin kuin muidenkin komponenttien.

## 3 LÄMPÖSUUNNITTELU

### 3.1 LÄMPÖSUUNNITTELUN TAVOITTEET

Elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelun perustavoitteena on suunnitella laitteen lämpötalous siten, että laite toimii luotettavasti sille määritellyn spesifikaation mukaisesti niissä ulkoisissa olosuhteissa, joihin se joutuu elinjaksonsa aikana. Laitteen ulkoiset olosuhteet kattavat sen valmistuksen, kuljetuksen, asennuksen ja käytön aikaiset olosuhteet.

Kuvan 4 mukaan elektroniikkalaitteen vikaantumisen syistä pääosa liittyy lämpöön ja kosteuteen. Lämpötilan korkeus (kylmä/kuuma) ja vaihtelu sekä kosteus vaikuttavat aina materiaalien ja komponenttien fyysisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Näiden vaikutusten suuruus puolestaan ratkaisee sen, milloin jokin lämpötilan muutos tai absoluuttinen taso taikka kosteustaso on merkittävä tuotteen ominaisuuksien huononemisen ja käyttövarmuuden kannalta.



*Kuva 4. Elektroniikkalaitteen vikaantumisen syyt ilmailualalla (Flometrics, US Air Avionics Integrity Program).*

Lämpösuunnittelussa ei voida toimia pelkästään lämpötekniikan ehdoilla, suunnittelijan on oltava tiiviissä yhteistyössä sähköisen ja mekaanisen suunnittelun kanssa laitteen toiminnallisten ominaisuuksien kontrolloimiseksi. Lisäksi yhteydenpito EMC-suunnitteluun on tarpeen, jotta laitteesta tulee riittävän tiivis sähkömagneettisesti ja vältetään sellaisia ratkaisuja, jotka tekevät laitteesta sähkömagneettisen häiriölähteen ja/tai herkän ulkoisille sähkömagneettisille häiriöille.

Lämpösuunnittelun avulla poistetaan ylikuumentumisen ja lämpötilan vaihtelujen aiheuttamia ongelmia ja pidetään laitteen sisäosat riittävän tasaisessa ja oikeassa toimintalämpötilassa sekä vaikutetaan myös laitteen

käyttäytymiseen erilaisissa vaativissa ympäristöolosuhteissa ja vähennetään esim. kosteuden haitallista vaikutusta.

Laitteen lämpösuunnittelua harkittaessa on tarkoituksenmukaista arvioida, minkä tasoista suunnittelua kyseinen tapaus edellyttää ja onko laitteesta tai sen osista olemassa tai saatavissa jo aikaisempaa kokemukseräistä tietoa. Lämpösuunnittelun apuna voidaan käyttää mallinnusta, mutta mallinnus ei ole välttämätön ehto lämpösuunnittelulle, joka voidaan tehdä kokemukseräisesti ja verifioida visuaalisen tarkastuksen, mittausten ja lämpötestien avulla.

Perusasioita lämpösuunnittelun tavoitteita määritettäessä ovat seuraavat:

- olemassa olevien lämpötekniisten ongelmien kartoitus
- muiden kuin lämpötekniisten tavoitteiden vaikutus lämpösuunnitteluun
- olemassa olevan lämpösuunnittelutiedon hankkiminen ao. laitteesta
- karkeiden suunnittelutavoitteiden määrittely
- fyysisten rakenne- ja lämpömallien hyväksikäyttö suunnittelun apuna
- mahdollisen simulointimallin yksityiskohtaisuus ja tarkkuustaso
- mahdolliset kannanotot simulointimallin jakamiseen osakokonaisuuksiksi rajapintojen avulla
- mallinnustyökalun valinta, jos sitä tarvitaan
- käytettävissä olevien komponenttien ja materiaalien lämpötekniisten ominaisuuksien kartoitus
- suunnittelumarginaalien määrittely laite- ja komponenttitasolla
- kriittisimpien vikamekanismien kartoitus käytettävissä olevissa komponenteissa ja materiaaleissa ao. tapauksessa
- verifiointissa käytettävien mittausmenetelmien ja testien valinta.

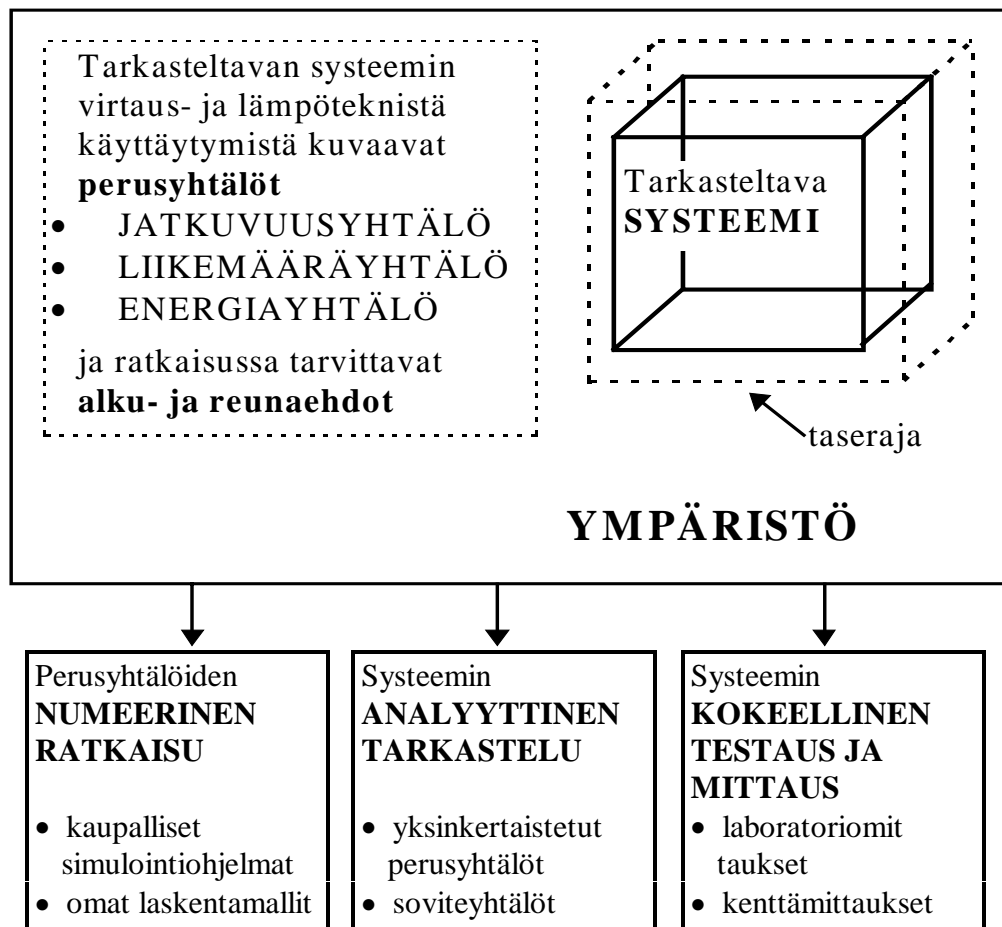
Näiden perusasioiden valintojen ja kartoitusten avulla varmistetaan, että tavoitteiden asettaminen, mallinnuksen rakenne, suunnittelun tarkkuus ja käytettävät mittaus- ja testausmenetelmät ovat keskenään sopusoinnussa ja vältetään mahdollinen harkitsematon ali- tai ylisuunnittelu taikka vältetään joko liian kallis mallinnustyö ja/tai pitkät testaukset.

Komponenttien kriittisimpien vikamekanismien kartoitus on tarpeen, jotta varmistettaisiin, että painopistettä lämpösuunnittelussakin osataan suunnata niihin kohteisiin, joiden vikaantuminen ensisijaisesti vaikuttaa laitteen käytettävyyteen ja luotettavuuteen.

### 3.2 LÄMPÖSUUNNITTELUN FYSIKAALINEN PERUSTA

Lämpösuunnittelun perustavoitteena on ylläpitää laitteen sisäosien lämpötiloja spesifikaatioiden mukaisissa rajoissa, tasoittaa sisäisiä lämpötilaeroja ja johtaa liiallinen lämpöteho teknisesti ja taloudellisesti mielekkäällä tavalla ulos laitteesta. Usein myös laitteen sisäosien varjeleminen liialta jäähtymiseltä ulko-olosuhteissa kuuluu lämpösuunnittelun tavoitteisiin.

Lämpösuunnittelu perustuu viimekädessä lämpöteknisten ilmiöiden hyvään ymmärtämiseen (kuva 5). Käytettävissä olevat fysikaaliset lämmönsiirtomekanismit ovat lämmön johtuminen, konvektio ja säteily. Väliaineiden (kaasu, neste) virtauksen ja faasimuutosten hyväksikäyttö ovat merkittäviä keinoja tehostaa lämmönsiirtoa. Näitä koskevaa tietoa on koottu yksityiskohtaisemmin liitteeseen 1 "Lämpösuunnittelun perusteet", jossa käsitellään lämpösuunnittelua komponenttitasolta kaappitasolle selvittäen lämpösuunnittelussa oleellisia lämmönsiirron, virtausdynamiikan ja aineensiirron perusmekanismeja ja toimintamalleja.



Kuva 5. Lämpösuunnittelun fysikaaliset perusteet (liite 1).

Lämpösuunnittelun fysikaalisen perustan verifiointissa kiinnitetään huomio mahdollisuuksiin hyödyntää suunniteltavassa tuotteessa lämmönsiirron eri mekanisme, johtumista, konvektiota ja säteilyä. Tässä arvioidaan, mitä mekanismeja voidaan hyödyntää missäkin yksityiskohdassa ja olisiko mahdollisuus käyttää hyväksi väliaineen virtausta (nesteena, kaasuna) ja väliaineen faasimuutosta, kuten lämpöputkissa. Näihin mahdollisuuksien arviointeihin liittyy läheisesti erilaisten materiaalien, rakenneratkaisujen, lämmönvaihdyntien, puhallinten yms. käyttömahdollisuuksien pohdinta, kun tavoitellaan uudentyyppisiä fysikaalisia ratkaisuja.

Tässä yhteydessä arvioidaan myös käytettävien fysikaalisten mallien ja yhtälöiden sekä laskentamenetelmien soveltuvuus kyseisen suunnittelutehtävän toteutukseen. Tämän tason verifiointi pureutuu lämpösuunnittelun perusteisiin, mikä kannattaa tehdä itseasiassa jo valittaessa yrityksen lämpösuunnittelun työkaluja, menetelmiä ja suunnittelijoita. Suunnittelijan olisi tiedostettava, missä ovat eri työkalujen ja menetelmien fysikaaliset rajoitukset, jottei tehdä tarpeetonta ja virheellistä laskentaa. Erilaisten laskentaohjelmien laskentamenetelmiinkin sisältyy virhelähteitä, joista suunnittelijan on vaikea ottaa selvää. Näin ollen verifiointissa onkin pyrittävä arvioimaan laskennallisia tuloksia suhteessa mitattuihin arvoihin, jotta erilaiset analyysi- ja laskentavirheet eivät johtaisi virheellisiin johtopäätöksiin.

Esimerkkinä tällaisesta ongelmasta mainittakoon vaikeus ratkaista tavallisen, käytännössä muodoiltaan hyvin monimutkaisen komponenttilevyn pinnan läheisyydessä tapahtuvan ilman virtaus, joka on laminaarin ja turbulentin virtauksen välimailla. Tästä taas seuraa vaikeus määrittellä komponenttilevyjen läheisyydessä ilman lämpötiloja ja virtausnopeuksia, ts. konvektiivisen lämmönsiirron tehokkuutta, saati sitten mitata niitä.

Toinen esimerkki hankalasti hallittavista fysikaalisista ilmiöistä on johtuminen kahden materiaalin (kappaleen) rajapinnassa, koska rajapinnan pinnankarheus, lenkous ja kosketuspaine (puristusaine) muuttavat melko paljon johtumisominaisuuksia. Pitemmällä käyttöajalla rajapinnan korroosio tai käytettyjen väliaineiden (piirasva) rappeutuminen voivat kasvattaa lämpöliitosresistanssia. Vastaavia ongelmia on erilaisten käytännön materiaalien emissio- ja absorptiokertoimien hallitsemisessa.

Kuvassa 5 tarkasteltavaa systeemiä ympäröi taseraja, jossa kuvataan lämpötekninen jatkuvuus, liikemäärät ja energiansiirto. Lämpösuunnittelussa suunniteltava tuote joudutaan pilkkomaan osiin, joiden lämpötekninen käyttäytyminen kuvataan mahdollisimman hyvin. Olennaista on, että sisäkkäiset ja



rinnakkaiset osat rajataan fysikaalisesti mielekkäällä tavalla siten, että niiden raja-alueiden molemmilla puolilla hallitaan lämpötekniset parametrit.

Esim. elektroniikkalaitteessa tällaisia luonnollisia osioita ovat komponentit, komponenttilevyt ja kehikot. Voidakseen päätellä komponentin sisäosien, esim. puolijohdekomponentin, puolijohderajapintojen lämpötilat, on suunnittelijalla oltava tieto komponentin sisärakenteesta ja sen ympäristöstä. Komponentin ympäristön muodostavat piirilevy, mahdollinen jäähdytysripa sekä komponenttia kiertävä ilma ja läheisyydessä olevat kuumat säteilevät alueet. Komponenttilevyn (komponentteineen) riittävän yksityiskohtainen analysointi mahdollistaa puolestaan sen käyttäytymisen ymmärtämisen. Komponenttilevyä ympäröivät toiset komponenttilevyt, liittimet, tukirakenteet ja seinämät sekä väliaine (ilma). Sisäosien tuntemuksen perusteella voidaan arvioida laitetason lämpökäyttäytyminen ja toisaalta päätellä, miten laitteen ympäristö vaikuttaa sen käyttäytymiseen.

### 3.3 LÄMPÖSUUNNITTELUN DOKUMENTOINTI

Lämpösuunnittelussa, kuten muissakin tuotesuunnittelun osa-alueissa, on kaikkien tehtäväkokonaisuuden osien, kuten käytettyjen raja-arvojen, tehtyjen oletusten ja yksinkertaistusten, dokumentointi välttämätöntä ja se olisi toteutettava samanaikaisesti itse tehtävän suorittamisen kanssa. Samanaikaisuus poistaa muistinvaraisuudesta aiheutuvat epätarkkuudet ja puutteet ja parantaa dokumentoinnin primääritavoitteen eli suunnitteluprosessin jäljitettävyyden luotettavuutta.

Kirjallisen seurannan tarve korostuu pitkissä projekteissa. Dokumentointi onkin ulotettava kattamaan koko lämpösuunnitteluketju aina tunnusteleavasta hahmotusvaiheesta lopulliseen tuotekonseptiin asti. Tässä ketjussa nk. muutosloki (päiväkirja), ts. dokumentti, joka seuraa tarkasti suunnitteluun tehtyjä muutoksia, niiden syitä (muutokset mekaanisessa tai sähköisessä suunnittelussa, jne.) ja perusteluja tehdyille korjauksille, on ensiarvoisen tärkeä. Mikäli lämpösuunnittelu tehdään yrityksen ulkopuolisena toimeksiantona, on tässä dokumentissa syytä esittää myös muutoksiin johtaneiden toimien esittäjät ja mahdollinen vaikutus projektin tavoitteiden saavuttamiseen ja aikatauluihin sekä kustannuksiin, sillä näiden asioiden selvittäminen jälkeenpäin voi olla äärimmäisen hankalaa.

Koska lämpösuunnittelu ei ole mikään erillinen osa tuotekehitystä, vaan se tehdään yhtenä tärkeänä osana samanaikaisuunnitteluun perustuvaa kokonaisuutta, on lämpösuunnittelijan toimittava läheisessä yhteistyössä lähinnä elektroniikka- ja mekaniikkasuunnittelijoiden kanssa. Koska kaikki vaikuttaa kaikkeen, on näiden henkilöiden kesken päästävä hyvään kompromissiin

annettujen tavoitteiden saavuttamiseksi. Lämpösuunnittelussa syntyvä dokumentaatio ei siis ole tarkoitettu pelkästään koristamaan suunnittelijan omaa hyllyä, vaan se on tarkoitettu jaettavaksi ja ennen kaikkea luettavaksi kaikille niille henkilöille, joiden tekemisiin sillä on vaikutusta. Tehokkaalla tiedonkululla varmistetaan kaikkien projektin suunnittelijoiden pysyminen ”samassa vaiheessa” ja ilmenevien ongelmakohtien nopea korjaaminen.

Hyvä lämpösuunnittelun dokumentointi toimii myös korvaamattomana apuna uusien projektien suunnittelussa. Kertyneen tiedon avulla voidaan projektin työn tarvetta ja syntyviä suunnittelu- ja testauskustannuksia arvioida hyvinkin tarkkaan. Lisäksi hyviksi osoittautuneita ratkaisuja voidaan usein soveltaa vain pienin muutoksin hyvinkin erilaisiin uusiin sovelluskohteisiin. Analyysityössä kertyneet materiaalikirjastot ja mallintamisfilosofiat myös nopeuttavat omalta osaltaan suunnitteluprosessia.

Tietoverkkojen ja niiden tarjoamien palveluiden nopea kehittyminen tarjoaa hyvän mahdollisuuden myös syntyvän dokumentaation levittämiseen ja tiedonsiirron nopeuttamiseen. Hyvin suunnitellussa ja toimivassa tietoverkossa myös oikean ja viimeisimmän tiedon hankinta ja hallinta on nopeaa ja vaivatonta.

Euroopan Avaruusjärjestö ESA onkin tutkituttanut tietoverkossa toimivan ”virtuaaliyrityksen” toimivuutta VTT:n (Suomi), ORS:n (Itävalta) ja HTS AG (Sveitsi) yhteistyönä (SME-NET). Tähänastiset kokemukset osoittavat tällaisen järjestelyn toimivan hyvin kaikilla tuotesuunnittelun osalueilla ja tuovan projektityöskentelyyn selviä säästöjä ja tehokkuutta.

### 3.4 TEHTÄVÄN MÄÄRITTELY JA REUNA-EHDOT

Kun lämpösuunnittelua tehdään, on huomioitava, että sitä ei tehdä vain sen itsensä vuoksi, vaan taustalla on yleensä tarve parantaa hyvällä lämpösuunnittelulla laitteen luotettavuutta, laajentaa sen käyttöaluetta vaativampiin ympäristöihin, tms. Onkin tärkeää heti projektin alussa tarkasti selvittää, mitä lämpösuunnittelulta halutaan. Halutaanko kenties jo olemassa olevan laitekonstruktion lämpökäyttäytymisen varmentamista tietyissä ääritilanteissa (tehot, lämpötilat jne.), vai halutaanko optimoida laitteen sisäiset lämmönsiirtopolut vai pyritäänkö mahdollisesti ratkaisuun, jossa minimoidaan pakotetun jäähtymisen tarve. Mahdollisia tarkastelusuuntia ja tapoja on lukematon määrä! Suoritettavan lämpösuunnittelun työn määrään ja tapaan valitulla tarkastelutavalla on keskeinen merkitys.

Kun on selvitetty, mitä halutaan, ja vaadittu tehtävä vaatii matemaattisen mallin tekemistä käyttäen jotakin erityisesti tähän tarkoitukseen suunniteltua

ohjelmistoa, on seuraavaksi määriteltävä kaikki lämpösuunnitteluun vaikuttavat *reunaehdot*. Niitä ovat:

#### 1. Mekaaniset reunaehdot

- laitteen dimensiot on jo tarkasti määrätty
- käytettävät materiaalit on määrätty
- materiaalien pinnoitus on määrätty

#### 2. Sähköiset reunaehdot

- laitteen teho on määrätty (max., min. ja keskim.)
- komponenttien sijoittelu on määrätty
- korttien sijoittelu on määrätty
- EMC-vaatimukset koteloinnilta

#### 3. Komponenttien ja materiaalien lämpötekniset ominaisuudet

- komponenttien suurimmat käyttölämpötilat
- laitteen luotettavuustavoite
- materiaalien lämpötekniset ominaisuudet ja käyttöominaisuudet eri lämpötiloissa

#### 4. Ympäristö

- käyttöympäristön lämpötilarajat
- ympäristön lämmönlähteet (lämmittimet, aurinko)
- lämpönielut (asennusalue, ilmastointi, vesisade, tuuli)
- korroosiosuojuksesta johtuvat vaatimukset
- muut sijoituspaikkojen moninaisuuksista johtuvat vaatimukset

#### 5. Asiakkaan tai markkinoinnin haluamat muut erikoisvaatimukset

- ei puhaltimia
- ei lisälämmittämiä
- ergonomisuus, ei melua, ulkonäkö...

Kun kaikki reunaehdot on selvitetty lähtien tuotespesifikaatioista, on yhteistyöllä laadittava tarkat analysoitavat tapaukset sekä niiltä haluttavat tulokset. Tyypillisiä analysoitavia tapauksia voivat olla mm. kuumin mahdollinen tapaus (suurimmat mahdolliset tehot, suurin mahdollinen ympäristön lämpöaste ja korkein mahdollinen ympäristön lämpötila jne.) ja kylmin mahdollinen tapaus. Luotettavuuden kannalta olennaisia ovat myös suurista tehonvaihteluista tai ympäristölämpötilan vaihteluista aiheutuvat sykliset lämpötilan muutokset, jotka rasittavat sekä kaikkia rajapintoja että materiaaleja. Tällaisten olosuhteiden lieventäminen lämpösuunnittelun avulla voi olla lähtökohtana koko lämpösuunnittelulle.

Usein ongelmat lämpösuunnittelun tulosten tulkinnassa tulevatkin siitä, että suoritettu analyysi ei ole vastannut niitä tavoitteita, mitä sille oli asetettu

johtuen osapuolien toisistaan huomattavasti eroavista käsityksistä siitä, mitä alun perin piti tehdä ja mitä varten.

Huolellisella tapausmäärittelyllä, reunaehtojen ja yksinkertaistusten huomioinnilla sekä hyvin dokumentoidulla analyysityöllä varmistetaan se, että asiakas (oli se sitten yrityksen sisällä tai joku ulkopuolinen tilaaja) saa sitä, mitä tilaa!

### 3.5 SUUNNITTELU

Lämpösuunnittelua voidaan tehdä usealla tarkkuustasolla ja useassa tuotekehityksen vaiheessa. Mitä aikaisemmassa vaiheessa nämä kysymykset ovat esillä, sitä parempiin ratkaisumalleihin voidaan päästä. Tyypillisiä lämpösuunnittelun toteutusvaiheita ovat:

#### 1. Esisuunnittelutaso

- tuotekokonaisuus on hahmotteluvaiheessa
- ei ole olemassa vertailukohtia tai malleja juuri tälle tuotteelle
- usein epämääräiset lämpötekniset reunaehdot
- ei tarkkaa kuvaa dimensioista tai käytettävistä materiaaleista
- perustuu yleisen tason ajatuksiin
- suuri vaikutus jatkosuunnittelun tuloksiin

#### 2. Tuotesuunnittelutaso

- tuotekehitys on konkretisoitunut pääosiltaan
- perustuu olemassa olevan perusgeometrian mallinnukselle ja/tai mittauksille
- tunnetut lämpötekniset reunaehdot, materiaalit ja rajapinnat
- ei radikaaleja muutoksia olemassa oleviin ratkaisuihin
- pohjana hyvä esisuunnittelu

#### 3. Jälkihoitotaso

- tuotekehitys on valmis ja halutaan varmistuksia samalla kun protosarja on jo tuotannossa
- perustuu mittaustuloksiin tai malliin
- toimii lähinnä erilaisten toimintatilanteiden analysoijana
- (damage control and prediction)
- minimaaliset mahdollisuudet muutoksiin.

Kaikilla näillä tasoilla voidaan lämpösuunnittelua käsitellä rationaalisenä iteraatioprosessina (vaikkakin jälkihoitotasolla ei saaduilla tuloksilla ja teh-

dyillä johtopäätöksillä ei välttämättä ole vaikutusta juuri tälle tuotesukupolvelle), joka käsittää seuraavat vaiheet:

#### 1. Ongelmakohtien kartoitus

- tehtyjen ratkaisujen lämpö- ym. vaikutusten arviointi sekä vertailu asetettuihin ympäristövaatimuksiin eri käyttötilanteissa
- suunniteltujen ja käytettävien komponenttien lämpösietoisuuskartoitus
- tuotteen ulkoisten vaatimusten kartoittaminen ja tarkentaminen

#### 2. Alustava analyysi

- voidaan suorittaa usealla tasolla riippuen vaadittavasta tarkkuudesta ja yksityiskohtaisuudesta
- voi perustua myös kokemuksiin vastaavista aikaisemmista tilanteista
- mikäli suunnittelu on tehty huolellisesti ja riittävällä tarkkuustasolla käyttäen sopivia työkaluja, voidaan hyvin hahmottaa korjausta vaativat kohdat

#### 3. Ratkaisuehdotukset

- vaativat sekä elektroniikka- että mekaniikkasuunnittelijoiden kommentit
- voitava esittää myös vaihtoehtoisia ratkaisumalleja
- perustuttava mahdollisimman tehokkaaseen ja tarkoituksenmukaiseen lämmönsiirtomekanismien kattavaan hyväksikäyttöön

#### 4. Uusi analyysikierros

- edellä esitettyjen ratkaisumallien analysointi ja tulosten vertailu
- sopivimman toimintatavan valinta
- suunnittelun lopullinen kiinnittäminen ko. tuotteelle tai tuotesukupolvelle.

Analyysikierroksia suoritettaessa ja saatuja tuloksia tarkastettaessa on erityistä huomiota kiinnitettävä edellisessä kappaleessa esitettyjen vaatimusten ja reunaehtojen toteutumiseen. Analyysin toteuttajan onkin pidettävä huolellisesti kirjaa tekemisistään. Mitä yksinkertaistuksia on käytetty? Mitkä ovat niiden vaikutukset? Kuinka hyvin kukin malli vastaa tehtävän määrittelyssä sille asetettuja vaatimuksia ja reunaehtoja? Myös analyysivaiheen huolellinen dokumentaatio on korvaamaton apu suunniteltaessa mahdollista (ja toivottavaa) tuotteen lämpökäyttämisen ja parametrien mittaamista.

Saavutettu lopputulos ei useinkaan ole lämpösuunnittelun kannalta paras mahdollinen lukuisten elektroniikka- ja mekaniikkasuunnittelun reunaehtojen paineessa, mutta koko tuotesuunnitteluhenkilöstön yhteistyöllä aikaan-

saatu ratkaisu on varmasti paras mahdollinen juuri ko. tilanteeseen. Myöhempää tuotekehitystyötä ajatellen on lämpösuunnittelun dokumentaatioon sisällyttävä myös ne perustelut, joilla tähän ratkaisuun päädyttiin, jolloin näillä kokemuksilla voidaan tehostaa suunnittelutyötä ohjaamalla jo suunnittelun varhaisessa vaiheessa kehitystä suuntaan, jolla on suurimmat mahdollisuudet onnistua.

### 3.6 SUUNNITTELUTULOSTEN ESITTÄMINEN

Kun tehtävän määrittely on tehty tarkasti ja siinä on kerrottu se, mitä lämpösuunnittelulta halutaan, voidaan tehdyn työn tulokset esittää viitaten näihin vaatimuksiin. Saadut tulokset ovat tiivistetty esitys siitä, mitä tehdyllä lämpösuunnittelulla on saatu aikaan. On kiinnitettävä erityistä huomiota siihen kuinka tulokset esitetään.

1. Esitä kaikki analysoidut ja mitatut tapaukset
2. Esitä kaikkien tapausten reunaehdot, kuten
  - vallinneet ympäristöolot
  - tehot
  - jne.
3. Esitä tulokset lyhyesti ja ytimekkäästi
  - Määrittelykohdassa haluttujen kohteiden saavuttamat lämpötilat ja mahdolliset muut kiinnostavat lämpötilat (ja saavutetut suunnittelumarginaalit) voidaan esittää taulukkona.
  - Käyrät ovat tehokas tapa kuvata muuttuvia parametreja.
  - Ota kantaa saatujen tulosten tarkkuuteen.
4. Esitä tulosten perusteella luotu synteesi,
  - kuinka hyvin suunnittelutyö onnistui
  - kuinka hyvin se vastaa tehtävän määrittelyssä sille asetettuihin tavoitteisiin (tämä kohta on erittäin tärkeä ja sille on pantava paljon painoa)
  - mahdolliset parannusehdotukset erillisessä yhteenvetokappaleessa.

Usein lopputulokset ja yhteenvedot ovat lämpösuunnittelun dokumentoinnista ainut osa, josta muut kuin lämpösuunnittelun parissa työskentelevät ovat kiinnostuneita. Tämän vuoksi näissä kohdissa onkin pyrittävä selkeään, tehokkaaseen ja yksinkertaiseen ilmaisuun, kuten edellä on sanottu.

## 4 MALLINNUS

### 4.1 MALLINNUKSEN TARKKUUSTASO

Kun tuotekehitys vaatii lämpösuunnittelua, on heti aluksi voitava määrittää suoritettavalta analyysiltä vaadittava tulosten tarkkuustaso. Analyysi voi vaihdella hyvin karkeista ja nopeista laskuista, jotka perustuvat joihinkin yleisiin oletuksiin, aina erittäin yksityiskohtaiseen numeeriseen simulointiin. Numeerinen simulointi voi ottaa huomioon kaikki mahdolliset lämmönsiirtotavat ja -polut suurella tarkkuudella, jolloin lämpömallinnustehtävä voi kaikkine iterointikierröksineen kestää jopa vuosia.

Pitkä tehtävän suorittamiseen kuluva aika ei riipu pelkästään mallinnuksen tai tietokonetekniikan pullonkauloista, vaan se johtuu tyypillisesti pitkäkestöisen kehitysprosessin mukanaan tuomista materiaali- ja lämmönsiirtoparametrien tarkentumisista sekä geometrian muutoksista. Myös itse lämpösuunnittelutehtävä ja sille asetetut tavoitteet saattavat muuttua muiden suunnittelun osa-alueiden johdosta.

Seuraavaksi on lähinnä lämpösuunnittelijan päätettävä käytettävästä rakennetarkkuudesta, jolla malli vastaa analysoitavaa laitetta sekä myös käytettävien lämmönsiirtotapojen valinnasta siten, että nämä valinnat ovat yhteisiä ja toisiaan tukevia niiden tavoitteiden saavuttamiseksi, joka annetulle lämpösuunnittelutehtävälle on asetettu.

### 4.2 LÄMPÖMALLIN LAATU

Lämpömallin laadun tarkistaminen on osa lämpösuunnittelun verifointitehtävää. Malli on osa lämpösuunnittelusta, joka alkaa kohteen analyttisestä tarkastelusta, jatkuu mallinnuksella ja simuloinneilla sekä hyväksikäyttää mittauksia ja testejä tuloksen laadun arvioimiseen.

Mallin hyvyyttä voidaan tarkastella joko vertaamalla mallin ja mittausten antamia lämpötilajakaumia ja/tai suorittamalla tarkka analyysi tutkittavan rakenteen kaikista lämmönsiirtopoluista ja -tavoista käyttäen referenssinä parasta osaamista ja tietoja lämmönsiirtomoodeista ja lämpösuunnittelusta.

Pelkästään lämpötilajakaumien vertailu mallin ja mittaustulosten välillä voi johtaa virheellisen lämpömallin hyväksymiseen. Näin voi käydä, jos tarkoitushakuisesti laaditaan lämpömalli, joka antaa oikeanlaisen lämpötila-

jakauman mutta ei kuvaa oikein lämmönsiirtoa laitteen sisällä ja ulos ympäristöön.

Esimerkkinä tällaisesta tilanteesta voidaan ottaa monikorttinen elektroniikkakotelo, jonka seinämien lämpötilat voidaan saada vastaamaan mittaustuloksia pelkästään muuntelemalla johtumisen lämmönsiirto-kerrointa korteilta niiden kiinnityskohtien läpi kotelon seinille. Todellisuudessa seinien lämpötilajakaumaan saattaa eniten vaikuttaa korteilta säteilemällä siirtynyt lämpö.

Näin saatu malli, jossa on siis jätetty huomioimatta kaikki lämmönsiirtotavat analysoimatta tarkemmin tehdyn oletuksen oikeellisuutta, antaa oikean tuloksen hyvin suppealla parametrien vaihtelualueella, eikä tarjoa niitä mahdollisuuksia mahdollisesti esiintyvien lämpöongelmien ratkaisemiseksi, mitä tarkemmin rakennettu malli antaa. Saadun mallin luotettavuus on myös kyseenalainen. Jos laitetta kuvaamaan hyväksytään väärä, tai ainakin jollakin tasolla mutkia oikova, malli (ilman, että oikomisen todelliset vaikutukset ovat tiedossa), on olemassa vaara laitteen vikaantumiseen tai jopa tuhoutumiseen. Tämä johtuu siitä, että laitteen lämpökäyttäytyminen onkin mallista poikkeavaa tilanteissa, joita ei osattu hahmottaa yksinkertaistuksia ja muita mallinnukseen liittyviä oletuksia tehtäessä.

Nykyaikaiset mallinnus- ja analyysityökalut yhdessä huolellisen mallinnustekniikan (jossa löytyy perustelut kaikille tehdyille yleistyksille ja yksinkertaistuksille) kanssa varmistavat kuitenkin sen, että nopein ja käytännössä paras tapa analysoida lämpömallin hyvyttä, on tutkia sen antaman lämpötilajakauman yhtenevyyttä mittauksista saatuun jakaumaan.

Myös mittaustulokset voivat olla virheellisiä. Tämän vuoksi on syytä selvittää, kumpi on luotettavampi, malli vai mittaus? Yhdistelmä, jossa väärin mittaustulosten perusteella muokattua mallia käytetään ennustamaan laitteen lämpökäyttäytymistä kaikissa mahdollisissa olosuhteissa, on kohtalokas yhdistelmä nykyisillä yhä vaativammilla laitemarkkinoilla.

Kun hyväksytään laitetta kuvaamaan väärä tai ainakin jollakin tasolla mutkia oikova malli (ilman, että oikomisen todelliset vaikutukset ovat tiedossa), on olemassa vaara laitteen vikaantumiseen tai jopa tuhoutumiseen, koska laitteen lämpökäyttäytyminen onkin mallista poikkeavaa jossakin tilanteessa, jota ei osattu hahmottaa yksinkertaistuksia ja muita mallinnukseen liittyviä oletuksia tehtäessä.

Ehkäpä kaikkein tärkein osa lämpömallinnusta on pitää tarkkaa kirjaa kaikista mallinnustyön aikaisista toimista, kuten esimerkiksi kattavaa dokumentaatiota käytetyistä lämpöparametreista, oletuksista ja yksinkertaistuk-



sista sekä niiden mahdollisista vaikutuksista ja perusteluista niiden käytölle. (Vrt. edellä kohtia 3.3, 3.4 ja 3.6.)

#### 4.3 MALLINNUKSEN ONGELMIA

Terminen malli simuloi matemaattisesti ko. laitteen lämpökäyttäytymistä useissa erilaisissa tilanteissa, joissa sekä laitteen sisäiset että ulkoiset lämpötekniset olosuhteet muuttuvat. Tällainen malli voi olla hyvinkin yksinkertainen, jossa käsitellään ainoastaan keskimääräisiä lämpötekniisiä parametreja, kuten ilman lämpötilaa, painetta, virtausnopeutta ja kokonaistehoa. Toisaalta malli voi olla myös erittäin mutkikas ja täynnä yksityiskohtia aina komponenttitasolta, piirilevyiltä ja korttitelineiltä järjestelmätasolle asti.

Hyvin yksityiskohtainen malli voi ottaa huomioon esim. luonnollisen konvektion elektroniikkakaapin ulkopinnoilta ja säteilylämmönsiirron komponenttilevyjen välillä sekä jopa johtumisen yksittäistä transistorin tai mikroprosessorin liitäntäjohtinta pitkin. Tyypillisessä lämpömallissa tällaiset yksityiskohdat lämmönsiirtoreiteissä tai -tavoissa voidaan useimmiten perustellusti jättää pois. Suunnittelijan tulisi näiden merkityksen arvioimiseksi muodostaa itselleen käsitys siitä, mitä suuruusluokkaa erilaisten yksityiskohtien huomioon ottaminen merkitsee lämmönsiirrossa.

Lämpömallinnuksen yksi haastavimmista tehtävistä onkin hahmottaa mallinnettavan laitteen lämpökäyttäytymisen mahdolliset ongelma-alueet kaikissa mahdollisissa tilanteissa sekä niissä vallitsevat lämmönsiirtotavat, jolloin mallin geometrista ja ”lämmönsiirrollista” tarkkuutta voidaan ja täytyy kasvattaa näissä kohdin.

Useinkaan tällaiset lisätarkkuutta vaativat kohteet eivät kaikki ole selvillä heti mallinnustehtävän alussa, mutta ne tulevat hyvin esille huolellisesti tehdyssä mallinnustyössä ensimmäisten analyysiajojen aikana. Iteratiivisessa prosessissa mallin tarkkuutta voidaan kasvattaa kiinnostavilla alueilla. Tämä ei tarkoita pelkästään geometrisen tarkkuuden lisäämistä vaan myös kaikkien vallitsevien lämmönsiirtomoodien huomioon ottamista, kuten edellä on jo todettu.

Usein laitteen sisäisten pintojen väliset säteilylämmönsiirtokytkennät jäävät huomiotta, koska ajatellaan vain konvektion olevan merkittävää. Myös konvektion kanssa on oltava huolellinen, sillä virtaavan väliaineen käyttäytymisessä saattaa tapahtua huomattavia muutoksia lyhyelläkin matkalla. Virtaus voi olla laminaarista yhdessä paikassa ja heti perään voimakkaasti turbulenttia, jolloin konvektion lämmönsiirtokerroin voi vaihdella voimakkaasti alueilla, jotka ovat lähellä toisiaan. Tällainen lämmönsiirtokertoimien

paikallinen vaihtelu tekee mallintamisesta vaikean tehtävän. Luodun lämpömallin tarkkuus ja yksityiskohtaisuus määrää siitä saatavien tulosten määrän ja hyödyllisyyden.

Mallinnuksen alkuvaiheissa lämpösuunnittelijan on kiinnitettävä erityistä huomiota saatujen tulosten todenmukaisuuden arviointiin, koska tukea ei useinkaan saada mittauksista. Tämä ei ole yksinkertaista ja vaatii kokemusta ja tietoa sekä käytetystä mallista että mallin käyttäytymisen taustalla olevista fysiikan ilmiöistä. Yksinkertaisella tarkastusrutiinilla voidaan mallin luotavuutta helposti parantaa.

1. Lämmönsiirtopolkujen on oltava jatkuvia

Tarkista kohdat, joissa ”kylmä” ja ”kuuma” alue sijaitsevat vierekkäin ilman, että niillä näyttää olevan minkäänlaista vaikutusta toisiinsa.

2. Lämpötehotasapaino

Lämpöteknisessä jatkuvuustilassa systeemin kehittämän, absorboiman tai muuten saaman lämpötehon on oltava yhtä suuri kuin siitä ympäristöön lähtevä lämpöteho.

Kun kaikki suunnitellut simuloinnit on tehty ja tuloksia verrataan mitattuihin arvoihin, on usein ongelmallista löytää mallista täsmälleen todellista mittauspistettä vastaavaa kohtaa, jossa vertailuarvojen pitäisi olla yksi yhteen samat. Mallinnusta tehtäessä onkin suunniteltava myös ne kohdat, joista mittaukset voidaan tehdä testien yhteydessä. Usein mallissa joudutaan kuitenkin tyytymään jonkinasteiseen kompromissiin joko rakenteellisen tarkkuuden tai puuttellisten lämpötekniisten parametrien suhteen, jolloin saatetaan saada huomattavia eroja mallin ja mittausten välille. Tätä eroa saattavat lisätä myös käytetyn mallinnustekniikan sisältämät virheet ja yleistyksyet. Mallittaja voi esimerkiksi käyttää ohjelmistoja ja mallin rakenteita, jotka eivät välttämättä ole parhaiten soveliaita ko. ongelman ratkaisemiseen, jolloin yhteisvaikutuksena saadaan epätyytyttäviä tuloksia.

#### 4.4 SUUNNITTELUTAVOITTEET JA MALLINNUS

Kuten edellisessä kappaleessa esitettiin, on mallinnuksen tarkkuuden optimointi yksi kaikkein vaativimmista tehtävistä lämpösuunnittelussa. Tähän optimointiin vaikuttaa suuresti tuotesuunnittelussa laitteen käyttäytymiselle ja käyttöympäristölle asetetut tavoitteet. Nämä tavoitteet määrittävät lämmöntuoton, ulkoiset olosuhteet ja lämpötilarajat laitteen sekä toiminnallisille- että varastointiolosuhteille. Kun mallin tarkistuspisteet (tiettyjen kriittisten komponenttien, piirilevyjen tai/ja ilman lämpötilat yms.) ja ympäristön

asettamattomat reunaehdot on hyvin määritetty, on mallinnustyökalujen ja tarkkuuden optimointi lähes automaattista. Tärkeää on myös määrittää suoritettavan analyysityön tarkoitus. Onko kyseessä optimointitehtävä, jossa pyritään kaikkein tarkoituksenmukaisimpaan ja tehokkaimpaan ratkaisuun joko koko laitteelle tai jollekin sen osalle, vai onko kyseessä vain annettujen spesifikaatioiden toteuttamiseksi suoritettu tarkistustehtävä. Näiden kahden tehtävätyypin perustavaa laatua oleva erilaisuus tekee mallinnuksenkin näissä tilanteissa hyvin erilaiseksi.

#### 4.5 MALLINNUSTYÖKALUN VALINTA

Mallinnettavan kohteen monimutkaisuus ja mallinnuksen tarkoitus säättävät hyvin pitkälle siinä käytettävän työkalun valinnan. Yksinkertaisissa tapauksissa tavallinen taskulaskin ja muutama lämmönsiirron perusyhtälö ovat aivan riittävä varusteisto. Ongelmien ja geometrioiden mutkistuessa myös käytettävien työkalujen ”järeysaste” kasvaa.

Esimerkkinä vuonna 1997 käytetyistä tietyn erikoistapausalueen ongelmien ratkaisuun tarkoitetuista ohjelmista mainittakoon Yhdysvalloissa kehitetty simulointiohjelma, SAUNA, joka on tarkoitettu piiri- ja komponenttilevyjen sekä yksinkertaisten rakenteiden suhteellisen monipuolisiin lämpöanalyysiin. Ohjelmallisten työkalujen huippua edustavat erilaiset numeeriset ohjelmistot, jotka ratkaisevat samanaikaisesti sekä johtumisen, virtauskentän että säteilyn (esim. I-DEAS ESC ja TMG sekä Flotherm).

Mitä tahansa työkalua käytetäänkin, menestyksekkään lämpösuunnittelun edellytys on lämmönsiirtoilmiöiden perusteellinen ymmärtäminen sekä niiden keinojen hallinta, joilla voidaan muuttaa eri lämmönsiirtotapojen suhteellista osuutta kussakin tapauksessa ja näin vaikuttaa ko. laitteen lämpökäyttäytymiseen ohjaamalla sitä haluttuun suuntaan. On aina hyvä tiedostaa, että suurin virhelähde lämpösuunnittelussa, kuten missä tahansa mallinnuksessa tai analyysissä, on sen suorittaja huolimatta siitä, kuinka edistyneistä tekniikkaa on käytössä. Paraskin ohjelmisto toimii vain korkeintaan sillä tarkkuudella kuin sen annetaan toimia!

#### 4.6 FYSIKAALISET LÄHTÖTIEDOT

Lämpömallin luomiseksi tarvitaan suuri joukko perustietoja,

- analysoitavan kohteen mekaaninen rakenne
- materiaalien ja komponenttien lämpötekniset ominaisuudet
- käytetyt tai aiotut pintakäsittelyt

- ympäristöolosuhteita kuvaavat tiedot
- systeemin teho ja sisäinen tehojakauma
- ikääntymisen mukanaan tuomat vaikutukset.

Tästä perustietojen joukosta luodaan analysoitavien ääritapausten (myös mahdollisen tyypillisimmän tapauksen), kuten kuumimman ja kylmimmän tapauksen parametrijoukot annetun tehtäväasetuksen mukaisesti.

#### 4.7 MALLINNUKSEN PERIAATTEITA

##### **Perustavoitteena luotettavuuden parantaminen (viileä laite)**

Useat elektroniikkalaitteen vikaantumisen syyt liittyvät laitteen lämpenemiseen (kuva 4 sivulla 21). Lämpömallinnus auttaa löytämään keinoja, joiden avulla ko. laitteen terminen käyttäytyminen pysyy annetuissa rajoissa spesifioitujen ympäristöparametrien ääriarvoillakin ilman, että tarvitaan kallista prototyyppien valmistamista ja testaamista. Lämpömallin suunnittelun ja toteutuksen yhtenä lähtökohtia tulee olla sen käyttäminen vastausten hakemiseen niihin rakennetta ja elektronisia komponentteja koskeviin lämpökäyttäytymisen kysymyksiin, jotka laitteen suunnittelijoita eniten kiinnostavat.

##### **Mallinnuksen tavoitteiden täsmentäminen**

Määritettäessä lämpömallinnukselle asetettavia tavoitteita ja tehtäviä on pidettävä mielessä, miksi ao. tehtävään on ryhdytty. Tämä on tärkeää sekä omana työnä tehtäessä että tilattaessa mallinnus alihankintana. Nämä tavoitteet on dokumentoitava yksityiskohtaisesti, jotta mallinnuksen suunnittelu lähtisi alusta alkaen oikeille urille. Myöhemmät mahdollisesti toistuvat tavoitteiden muutokset voivat vaikuttaa olennaisesti koko mallinnustehtävän luonteeseen ja vaativat helposti huomattavasti lisätyötä, mikä kasvattaa kustannuksia.

Esimerkiksi, jos laitteen toiminnan kannalta tärkeintä on pitää jonkun tietyn mikroprosessorin pintalämpötila annetun rajan alapuolella, on malli rakennettava siten, että sen suurin tarkkuus on juuri tällä alueella ja niissä lämmönsiirtotavoissa, jotka eniten vaikuttavat juuri tähän kohteeseen. Tällöin on kuitenkin huolehdittava systeemin kokonais-tarkkuudesta niin, että mallin luotettavuus kaikilla tasoilla on vaadittavaa tasoa. Erilaiset kiinnostuksen kohteet muovaavat luotavaa mallia omiin suuntiinsa.

##### **Herkkyysanalyysi**

Kuten jo aiemmin on todettu, samaa rakennetta (mallia) analysoidaan annetuissa ääriolosuhteissa muuttamalla tehotasoja, ympäristöreunaehdoja ja ra-

kenteen lämpötekniisiä ominaisuuksia. Kaikki analysoitavat tapaukset on dokumentoitava hyvin, jotta voidaan päätellä, mitkä muutokset mallissa aiheuttivat minkäkinlaisia muutoksia sen lämpökäyttäytymisessä.

Hienosäädettäessä mallia mittaustuloksia vastaavaksi kannattaa muutokset rajoittaa selkeästi vain yhteen tai kahteen parametriin, jotta eri parametrien muutosten vaikutukset aiheuttajineen tulisivat selkeästi esille.

Yksi usein käytetty ja tärkeä suunnittelukriteeri lämpötekniisesti hyvälle rakenteelle on sen epäherkkyys yksittäisten lämpöparametrien muutoksille. Hyvä käytäntö on ottaa tavaksi suorittaa lämpömallille **herkkyysanalyysi**, jossa muunneltavien parametrien arvoja muutetaan yksi kerrallaan ja lämpötilojen muutokset kohdealueilla kirjataan ylös. Näin saadaan selville analysoitavan systeemin stabiilisuus ja voidaan määrittää myös malliparametrien virheistä johtuva tulosten epätarkkuus, jolloin mallin luotettavuus paranee. Saatavien tulosten epätarkkuus pienenee analyysin edetessä ja se on hyvälle mallille aluksi noin  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  ja tarkentuu projektin lopussa ehkä arvoon  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

### **Testien hyväksikäyttö**

Lämpömallia laadittaessa on usein käytössä vain oletuksia ja taulukkotietoa rakenteessa esiintyvien lämpötekniisten rajapintojen käyttäytymiselle. Erityisesti ongelmia tuottavat erilaiset liitospinnat, joiden läpi lämpövirrat kulkevat. Tällaisten pintojen lämmönsiirtokertoimet vaihtelevat hyvinkin suurella alueella (100...5000 W/m<sup>2</sup>K) riippuen liitostyypistä ja mahdollisesti käytetyistä lämmönjohtavuutta parantavista väliaineista. Vasta rakenteelle tehty lämpötestit (vrt. luku 6) voivat antaa tarkan kuvan siitä, kuinka lämpövirrat rakenteessa todellisuudessa virtaavat ja mitkä ovat liitosten yli olevien lämmönsiirtokertoimien todelliset arvot.

Näitä arvoja käyttämällä tehdään lämpömallin lopullinen säätäminen vastaamaan todellista tilannetta. Tilanne on optimaalinen, mikäli testi on voitu tehdä useassa erilaisessa muuttuvien ympäristöparametrien tapauksessa (erilaiset ympäristön lämpötilat, laitteen tehotason vaihtelu, rakenteen erilaiset asennot, jne.), jotka on kuitenkin myös ko. mallilla ratkaistu. Näin saadaan karsittua satunnaisilmiöitä ja tuodaan helposti esiin selvät poikkeamat laitteen ja mallin lämpökäyttäytymisessä sekä todennäköiset syyt näihin eroihin.

Verrattaessa lämpömallia ja testien antamia tuloksia on oltava sekä varovainen että huolellinen, sillä usein testaustilanne ei aivan tarkkaan vastaa mallin liityntäparametreja ympäristöön. Tällaisissa tapauksissa on testaustilanteen ja siinä vallinneiden parametrien huolellisen kartoittamisen

jälkeen muutettava analysoitavan systeemin lämpömallia siten, että se saadaan kuvaamaan testaustilannetta. Mittaustulosten ja tämän ns. testausmallin antamia tuloksia vertaamalla (Huom. Ei siis verrata alkuperäistä mallia ja mittaustuloksia keskenään.) tehdään korjaukset testausmalliin. Kun se saadaan toimimaan halutulla tavalla, siirretään siinä tehdyt korjaukset varsinaiseen malliin ja suoritetaan tapauskohtaiset analyysit uudelleen. Virheiden ja turhan uudelleensuunnittelun välttämiseksi testaussuunnitelma on laadittava huolellisesti ja dokumentoitava yhdessä saatujen mittaustulosten kanssa. Testaussuunnitelmaan valittujen mittauspisteiden on oltava mahdollisimman hyvin siirrettävissä lämpömalliin.

## 4.8 LÄMPÖRAJAPINNAT

### **Lämmönsiirtomekanismien käyttö**

Lämmönsiirron tehokkuus ja laatu riippuvat erittäin voimakkaasti lämpöteknisten rajapintojen ominaisuuksista. Mallin verifiointiprosessissa yksi tärkeimmistä tehtävistä on tarkistaa käytetyt lämmönsiirtomekanismit (konvektio, säteily ja johtuminen) kultakin rajapinnalta sekä niiden suhteelliset osuudet kokonaislämpötehon hävittämisessä. Esim. voidaan tarkistaa, ovatko oletukset, jotka on tehty konvektion ja säteilylämmönsiirron merkityksestä tietyille pinnalle, paikkansapitäviä ja voidaanko yleensäkin käyttää säteilylämmönsiirtoa mallitettaessa niitä termo-optisten parametrien arvoja, jotka saadaan eri lähteistä, vai täytyykö niitä muuttaa vaikkapa ko. pinnan mutkikkaan rakenteen (jota ei ole tarkasti mallinnettu) huomioon ottamiseksi.

Lämpötekniset rajapinnat voidaan jakaa kahteen luokkaan, sisäisiin ja ulkoisiin rajapintoihin. Ulkoisilta rajapinnoilta lämpö siirtyy ympäristöön (ja kääntäen), joten näiden pintojen ominaisuudet ja niillä tapahtuvat lämmönsiirtoilmiöt määräävät keskimääräisen lämpötilaeron laitteen ja ympäristön välillä. Sisäiset rajapinnat määrittävät lämmönsiirtopolut laitteen sisällä. Suuret lämpötilaerot laitteen sisäisessä lämpötilajakaumassa voivat olla merkki huonosti suunnitelluista sisäisistä lämmönsiirtopoluista.

### **Ulkoiset rajapinnat**

Verifiointiprosessissa lämpösuunnittelija tarkistaa, mitkä ulkoisista lämpöteknisistä rajapinnoista on otettu mukaan malliin, mitkä ovat niillä käytetyt lämmönsiirtomekanismit ja kuinka ne on mallinnettu. On myös kyettävä arvioimaan näiden pintojen lämmönsiirtokyky ja verrattava sitä saatuihin mittaustuloksiin. Yksi tärkeä tutkimuskohde on ulkoisten ympäristöpara-

metrien muutosten vaikutusten tutkiminen näillä rajapinnoilla. Näihin muutoksiin kuuluvat mm. korroosion, lian kertymisen, säteilyn ja yksinkertaisesti ikääntymisen mukanaan tuomat muutokset rajapintojen lämpötekniisiin ominaisuuksiin yhdessä muiden ympäristön muutoksien kanssa.

On erittäin tärkeää huomata, että tässä tarkoitettu määritelmä ulkoisesta lämpöteknisestä rajapinnasta ei välttämättä (mitenkään) viittaa ko. pinnan fyysiseen sijaintiin suhteessa ympäristöön.

Esimerkiksi tuuletetussa laitekaapissa kaikki ne kaapin sisällä olevat pinnat, jotka konvektion avulla poistavat lämpöä ympäristöön, ovat määritelmän mukaisesti ulkoisia rajapintoja. Samanaikaisesti tällaiset pinnat ovat myös sisäisiä rajapintoja tasatessaan lämpötilaeroja kaapin sisällä säteilylämmönsiirron ja myös konvektion avulla.

### **Sisäiset rajapinnat**

Sisäiset rajapinnat ohjaavat laitteen sisäisiä lämpövirtoja tasaten lämpötilaeroja. Lopulta nämä virrat siirtyvät ulkoisten rajapintojen kautta ympäristöön. Kuten ulkoiset rajapinnat, on myös sisäisten rajapintojen käyttäytyminen ja ”määrä” mallissa tarkastettava. Moninkertaisten lämpöä johtavien liitosten huomioon ottaminen, mallintaminen ja niiden käyttäytymisen määrittäminen tekevät verifointitehtävästä (samoin kuin itse mallintamisesta) erittäin vaativan. Näissä mittaustulosten oikea tulkinta korostuu.

Pahimmassa tapauksessa huonostikin tehdyllä rajapintojen määrittelyllä saadaan aikaan ”oikea” lämpötilajakauma, vaikka käytetyt lämmönsiirtopolut ovat täysin virheelliset. Tosin yleensä näin saadaan toimiva malli vain yhdessä yksittäisessä tapauksessa (yksissä olosuhteissa), ks. edellä useamman tapauksen (kohta 4.2) sovituksen merkitys. Tällaisen mallin hyväksyminen johtaa suurella todennäköisyydellä halutusta poikkeavaan lämpökäyttäytymiseen toisenlaisessa tilanteessa ja pahimmassa tapauksessa jopa laitteen tuhoutumiseen.

Hyvä sisäisten lämpötekniisten rajapintojen tuntemus onkin erityisen tärkeää luotaessa toimivaa ja luotettavaa lämpömallia. Tällainen taitotieto syntyy kokemuksen ja koulutuksen kautta, hyvin suoritettujen ja dokumentoitujen mittausten avulla sekä hyödyntämällä uusimpia eri lähteistä saatavia lämpötekniisiä parametriarvoja. Hyvä dokumentaatio ja tiedon levittäminen ovatkin ensiarvoisen tärkeitä hyvälaatuisen mallinnuksen aikaansaamiseksi.

Kun laitteen tehojakauma on tasainen ja sen sisäiset lämmönsiirtopolut on hyvin suunniteltu, saadaan aikaan laite, jonka lämpötilajakauma on hyvin tasainen. Tällaisessa tilanteessa onkin helppoa keskittyä lämmön siirtämi-

seen laitteesta ympäristöön, jolloin suuremmat tehotiheydet ja suurempi valikoima yhä kireämpiä ulkoisia lämpöolosuhteita ovat ”tavoitettavissa” samalla rakenteella, jolloin saavutetaan kustannussäästöjä ja markkinointietua niihin kilpailijoihin nähden, jotka joutuvat tarjoamaan uuden tuotteen jokaiseen sovelluskohteeseen.

Esimerkkinä sisäisten lämmönsiirtopolkujen paremmasta hyödyntämisestä on pelkästään parantaa komponenttilevyjen kiinnitystä kortti-kehikkoon ja sen kiinnitystä telineeseen. Näiden toimenpiteiden avulla voidaan kohtuullisen yksinkertaisin keinoin saada aikaan huomattava tehotiheyden kasvu komponenttilevyllä ilman, että sen lämpötila nousee huomattavasti.



## 5 KOMPONENTTITASON VERIFIOINTI

### 5.1 KOMPONENTIT LÄMPÖSUUNNITTELUSSA

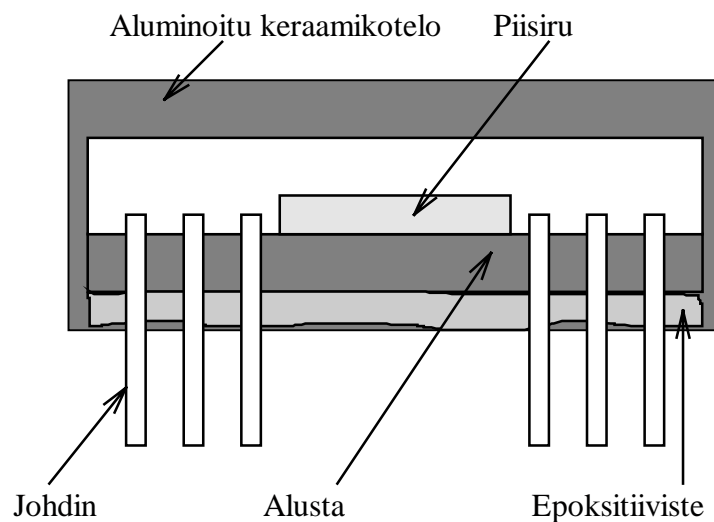
Komponenttien lämpötilojen hallinta on välttämätöntä niissä tapahtuvien vikamekanismien vaikutusten rajoittamiseksi. Nämä vikamekanismit johtuvat lämpötilasta ja lämpötehosta aiheutuvien ominaisuuksien muutosten ja erilaisten materiaalien ja materiaalirajapintojen käyttäytymisestä ei-toivotulla tavalla. Tyypillisesti esim. kaikki mikropiirin sähköiset ominaisuudet ovat enemmän tai vähemmän lämpötilasta riippuvaisia. Vastaavasti erilaiset materiaaleissa ajan myötä tapahtuvat suhteellisen hitaat ei-toivotut muutokset, kuten puolijohteissa epäpuhtauksien vaeltamiset pn-rajapinnoissa sekä liitosten ja eristeiden rappeutuminen kiihtyvät lämpötilan noustessa. Erityisen ongelmallisia ovat erilaisten materiaalien kuten piin, metallien ja muovien välisten rajapintojen käyttäytyminen, joissa yleensä ensimmäisinä tapahtuu vikaantumisia. Usein ongelmien syynä ovat liian erilaiset lämpölaajenemiskertoimet materiaaleissa niin komponentin sisällä kuin niiden ulkopuolella laitetasollakin (kuva 6). Vastaavasti korkea ilman suhteellinen kosteus (> 50 % RH) ja kosteuden tiivistyminen pinnoille kiihdyttävät metallien korroosiota ja toisaalta huonontavat johdinten välistä sähköistä eristystä, koska eristemateriaalit kostuessaan johtavat paremmin sähköä. Näihin voidaan vaikuttaa komponentti-, yksikkö- ja laitetason lämpösuunnittelulla.

Kun elektroniikkaa suunnitellaan toimivaksi yhä pienempään tilavuuteen ja yhä suuremmilla tehoilla, korostuu komponenttien tarkan lämpökäyttämisen tuntemisen tarve. On yhä tärkeämpää mallintaa komponentti tarkemmin kuin tyypillisesti käytetyt yleistyksiset piirilevytason (komponenttilevyn) keskimääräisestä tehojakaumasta ja siitä johdetut komponenttilevyn ja komponentin lämpötilat. Yksittäisten komponenttien mallintaminen ja mittaaminen sekä tätä kautta suoritettava piirilevyn rakenteen ja sen komponenttien sijoittelun optimointi on käytännössä vaikea ja monimutkainen tehtävä, usein se voi olla jopa mahdotonta.

Elektroniikan komponenttien lämpökäyttämisen verifioiminen nykyi-kaisten mallinnustyökalujen avulla on periaatteessa helppoa, paljon helpompaa kuin niiden onnistunut ja tarkoituksenmukainen mittaaminen, mutta sitä ei useinkaan suoriteta tarkasti, vaikka tarvetta tällaiselle toiminnalle olisi.

Lämpömallinnuksen vaikeuksien syyt ovat kaksitahoiset: Komponenttien sisäisestä rakenteesta ei ole saatavilla tarkkoja tietoja eikä myöskään raken-

teessa käytetyistä materiaaleista, jolloin syvälle eri materiaalikerrosten keskelle upotettu piipala, se osa komponenttia, jonka lämpötilasta ollaan kiinnostuneita, ei käyttäydykään todellisuudessa siten kuin malli kertoo. Tämä voi olla ratkaisevaa, kun koko systeemi on viritetty toimimaan lämpötila-alueensa äärirajoilla. Keskiarvoisen rakenne- ja materiaalitiedon käyttäminen voi näissä tapauksissa olla vaarallista, sillä esim. VTT:n mitauksissa on havaittu jopa viidentoista asteen lämpötilaeroja mikropiiriin aktiivisessa kerroksessa verrattuna mallin antamiin tuloksiin.



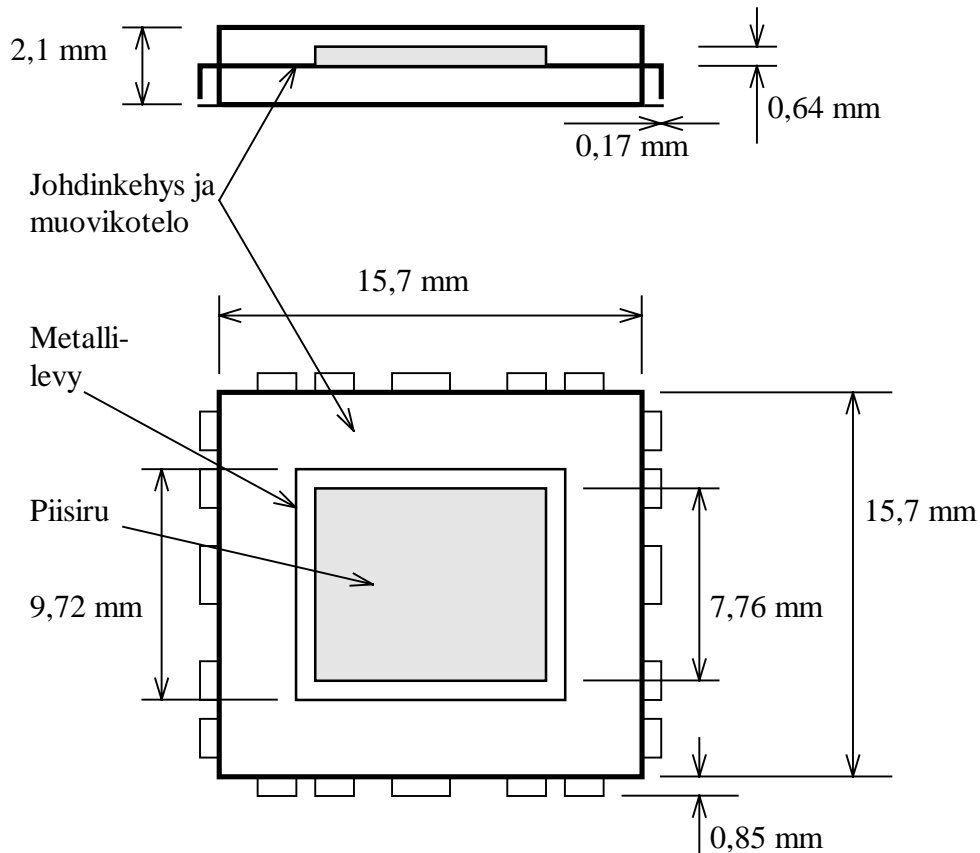
Kuva 6. Poikkileikkaus metallisoidusta keraamikotelosta piisiruineen /5.1/.

## 5.2 KOMPONENTTIEN MALLINTAMINEN

Komponentteja voidaan mallintaa nykyaikaisilla työkaluilla tarkasti, kunhan tunnetaan niiden rakenne ja niissä käytetyt materiaalit. Usein tämä tieto on salaista tai muuten lämpösuunnittelijan ulottumattomissa. Useista komponenteista voidaan kuitenkin hankkia kaavakuvamainen esitys niiden rakenteesta sekä yleinen kuvaus niissä käytettävistä materiaaleista (kuvat 6 ja 7). Materiaalien lämmönjohtavuustietoa yleisellä tasolla löytyy kirjallisuudesta. Kunnollisiin suunnittelutuloksiin voi päästä vain yhteistyössä komponentin valmistajan kanssa.

Näiden tietojen avulla voidaan rakentaa komponentin matemaattinen malli. Tällaisen erittäin tarkan mallin liittäminen osaksi laajempaa systeemitason mallia ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista eikä usein mahdollistakaan. Yksityiskohtaisen mallin tarkoitus on olla ko. komponentin lämpöteknisen käyttäytymisen referenssimalli, johon verrataan laajoissa laitetason malleissa käytettävää huomattavasti yksinkertaisempaa mallia. Yksityiskohtai-

sen mallin toimivuus on kuitenkin tarkastettava hyvin hallituissa koeolosuhteissa mittausten avulla.



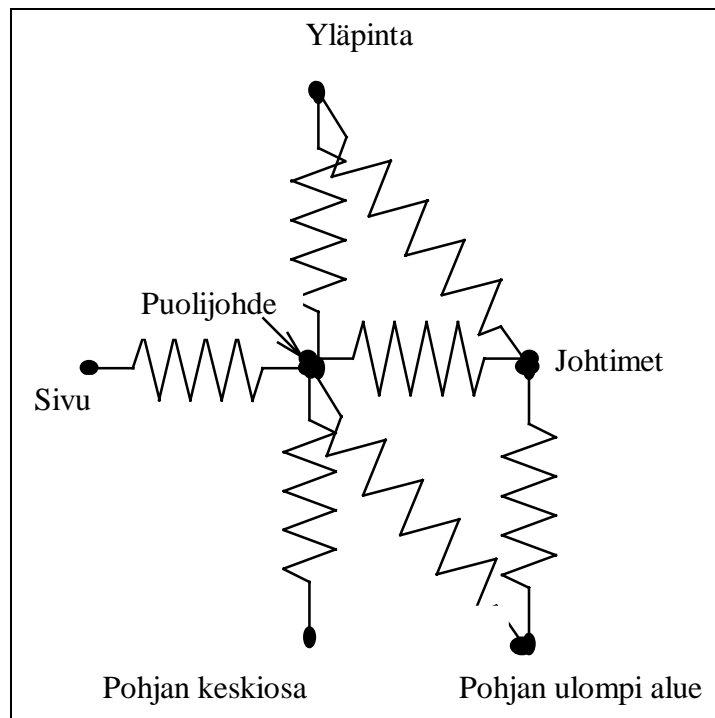
*Kuva 7. Esimerkki komponentin yksinkertaistetusta pakkausgeometriasta eräässä yksityiskohtaisessa komponenttimallissa. Johtimet on kuvattu viitteenä ryhmänä kullakin sivulla. Kotelo PQFP on neliömäinen. /5.2/.*

Yksinkertaistettuja malleja on myös useaa eri tyyppiä riippuen siitä, millaisessa mallinnusympäristössä (ohjelmistossa) niitä on tarkoitus käyttää. Eurooppalainen yhteistyöprojekti DELPHI (Development of Libraries of Physical models for an Integrated design environment) /5.3/ on esimerkki toiminnasta, jossa lämpösuunnittelun vastuuta on yritetty rajata komponentin toimittajan ja loppukäyttäjän kesken. Projektin tavoitteena on ollut

1. Luoda standardimittausmenetelmä komponentin eri osien lämmönjohtavuuksien ja niiden välisten suhteiden selvittämiseksi.
2. Määrittää lämpösuunnittelussa/mallinnuksessa tarvittavat suureet.
3. Luoda mittausten ja yksityiskohtaisen mallintamisen avulla pohja näiden suureiden käytölle.

4. Kehittää maksimissaan noin seitsemän solmupisteen lämpöresistanssimalli kullekin komponenttityypille. Tämän mallin komponenttivalmistaja toimittaa komponentin mukana ja sen tulee toimia riittävällä tarkkuudella (ero <10 % annetuista lukuarvoista) kaikilla arvioituilla, ennakkoon asetetuilla reunaehtoalueilla.

Vaikka DELPHI-projektissa tavoiteltu yksinkertaistettu vastusmalli ei olekaan yhteensopiva kaikkien mallinnusohjelmistojen kanssa, on tarkemman ja paremman lämpöparametritiedon yhtenäinen ja kattava esitysformaatti erittäin hyvä tavoite, jonka on syytä toivoa tulevan yleiseen käyttöön.



Kuva 8. CDIP-kotelon vastusmalli /5.4, Fig 1b/. (CDIP = Ceramic Dual Inline Package).

Jos mallinnustyökalu antaa mahdollisuuden käyttää komponenteista rakenteen mukaista (ulkoisilta mitoiltaan), mutta muutoin yksinkertaistettua mallia, joka kuitenkin on tarkkuudeltaan parempi kuin yksinkertaistettu solmumalli, saadaan yksittäisten komponenttien lämpökäyttäytymisestä luotettava kuva ilman mallin kohtuutonta kasvamista ja laskenta-aikojen pitenemistä. Nämäkin mallit edellyttävät kohtuullisen hyvää komponentin rakenteen tuntemista sekä hyvää tietämystä käytetyistä materiaaleista.

Komponentin rakenteissa käytettävien puolijohdemateriaalien, keraamien, muovien ja metallien lämmönjohtavuudet ja ominaislämpökapasiteetit ovat kuitenkin melko hyvin saatavilla olevaa tietoa (Taulukossa 1 on kuvan 7

materiaalitiedot.), eivätkä näiden eri ryhmien sisällä olevien materiaalien parametrit vaihtelee niin paljon, etteikö hyvään ja luotettavaan analyysitulokseen päästäisi, vaikka mallinnuksessa käytetäänkin rakenteen yksinkertaistettua mallia ja käytetyille materiaaleille niiden tiedettyä tai keskiarvoistettua parametriarvoa. Kyseisten tietojen laatu ei kuitenkaan aina ole ajantasalla, jonka vuoksi suunnittelijan on tarkistettava tietoja eri lähteistä ja omien kokemustensa perusteella.

*Taulukko 1. Tyypillisiä mikropiirin mallintamisessa (Kuva 7) käytettäviä parametreja /5.2/.*

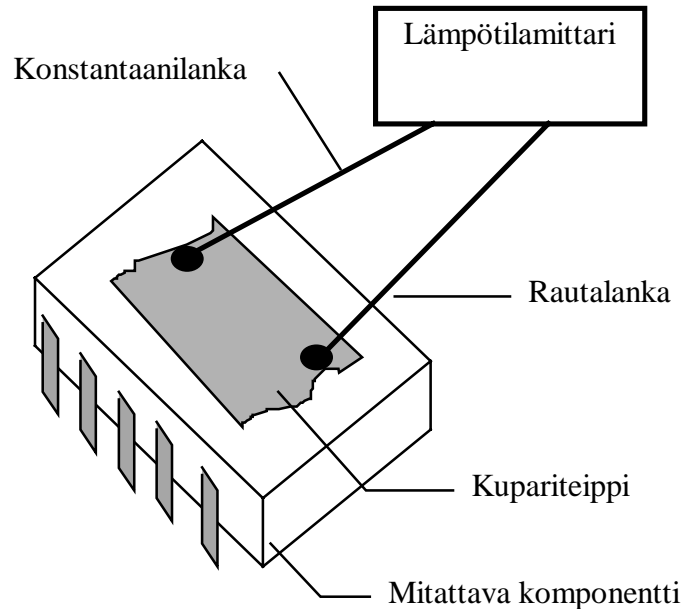
<b>Materiaali</b>	<b>Lämmönjohtavuus</b> [W/Km]	<b>Ominaispaino</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Ominaislämpökapasiteetti</b> [kJ/kg*K]	<b>Dynaaminen viskositeetti</b> [kg*m/s]	<b>Emissiivisyys</b>
<b>Ilma</b>	0,0263	1,1614	1007	1,846*10 <sup>-5</sup>	
<b>FR-4</b>	2,0	1900	930	10 <sup>10</sup>	0,9
<b>Metallilevy</b>	260,0	8780	385	10 <sup>10</sup>	
<b>Kotelomuovi</b>	0,8	1206	1000	10 <sup>10</sup>	0,9
<b>Johdinkehys</b>	138,5	5750	631	10 <sup>10</sup>	
<b>Piisiru</b>	148,0	2330	712	10 <sup>10</sup>	
<b>Vaahtomuovi</b>	0,03	70	1000	10 <sup>10</sup>	0,9
<b>Koko kotelo</b>	20,0	..	..	..	0,9
<b>Johtimet yht.</b>	8,5	..	..	..	

### 5.3 KOMPONENTTIEN MITTAUS JA MALLINNUS

Komponentin sisäisten lämmönsiirtopolkujen suhteet riippuvat huomattavasti sen kiinnitystavasta, mm. piirilevyn johdinkerrosten ja metallin määrästä, kotelomateriaalista ja mahdollisesta poikkeavasta pintakäsittelystä. Tällä on suuri vaikutus varsinkin kohtuullisen suuren pinta-alan omaavien komponenttien pintalämpötilojen jakautumaan.

Esim. puolijohdekomponentin pintalämpötilaa, joka on mitattu esim. termoparilla yhdestä ainoasta paikasta, ei voida suoraan käyttää komponentin aktiivisen osan lämpötilan määrittämiseen, koska pintalämpötila ei ole sama jokaisessa kohdassa. Koska puolijohdekomponenttien kotelorakenteet ovat tyypillisesti melko huonosti lämpöä johtavia, voidaan käyttää ns. kolmen johteen (Const - Cu - Fe) mittaumenetelmää. Siinä (kuva 9) komponentin pinnalle kiinnitetään esim. kupariteipin pala, jonka eri päihin on kiinnitetty konstantaani- ja rautajohdin kuvan 9 esittämällä tavalla. Hyvin lämpöä joh-

tava kupariteippi tasaa kahden mittauspisteen välisen lämpötilaeron, jolloin saadaan riittävän hyvä kuva keskimääräisestä lämpötilasta ko. pinnalla.



*Kuva 9. Kupariteipin käyttö keskiarvoistamaan mitattavan kohteen pintalämpötilaa.*

Tällä tiedolla ei kuitenkaan yksinään ole mitään merkitystä, kun halutaan tietää, mikä on aktiivisen osan lämpötila ko. tapauksessa. On myös kyettävä määrittämään, mikä osa komponentista siirtyvästä hukatehosta kulkee tässä tilanteessa ko. pinnan kautta. Tämä taas vaatii saadun mittaustiedon sovittamista matemaattiseen malliin, joka kuvaa komponentin sisäistä lämpökäytäytymistä.

Kokonaisvaltaisempi ja mallinnuksen kanssa helpommin sovittettavissa oleva pintalämpötilan mittaussuunnitelma on lämpöherkän nestekidemaalinn käyttäminen [5.5]. Tämä helppokäyttöinen ja lämmönsiirtopolkua häiritsemätön mittaussuunnitelma antaa tarkan kuvan vallitsevasta lämpötilajakaumasta. Tässä suunnitelmässä ongelmana on kuitenkin se, kuinka valaista ja kuvata usein erittäin hankalassa paikassa oleva kohde. Tämä ongelma on kuitenkin ratkaistavissa käyttämällä erityisesti rakennettuja läpinäkyvistä seinistä koostuvia katselupolkua tai käyttämällä endoskooppikameraa.

## LUVUN 5 LÄHTEET

- 5.1. Claassen, A. & Shaukatullah, H. Comparison of diodes and resistors for measuring chip temperature during thermal characterization of electronic packages using thermal test chips.  
Thirteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Austin, TX, USA, 1997. s. 198 - 209.
- 5.2. Adams, V.H., Blackburn, D.L., Joshi, Y. & Berning D.W. Issues in validating package compact thermal models for natural convection cooled electronic systems.  
Thirteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Austin, TX, USA, 1997. s. 10 - 23.
- 5.3. Rosten, H.I. et al. Final report to SEMITHERM XIII on the European-funded project DELPHI - the Development of libraries and physical models for an integrated design environment.  
Thirteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Austin, TX, USA, 1997. s. 73 - 91.
- 5.4. Vinke, H. & Lasance, C.J.M. Recent achievements in the thermal characterization of electronic devices by means of boundary condition independent compact models.  
Thirteenth Annual IEEE Semiconductor-Thermal Measurement and Management Symposium, Austin, TX, USA, 1997. s. 32 - 39.
- 5.5. Azar, Kaveh. & Farina, Dino, J. Measuring chip temperatures with thermochromic liquid crystals.  
Electronics Cooling, vol. 3, no.1, January 1997. s. 16 - 20.

## 6 KOKEELLINEN VERIFIOINTI

### 6.1 MITTAUSTEN JA TESTIEN KÄYTTÖ VERIFIOINNISSA

Kokeellisella verifiointilla tarkoitetaan tässä kehitteillä olevan laitteen eri valmiusasteissa olevien prototyyppien testaamista ja mittaamista tarkoituksena selvittää, miten hyvin suunniteltava laite vastaa asetettuja lämpösuunnittelutavoitteita. Testaamisella tarkoitetaan sekä toiminnallisia käyttötöstejä että altistusta erilaisille sisäisille käyttökuormituksille ja ulkoisille ympäristöolosuhteille. Jotta kokeelliseen verifiointiin voisi luottaa, on siinä käytettävä kalibroituja mittaus- ja testauslaitteita, mitä myös kaikki laatujärjestelmät edellyttävät.

Esim. SFS-EN ISO 9000-1 (1994) Laadunhallinnan ja laadunvarmistuksen standardit. Osa 1: Valinta- ja käyttöohjeita.

*Kokeellinen verifiointi* on tekniikan nykyiselläkin tasolla (vuonna 1997) vielä välttämätöntä, koska materiaalien, komponenttien ja rakenteiden monimuotoisuudesta johtuvia lämpötekniisiä ominaisuuksia ei tunneta riittävän hyvin, jotta laitekokonaisuus voitaisiin hallita pelkästään analyyttisin keinoin. Mallinnus ja simuloinnit antavat kohtuullisen käyttökelpoista tietoa lämpöteknisistä ominaisuuksista etsittäessä kelpollisia vaihtoehtoja, mutta niiden varaan ei voida jättää fyysisen laitteen toimivuuden varmistamista.

Kokeellisen verifiointin toteuttamiseksi on testaus ja niihin liittyvät mittaukset suositeltavaa koota *testaus- ja mittausohjelmiksi*, joissa otetaan kantaa myös tulosten käsittelyyn ja analysointiin. Verifiointissa arvioidaan myös, miten hyvin ao. testit ja mittaukset palvelevat tuotekehityksen ja yrityksen laadunohjauksen tarpeita.

Testaukset ja mittaukset suunnitellaan tuotteen suunnitteluvaiheen mukaan seuraavasti:

1. alustavien *rakennemallien* lämpötekniinen testaus haettaessa oikeantyyppisiä lämpötekniisiä rakenneratkaisuja.
2. toimivien *prototyyppien* tutkiminen lopullisten ominaisuuksien selvittämiseksi ennen tuotantoa.
3. *kenttätiedon* hankinta tuotannosta käyttäjille menneiden laitteiden seurannan avulla (etämittaustekniikka, takuuajan huoltotiedot).

Nämä perustavoitteet on otettava huomioon verifiointiin liittyviä testejä ja mittauksia suunniteltaessa. Kenttätietojen kokoaminen on tarpeen kokemuksesta oppimisen toteuttamiseksi myös yrityksen lämpösuunnittelussa.



Testit ja mittaukset on suunniteltava tiiviissä yhteistyössä muiden osa-alueiden suunnittelijoiden kanssa (esim. mekaniikka-, EMC- ja sähkösuunnittelu). Testit on sidottava kuhunkin laitteen prototyyppiin ja valittava kulloisenkin prototyypin ominaisuuksien mukaisiksi. Tuotekehitykselle ominaisia tuotteen esiasteita (pahvi-, rakenne- ja lämpömalleja) testataan soveltuvien osien, jotta lämpösuunnittelua voitaisiin ohjata paremmin ja aina hankalaa ja aikaa vievää prototyyppien valmistusta voitaisiin rajata aivan välttämättömään.

Mittausten ja testien avulla tehtävä kokeellinen verifiointi kohdistuu teknisesti kahteen tärkeään osa-alueeseen:

- *lämpötekniisten ominaisuuksien* todentamiseen (lämpötilat, tehot, virtaukset) laitteen käyttöolosuhteita simuloivilla testeillä
- laitteen *toimivuuden ja luotettavuuden* varmistamiseen ja mahdollisten lämmöstä ja sen vaihteluista aiheutuvien vikamekanismien paljastamiseen laitteen käyttöolosuhteissa.

*Käyttöolosuhteilla* tarkoitetaan tässä niitä laitteen spesifikaation mukaisia ympäristöolosuhteita, joihin laite voi joutua elinjaksensa aikana käyttöpäikällä.

Käyttöolosuhteilla tarkoitetaan yleensä koko sitä olosuhtealuetta, jossa laite joutuu elinjaksensa aikana toimimaan, esim. ympäristön lämpötilan minimin ja maksimin välinen lämpötila-alue. Toimintaa tällä alueella simuloidaan testeissä, tyytyen usein vain testaamaan ääriolosuhteissa ja yhden olosuhteen vaikutusta kerrallaan. Eri seikkojen muutosten vaikutuksen tunnistamiseksi muutetaan yhtä olosuhdetta kerrallaan esim. ensin lämpötilaa ja sitten toimintatehoja.

Testeillä jäljitellään näitä olosuhteita pyrkien saamaan mahdollisimman nopeasti ja riittävällä varmuustasolla tarpeelliset tiedot tuotteen käyttäytymisestä. Laitteen vikaantumiseen johtavia lämmöstä aiheutuvia vikamekanismeja voivat olla erilaiset komponenttien ominaisuuksien muutokset yli rajojen ja katastrofiviat, rakenteiden lämpölaajenemisesta aiheutuvat toimilaitteiden viat jne.

*Laitteen mittaukset* testien yhteydessä kannattaa suunnitella monipuolisiksi siten, että laitteen käyttäytymisestä saadaan mahdollisimman paljon tietoa mahdollisimman vähin testein ja mittauksin. Kuitenkin on pidettävä huoli siitä, että laitteen toiminnallisista ja myös lämpöteknisistä ominaisuuksista saadaan seuraavanlaista tietoa testeissä ja että lämpösuunnittelusta saatavaa tietoa käytetään näiden molempien osa-alueiden hyväksi.

- *Toimiiko laite vai ei* ja vahingoittuuko se vai ei (go no go -tarkistus). Näitä tarkistuksia voidaan tehdä kaikissa testien vaiheissa, myös ääriolosuhteissa. Tarkistuksia ei pitäisi jättää vain näiden on - ei-tyyppisten tietojen varaan, koska komponenttien ja rakenteiden satunnaiset ominaisuudet voivat antaa joko liian hyvän tai huonon tuloksen. Tyytyminen vain näihin toimii - ei toimi -mittauksiin saattaa merkitä myös testausajan tuhlaamista, koska lisäämällä muutamia parametrimittauksia, jotka kuvaavat laitteen toimintaa, saadaan suhteellisen vähin vaivoin luotettavampaa ja eksaktia tietoa laitteen tärkeistä ominaisuuksista.
- Millaiset mitatut suoritusarvot laitteella on tietyissä olosuhteissa tai muutostilanteissa? Millaiset ovat lämpötilat, tehonsiirrot ja esim. ilman virtaukset tietyissä testausolosuhteissa? Kuinka lähellä ollaan tavoiteltuja arvoja? Missä ovat suurimmat riskit vikaantumiseen. Eri-laisten fysikaalisten parametrien mittaaminen mahdollistaa kokeellisen herkkyyksianalyysin tuotteelle testeissä käytettyjen olosuhteiden suhteen.

Laitteiden lämpötekniisiä ominaisuuksia ja luotettavuutta arvioitaessa käytetään mm. erilaisia lämpötestejä (tai säätestejä), jotka ovat staattisia tai dynaamisia tarkoituksella jäljitellä laitteen käyttöä. Lämpösuunnittelun yhteydessä on määriteltävä, millaisilla testeillä eri ominaisuuksia verifioidaan, joita vastaavat tilanteet on myös mallinnettava. Yksinkertaisinta on testata laitetta vakiolaboratorio-olosuhteissa, joissa laite kytketään päälle ja mitataan sen käyttäytymistä. Näin saadaan alustava ja usein riittäväkin kuva suunnittelun onnistuneisuudesta. Parempi kuva laitteen toimivuudesta saadaan kuitenkin mainituilla lämpötesteillä, joissa laite toimii vuorotellen eri ääriolosuhteissa, kylmässä, kuumassa ja normaaleissa laboratorio-olosuhteissa. Niiden avulla saadaan näkyviin myös dynaaminen käyttäytyminen, mikä vastaa esim. tavallista ulko-olosuhteiden vuorokausivaihtelua lämpörasituksen suhteen.

Oma lukunsa on tuotteen testaaminen *poikkeuksellisissa olosuhteissa*, joissa lämpövaihteluun on yhdistetty esim. voimakasta vesisadetta ja tuulta taikauringon paistamista vastaavat simuloinnit ulkoisissa olosuhteissa. Nämä tilanteet aiheuttavat laitteen ulkopintoihin nopeita ja suuria lämpötilan sekä lämmönsiirto-ominaisuuksien muutoksia, jotka olisi myös otettava huomioon lämpösuunnittelussa. Vastaava poikkeustilanne on esim. tuuletusaukkojen tukkeutuminen eliöiden, kasvien tai roskaantumisen vuoksi. Näihinkin on varauduttava lämpösuunnittelun yhteydessä.

Lämpösuunnittelun verifiointissa käytettävät testausolosuhteet ja testispesifikaatiot kannattaa suunnitella yhteistyössä laitteen ympäristövaatimuksista vastaavien henkilöiden kanssa, jolloin säästetään aikaa ja saadaan testit

sellaisiksi, että niiden tulokset kelpaavat myös laitteen ympäristösietoisuuden varmentamiseen.

Laitteiden *lämpö- ja ympäristötestaussuunnittelusta* on olemassa paljon julkaistua kirjallisuutta. Tässä yhteydessä mainittakoon vain seuraavat lähteet.

**IEC 68-2, Environmental testing, Part 2** (IEC International Electrotechnical Commission) Nämä standardit (useita kymmeniä) sisältävät tiedot kansainvälisesti sovitusta ympäristötestausmenetelmistä, joissa käytettävät rasisitustasot on valittu yhteensopiviksi erilaisiin ympäristöolosuhdeluokitteluihin.

Lämpösuunnitteluun liittyvät mm. testit IEC 68-2-1, Test Ab Cold, IEC 68-2-2, Test Bb Dry heat, IEC 68-2-14, Test Nb Change of temperature ja IEC 68-2-30, Test Db Damp heat cyclic.

**IEC 721 -sarjan ympäristöluokittelua** koskevat standardit kattavat kaikki maapallolla vallitsevat ympäristöolosuhteet. Luokittelu kattaa sekä kuljetusolosuhteet että laitteen käytön erilaisissa suojatuissa tai suojaamattomissa tiloissa tai ajoneuvoissa. Esimerkkejä näistä luokittelustandardeista ovat:

**IEC 721-1:** 1990, Classification of environmental conditions - Part 1: Environmental parameters and their severities  
Amendment 1 (1992)

**IEC 721-2-1:** 1982, Classification of environmental conditions - Part 2: Environmental conditions appearing in nature - Section 1: temperature and humidity  
Amendment 1 (1987)

**IEC 721-3-0:** 1984, Classification of environmental conditions - Part 3: Classification of environmental parameters and their severities - Section 0: Introduction  
Amendment 1 (1987)

**IEC 721-3-2:** 1985, Classification of environmental conditions - Part 3: Classification of **groups of environmental parameters and their severities; Transportation**

**IEC 721-3-4:** 1995, Classification of environmental conditions - Part 3: Classification of **groups of environmental parameters and their severities** - Section 4: **Stationary use at non-weatherprotected locations.**

**SFS-käsikirja 108**, Ympäristöluokitus ja -testaus. 1989. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 76 s. Sisältää tietoja ympäristöluokituksen ja ympäristötestauksen periaatteista. Se toimii myös hyvänä opastuksena ympäristöluokitusstandardeihin ja niiden soveltamiseen.

**SFS-käsikirja 92**, Ympäristötestien tiivistelmät. 1991. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 150 s.

Elektroniikan tutkimuksen ja kehityksen yhteistyöelin KOTEL ry (c/o VTT Automaatio, ProTechno) on julkaissut mm. seuraavat raportit elektroniikkalaitteiden testaamisesta:

**KOTEL 203** Ympäristötestauskäsikirja. Espoo 1989. 166 s. Tämä sisältää käytännön taustatietoa maapallolla vallitsevista ympäristöolosuhteista, ympäristöluokituksista ja ympäristötestausmenetelmistä sekä ohjeistusta testienn suunnitteluun.

**KOTEL 215** Ympäristötestauskäsikirja. II osa. Espoo 1994. 144 s. Tämä toinen osa sisältää kaavoja, taulukoita ja materiaalitietoja, joita tarvitaan elektroniikkalaitteen testaussuunnittelussa.

## 6.2 MITTAUKSET VERIFIOINNISSA

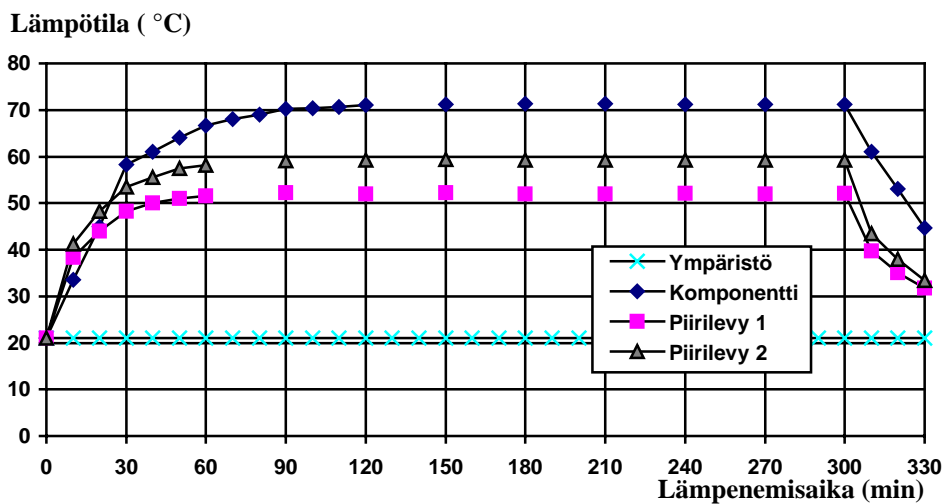
Elektroniikkalaitteiden kokeellisen verifioinnin avulla selvitetään laitteen terminen ja virtaustekninen käyttäytyminen. Kokeellisen verifioinnin tuloksena saadaan koesuunnitelman mukaiset mittaustulokset sekä esim. merkkisavun tai muiden visuaalisten menetelmien käyttöön perustuvien kokeiden tuloksena kuvia ja havainnoijan muistiinpanoja laitteen virtausteknisestä käyttäytymisestä. Mitattavia suureita ovat mm. pintalämpötilat, ilman lämpötila, ilman kosteus, ilman tilavuusvirta, nopeusjakaumat sekä paineet ja paine-erot. Materiaalien, komponenttien ja rakenneosien kohdalla kysymykseen tulevat myös perussuureiden johtuvuus-, konvektio- ja emissio-ominaisuuksien mittaukset. Näitä koskevien tietojen tulisi periaatteessa olla laitesuunnittelua tehtäessä valmiina, mutta laitesuunnittelu on myös uusien komponenttien (moduulien) suunnittelua ja käyttöönottoa, jonka vuoksi joudutaan paneutumaan myös näihin perusmittauksiin.

Kokeellisen tutkimuksen vaiheet ovat mittausten suunnittelu, mittausten toteutus, mittaustulosten käsittely, tulosten analysointi, raportointi ja mittaustulosten dokumentointi. Kokeellisen mittauksen suorittamisesta ja eri mittausmenetelmistä on julkaistu runsaasti kirjallisuutta (mm. /6.1/, /6.2/, /6.12...6.17/) ja yksittäisiä mittausmenetelmiä koskevia standardeja.

Kokeellista tutkimusta suunniteltaessa määritetään mittauskohteet ao. laitteissa ja mitattavat suureet sekä valitaan mittauslaitteisto. Laitteiston valintaan vaikuttavat taloudelliset resurssit sekä laitteiston fysikaaliset ja mittaus tekniset ominaisuudet ja soveltuvuus. Huomioon otettavia ominaisuuksia ovat suorituskyky; menetelmän tarkkuus, mittaustaajuus, mittauservojen lukemismahdollisuus mittaustapahtuman seuraamiseksi ja ohjaamiseksi sekä

mittaustietojen tallennusmenetelmä. Mittausanturien valinnassa on mittaustilanteista riippuen kiinnitettävä huomiota anturin tarkkuuteen, kokoon ja nopeuteen. Muita mittausjärjestelmän valintaan vaikuttavia näkökohtia ovat käyttökäytökunnan koulutustarve sekä laitteiden huollettavuus ja kalibrointavuus.

Mittausten luotettavuutta arvioitaessa ja mittausrvirheitä kartoitettaessa on otettava huomioon mm. mittausrvirhe, systemaattinen virhe, satunnaisvirhe, mittausrlaitteen tarkkuus ja mittausrlaitteen ajautuma [6.17]. Mittausrtuloksia esitettäessä arvioidaan eri virhelähteiden aiheuttamat virheet virherajojen avulla. Mittausrtulosten esitysmuoto on  $y \pm dy$ , missä  $y$  on mitatun suureen arvo ja  $dy$  on eri tekijöiden aiheuttama virhe saatuun mittausrtulokseen.



Kuva 10. Laitteen lämpeneminen mittauksia tehtäessä.

Kuvassa 10 on esimerkki laitteen normaalista lämpenemisestä. Mittauksia suunniteltaessa on otettava huomioon laitteen eri osien erilaiset aikavakiot, jotta mittaukset tehdään oikeina ajankohtina. Mittaukset tehdään helposti liian nopeasti varaamatta riittäviä tasaantumisaikoja. Kuvaan 10 on piirretty televisiosta mitattuja lämpötiloja. Jännitteet on kytketty päälle hetkellä 0 min. Kuumahkon kookkaan komponentin lämpeneminen jatkuu sen pinnasta mitaten vielä 120 min jännitteiden kytkennän jälkeen, kun piirilevyn lämpötila ao. komponentin läheisyydessäkin on vakiintunut jo 90 min kohdalla. Sama muutos näkyy alusta lukien 300 min kuluttua tehdyn jännitteiden katkaisemisen jälkeen. Tässä tapauksessa on siis odotettava ainakin 120 min ennen kuin laitteen staattisesta toiminnasta saadaan oikea kuva. Vastaavasti lämpövaihtelutesteissä, joissa nopean muutoksen jälkeen halutaan mitata myös toimintaa jossain vakio-tilassa, olisi varattava riittävät

tasaantumisaajat, jos halutaan varmistaa, että kaikki kohdat ovat saavuttaneet lopullisen lämpötilansa ko. tilanteessa.

Suunnittelun verifiointiin liittyvät mittaukset tulee edellä olevan mukaan ulottaa alkuvaiheen rakennemalleista (jopa pahvimalleista) lopulliseen tuotteeseen ja vielä mahdollisuuksien mukaan kentälle, josta tarvitaan palautetietoa todellisista käyttöolosuhteista. Rakenne- ja lämpömallit, jotka ovat yksinkertaistettuja toimivan laitteen malleja, verifioidaan sillä tark-

#### Mittausten verifiointinnissa tarkistetaan ainakin seuraavat seikat:

- Mittausohjelman olemassaolo
- Testausohjelman olemassaolo
- Tulosten käsittely ja dokumentointi (tulosten käyttökelpoisuuden arviointi, vertailu laskentatuloksiin)
- Kattavatko mittaukset ja testit kaikki rakennemallit ja kenttäolosuhteet?
- Mittausten sisällön määrittely (lämpötilat, pinnat, ilma, virtaus, teho, jne); mitä kannattaa mitata missäkin vaiheessa?
- Fyysisten mittauskohdeiden määrittely; vastaavatko ne myös lämpösuunnitelmaa ja mallia?
- Mittausajankohtien määrittely. Onko varmistettu riittävät ajat termisen tasapainon saavuttamiseen, onko eri osien erilaiset lämpöaikavakiot ja lämpökapasiteetit otettu huomioon transienteja tutkittaessa (esim. pitkän ketjun viimeisten komponenttien hitaampi reagointi)?
- Mittausolosuhteiden (testien) määrittely; onko ulkoiset häiriötekijät otettu huomioon, tehdäänkö mittauksia tai testejä käyttöolosuhteissa tai niitä vastaavissa testausolosuhteissa?
- Mittausmenetelmät ja niiden soveltuvuus ao. mittauksiin, tarkkuudet, välineet, suhde asetettuihin suunnittelumarginaaleihin
- Päätösmenettely havaintojen tulkinnassa
- Kenttämittaukset käyttöolosuhteissa
- Materiaalien, rajapintojen ja komponenttien mittaukset, mahdolliset tarpeet
- Kenttäpalautetiedon hyväksikäyttö, suunnittelukokemusten myötä tapahtuva mittausten karsiminen ja/tai sisällön muuttaminen, kun tuotteesta tehdään uusia versioita.

kuustasolla, mikä on tarkoituksenmukaista ao. vaiheessa. Nämä eri vaiheissa tehtävät mittaukset on sisällytettävä osaksi lämpösuunnittelua, jotta var-

mistettäisiin mahdollisuudet saada tietoa suunnittelussa käytettyjen kriteerien oletuksenmukaisuudesta.

Mittaussuunnitelmien ja tulosten dokumentointi on välttämätön osa tulosten hyödyntämistä. Esim. ennalta laadittujen tulosdokumenttien olemassaolo varmistaa haluttujen asioiden esiinoton mittauksissa ja vähentää tarvetta korjaaviin mittauksiin tai tulosten kertautuvaan käsittelyyn.

## 6.3 PINTALÄMPÖTILA

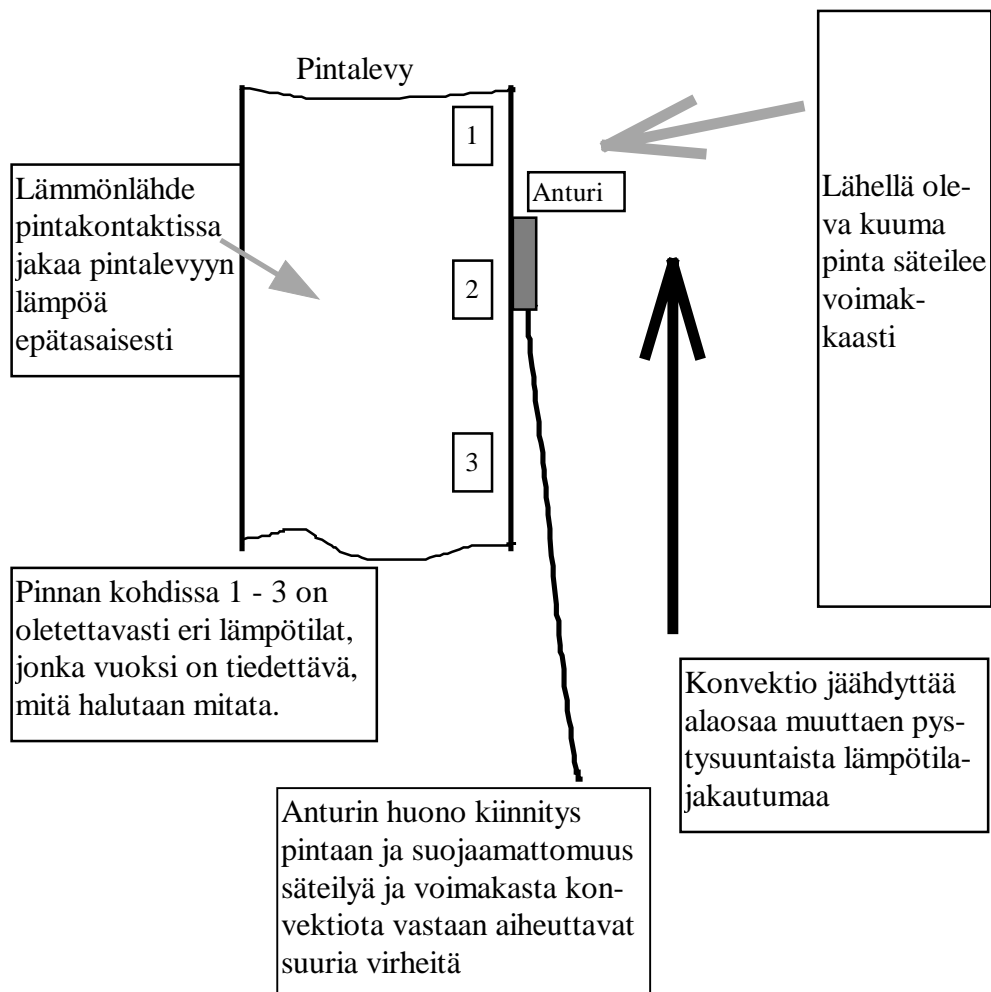
### 6.3.1 Verifiointikohteiden valinta

Pintalämpötilalla tarkoitetaan tässä jonkin mekaanisen osan pinnasta mitattavissa olevaa lämpötilaa. Mittausteknisesti pintalämpötila on käytetyn mittausmenetelmän antama lukuarvo, joka kuvaa joko yhtä pistettä mitattavalla pinnalla tai jonkinasteista likimääräisarvoa ko. pinnan lämpötilasta.

Kaikkiin mittausmenetelmiin liittyy niille tyypillisiä virhelähteitä, jotka täytyy ottaa huomioon. Kuvan 11 mukaisessa tilanteessa lähtökohtana on ettei käytettävä mittaustekniikka häiritse vallitsevia lämpöolosuhteita. Tässä tapauksessa esim. anturi ei saa muuttaa pinnan lämpötekniisiä ominaisuuksia. Jos anturi on iso, se voi aiheuttaa johtumisvirheitä, se voi toimia jäähdytysripana ja sen peittäminen kirkkaalla alumiiniteipillä voi vaikuttaa pinnan säteilyominaisuuksiin. Toisaalta mitattavan laitteen pintojen lämpötila vaihtelee rakenteellisten yksityiskohtien vuoksi, jonka vuoksi on tärkeää, että suunnitelmissa ja mittauksissa on osattu ennakoida nämä mittausepämääräisyyksiä aiheuttavat seikat.

Lämpösuunnittelussa käytetään usein karkeita komponentti- ja osamalleja, joiden tehot on yleensä arvioitu tai mitattu. Osan sisäinen rakenne on kuitenkin vain yksinkertainen kotelo, jolloin osan lämpötila on keskiarvo komponentin lämpötilasta. Tällöin menetetään tieto todellisista pintalämpötiloista etenkin suuremmissa komponenteissa eikä verifiointissa ole käytettävissä vertailukelpoisia mittauskohteita.

Verifiointin lähtökohtana on tarkistaa, miten pintojen lämpötilat ja mittauspaikat on määritelty lämpösuunnitelmassa ja ovatko ne mitattavissa olemassa olevilla menetelmillä halutulla tarkkuudella ja onko näitä vertailupisteitä käytetty mittauksissa, jolloin mittaustulosten ja suunnitelman vertailu on mahdollista. Jos lämpösuunnitelmassa ei ole määritelty mittauskohteita, tarkistetaan, voidaanko mittauksiin valittuja kohteita käyttää suunnitelmasta saatavien tietojen tarkastamiseen.



Kuva 11. Pintalämpötilan mittaaminen.

Tässä verifiointi jaetaan **laitteen ulkopinnan** ja **sisäosien** sekä **komponenttien pintalämpötilojen** mittausten arviointiin. Käytettävissä oleva mittausmenetelmävalikoima vaihtelee näiden kohteiden perusteella. Samalla on tarkistettava mittaustilanteessa vallitsevan ympäristön (tuuletus, erilaiset lämmönlähteet, aurinko) vaikutus tuloksiin ja se, vastaako mittaustilanne riittävän hyvin käyttöolosuhteita ja tunnetaanko ao. lähiympäristö riittävän hyvin.

Jos mittaukset tehdään esim. normaaleissa huoneen lämpötiloissa, on tarkistettava, paljonko käyttöolosuhteet poikkeavat huoneen lämpötilasta, ja korjattava tulokset vastaamaan käytönaikaisia ääriolosuhteita. Laboratoriooloissa, sääteisteissä ja kentällä saattaa olla vaikeuksia mitata ulkopintojen lämpötiloja aina samoista kohteista. Mittauksia vaikeuttavat kenttäolosuhteissa ulkoiset häiriöt, kuten vesisade, jäätyminen, aurinko, tuuli ja mekaaniset vauriot. Tämän vuoksi valittaessa pintamittauskohteita (suun-



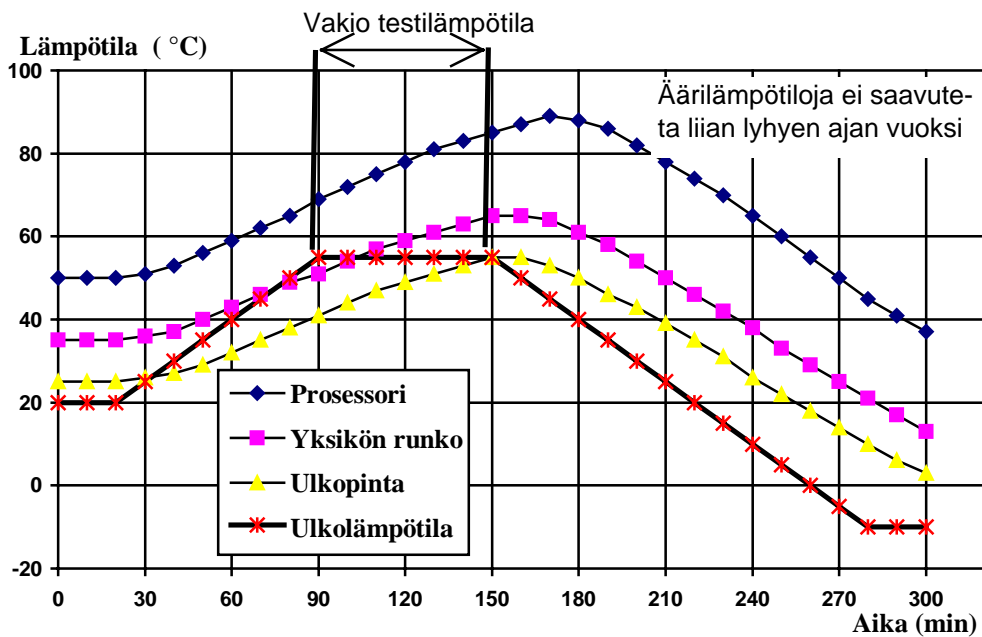
nittelijan ja testaajan valinnat) olisi harkittava antureita käytettäessä myös mahdollisuutta mitata lämpötiloja pintalevyjen sisäpinnoilta käsin, jolloin saadaan samat mittauskohteet kuin olisi järkevää käyttää testaus- ja kenttäolosuhteissa. Tämä palvelee myös kentällä mahdollisesti tapahtuvaa tiedonkeruuta ja sen käytettävyyttä.

### **6.3.2 Mittausajankohdan valinta**

Verifioinnissa tarkastetaan kaikkien pintalämpötilan mittauskohteiden yhteydessä, että valitut mittausajankohdat ja mittausten kestoajat on valittu siten, etteivät eri osien termiset aikavakiot (hitaudet) aiheuta virheitä mittaustuloksiin ja että käytettyjen antureiden aikavakiot ovat sopuinnossa mitattavien ilmiöiden nopeuden kanssa.

*Termisen tasapainotilan* mittauksessa on varmistettava, että laite on saavuttanut ko. tilanteessa loppulämpötilansa. Esim. mikrotietokoneen tai televisiovastaanottimen kokoisen laitteen lämpeneminen kestää vähintään tunnin ajan. Käytännössä etenkin käytettäessä luonnollista konvektiota voi mainittujen laitteiden lämpötilatasapainon saavuttaminen kestää kolmekin tuntia. Vastaavasti laitteessa saattaa olla kriittisiä komponentteja, jotka ovat pitkähkön lämmönsiirtoketjun päässä, jonka vuoksi ne reagoivat huomattavalla viiveellä tapahtuviin lämpötilan muutoksiin. *Ulkoisen lämpötilan muutosten* vaikutuksia tutkittaessa on selvitettävä eri mittauskohteiden (tai koko laitteen) termiset aikavakiot, jotta niille tulee varattua riittävä asettumisaika erityisesti ääriämpötiloja testattaessa.

Kuvassa 12 on esimerkki huonosti suunnitellusta laitetestistä. Kuvaan on piirretty muutamia tyypillisiä mittaustuloksia kehikon eri osista lämpövaihtelutestissä, kun laitetta mitataan vaihtuvassa ympäristölämpötilassa. Kuvan mukaan edes laitteen ulkopinnan lämpötila ei ole ennättänyt stabiloitua ko. testin ääriämpötiloissa riittävän hyvin puhumattakaan sisäosien ja prosessorin pintalämpötiloista. Jos testin tarkoituksena oli tässä mitata myös käyttäytyminen ääriämpötiloissa eikä pelkästään käyttäytymistä muutostilassa, oli tasaantumisaikat valittu liian lyhyiksi. Kuva 12 osoittaa myös kuinka tärkeää olisi mitata todellisia lämpötiloja testien yhteydessä laitteen sisäosista eikä tyytyä vain toiminnallisten (toimii - ei toimi) ominaisuuksien tarkistamiseen.



Kuva 12. Huonosti suunniteltu laitetesti.

### 6.3.3 Laitteen ulkopinnan lämpötila

Laitteen ulkopintojen lämpötilamittausten avulla voidaan tarkistaa soveltuvien osien laitteen lämpötekninen ergonomisuus (ei polttavan kuumia pintoja), jäähtymisen toimivuus ja osittain laitteen lämpötehon suuruusluokka. Myös ulkopintojen lämmönsiirto-ominaisuuksien tarkistuksessa tarvitaan pintalämpötilojen mittausta. Verifiointissa tarkistetaan, mitä tavoitteita ulkopintojen lämpötilojen spesifioinnille ja mittaamiselle on asetettu. Samoin tarkistetaan, mihin tarkoituksiin mittauspisteiden lämpötiloja käytetään.

#### *Ergonomisuus ja hukkalämmön hyväksikäyttö*

Ergonomisena suunnittelutavoitteena on pitää laitteen ulkopinnat niin viileinä kaikissa olosuhteissa, että käyttäjä ei kärsi pintojen koskettelusta tai laitteen pinta ei käy kertyvän pölyn vuoksi. Hukkalämpöä voi hyödyntää ulos kosteisiin olosuhteisiin suunnitellun laitteen ulkopinnan pitämiseksi esim. 3...5 °C ympäristöstä lämpimämpänä pinnan kuivaamiseksi korroosion vähentämistarkoituksessa.

Tällaisessa tilanteessa kannattaa käyttää infrapunamittausta tai lämpökameraa, jolla saa yleiskuvan koko ulkopinnasta. Tällöin on oltava melko hyvä tieto pintojen emissiokertoimista tai kokemusperäistä tietoa infrapunamittausten tekniikasta ja käytettävyydestä. Toisaalta mittaajan omien aistien käyttö tai helppokäyttöisten pintamittauslaitteiden käyttö saattaa riittää mittaukseen, jos ulkoiset olosuhteet vastaavat pahinta käyttötilannetta.

Tarkistetaan onko spesifioitu ne korkeimmat sallitut pintalämpötilat koh-teissa, joilla on vaikutusta ergonomiaan.

Mittaustarkkuudeksi riittää yleensä  $\pm 5$  °C, vaikka oikein käytettynä läm-pökameran tarkkuus on  $\pm 2$  °C ja erotuskyky alle  $\pm 0,5$  °C. Kuitenkin, jos ha-lutaan varmistaa vain muutaman asteen lämmön nousu, on käytettävä esim.  $\pm 0,5$  °C tarkkuutta, jonka saavuttaa yleensä vain kalibroidulla pinta-antu-rilla.

### *Jäähdytyksen toimivuus*

Ulkopintojen lämpötilat kuvastavat jossain määrin laitteen jäähdytyksen toi-mivuutta niin absoluuttisten arvojensa kuin paikkavaihtelunkin perusteella. Ulkopintojen lämpötilat eivät kuitenkaan anna riittävää kuvaa laitteen sisä-osien käyttäytymisestä, minkä vuoksi yksin ulkopintojen lämpötilan perus-teella ei voida varmistaa laitteen toimivuutta. Ulkopintojen lämpötiloja voi käyttää myös ajan myötä tapahtuvan laitteen lämpenemisen ja ulkoisten lämpötilavaihtelujen aiheuttamien vaikutusten seuraamiseen. Tosin hyvin eristetyt ulkopinnat seuraavat lähinnä ympäristönsä lämpötilaa. Lämpösuun-nitelmassa on ilmaistava, voidaanko ulkopintoja käyttää jäähdytyksen toimi-vuuden arviointiin ja mitkä ovat mittauspisteet.

Tarkoituksenmukaisimpia näiden ominaisuuksien eksaktiin mittaamiseen ovat lämpöanturit, joilla saa pisteittäin ajan funktiona seurattavia lämpötila-arvoja. Mittaustarkkuudeksi näissä tapauksissa riittää usein  $\pm 2$  °C.

### *Lämpötehon suuruusluokka*

Mikäli laitteen lämpötehosta halutaan luotettava kuva, jossa ovat mukana konvektion, emission ja johtuvuuden vaikutukset, on tunnettava paitsi elek-roniikan sähköinen häviöteho myös laitteen eri puolilla pintalämpötilat ja niiden muutokset. Kuitenkin voimakasta tuuletusta tai erillisiä jäähdyttämiä käytettäessä sekä pintojen ollessa hyvin lämpöeristetty laitteen ulkopintojen lämpötiloilla on heikko korrelaatio laitteen tehohäviöihin.

Laitteiden lämpötehomittauksissa on olennaista varmistaa, että mittaustilan-teessa myös ympäristön ilman virtaukset ja lämpötila sekä mitattavaan lait-teeseen suunnattujen pintojen lämpötilat tunnetaan riittävän kattavasti.

Tähän mittaukseen soveltuvat parhaiten pintalämpötila-anturit, esim. termo-parit, joiden avulla seurataan ajan funktiona haluttujen pisteiden lämpötiloja testien aikana. Mittaustarkkuudeksi näissä tapauksissa riittää usein  $\pm 2$  °C,

vaikka joissain tilanteissa tarvittaneen  $\pm 1$  °C tarkkuus, kun kokonaislämpeneminen on suhteellisen vähäistä.

#### *Ulkopinnan muotoilun ja materiaalin vaikutus lämpöominaisuuksiin*

Ulkopinnan mittauskohteita tarkistettaessa on otettava huomioon laitteen muoto, joka voi olla kaappi, kotelo tai pistoyksikkö. Ulkopinta on aina pinnanmuodoiltaan vaihteleva sen mukaan, millaiseen ympäristöön se on tarkoitettu. Ulkopinnoissa on myös aukkoja esim. tuuletusta varten. Pinnanmuotojen, aukkojen ja pintamateriaalin laadun vaikutus lämpötilaan ja sen tasaisuuteen on arvioitava mittauspisteitä valittaessa ja mittaustuloksia käytettäessä.

Mittauskohtien tulisi olla pinnan kannalta edustavia, ts. jos valittujen pisteiden lämpötilat edustavat esim. 90 %:a pinnasta, voidaan määräää pitää riittävänä. Yksinkertaisissa tapauksissa voidaan tyytyä muutaman tai yhden pisteen lämpötilamittaukseen, mutta monimutkaisemmilla pinnoilla, joilla on merkitystä ergonomian tai lämmönsiirron kannalta, on käytettävä useampia mittauspisteitä tai lämpökameraa koko pinnan kartoittamiseksi. Infrapuna-mittauksia käytettäessä on tunnettava pintojen emissiokertoimet kohtuullisella tarkkuudella ( $\pm 0,1$ ).

Myös lähiympäristöllä on oma vaikutuksensa pintalämpötilamittausten tuloksiin. Esim. hyvin kuumat tai kylmät lähietäisyydellä olevat pinnat saattavat aiheuttaa virheitä, samoin mittaustilanteessa liian voimakas ulkoinen ilmanvirtaus tai auringon säteily (ikkunasta tai ulkona) voi muuttaa tuloksia.

#### **6.3.4 Laitteen sisäosien pintalämpötilat**

Laitteen sisäosien pintojen lämpötilatietoja tarvitaan ensisijaisesti varmistamaan, että tehty lämpösuunnittelu on johtanut halutunlaiseen lämmönjakautumiseen laitteen sisällä ja että käytössä olevat lämmönsiirtomekanismit toimivat suunnitellulla tavalla. Verifioinnissa voidaan myös tutkia pintalämpötilojen avulla, onko kaikkia hyödyllisiä lämmönsiirtokeinoja käytetty järkevällä tavalla ko. laitteessa. Tämä näkyy siitä, jos esim. laitteen lähellä toisiaan olevien osien välillä on suuria lämpötilaeroja.

Perustavoitteena on yleensä varmistaa, että rakenteiden kuumimmat kohdat ovat spesifikaatioiden rajoissa. Mutta myös laitteen kylmimpien kohtien mittaaminen saattaa olla perusteltua sekä lämmönsiirron toimivuuden varmistamiseksi ja esim. ulkokäyttöisten laitteiden korroosioriskin tunnistamiseksi. Mittaustietoja tarvitaan yksiköistä, runkorakenteista, liittimien lämmönjohtavuudesta, komponenttilevyistä ja komponenttien pinnoilta.

Sisäosien mittauksen verifiointissa tarkistetaan aluksi suunnitelmaan sisältyvät sisäosien pintamittauskohteet ja niiden käyttötarkoitus sekä arvioidaan niiden käyttökelpoisuus ja virhemahdollisuudet suhteessa tehtyyn lämpösuunnitelmaan. Erityisesti tarkistetaan, onko valituilla mittauksilla mahdollista löytää eri rakennneosien väliset jyrkät lämpötilaerot, jotka mahdollisesti johtuvat huonosti toimivista rajapinnoista.

Tyypillinen suunnitteluvirhe on esim. komponenttilevyjen jättäminen kellumaan lämpötekniisesti, jolloin johtuvuusmekanismia ei hyödynnetä lämmön jakamisessa ympäristöön.

Esimerkkinä toisesta virheellisestä pintalämpötilojen suunnittelutavoitteesta tai virhesuunnittelusta on sisäosien jäädyttäminen mahdollisimman tehokkaasti välittämättä kylmimpien kohteiden käyttäytymisestä. Kun ulkoa otetaan laitteen sisälle ilmaa, se on yleensä kosteaa. Kun tällainen kostea ilma puhalletaan kohden laitteen sisäosia, lämpötilat pysyvät alhaisina tulo kohdassa, mutta myös kosteus pysyy korkeana (> 50 %), mikä aiheuttaa korroosiota. Jos tätä ilmaa joudutaan vielä jäädyttämään lämpimänä vuodenaikana, voi laitteeseen puhallettavan ilman kosteus nousta jopa yli 90 %:iin, mikä kiihdyttää oleellisesti korroosiota. Tämän välttämiseksi voidaan hyödyntää laitteen omaa hukkalämpöä, nostaa sisääntulokohtaan lämpötilaa ja välttää liikaa jäädyttämistä niissä kohdissa, joissa ilma syötetään laitteeseen. Tällaisissa tilanteissa tuloilma olisi myös kuivattava ennen sisäänpuhallusta.

#### *Käyttökelpoinen mittaustekniikka*

Mittaustekniisesti sisäosien pintalämpötilojen mittaus on jokseenkin hankalaa lukuisten mittauspisteiden takia, käytettiinpä mitä mittaustekniikkaa tahansa. Haluttaessa nopea yleiskuva sisäosien pintalämpötiloista, voidaan laite varustaa tilapäisesti lämpösäteilyä läpäisevällä muovikalvolla (esim. 6 µm mylar DuPont Co., infrapunavalon läpäisevyyspektri on tarkistettava /6.5/) säilyttäen virtausominaisuudet ja kuvata näin esiin saatavia osia lämpökameralla. Toinen mahdollisuus on avata toimiva laite lyhytaikaisesti ja ottaa siitä kuvausta varten esiin komponenttilevyjä tai yksiköitä. Näiden tulosten käyttökelpoisuuden parantamiseksi olisi hyvä merkitä kuvattavan kohteen pinnoille muutama vertailupiste, jotka ovat myös mahdollisessa lämpösuunnitelmassa ja mitata samanaikaisesti kamerakuvauksen kanssa näistä vertailupisteistä esim. termopariantureilla tarkemmat lämpötilat.

Kamerakuvausten avulla saadaan pintalämpötilat parhaimmillaan  $\pm 2$  °C tarkkuudella, mikäli laitteessa ei ole kovin kiiltäviä pintoja ja materiaalien emissiokertoimet ovat samaa suuruusluokkaa ja kuvausvirheet korjataan.

Ympäristöään selvästi kuumemmat pinnat aiheuttavat aina lähialueelle virheitä tällaisissa mittauksissa.

Luotettavampi kuva yksittäisten pisteiden lämpötiloista saadaan esim. termoparien avulla, joilla voidaan päästä alle  $\pm 1$  °C absoluuttisiin tarkkuuksiin. Näitä käytettäessä on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota antureiden hyvään kiinnitykseen pinnoille ja eristämiseen ympäristön vaikutuksilta, koska pinnat ovat yleensä hyvin lähellä toisiaan. Samoin on varottava anturijohtimien hyvän lämmönjohtavuuden aiheuttamia muutoksia mittauskohteen lämpötilaan. Rakenteissa voi olla jyrkkiä lämpötilamuutoksia, jotka olisi kartoitettava ennen antureiden lopullisen kiinnityspaikan valintaa, jottei paikkaepätarkkuus aiheuttaisi suuria virheitä. Vastaavia virheitä pintalämpötiloihin voi aiheuttaa puhaltimen aiheuttama voimakas konvektio tai säteily kuumalta pinnalta, ellei lämpöanturia suojata hyvin esim. alumiiniteipin avulla ulkoisia häiriöitä vastaan. Antureiden on oltava riittävän pieniä, jotta ne eivät häiritse mittauskohdetta ja ne olisi helpompi suojata ulkoisia häiriöitä vastaan.

#### *Lämmön jakautuminen ja siirtotiet rakenteissa*

Koska yleensä tavoitellaan lämmön jakamista melko tasaisesti ympäri laitetta, jolloin kuumimmat kohdat ovat mahdollisimman viileitä, on tässä verifiointin päätavoitteena varmistaa, että lämpötilajakautuma on suhteellisen tasainen niin komponenttilevyillä kuin runkorakenteissakin. Tässä yhteydessä tarkistetaan erityisesti, esiintyykö lähellä toisiaan olevien rakenneosien välillä suuria lämpötilaeroja, mikä osoittaisi lämmönsiirtoteillä olevan katkoksia.

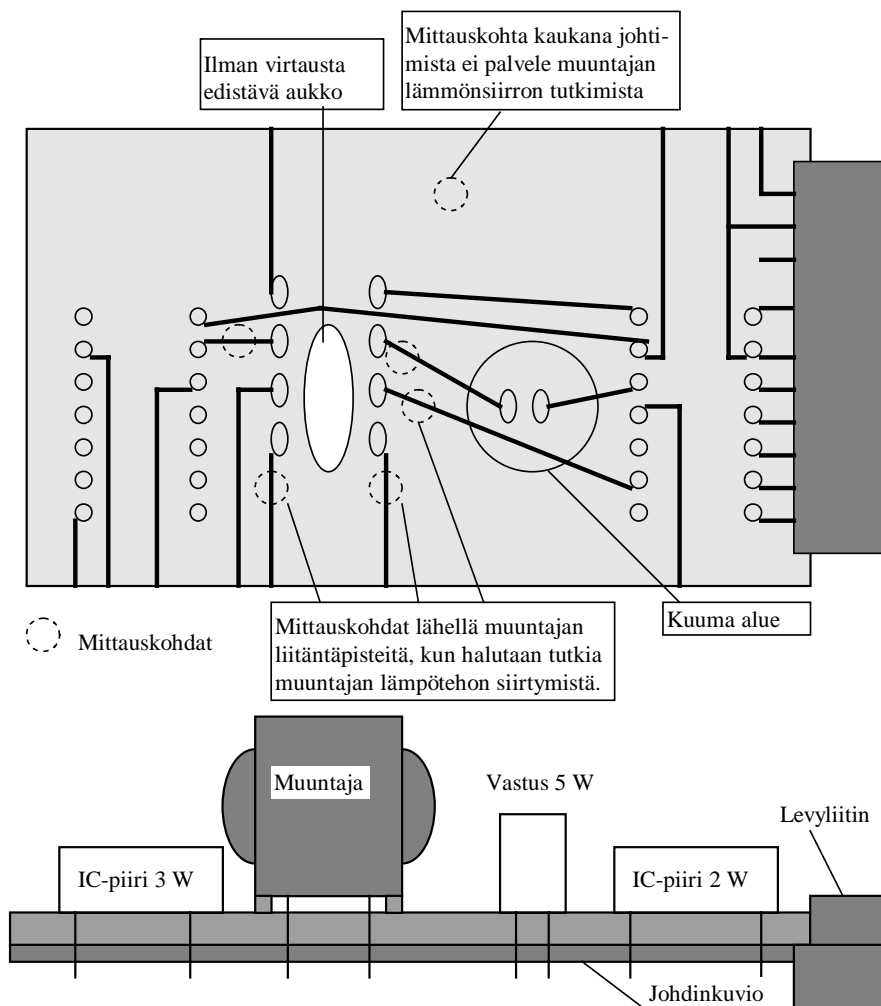
Verifiointin tarkistetaan kuumimmat ja kylmimmät alueet sekä varmistetaan eri kohteiden vastaavuus suunniteltuun lämpötilajakautumaan.

Lämmön jakautumisen tarkistamiseksi on pintalämpötilojen mittaukset ulotettava komponenttilevyiltä liittimien ja runkorakenteiden kautta mahdolliseen emolevyyn ja laitteen ulkoseinämien sisäpinnoille asti, jotta kaikkien käyttökelpoisten lämmönsiirtoteiden käyttö tulee varmistettua. Hyvä perussääntö on, että kaikki metallia sisältävät rakenteet, kuten metallirungot, liittimet ja kaapeliniiput, voivat toimia tehokkaina lämmön kulkuteinä komponenttilevyiltä ja yksiköistä ulospäin. Esim. emolevyn runsaan johdotuksen hyödyntäminen lämmön poistotienä on mahdollista, kun käytetään piirilevyjen reunoissa moninapaisia levyliittimiä, joiden metallijohtimet kuljettavat hyvin lämpöä. Vastaavasti heikommin lämpöä johtavat materiaalit, kuten useimmat muovit, heikentävät lämmönsiirtomahdollisuuksia.

### 6.3.5 Komponenttilevyn pintalämpötila

Komponenttilevyn, joka sisältää piirilevyn ja sille asennetut komponentit, pintalämpötilojen avulla verifioidaan levyllä olevien lämmönsiirtoteiden (johdotuskuvion) toimivuus. Varsinaisen piirilevyn pintalämpötila on kuitenkin käsitteellisesti melko epämääräinen ja sen absoluuttinen arvo on vähemmän tärkeä kuin levyllä olevien komponenttien lämpötila. Tärkeä verifiointikohde on kuitenkin komponenttien ja piirilevyn liitosten ja johdinten toimivuus lämmönsiirtoteinä.

Oheisessa kuvassa 13 tarkastellaan piirilevyn ja komponenttien liittymäkohtia tarkoituksella havainnollistaa mittauspisteiden oikean valinnan ja tulokinnan merkitystä. Kuvassa on lämpöä tuottava muuntaja, jonka häviötehosta noin neljäsos (yksi watti) johdetaan piirilevylle ja joitakin kuumana



Kuva 13. Lämpötilan mittausskohteita komponenttilevyllä.

käyviä komponentteja. Haluttaessa tietää esim. muuntajan näkemä piirilevyn lämpötila on tunnistettava lämmönsiirtotiet, joina tässä ovat lähinnä liitäntäjohtimet. Anturit on sijoitettava näihin liittymäkohtiin. Muuntajan rungon muovi ei johda paljoa lämpöä piirilevylle, mihin vaikuttaa myös se, että runkorakenteella on vain pieniä kosketuskohtia piirilevylle.

#### *Käyttökelpoinen mittaustekniikka*

Komponenttilevyn pintalämpötilojen mittaukseen soveltuvat samat tekniikat kuin laitteen sisäosien mittauksiin yleensä käytetyt menetelmät. Kuitenkin pienten mittasuhteiden ja lähekkäin olevien kuumien ja viileiden komponenttien vuoksi mittauskohtien valinta on erityisen tärkeää ja on varmistettava eri keinoin, että haettaessa varmistusta tietyn komponentin lämmönsiirtoteistä ei erehdyksessä mitata todellisen lämmönsiirtotien viereistä lämpötilaa. Virheitä (esim. 5...10 °C) syntyy helposti piirilevyn metallijohdinten ja eristealueiden lämmönjohtavuuksien suurten erojen vuoksi. Piirilevyltä voi esim. olla vaikeaa löytää riittävän väljää paikkaa, johon anturin saa luotettavasti kiinni, jolloin tulee suuri houkutus sijoittaa anturi sinne minne sen kiinni saa kohtuullisella vaivannäöllä. Termopariantureita, jotka pienen kokonsa vuoksi soveltuvat näihin mittauksiin, käytettäessä on varmistettava, että antureiden kiinnitystekniikka on riittävän luotettava. Löysä kontakti tai ilmatila anturin ja piirilevyn pinnan välillä aiheuttaa helposti 5...10 °C suuruusluokkaa olevia virheitä. Vastaavasti sähköisen eristyksen aikaansaamiseksi käytettävän teipin kiinnitys ja paksuus voivat häiritä mittauksia. Toimiva ratkaisu on esim. käyttää piirilevyn päällä kapton-teippiä, jonka päälle anturi sijoitetaan ja kiinnitetään liimaamalla sen päälle esim. alumiiniteipin pala. Verifioinnissa varmistetaan näiden mittausteknisten seikkojen kunnoissaolo.

### **6.3.6 Komponentin pintalämpötila**

Komponenttilevylle asennetun komponentin pintalämpötilaa tarvitaan arvioitaessa komponentin kriittisten sisäosien lämpötilaa. Pintalämpötilaa voidaan käyttää rajoitetusti myös lämmönsiirtyvyyden arviointiin komponentista piirilevylle ja ympäröivään ilmaan.

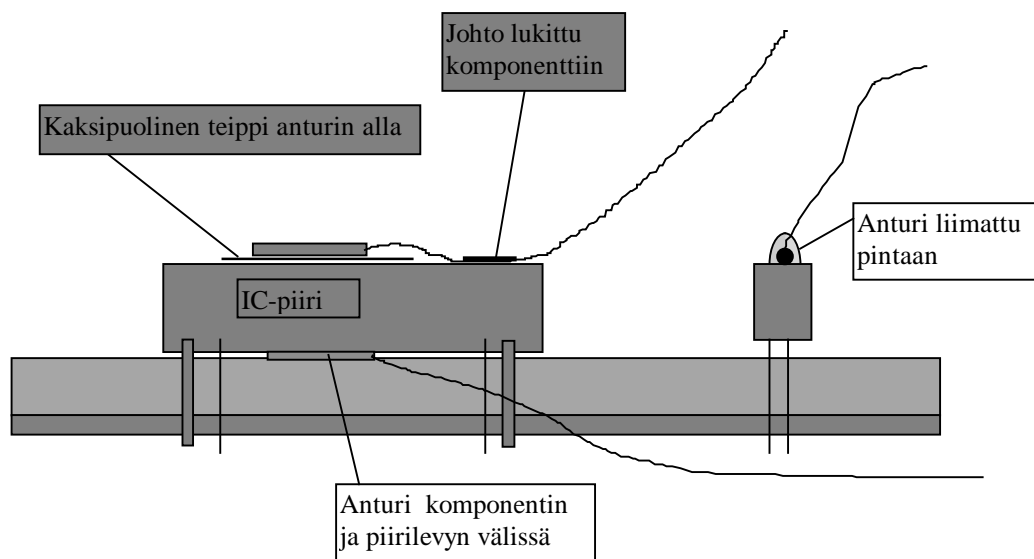
Sen mukaan, kuinka paljon on olemassa tietoa itse komponentin ominaisuuksista, kannattaa tutkia tarkemmin ainakin kriittisemmiksi tiedettyjen komponenttien pinnoilta saatavia lämpötiloja. Jos komponentin sisärakenteesta ei ole mitään tietoa, voi pintalämpötilan mittaus johtaa suuriin virheisiin komponentin sisälämpötilaa arvioitaessa. Jos lämpösuunnitelmassa on käytetty komponenttia kuvaamassa vain fyysisesti tietyn kokoista ja muotoista kappaletta, jonka lämmönjohtavuus on joka suuntaan vakio, ei esim. yläpinnan lämpötilalla ole välttämättä kovin hyvää korrelaatiota kom-



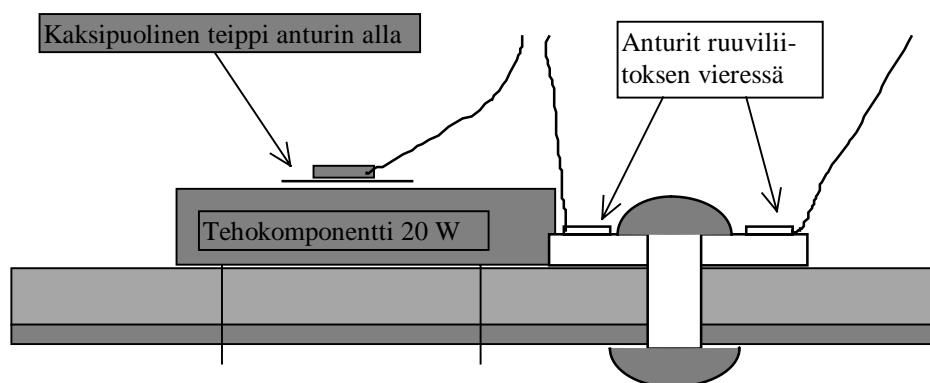
ponentin sisälämpötilaan, koska mahdollisesti johdinten kautta tapahtuva lämmönsiirto muuttaa lämpötilan jakautumista. (Katso luku 5 Komponentit.)

#### *Käyttökelpoinen mittaustekniikka*

Periaatteessa komponenttien pintalämpötiloja voidaan mitata samoilla tekniikoilla kuin komponenttilevyä. Kuitenkin komponenttien pieni pinta-ala ja epäsäännöllinen pinnanmuoto vaikeuttavat esim. antureiden käyttöä lämpötilan mittauksiin. Ääritilanteessa anturin massa voi olla liian suuri suhteessa komponenttiin. (Katso myös luku 5 Komponentit.)



*Kuva 14. Termopariantureiden kiinnitys erilaisiin komponentteihin.*



*Kuva 15. Termopariantureiden kiinnitys tehokomponenttiin.*

Kuvissa 14 ja 15 esitetään joitakin komponentin pintalämpötilan mittauskohteita. Komponentin päälle anturi voidaan kiinnittää ensisijaisesti liimamalla (Araldit), mutta myös teippikiinnitys on IC-piireillä mahdollinen. On

gelmana tässä on pieni tila ja mahdollisuus häiritä konvektiota ja emissiota komponentin pinnan kautta ulkoilmaan. Useampia mittauspisteitä voidaan saada käyttämällä hyvin ohuita anturijohtimia. IC-piirin ja piirilevyn välissä oleva anturi näyttää keskiarvoa komponentin alapinnan ja piirilevyn pinnan välillä aiheuttaen johdinkuvioista riippuen vaihtelevan suuruisia virheitä. (Katso myös luku 5.)

Lähes häiriöttömiä pintalämpötilan mittauksia voidaan tehdä maalaamalla komponenttien pinta TLC-pigmenteillä (lämpöherkkä nestekidemaali), jolloin mittaus tapahtuu pinnan värin perusteella. (TLC Thermochromic liquid crystals /6.3/ ja /6.4/)

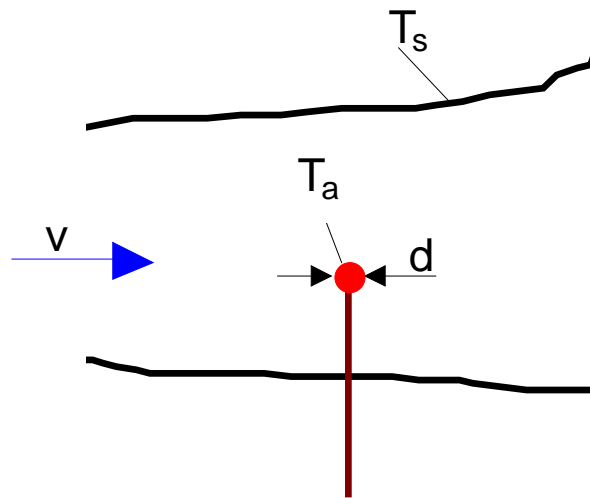
## 6.4 ILMAN LÄMPÖTILAN MITTAUS

Ilman lämpötilatietoa tarvitaan elektroniikkalaitteessa sen tehohäviöiden arvioimiseksi (tulo- ja lähtöilman lämpötilaero), ympäristön lämpötilan määrittämiseen sekä laitteen sisäosien lämpösuunnittelun onnistuneisuuden arviointiin.

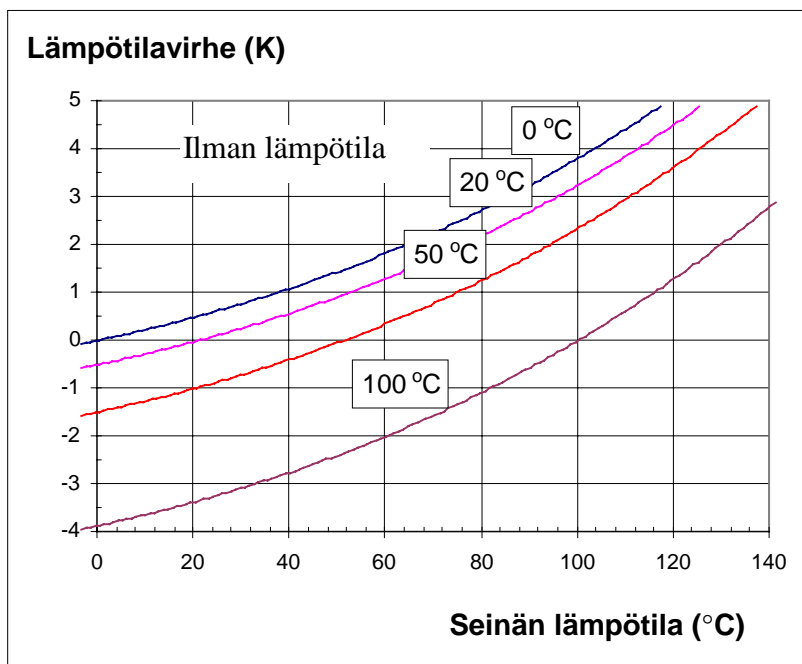
*Ilman lämpötila /6.6/ laitteen sisällä on vaikeasti määritettävä suure, koska jatkuvuustilassakin lämpötila on jokaisessa pisteessä erilainen johtuen mm. lämpöä tuottavien komponenttien energiapäästöistä. Lämpötilakenttä riippuu lähellä olevien osien lämpötehosta, geometriasta ja ilman virtausnopeudesta. Virtauskenttä riippuu monimutkaisella tavalla sekä komponenttien energiatuotosta että ilman virtauksen muodosta ja laajuudesta. Näistä seikoista johtuen myös ilman lämpötilojen mittaaminen elektroniikkalaitteen sisältä on hankala toimenpide. Ongelma on samantyyppinen kuin kuvassa 11, jonka mukaisessa tilanteessa ilman lämpötilan vaihtelu osien välissä eri paikoissa ja myös ajan suhteen vaihtelee koko ajan. Laitteen sisäosien ilman lämpötilaa ei tämän vuoksi käytännössä useinkaan mitata, vaan tyydytään helpommin hallittavaan pintojen lämpötilamittaukseen.*

Kun ilman lämpötilan mittausta tarvitaan, voidaan haluttu tieto saada kohtuullisella vaivannäöllä, kunhan noudatetaan muutamia peruseriaatteita virheiden välttämiseksi. Kuvassa 16 on termoparianturi tilassa, jonka seinämät ovat tässä tapauksessa tasalämpöiset  $T_s$  ja ilmavirran lämpötila on  $T_a$ . Jos seinämien lämpötila poikkeaa huomattavasti ilman lämpötilasta, voi seinämien säteilylämpö aiheuttaa huomattaviakin virheitä mittaustulokseen.

Käyttämällä riittävän pieniä antureita tämä ongelma voidaan eliminoida lähes täysin. Käytännössä seinämän lämpötila-alueella 0...140 °C ja ilman lämpötilan vaihdellessa samalla alueella saavutetaan pienempi kuin 0,5 °C virhe säteilylämmön vuoksi, jos käytetään halkaisijaltaan 50 µm termoparianturia. Jos anturin halkaisija on 1 mm, on vastaava virhe jopa 5 °C.



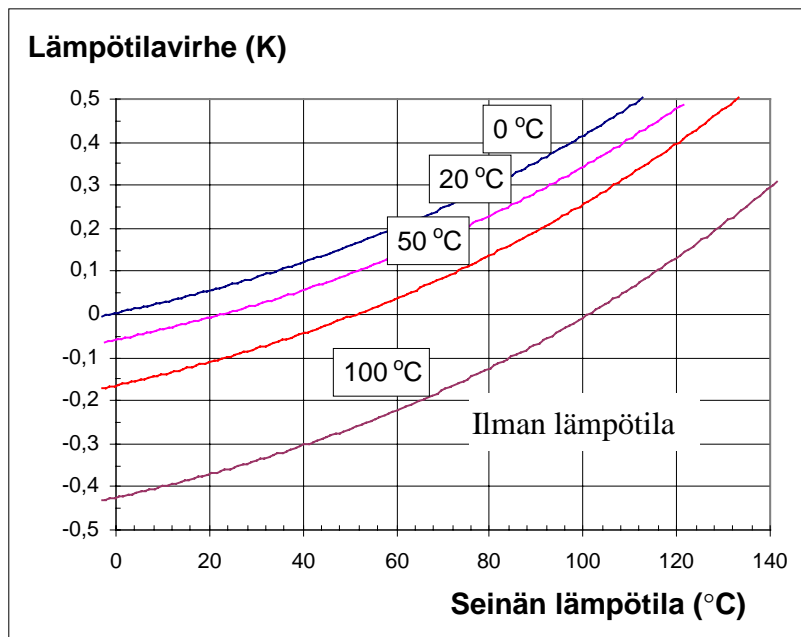
Kuva 16. Termoparianturi ilman lämpötilamittauksessa /6.6/.



Kuva 17. Kuuman pinnan aiheuttama virhe, termoparianturi  $\varnothing$  1 mm.

Kuvassa 17 /6.6/ on esitetty kuuman komponentin pintalämpötilan (seinämän) aiheuttama säteilyvirhe termoparin näyttämän pintalämpötilan funktiona, kun 1 mm läpimittainen anturi viedään mittauskenttään annetussa ilman lämpötilassa, joka on esitetty parametrina.

Kuvassa 18 on  $\varnothing$  50  $\mu$ m anturi. Käyttämällä näin ohuita antureita, voidaan ilman lämpötiloja mitata suhteellisen luotettavasti ahtaissakin paikoissa ja



Kuva 18. Kuuman pinnan aiheuttama virhe, termoparianturi  $\varnothing 50 \mu\text{m}$ .

lähellä eri pintoja ilman pelkoa säteilylämmön aiheuttamasta suuresta virheestä.

Ilman lämpötila voidaan mitata laitekotelossa periaatteessa usealla erilaisella anturityypillä, joista kaksi tärkeintä ovat erilaiset termoparit ja päästösuuntaan kytketty puolijohdediodi. Jälkimmäisiä on kaupallisesti saatavissa mikropiirinä puolijohde- tai mikropiirikotelossa. Niiden absoluuttinen tarkkuus on tyypillisesti 0,5 K ja herkkyys 1 mA/K, [6.7]. Nämä anturit eivät sovellu parhaiten laitekotelon ilman lämpötilan mittaamiseen, koska niiden koteloiden koko on vähintään muutamien millimetrin luokkaa. Siitä johtuen aikavakio on pitkä ja säteilykorjaus huomattava, kuten edellä on todettu.

Termopareja on eri tyyppisiä, mutta periaatteessa ne kaikki soveltuvat tässä vaadittaviin tehtäviin. Termoparien ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2. Kun mitataan suhteellisia lämpötiloja, termoparien tarkkuus on niin suuri, että voidaan käyttää valmistajan antamaa yleistä kalibrointikäyrää. Jos halutaan parantaa tarkkuutta, kannattaa tavallinen termopari kalibroida paikan päällä käytetyssä mittausspaikassa tai käyttää valmistajien yksilöllisesti kalibroimia termopareja.

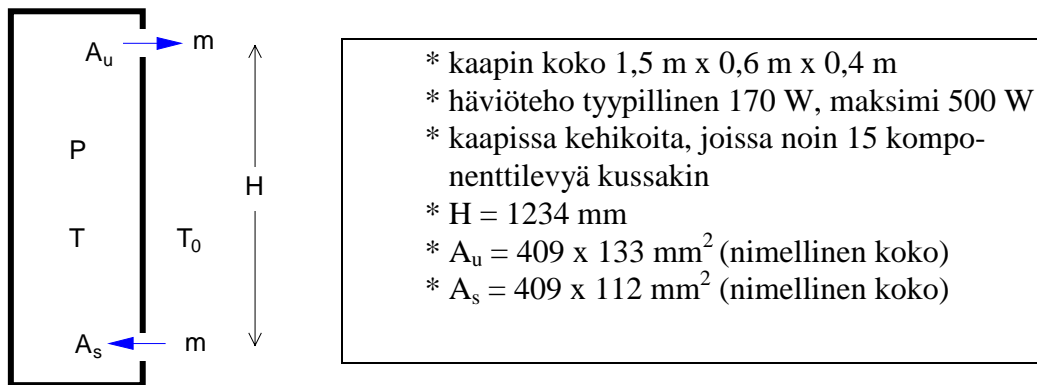
Taulukko 2. IEC 584-1:ssä määriteltujen termoparien ominaisuuksia /6.9/

Tyyppi	Materiaali	Mittausalue (°C)	Herkkyys (μV/K) (20 °C)
E	NiCr-CuNi	-40...+900	60
S	PtRh10%-Pt	0...+1600	60
T	Cu-CuNi	-200...+350	40
J	Fe-CuNi	-200...+750	51

CuNi = Konstantaani (CuNiMn)

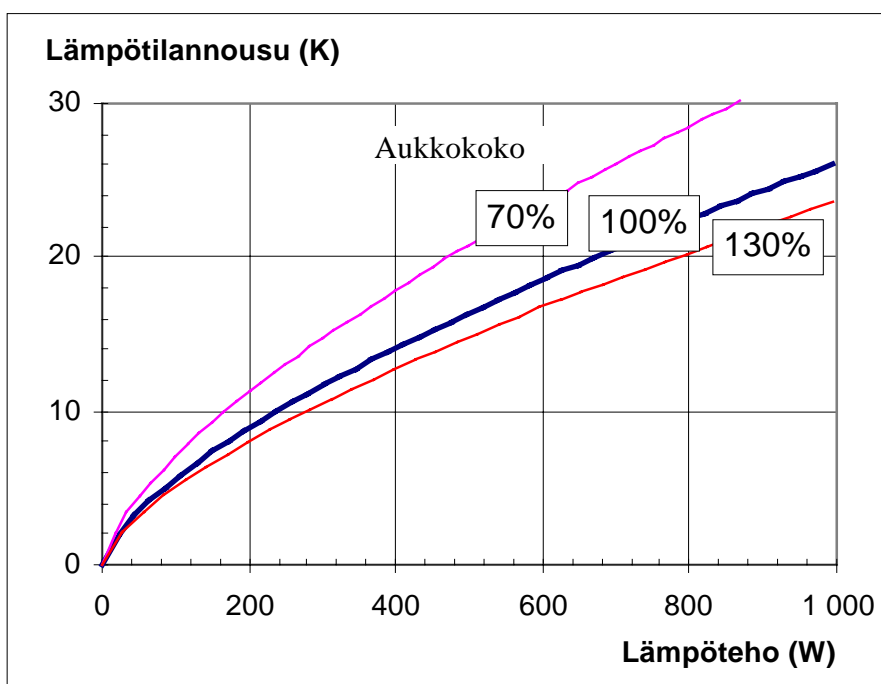
*Laitekaapin lämpötehon* mittaamisessa voidaan käyttää kuvattuja ilman lämpötilan mittaustekniikoita esim. seuraavassa vapaan konvektion tapauksessa (kuva 19). Kuvan 19 laitekotelossa on alhaalla tuloilma-aukko ja ylhäällä poistoaukko. Puhallinta ei ole, joten ilma vaihtuu vapaalla konvektiolla. Ilma virtaa kotelon läpi nosteen aiheuttaman paine-eron vaikutuksesta, jolloin virtausaukkoihin muodostuu virtausta ajavat painetasot. Virtausvastus kotelon sisällä on yleensä pienempi kuin aukoissa. Myös ilman virtaus sisällä on pienempää kuin aukoissa.

Ilman lämpötilasta laitteesta saadaan tyypillinen arvo mittaamalla lämpötilat tulo- ja poistoaukoista sekä määrittämällä virtauksen kokonaisarvo.

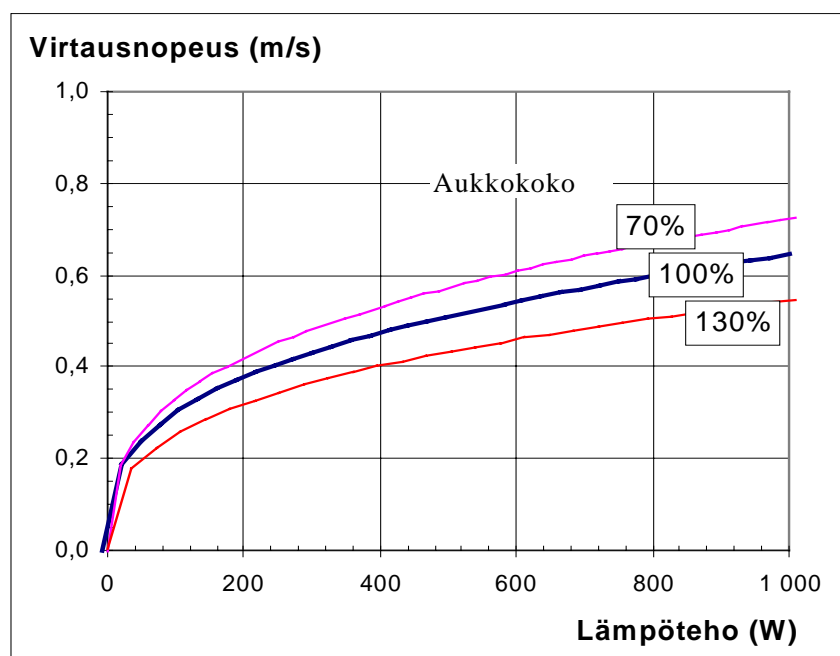


Kuva 19. Luonnollisen konvektion avulla tuuletettu laitekaappi.

Tällaisen kaapin (kuva 19) ilman lämpötilan nousulle  $\Delta T = T - T_0$  kaapin tehon funktiona /6.6/ ja /6.10/ voidaan johtaa kuvan 20 mukainen käyrästä kaapin poistoilman lämpötilan nousulle eri kokoisilla tuuletusaukoilla. Aukkojen nimellinen koko (merkitty kuvaan 19) on 100 %, josta aukkojen pinta-aloja on muutettu  $\pm 30$  %:a aukkokoon vaikutuksen havainnollistamiseksi.



Kuva 20. Poistoilman lämpötila kaapin tehon funktiona eri aukoilla, 100 % on aukkojen valittu nimelliskoko ja 70 % pienempi sekä 130 % suurempi aukkokoko.

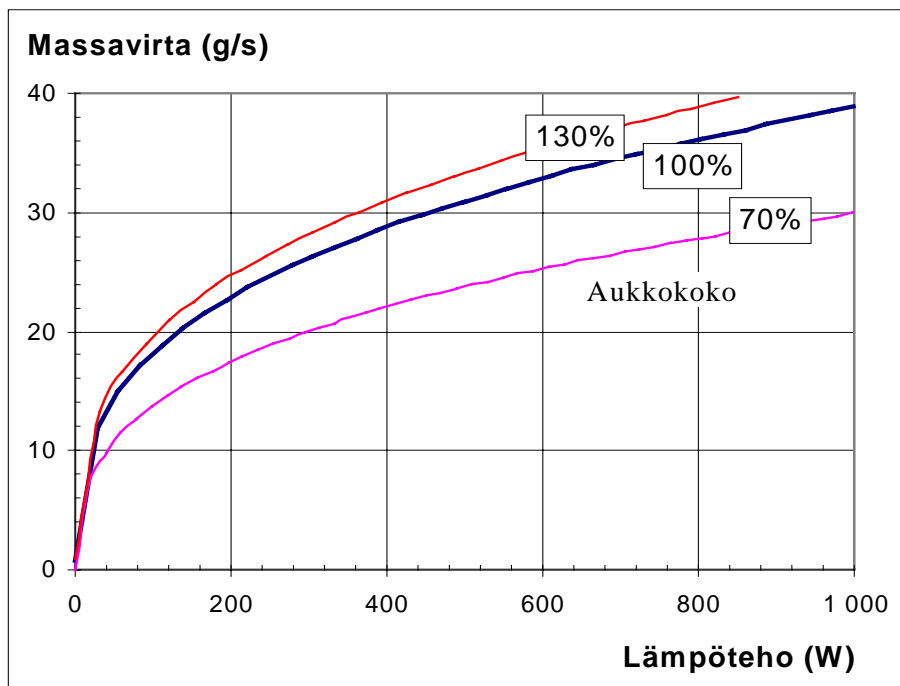


Kuva 21. Ilman virtausnopeus kaapin tehon funktiona alempaan tuuletusaukkoon eri aukoilla (70 %, 100 % ja 130 %).

Kuvan 20 käyrästä voidaan saada arvio laitekaapin tehosta, kun mitataan lämpötilaero edellä kuvatun mukaisesti tulo- ja poistoaukoista. Vastaavasti mittaamalla saadaan kuvasta 21 virtausnopeus eri tehoilla tai tehoarvio eri virtauksilla ja aukoilla.

Kuvassa 21 on puolestaan vastaava ilman virtausnopeus alempaan tuuletusaukkoon eri aukkomitoituksilla. Kuvassa 21 ilman virtausnopeudet on esitetty tehon funktiona. Nimellistehoalueella virtausnopeudet ovat 0,3 ... 0,5 m/s. Ne ovat niin pieniä, että niiden mittaus ei ole kovin helppoa.

Kyseinen käyrästä /6.6/ on laskettu olettaen kaappi sekoitusreaktoriksi, jonka sisälämpötila on vakio ja tässä tilanteessa sama kuin poistuvan ilman lämpötila. Tämä on melko ratkaiseva eikä aivan oikea oletus, mutta tulokset vastaavat käytännön kokemuksia.



Kuva 22. Massavirta kaapin aukoista lämpötehon funktiona eri aukoilla (70 %, 100 % ja 130 %).

Lämpöteho (P) kotelossa on

$$P = c\dot{m}\Delta T \quad \text{jossa} \quad \Delta T = T - T_0 \quad \text{ja ilman massavirta } \dot{m} \quad (1)$$

Kun aukkojen korkeus oletetaan pieneksi verrattuna kotelon korkeuteen H, voidaan paine-erolle kirjoittaa yhtälö

$$\Delta p_s + \rho g H + \Delta p_u = \rho_0 g H \quad (2)$$

Kun sovelletaan Bernollin lakia jäädytysilman kulkemaa virtausviivaa pitkin laitteen sisään ja ulos aukoista, voidaan johtaa laadullisessa muodossa yhtälö (6) suhteelliselle lämpötilan nousulle.

Massavirta  $\dot{m}$  tulo- ja lähtöaukoissa (kuva 22) riippuu aukkojen yli vaikuttavasta paine-erosta  $\Delta p_s$  tai  $\Delta p_u$  seuraavasti

$$\dot{m} = \rho_0 C_s A_s \sqrt{\frac{2\Delta p_s}{\rho_0}} \quad (3)$$

$$\dot{m} = \rho C_u A_u \sqrt{\frac{2\Delta p_u}{\rho}} \quad (4)$$

missä C:t ovat aukkojen virtauskertoimia ja A:t niiden pinta-aloja. Ilman tiheys ympäristössä ja kaapissa on vastaavasti  $\rho_0$  ja  $\rho$ . Ilman tiheyden voimme sitoa lämpötilaan T ihannekaasun tilanyhtälöllä, joka on tiheysmuotoon kirjoitettuna

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (5)$$

Suhteellinen lämpötilan nousu on tällöin

$$\frac{\Delta T}{T} = \left[ 1 + \left( \frac{C_u A_u}{C_s A_s} \right)^2 \right]^{1/3} \left( \frac{P}{c C_s A_s \rho_0 T_0 \sqrt{2gH}} \right)^{2/3} \quad (6)$$

Tämä kaava antaa ilman lämpötilan nousulle hieman liian korkean arvon, koska osa lämpötehosta kulkeutuu kotelon seinämien läpi, mitä tässä yksinkertaistetussa adiabaattisessa mallissa ei ole otettu huomioon. Samaan suuntaan vaikuttaa se, että kaapin sisäinen ilman virtausvastus on jätetty huomiotta. Virtausvastus on kuitenkin pieni suhteessa aukkojen omaan virtausvastukseen.

Lämpötilannousun  $\Delta T$  perusteella aukoissa kulkeva massavirta on

$$\dot{m} = \frac{P}{c\Delta T} \quad (7)$$

Keskimääräinen virtausnopeus alemman aukon sisäänvirtauksessa on

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho_0 A_s} \quad (8)$$

Viitteessä /6.10/ on tähän aiheeseen liittyvää kokeellista aineistoa.

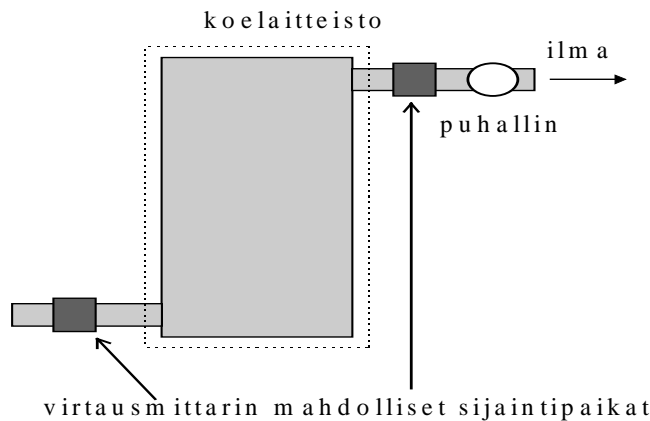


## 6.5 ILMAN VIRTAUSMITTAUS

### 6.5.1 Virtausmittauksen periaate

Ilman tilavuusvirta voidaan mitata ilmanakanavaan kiinteästi asennetun mitta-anturin tai kuristuselimen avulla tai määrittämällä paikallinen virtausnopeus kanavan poikkipinnassa virtaussondin tai anemometrin avulla.

Kiinteästi asennettavaa virtausmittausta voidaan käyttää koejärjestelmässä, jossa on tarkoitus määrittää koko laitteiston läpi puhallettava jäähdytysilmamäärä. Tällöin koe on järjestettävä siten, että laitteiston läpi puhallettava ilma ohjataan keskitetysti mitta-anturin kautta (kuva 23). Puhaltimen mitoituksessa on otettava huomioon ko. koejärjestelmän aiheuttama painehäviön suureneminen.



*Kuva 23. Kiinteästi virtauskanavaan asennettavan virtausmittarin mahdollinen sijaintipaikka.*

Kiinteästi ilmanakanavaan asennettavat mitta-anturit ja kuristuselimet ovat jatkuvatoimisia mittausmenetelmiä, joista mittaustulos saadaan joko analogisessa tai sähköisessä muodossa. Jatkuvatoimisia ilmamäärän mittalaitteita ovat mm. rotametri, turbiinimittari, termiset massamittarit, vortexpyörrevanamittari ja erilaiset kuristuselimet.

Paikallisia ilman nopeuksia ja nopeusjakaumia voidaan mitata virtauskanavasta tai laitekaapin sisältä virtaussondin tai anemometrin avulla. Kun halutaan määrittää koelaitteiston läpi virrannut kokonaisilmamäärä, mitataan virtauskanavan poikkipinnalta useammasta kohdasta paikallinen nopeus, joista lasketaan keskimääräinen nopeus. Keskinopeuden ja vapaan virtauspoikkipinta-alan tulona saadaan kanavassa virtaavan ilman tilavuusvirta. Virtaussondina voidaan käyttää siipipyörä-, kuumalanka- tai termoanemo-

metria. Pitot-staattinen putki soveltuu virtausnopeuden määrittämiseen, kun mitattava nopeus on  $\geq 3$  m/s.

Virtauskanavasta saadaan määritettyä parempi paikallinen nopeus sekä virtaussuunta käyttämällä kehittyneempiä mittausten menetelmiä, joita ovat mm. ultraäänimittari, kuimalanka-anemometria tai laser-doppler-anemometria. Kyseiset mittalaitteet ovat kuitenkin kalliita ja vaativat usein erityisiä koejärjestelyjä sekä mittalaitteen käyttäjältä hyvää asiantuntemusta. Edellä mainittuja mittalaitteita ja mittaustalveta on saatavilla tutkimuslaitoksista, yliopistoista ja korkeakouluista /6.11/.

Koelaitteen sisäisten virtausjakaumien tutkimisessa voidaan käyttää myös visuaalisia havainnointimenetelmiä, kuten merkkisavua, hienoa jauhoa ja merkkilankoja.

*Taulukko 3. Eräiden tilavuusvirran-, nopeuden ja paine-eron mittalaitteiden hintataso vuonna 1996.*

	5000 mk	10 kmk	20 kmk	40 kmk	50 kmk	yli 100 k mk
<b>kiinteästi asennettavia mittareita</b>						
↳ rotametri						
↳ terminen massamittari						
↳ vortex-pyörreanemittari						
↳ turbiinimittari+vahvistin						
↳ vortex-pyörreanemittari, paine- ja lämpötilakompensointi						
<b>paikallisten suureiden mittareita</b>						
↳ ilmastointisovelluksissa käytettävä monitoimimittari (mitattavia suureita; $w \rightarrow 0,2$ m/s, lämpötila, kosteus, paine-ero, muisti tietojen tallentaminen)						
↳ termooanemometri + näyttölaite (suuntariippuva, $w \rightarrow 0,2$ m/s)						
↳ termooanemometri + näyttölaite (suuntariippumaton, $w \rightarrow 0,05$ m/s)						
↳ siipipyöräanemometri ( $w \rightarrow 0,3$ m/s)						
↳ kuimalanka-anemometri, paine ja kosteuskompensointi ( $w \rightarrow 0,1$ m/s)						
↳ kuimalanka-anemometri, laser-doppler anemometri, ultraääneen perustuva nopeusmittaus, joilla voidaan mitata 2- tai 3-nopeuskomponenttia, niiden suunta ja suuruus						
<b>paine-eromittareita:</b>						
↳ tarkkuusmikromanometri						
↳ kapasitiivinen paine-eromittari						

### 6.5.2 Mittausmenetelmän valintaan vaikuttavat tekijät

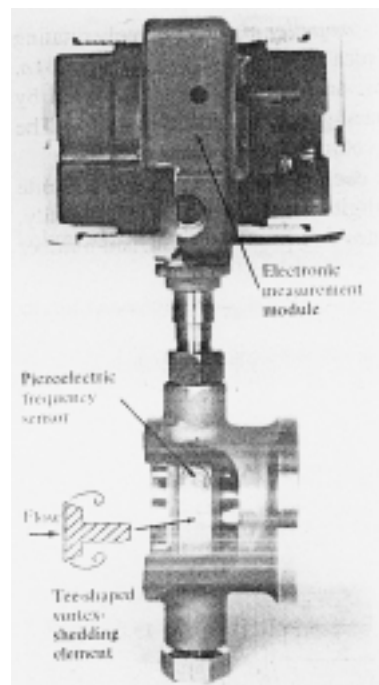
Ennen ilmamäärän mittausmenetelmän ja mittausanturin valintaa on selvitettävä, millaista laitetta on tarkoitus tutkia ja arvioitava mahdollisimman tarkasti mitattavan ilmamäärän suuruus. Mittausanturin valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. mittalaitteen hinta, vaadittu tarkkuus, mittauspaikan sijainti ja koko. Mittalaitteen valinnassa on kiinnitettävä huomiota anturin mittausalueeseen, koska liian laajan mittausalueen mittarin tai aivan äärialueilla toimivan mittarin tarkkuus on huono. Mittarin asennuksessa ja mittausanturin käytössä on noudatettava asennus- ja käyttöohjeita. Mittausanturin paikan valinnassa on noudatettava vaadittuja suojaetäisyyksiä. Taulukossa 3 on esitetty eri mittalaitteiden hintataso vuonna 1996. Hintatiedot ja taulukossa esiintyvät miniminopeudet on koottu tuote-esitteistä, joten arvot ovat vain suuntaa antavia ja ne on tarkastettava aina laitekohtaisesti.

### 6.5.3 Kiinteästi asennettavat tilavuusvirtamittarit

Kiinteästi virtauskanavaan asennettavat mittarit soveltuvat laboratoriomittauksiin, jossa koko jäähdytysilmavirta voidaan johtaa puhaltimen avulla keskitetysti mitta-anturin läpi.

#### VORTEX-PYÖRREVANAMITTARI

Kun virtaukseen asetetaan este, syntyy esteen jälkeen virtaukseen pyörteitä vuorotellen esteen molemmille sivuille. Pyörteiden syntymistaajuus on verrannollinen virtausnopeuteen. Vortex-pyörrevanamittarissa mitataan mitta-anturissa virtauskentässä esteen jälkeen muodostuvaa pyörrevanan taajuutta joko paineeseen, ultraääneen tai lämmönsiirtomekanismiin perustuvalla tunnistimella. Syntyneen pyörrevanan taajuus on suoraan verrannollinen virtausnopeuteen. Tarkoille pyörrevanamittareille ilmoitetaan mittausepä-tarkkuudeksi pienimmillään  $\pm 0,3\%$  laajalla anturin mitta-alueella. Vortex-pyörrevanamittari on hyvin herkkä virtaavan aineen tiheyden ja viskositeetin muutoksiin. Vortexmittaria on saatavissa myös varustettuna paine- ja lämpötilakompensoinnilla.



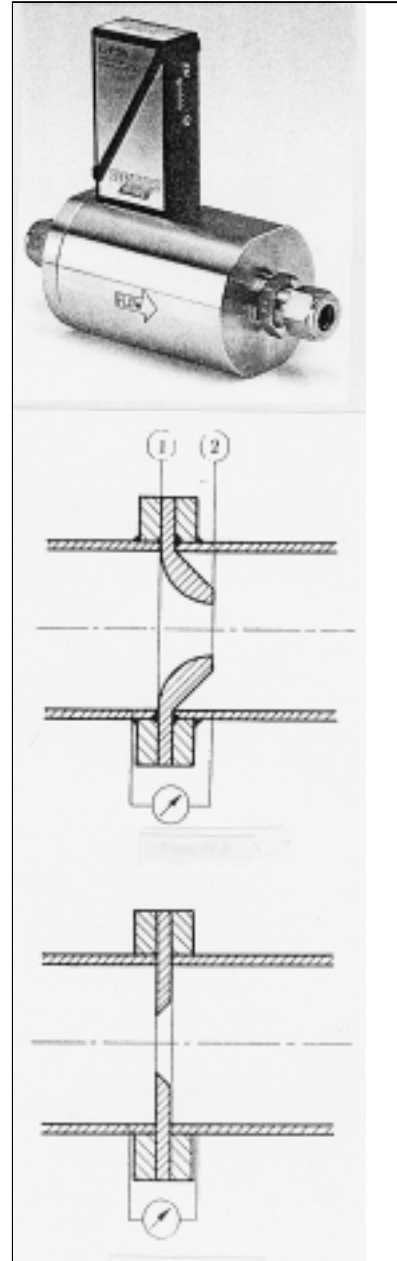
## TERMINEN MASSAVIRTAMITTARI

Termisen massavirtausmittarin toimintaperiaate perustuu virtaavan aineen lämmittämiseen ja virtauksen lämpötilan mittaamiseen ennen ja jälkeen lämmityselementin. Lämpömittarit mittaavat lämmityksen synnyttämää lämpötilaeroa, joka on virtausnopeuden funktio. Massavirtausmittareissa on paine- ja lämpötilakompensointi, joten kaasun paine ja lämpötila eivät vaikuta mittaus-tarkkuuteen ja mittarin antama viesti on suhteellisen tarkka. Saatavissa olevien massavirtausmittareiden pienin mitta-alue on 0,1...5 ml/min suurempien ollessa 25...1000 dm<sup>3</sup>/min. Mittareille ilmoitettu mitta-epätarkkuus on  $\pm 1\%$  ja toistettavuus  $\pm 0,2\%$  täydestä näytämästä.

### MITTAUSLAIPPA, MITTAUSSUUTIN

Ilman tilavuusvirta pyöreässä putkessa voidaan mitata virtausputken asennetun kiinteän kuristuselimen avulla. Supistuskohdassa nopeus kasvaa poikkipinnan pienentyessä, mistä on seurauksena paineen aleneminen. Tilavuusvirta määritetään putken normaalin poikkipinnan ja kuristuslaitteen supistetun poikkipinnan välillä mitatun paine-eron avulla. Kuristuselin aiheuttaa myös pysyvän painehäviön, mikä on otettava huomioon mittausjärjestelmän suunnittelussa. Kuristuselimenä voidaan käyttää mittauslaippaa tai mittaussuutinta, jotka on esitetty standardissa

SFS-ISO 5167 (1995) Virtausmittaus paine-eroon perustuvilla laitteilla. Osa 1: Mittauslaipat, mittaussuuttimet ja venturiputket asennettuna poikkileikkaukseltaan pyöreisiin, täynnä virtaaviin putkiin. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices. Part 1: Orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full. 107 s. (tai DIN 1952).



Standardin mukaan valmistettujen mitta-antureiden mittaasepätkkyus on  $\pm 2...4\%$ .

Kuristuselimeltä mitataan paine-ero (kohta 6.6), ja mitatun paine-eron avulla lasketaan standardissa esitetyn mukaisesti kuristuselimen läpi virranneen kaasun tilavuusvirta. Paine-eron mittaustapa ja mittalaitteen sijainti virtausputkessa sekä tarvittavat suojaetäisyydet on esitetty kyseisessä standardissa.

Mittauslaippaa käytetään, kun virtausputki on 50...1000 mm ja aukkosuhteen alue 0,05...0,64 (= kuristuselimessä olevan aukon halkaisija/virtausputken halkaisija). Mittauslaippa on suhteellisen tarkka, mutta siinä syntyy suhteellisen suuri pysyvä painehäviö. Mittaussuutinta käytetään, kun putken halkaisija on 50...500 mm ja aukkosuhde 0,1...0,64.

#### MUITA KIIINTEÄSTI ASENNETTAVIA TILAVUUSVIRRRAN MITTALAITTEITA

Ilmastointilaitteissa ilman tilavuusvirran mittaamisessa käytetään erilaisia, virtauskanavaan asennettavia mittalaitteita (esim. mittarengasta). Tavallisimmin kyseisissä laitteissa mitataan paine-ero. Mitatun paine-eron ja mittalaitteen valmistajan esittämän käyrästön tai taulukon avulla saadaan mittalaitteen läpi virrannut ilmamäärä. Edellä mainitut mitta-anturit ovat usein edullisia, mutta ne vaativat ennen käyttöä kalibroinnin ja lisäksi hyvän paine-eromittarin. Mittausepätkkyus niillä on noin  $\pm 5\%$ .

#### MUITA TILAVUUSVIRTAMITTAREITA

##### **Rotametri**

Yksinkertaisin jatkuvatoiminen ilman tilavuusvirtamittari on rotametri. Rotametri on pystysuorassa oleva kartiomainen mittaosputki, jossa liikkuva erikoismuotoiltu kelluva kappale (uimuri) asettuu tasapainotilaan mittaosputkeen alhaalta päin tulevan ilmavirran mukaan. Rotametriputki on valmistettu lasista tai muovista. Siihen on merkitty mitta-asteikko ja mittarin läpi virtaavan kaasun tilavuusvirta määritetään uimurin paikan mukaan.

Ilman tilavuusvirran mittaukseen käytettävien rotametrien mittaosalue 0,1 dm<sup>3</sup>/min...100 m<sup>3</sup>/h ja mittaasepätkkyus  $\pm 1...10\%$ . Rotametrien mitaustarkkuuteen vaikuttavat mittarin läpi virtaavan kaasun paine ja lämpötila. Rotametrien mittaos tieto on muutettavissa myös sähköiseen muotoon, jolloin mittarin hinta moninkertaistuu. Rotametri on hinnaltaan edullisimpia tilavuusvirran mittalaitteita.

## **Turbiinimittari**

Turbiinimittari asennetaan virtausputkeen. Anturin läpi virtaava ilma pyörittää turbiinia ja turbiinin pyörimisnopeus on suoraan verrannollinen anturin läpi virtaavaan ilmamäärään. Turbiinimittarilta saatava viesti on taajuusviesti, joka on muutettavissa virtaviestiksi. Turbiinimittarit ovat yleensä tehdaskalibroituja. Turbiinimittareita on saatavissa alkaen mittausalueelta 0,36...3,6 dm<sup>3</sup>/min alueelle 24...240 dm<sup>3</sup>/min.

Mittarin toimittajien ilmoittama mittausepätkkyys lineaarisuudelle on  $\pm 1 \%$  ja toistettavuudelle  $\pm 0,1 \%$ . Turbiinimittarin toiminta-alueen alarajalla mittausvirhe on suuri, koska kitka vaikuttaa voimakkaasti turbiinin pyörimiseen pienillä virtausnopeuksilla. Turbiinimittarin mittaustarkkuuteen vaikuttavat lisäksi kaasun paine ja lämpötila. Turbiinimittarin asennuksessa on otettava huomioon mittarin vaatimat suojaetäisyydet.

### **6.5.4 Paikallisen virtausnopeuden mittaus**

Putkessa tai kanavassa virtaavan ilman nopeusjakauma riippuu putkessa tai kanavassa virtaavan aineen määrästä ja virtauspoikkipinta-alasta. Häiriötömässä laminaarisessa virtauksessa on nopeusjakauma muodoltaan parabeli virtauksen saavuttaessa kanavan keskellä maksimin ja pienentyessä seinämällä arvoon nolla. Turbulenttisen virtauksen nopeusjakauma on muodoltaan tylpempi. Nopeusjakauma on virtauskanavan keskiosassa melko tasainen ja lähestyy seinämällä arvoa nolla.

Epätasaisen nopeusjakauman vuoksi suoritetaan mittaus ns. monipistemittauksena. Mittauspoikkipinnan tulisi olla kohtisuorassa päävirtaussuuntaan nähden ja nopeusjakauman tulisi olla mahdollisimman tasainen virtausputken poikkipinnalla. Virtaviivojen yhdensuuntaisuus ja tasainen virtausjakauma edellyttävät riittäviä suojaetäisyyksiä ennen mittauskohtaa ja sen jälkeen.

Kun nopeuksia tai nopeusjakaumia halutaan määrittää komponenttilevyjä sisältävässä kaapissa, on anturia valittaessa otettava huomioon virtauksen pyörteellisyys. Virtaussuuntien tarkka määrittäminen on tällöin vaikeaa ja lisäksi paikalliset nopeudet ovat usein hyvin pieniä. Tällöin mittaasanturilta vaaditaan hyvää mittaustarkkuutta pienillä virtausnopeuksilla sekä suunta-riippumattomuutta.

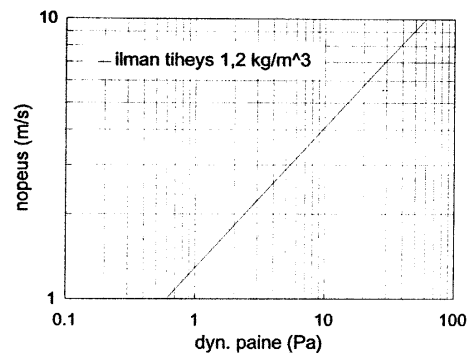
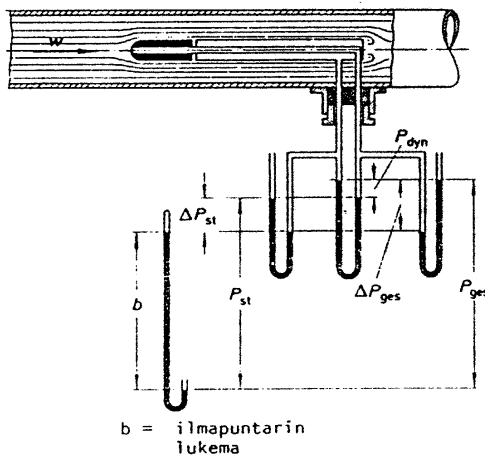
## PITOT-STAATTINEN PUTKI

Pitot-staattista eli Prandtlin-putkea voidaan käyttää kaasun nopeuden mittaamiseen kanavassa tai putkessa. Kulmaan taivutetun patoputken puolipallon muotoisessa päässä on reikä, joka asetetaan virtausta vastaan. Reiästä mitataan virtauskanavassa vallitseva kokonaispaine ( $p_{tot}$ ). Pitot-staattisen putken sivussa on reikiä, jotka ovat virtaussuuntaan nähden kohtisuorassa. Näistä raoista mitataan virtauskanavassa vallitseva staattinen paine ( $p_{staat}$ ). Kokonaispaineen ja staattisen paineen erosta saadaan virtauskanavassa vallitseva dynaaminen paine ( $p_{dyn} = p_{tot} - p_{staat}$ ). Kokonaispaineen ja staattisen paineen ero mitataan paine-eromittarilla (kohta 6.6).

Pitot-staattisella putkella voidaan määrittää kanavistossa virtaavan ilman ti-lavuusvirta noudattaen standardia

SFS 5512 (1989) Ilmastointi. Ilmavirtojen ja painesuhteiden mittaus ilmastointilaitoksissa. Air conditioning. Measurements of air flows and pressure conditions in air conditionings systems. 11 s.

Standardissa on määritetty eri kokoisille ja erimuotoisille kanaville kanaviston poikkipinnassa tarvittavien mittauspisteiden lukumäärät ja sijainnit sekä tarvittavat suojaetäisyydet.



Paine-eromittarilta luettavan dynaamisen paineen avulla määritetään paikallinen virtausnopeus ko. mittapisteessä yhtälöllä

$$w = \sqrt{\frac{2 p_{dyn}}{\rho}}$$

jossa  $\rho$  on kanavassa virtaavan kaasun tiheys (ilmalle  $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ , kun  $p = 1,013 \text{ bar}$  ja  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Kuvassa 25 on esitetty mitattua dynaamista painetta  $p_{\text{dyn}}$  vastaava virtausnopeus. Kuten kuvasta 25 nähdään, pienillä virtausnopeuksilla ovat mitattavat paine-eron arvot hyvin pieniä, mikä vaatii tarkkaa paine-eromittaria. Käytännössä pitot-staattisella putkella mitattavat nopeuden arvot ovat suurempia kuin  $3 \text{ m/s}$ .

Kanavassa virtaavan ilman tilavuusvirta  $q_v$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) on

$$q_v = \bar{w} A$$

missä  $A$  ( $\text{m}^2$ ) on kanavan poikkipinta-ala. Kanavassa virtaavan ilman massavirta  $q_m$  ( $\text{kg/s}$ ) on

$$q_m = q_v \rho$$

missä  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) on kanavassa virtaavan ilman tiheys.

Pitot-putkella ja mikromanometrillä suoritettujen mittausten suhteellinen kokonaisvirhe on noin  $6 \%$ , kun mittaus on suoritettu em. standardin SFS 5512 mukaisesti. Pitot-mittauksen kustannukset riippuvat siitä, mitä mittaustekniikkaa käytetään paine-eron mittaukseen. Kaupallisesti saatavissa olevien pienimpien pitot-staattisten putkien halkaisija on  $2,3 \text{ mm}$ .

#### KUUMALANKA- JA KUUMAKALVOANEMOMETRI SEKÄ TERMISTORIENTURI

Kuumalanka- ja kuumakalvoanemometrin sekä termistorianturin toimintaperiaate perustuu virtauksen aiheuttaman jäähtymisen mittaukseen. Anturit toimivat joko vakio- $\text{lämpötila-}$  tai vakio- $\text{teho-}$ periaatteella. Kuumalanka-anemometrissa sähköisesti kuumennettu metallilanka asetetaan kaasuvirtaan, jossa virtaus jäädyttää lankaa sitä tehokkaammin mitä suurempi on virtausnopeus.

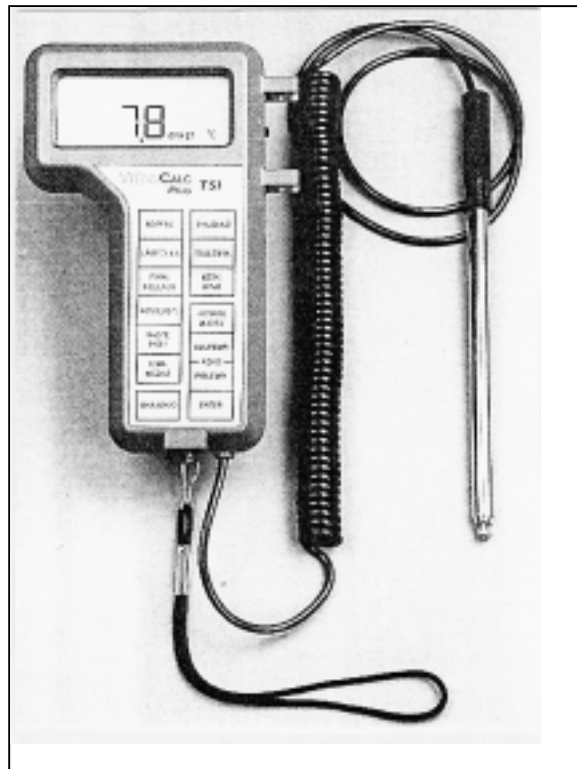
Mittauksessa käytettävän anturin muoto vaihtelee käyttötarkoituksen mukaisesti. Ohuita lanka-antureita käytetään usein nopeissa kaasuvirtauksissa turbulenssin mittamiseen. Pallomaisia termistoriantureita käytetään hitaitten huoneilmavirtausten mittaamiseen. Molemmat anturityypit ovat suuntariippuvia, ts. anturin ja virtauksen kohtauskulma vaikuttaa nopeuden mittaustulokseen ja lisäksi molempiin vaikuttaa itsekonvektio. Itsekonvektio aiheuttaa mittaustulovirhettä etenkin pienillä virtausnopeuksilla.

Sellaisissa tapauksissa, joissa virtauksen suuntaa ei tarkoin tunneta, voidaan käyttää ns. suuntariippumattomia antureita. Helposti vikaantuvien lanka-antureiden sijasta voidaan käyttää samaan toimintaperiaatteeseen perustuvaa,



rakenteeltaan kestävämpää keskinopeusanturia. Termistorianturit ovat muodoltaan pallo-maisia, halkaisijaltaan muutama millimetriä. Termistorianturien toimintaperiaate perustuu myös virtauksen jäädyttävään vaikutukseen. Termistorit eivät ole kovin stabiileja ja ne vaativat säännöllisen kalibroinnin.

Kuvan mukaisella monitoimimittarilla voidaan määrittää il-mavirran määrä. Laite voi sisältää sisäänrakennetun dataloggerin, jonka avulla voidaan määrittää eri mittapisteistä mitattujen suureiden keskimääräinen arvo. Mittarilla mitattavia suureita sekä sen ominaisuuksia ovat



- nopeus                      0,15...50 m/s, virhe noin 2,5 % lukemasta
- paine-ero                    -2500...+2500 Pa, virhe noin 0,5 % lukemasta
- ilman lämpötila        -10...+60 °C, virhe noin ±0,3 °C
- suhteellinen kosteus    5...95 %, virhe noin 3 % s.k..

Kalliimmissa kuumalanka-anemometrimittareissa (20 000 - 30 000 mk) mit-taustarkkuus alle 0,5 m/s virtausnopeuksien mittaamiseksi on huomattavasti parempi kuin monitoimimittareissa.

## SIIPIPYÖRÄANEMOMETRI

Siipipyöräänemometrissä on lieriömäisessä vaipassa pyörivä siipipyörä. Laite asetetaan mitattavaan virtaukseen siten, että siipipyörä on kohtisuorassa virtausta vastaan, jolloin siipiin kohdistuvien voimien kehän suuntaiset komponentit saattavat siipipyörän pyörimisliikkeeseen.

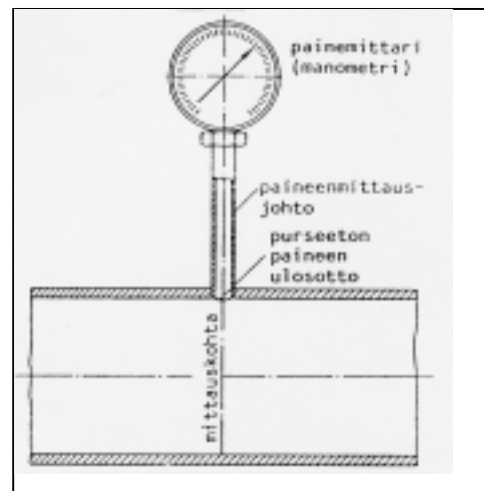
Siipipyörän hyvästä laakeroinnista huolimatta esiintyy siinä kitkavoimia, minkä seurauksena pyörimisnopeus pienillä virtausnopeuksilla ei ole suoraan verrannollinen virtausnopeuteen. (Alue 0,2 ...0.5 m/s, missä 0,2 m/s on tyypillinen siipipyörän liikkeellelähtönopeus.) Valmistaja ilmoittaa laitteelle kalibrointikokeen tuloksena korjauskäyrästöt tai korjauskertoimet.

Siipipyöräänemometri-  
rien mittausalue on  
0,5...30 m/s ja epä-  
tarkkuus 1...5%.  
Kaupallisesti saata-  
villa olevien siipi-  
pyöräänemetri-  
fyysinen koko on  
10...150 mm.



## 6.6 PAINEEN JA PAINE-ERON MITTAUS

Paineen ja paine-eron mittausjärjestelmä koostuu paine- tai paine-eromittarista, mittausjohdoista ja mitausreiästä. Virtauskanavasta tai mita-anturilta mitattava paine välitetään mitausreiästä mittausjohdon välityksellä mittalaitteeseen. Monet tilavuusvirran ja massavirran mittausmenetelmät perustuvat paine-eron mittaamiseen. Usein mitattavat paine-erot ovat hyvin pieniä, mikä asettaa erityiset vaatimukset paine-eron mittausanturin erottelukyvylle ja mittaustarkkuudelle.

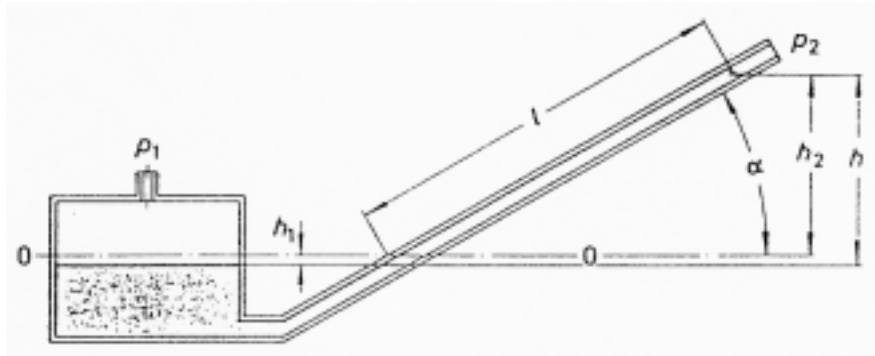


Paineen tai paine-eron mittauksessa on tärkeää, että mittausyhteet virtauskanavan ja mittalaitteen välillä on oikein suunniteltu ja rakennettu. Mitattavassa kanavassa olevasta mitausreiän paikasta, suuruudesta ja muodosta sekä mittausjohtojen pituudesta ja poikkipinnasta on tarkkoja ohjeita alan kirjallisuudessa /6.7/ ja standardeissa. Mittausreiän on oltava purseeton.

Paineen tai paine-eron mittaus voidaan suorittaa mekaanisen, sähköisen tai nesteputkimanometrin avulla.

## NESTEMANOMETRI

Edullisin vaihtoehto paine-eron mittaukseen on U-putkimanometri, jossa nesteputki täytetään mitattavaa ainetta (kaasua) raskaammalla aineella, sulkunesteellä. U-putkimanometri ei sovellu pienien paine-erojen mittaamiseen. Mittarin herkkyys on noin 0,05 mm/Pa, kun sulkunesteinä on vesi.



Pienien paine-erojen mittauksessa tarkempi mittaustulos saadaan käyttämällä ns. Prandtl-manometriä tai Prandtlin manometristä tehtyä muunnosta, ns. kallistettavaa manometriä, jossa manometrin herkkyyttä ja lukematarkkuutta voidaan muunnella kaltevuutta muuttamalla. Nestepatsaan korkeuseron ja manometrissä käytettävän nesteen tiheyden avulla voidaan määrittää paine-ero

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g l \sin \alpha$$

missä  $\rho$  on sulkunesteen tiheys,  $g$  on maan vetovoiman kiihtyvyys  $9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $l$  on nestepatsaan pituus ja  $\alpha$  on putken kallistuskulma. Kallistettavien nestemanometriin paine-eron mittausalue on 0...100 Pa.

## SÄHKÖINEN PAINE-EROANTURI

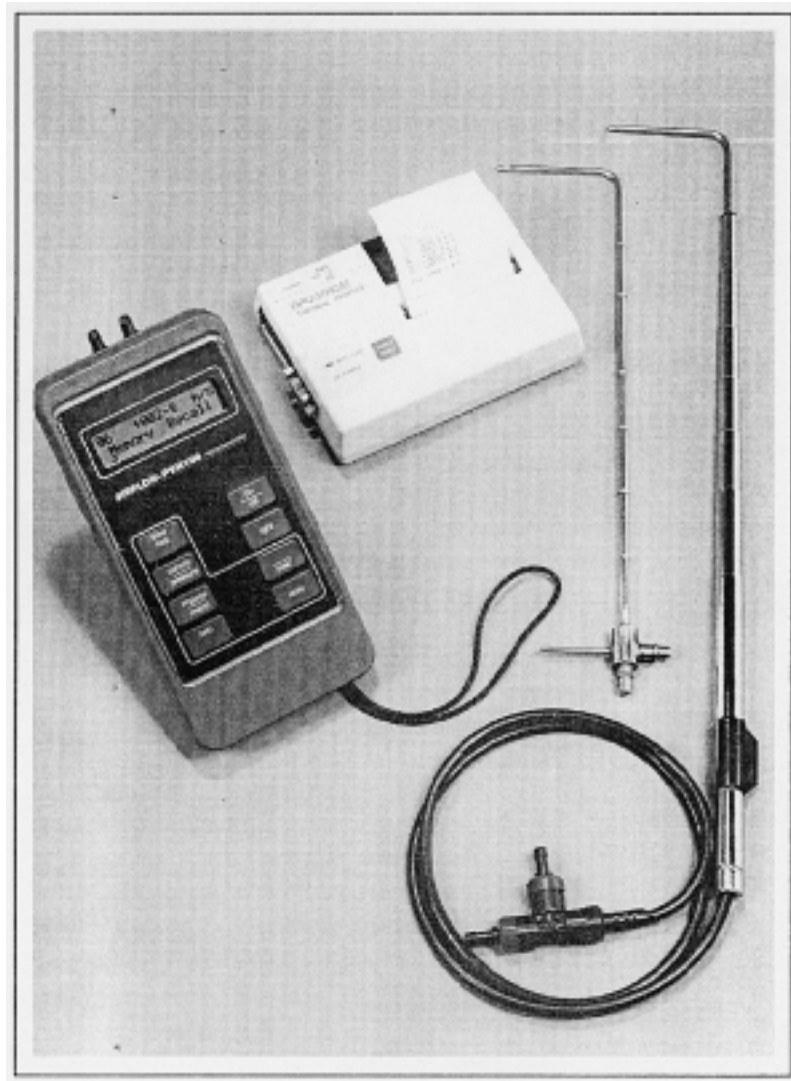
Paine-eroanturille kohdistuva paine aiheuttaa anturiin paineeseen verrannollisen siirtymän. Siirtymä voidaan muuntaa sähköiseksi suureeksi käyttämällä resistiivistä, induktiivista tai kapasitiivista menetelmää. Tällaiseen mittausten menetelmään perustuu mm. kapasitiivinen paine-eroanturi.



Paine-eromittarilta saatava viesti on yleensä 4...20 mA analogiaviestiä, missä kalibroidaan alaraja vastaamaan paine-eroa nolla ja yläraja vastaavasti anturille kalibroituja suurinta paine-eron arvoa. Paine-eroanturin mittauserotarkkuus on noin 0,1 % mittausalueen leveydestä ja pienimpien paine-erojen mittauksiin tarkoitettujen antureiden mittausalue on 0...60 Pa.

#### MEKAANINEN (ELEKTRONINEN) MIKROMANOMETRI

Mikromanometri on tarkka ja toisaalta herkästi vioittuva paine-eromittari. Mikromanometrejä on saatavissa sekä näytöllä tai näytön lisäksi sähköisellä ulostuloviestillä varustettuna. Kuvan mukaisen, paristokäyttöisen mikromanometrin mittausalue on 0...3500 Pa ja tarkkuus noin 1% lukemasta.



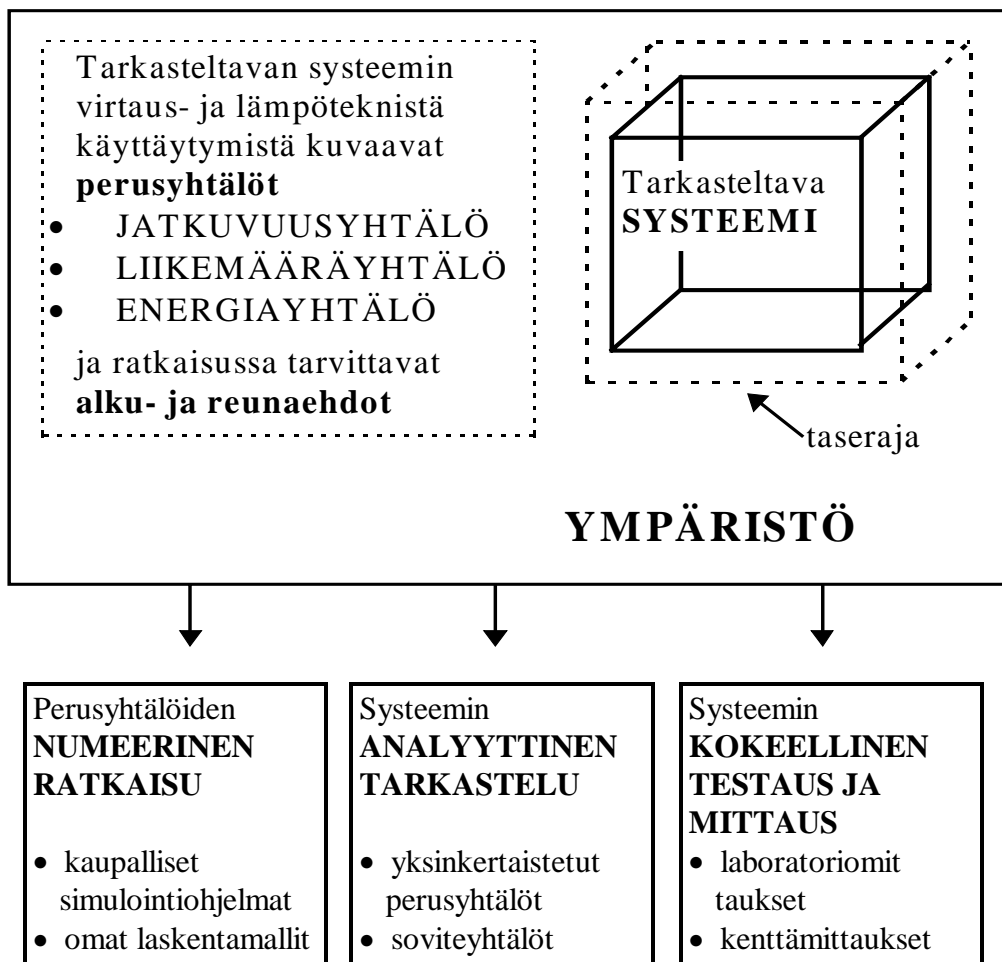
## LUVUN 6 LÄHTEET

- 6.1. Moffat, Robert, J. Experimental Methods for Heat Transfer Measurements in Electronic Systems. 1996. Helsinki. Stanford University, Moffat Thermosciences, Inc. and Flomerics Limited. 54 s.
- 6.2. KOTEL ry. Mittaustekniikka elektroniikan lämpösuunnittelussa. 1996. Seminaari. Oulu.
- 6.3. Farina, Dino, J. Making surface temperature measurements using liquid crystal thermography. Electronics Cooling, vol 1, no. 2, October 1995. s. 10 - 15.
- 6.4. Parsley, Michael. The Hallcrest Handbook of Thermochromic Liquid Crystal Technology. 1991. Hallcrest, Dorset, United Kingdom. s. 36.
- 6.5. Tien, C.L., Chan, C. K., Cunnington, G. R., Infrared Radiation of Thin Plastic Films. Journal of Heat Transfer. February 1972. ss. 41 - 45.
- 6.6. Keski-Rahkonen, Olavi. 1996. Ilman lämpötilan mittaaminen elektroniikkalaitteissa. KOTEL seminaari. Oulu. 13 s.
- 6.7. Doebelin, E, O. Measurement Systems, Applications and Design. 1990. McGraw-Hill, New York, 4<sup>th</sup> Edition.
- 6.8. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics. 1985. Wiley, Chichester.
- 6.9. IEC 584-1(1995) Thermocouples Part 1: Reference tables. 155 s.
- 6.10. Mangs, J. and Keski-Rahkonen, O. Full scale fire experiments for instrument cabinets. 1994. VTT Publications 186. 50 p. + 37 p. appendices.
- 6.11. Saarenrinne, P. Virtausmittausten nykytilanne ja kehittäminen. Tampere. TTKK/Energia- ja prosessitekniikka. 1995. Raportti 108. 54 s.
- 6.12. Benard, C. J. Handbook of Fluid Flowmetering. England. The Trade & Technical Press Limited Crown House. 1988.
- 6.13. Michalski, L. Temperature Measurement. 1991. Wiley, Chichester. 514 s.
- 6.14. Paine ja virtaus. Helsinki: Suomen Sääätöteknillinen Seura ry. 1981. Julkaisu n:o 4.
- 6.15. Lämpötilan mittaukset. Helsinki. Suomen Sääätöteknillinen Seura ry. 1981. Julkaisu n:o 3.
- 6.16. Sirén, Kai. Ilmastointitekniikan mittaukset. Helsinki. Tietonova Oy. 1995.
- 6.17. Halko, Pekka. Härkönen, Sakari. Lähteenmäki, Ilkka & Välimaa, Taisto. Teollisuuden mittaustekniikka. Perusmittaukset. Helsinki. Ammattikasvatushallitus. 1990.

# LIITE 1 LÄMPÖSUUNNITTELUN PERUSTEET

## LÄMPÖSUUNNITTELUN FYSIKAALISET PERUSTEET

Kuvassa 1 mainitaan ne perusyhtälöt, jotka kuvaavat matemaattisesti laitteiden lämpötekniistä ja virtauskentän lämpö- ja virtaustekniistä käyttäytymistä. Kaaviokuvassa taserajalla ympäristöstä erotettu systeemi voi olla tarkastelun kohteena oleva komponentti, komponenttilevy, kehikko tai kaappi. Lämpötekniikan suunnittelun välineitä ovat numeerinen ja analyttinen laskenta sekä kokeelliset mittaukset.



Kuva 1. Lämpösuunnittelun fysikaaliset perusteet.

Sekä tutkittavalle laitteelle suoritettava analyttinen tarkastelu että tietokone-mallinnuksessa käytettävien, numeeriseen ratkaisuun perustuvien simulointiohjelmien lähtökohtana ovat perusyhtälöt. Manuaalisesti suoritettavas-

sa laskennassa joudutaan perusyhtälöihin tekemään huomattavia yksinkertaistuksia, jotta yhtälöiden soveltaminen ja ratkaiseminen olisi mahdollista. Yhtälöihin tehtävät yksinkertaistavat oletukset määräytyvät aina tarkasteltavan systeemin ja tilanteen mukaan.

Mallinnuksen simulointiohjelmissa on edellä mainittujen perusyhtälöiden ratkaisuihin käytetty erilaisia numeerisia ratkaisumenetelmiä sekä erilaisia turbulentsin virtauksen laskentamalleja. Näin ollen ohjelmista saatavien tulosten oikeellisuus ja tarkkuus vaihtelee.

Sekä analyyttisessä että numeerisessa laskennassa perusyhtälöiden lisäksi lopputuloksen kannalta olennaisia ovat niiden ratkaisussa käytettävät **alku- ja reunaehdot**.

## PERUSYHTÄLÖT

Perusyhtälöiden johto on esitetty useissa virtaustekniikan ja lämmönsiirron kirjoissa, esim. /1/, /2/ /3/ ja /4/. Yhtälöiden johdossa on käsitelty differentiaalisen pientä kontrollitilaa (control volume - cv) ja tarkasteltu sen massa, voima- ja energiatasetta eri ajanhetkillä (= epästationäärinen tila). Tarkasteltavan systeemin mallinnus on sitä tarkempi, mitä suuremmalla aikataajuuksella tarkastelu tapahtuu ja mitä pienempiin osiin (kontrolli- tai tasetiloihin, elementteihin) systeemi on jaettu. Näin saadaan näkyviin nopeasti ajan suhteen tapahtuvat muutokset sekä virtauskentän paikalliset pienet pyörteet.

Yksifaasisen ja 3-dimensioisen tasetilan kuvaamiseksi tarvitaan viisi perusyhtälöä; yksi jatkuvuusyhtälö, kolme liikemääräyhtälöä (3-dimensiota) sekä yksi energiayhtälö.

**Jatkuvuusyhtälö** eli massatasapainoyhtälö kuvaa tasetilan ainemäärän muutosta ajan suhteen /1/, /2/:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \bar{V} = 0 \quad (1)$$

**Liikemääräyhtälöllä** eli voimien tasapainoyhtälöllä määritetään tasetilassa massan kiihtyvyyteen vaikuttavat voimat. Tasetilan massan liikemäärään vaikuttavat voimia ovat massavoimat ja pintavoimat. Tasetilan massaan vaikuttavia massavoimia (body forces) ovat mm. gravitaatio- ja keskipakoisvoimat sekä magneetti- ja sähkökentät ja tasetilan pinnalla vaikuttavia pintavoimia (surface forces) ovat painevoimat, leikkausvoimat ja normaalivoimat. Viskoottisille, newtonilaisille virtauksille saadaan liikemäärän yhtälön, jota yleisesti kutsutaan Navier-Stokesin yhtälöksi, yleinen muoto /1/, /2/:

$$\rho \frac{D\bar{V}}{Dt} = \rho \bar{g} - \Delta p + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \operatorname{div} \bar{V} \right] \quad (2)$$

Kun tarkasteltavassa systeemissä ei esiinny lämmönsiirtoa (= isoterminen systeemi), saadaan tilan virtauskäyttäytyminen; nopeus- ja painejakaumat, määritetyksi jatkuvuusyhtälön ja liikemääräyhtälöiden avulla. Kun tarkasteltavassa systeemissä tapahtuu lämpötilaerojen seurauksena lämmönsiirtoa, tarvitaan systeemin lämpötilajakaumien ja lämpötilariippuvien aineominaisuuksien laskemiseksi lisäksi energiayhtälö.

Tasetilalle saadaan määritettyä energiatasapainoperiaatetta käyttäen **energiayhtälö** muotoon /1/, /2/

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \operatorname{div} (k \Delta T) + \Phi \quad (3)$$

Yhtälön vasemmalla puolella termi on tasetilan entalpian kokonaisdifferentiaali ajan suhteen. Tasetilan entalpiaan vaikuttavat paineen kokonaisdifferentiaali ajan suhteen, lämmön johtuminen taserajalla sekä virtauksen kitkasta johtuva liike-energian muuttuminen lämpöenergiaksi (entropian liiäys), joka otetaan huomioon ns. dissipaatiotermillä ( $\Phi$ ).

Koska perusyhtälöt ovat hyvin monimutkaisia ja pääosin analyttisesti mahdollisia ratkaista, ne eivät sellaisenaan ole käyttökelpoisia analyttiseen, differentiaaliseen pienten tasetilojen laskentaan. Komponentti-, komponenttilevy ja kaappitason tarkastelussa ovat sopivasti yksinkertaistetut perusyhtälöt hyvin käyttökelpoisia. Tällöin ei saada yksityiskohtaista tietoa lämpötila- ja nopeusjakautumista, vaan käsitys tarkasteltavan systeemin kokonaisenergiataseesta ja vertailutietoa mahdollisiin mittaustuloksiin.

Yhtälöiden numeerisessa laskennassa käytetystä ratkaisumenetelmästä riippuen tulos ja sen tarkkuus vaihtelevat. Se, millä tarkkuudella (ts. kuinka pieniin osiin ja kuinka tiheällä aika-askeleella) tarkasteltava systeemi lasketaan, määrittyy laskentakapasiteetin, laskentaan käytössä olevan ajan ja käytettävän simulointiohjelman mukaan. Yleisesti voitaneen sanoa, että mitä pienempiin tasetiloihin systeemi on jaettu, sitä suurempi laskentakapasiteetti (tehokas tietokone) tarvitaan ja sitä yksityiskohtaisempaa tietoa mallinnuksen tuloksena tarkasteltavasta systeemistä saadaan.



## ANALYYTTINEN TARKASTELU - ENERGIATASEET JA REUNAEHDOT

Elektroniikkalaitteiden termisessä suunnittelussa on olennaista tuntea lämmönsiirron, virtausdynamiikan ja aineensiirron perusmekanismit ja toimintamallit. Tarkasteltavan systeemin käyttäytyminen on määritettävissä perusyhtälöiden avulla. Koska perusyhtälöiden analyyttinen ratkaiseminen on vaikeaa ja osin mahdotonta, tehdään manuaalisessa lämpöasetarkastelussa perusyhtälöihin tarvittavat yksinkertaistukset.

Lämmönsiirron osalta on tunnettava eri *lämmönsiirtomuodot* sekä jäähdytystehokkuuteen vaikuttavat tekijät. Elektroniikkalaitteen jäähdytyksessä esiintyvät kaikki lämmönsiirron perusmekanismit, johtuminen, konvektio ja säteilylämmönsiirto.

Lämmön siirtymistä jäähdytettävän komponentin, komponenttilevyn, laitekotelon tai kaapin pinnan ja jäähdyttävän aineen välillä voidaan tehostaa onnistuneella *virtausdynaamisella* suunnittelulla. Virtausdynamiikan kannalta on kiinnitettävä huomiota kotelon sekä jäähdytysilma-aukkojen rakenteeseen sekä komponenttilevyjen sijaintiin ja asentoon kotelon sisällä. Lisäksi piirilevyllä olevien komponenttien sijainnilla on vaikutusta jäähdytykseen.

Ilmajäähdytteisissä laitteissa, joissa jäähdytys tapahtuu joko vapaan tai pakotetun konvektion sekä säteilylämmönsiirron välityksellä, *aineensiirto* rajoittuu usein jäähdytysilmassa olevan kosteuden tiivistymiseen tai höyrystymiseen kiinteillä pinnoilla sekä mahdolliseen kosteuden siirtymiseen diffuusiolla rakenteisiin ja laitteisiin.

Termisessä suunnittelussa huomioon otettavat **reunaehdot**, joita käytetään suunnittelun lähtöarvoina, kirjataan reunaehdoiksi myös verifiointia suorittaessa. Huomioon otettavia reunaehtoja ovat ympäristöolosuhteet ajan funktiona. Nämä ovat lämpötila (lämpötilaerot), lämpösäteily, ilmanpaine, kosteus ja lika.

Verifiointissa energiatasetarkastelu voidaan suorittaa usealla eri tasolla. Taserajan yli siirtyy energiavirtoja ja ainevirran mukana entalpiavirtoja.

### A) Yksittäisen **komponentin** energiatase

Energiavirrat; komponentille tuleva *sähköteho* sekä *konvektiivinen* ja *säteilylämmönsiirto* komponentin ja ympäristön välillä sekä *johtumalla* tapahtuva lämmönsiirto komponentin ja piirilevyn välillä.

Lämpövirtojen suuruuteen vaikuttavat:

- komponenttien rakenne, materiaalit ja niiden aineominaisuudet
- komponenttien kiinnitys piirilevylle, johtimien määrä, rakenne ja materiaali
- komponenttiin kiinnitettävä erillinen jäähdytysrivasto
- kahden kiinteän pinnan välinen termien kosketusresistanssi (rajapinnat).

*Konvektiiviseen* lämmönsiirtoon vaikuttavat ympäröivän ilman lämpötila ja virtausnopeus.

*Säteilylämmönsiirtoon* vaikuttavat ympäröivien pintojen lämpötilat.

### B) **Komponenttilevyn** energiatase

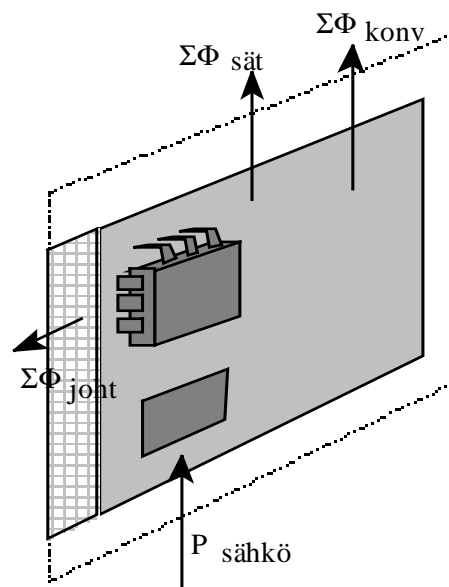
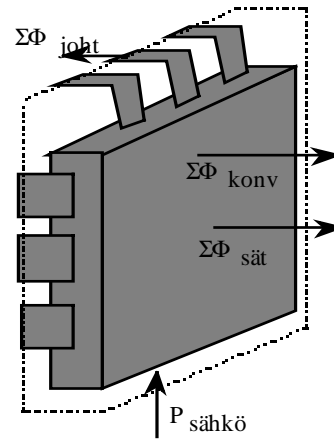
Energiavirrat; komponenttilevylle tuleva *sähköteho* sekä *konvektiivinen* ja *säteilylämmönsiirto* komponenttilevyn ja ympäristön välillä sekä *johtumalla* tapahtuva lämmönsiirto komponenttilevyn ja kehikon välillä.

Lämpövirtojen suuruuteen vaikuttavat

- piirilevyn materiaali ja rakenne
- komponenttien rakenne, laatu, määrä ja sijainti levyllä
- komponenttilevyn kiinnitys kehikkoon, johtumisväylät.

*Konvektiiviseen* lämmönsiirtoon vaikuttavat komponenttilevyä ympäröivän ilman lämpötila ja virtausnopeus

*Säteilylämmönsiirtoon* vaikuttavat levyn säteilyominaisuudet ja lämpötila sekä ympäröivien pintojen säteilyominaisuudet ja lämpötilat.

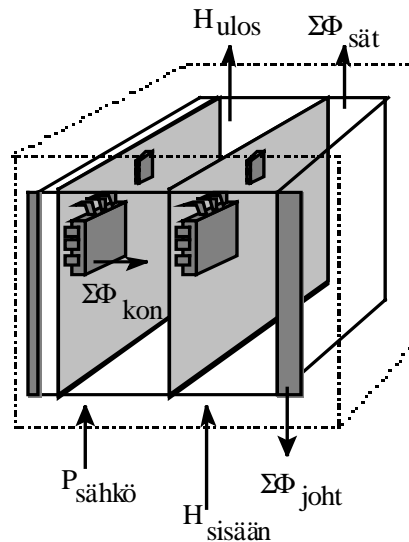


### C) Kehikon energiatase

Energiavirtoja ovat kehikkotasolle tuleva *sähköteho* sekä *konvektiivinen lämmönsiirto* komponenttilevyjen ja niitä ympäröivän ilman välillä sekä *säteilylämmönsiirto* kehikossa olevien komponenttilevyjen välillä sekä kehikkoa ympäröivän kiinteän pinnan ja komponenttilevyjen välillä. Lisäksi lämpö voi siirtyä *johtumalla* kehikon kiinnitysosien ja laitekaapin välillä. *Lämpövirtojen* suuruuteen vaikuttavat

- komponenttilevyjen keskinäinen sijainti ja asento kehikossa
- kehikon rakenne, koko ja sijainti, kehikon materiaali sekä komponenttilevyjen kiinnitykset kehikkoon ja kehikon kiinnitys kaappiin
- ilmanvirran määrä ja kulkuväylät

*Konvektiiviseen lämmönsiirtoon* vaikuttavat ympäröivän ilman lämpötila ja virtausnopeus ja *säteilylämmönsiirtoon* vaikuttavat ympäröivien pintojen lämpötilat ja säteilyominaisuudet.



### D) Kaapin energiatase

Energiavirrat; kaappiin tuleva *sähköteho* sekä *konvektiivinen ja säteilylämmönsiirto* kaapin ulkopinnan ja ympäristön välillä sekä jäähdytysilman mukana kaappiin siirtyvä ja sieltä poistuva *entalpiavirta*. Lämpö- ja entalpiavirtojen suuruuteen vaikuttavat:

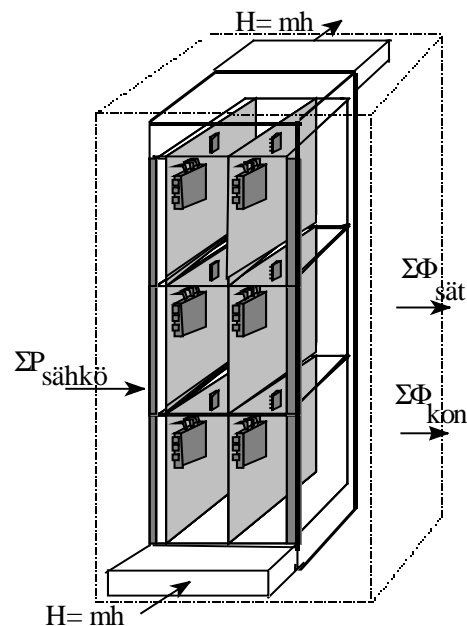
- kaapin seinämäpintojen rakenne ja materiaali
- kaappiin virtaavan ilman määrä, lämpötila ja kosteus.

*Konvektiiviseen lämmönsiirtoon* vaikuttavat

- kaappia ympäröivän ilman lämpötila ja virtausnopeus.

*Säteilylämmönsiirtoon* vaikuttavat

- kaapin tai kotelon ja kaappia tai koteloa ympäröivien pintojen ja kapaleiden (esim. aurinko) säteilyominaisuudet ja lämpötilat.



## LÄMMÖNSIIRRON PERUSMEKANISMIT

Seuraavassa esitetään yleisesti lämmönsiirron perusmekanismit. Tarkastelussa kiinnitetään huomiota eri lämmönsiirtomuodoissa lämpövirran suuruuteen, ts. jäähtyksen tehokkuuteen vaikuttaviin tekijöihin. Lämmönsiirron perusteoriaa on esitetty alan kirjoissa, esim. /3/ ja /4/.

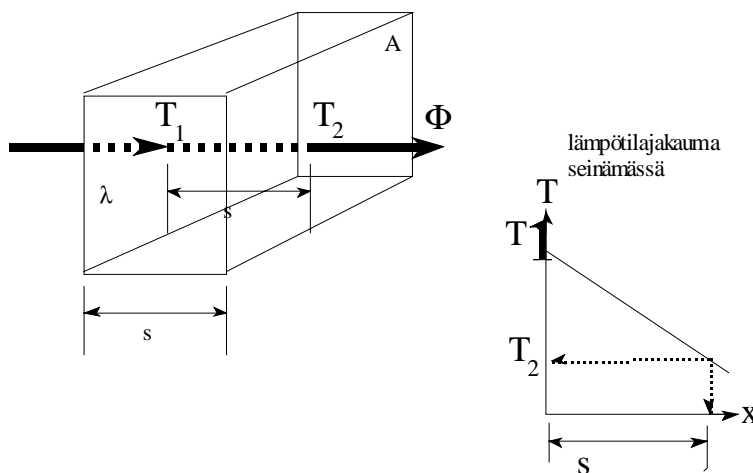
### Lämmön johtuminen

Johtuminen on lämmön siirtymistä aineessa molekyylien, atomien, ionien tai kiteiden värähtelyn ja keskinäisten törmäysten välityksellä. Johtuminen voi tapahtua kiinteässä aineessa, kaasussa ja nesteessä. Kaasuissa ja nesteissä lämpötilaero aiheuttaa tiheyseroja, mikä aiheuttaa puhtaan johtumislämmönsiirron lisäksi myös aineensiirtoa.

Tarkasteltaessa äärettömän pientä tasetilaa, jonka taserajan yli siirtyy lämpöenergiaa ainoastaan johtumalla, saadaan energiayhtälö (3) x, y, z-koordinaatiossa muotoon /3/

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi''' \quad (4)$$

Kappaleen lämpötilajakauman ratkaisemiseksi yllä olevan yhtälön lisäksi tarvitaan lisäksi alku- ja reunaehdot. Edellä esitetty yhtälö yksinkertaistuu edelleen, kun tarkasteltava systeemi on stationäärinen, 1-dimensionaalinen ja kappaleen sisällä ei kehity lämpöä.



Tällöin pinnan läpi johtumalla siirtynyt lämpövirta  $\Phi$  (W) tai pinta-alayksikköä kohden siirtynyt lämpövirta  $\Phi''$  (W/m<sup>2</sup>) voidaan laskea

yhtälöstä (5), jossa

$\lambda$  = aineen lämmönjohtavuus (W/m K)

$s$  = kerroksen paksuus (m),

$A$  = johtumispoikkipinta-ala (m<sup>2</sup>)

$R$  = **lämpöresistanssi** ('K/W)

$R''$  = johtumispoikkipinnalle määritetty  
lämpöresistanssi (K m<sup>2</sup>/W)

$T = T_2 - T_1$  on lämpötilaero (K),

missä  $T_1$  on lämpimän pinnan ja  $T_2$  kyl-  
män pinnan lämpötila.

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{\lambda}{s} A \Delta T = \frac{I}{R} \Delta T \\ R &= \frac{s}{\lambda A} \\ \phi'' &= \frac{\lambda}{s} \Delta T = \frac{I}{R''} \Delta T \\ R'' &= \frac{s}{\lambda}\end{aligned}\quad (5)$$

Lämpötilaeron vaikutuksesta johtumalla siirtynyt lämpövirta pinta-alayksikköä kohden ( $\Phi''$ ) on sitä suurempi, mitä pienempi on lämpöresistanssin arvo  $R''$ . Lämpöresistanssin arvoon vaikuttavat aineen lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ) ja kerroksen paksuus ( $s$ ). Mitä suurempi on aineen lämmönjohtavuus ja mitä ohuempi johtumiskerros, sitä pienemmän lämpöresistanssin se aiheuttaa ja sitä suurempi on seinämän läpi siirtynyt lämpövirta.

### Lämmön siirtyminen konvektiolla

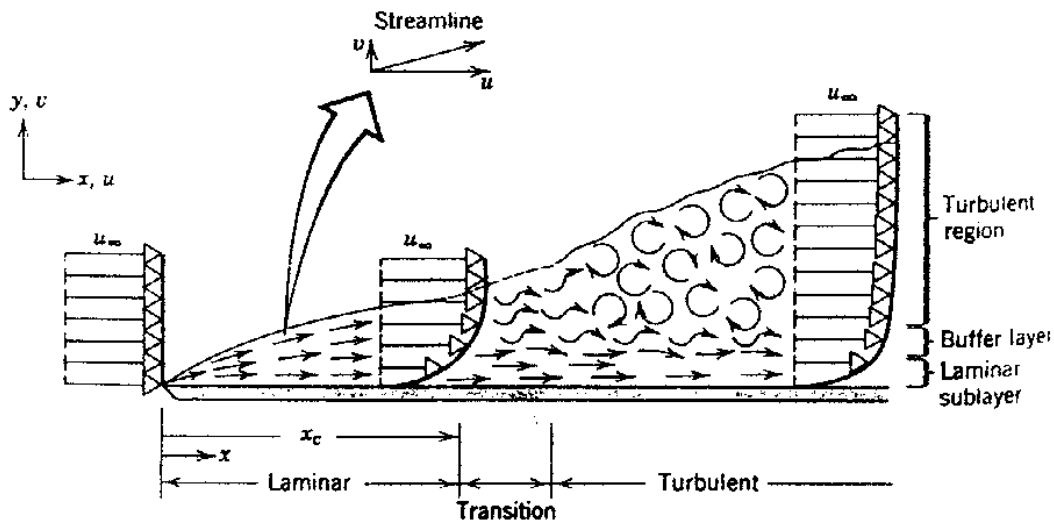
Konvektiivisella lämmönsiirrolla ymmärretään väliaineen (neste tai kaasu) mukana siirtyvää lämpöenergiaa ja erityisesti lämmön siirtymistä kiinteän pinnan ja sitä ympäröivän väliaineen (kaasun tai nesteen) välillä joko vapaan tai pakotetun konvektion vaikutuksesta.

**Vapaassa konvektiossa** lämmön siirtyminen kiinteän pinnan ja väliaineen välillä tapahtuu lämpötilaeroista johtuvien tiheyserojen vaikutuksesta. Tiheydeltään raskaampi väliaine pyrkii maan vetovoiman vaikutuksesta alaspäin ja kevyempi siirtyy ylöspäin. Näin tiheyserot saavat aikaa aineen virtausta.

**Pakotetussa konvektiossa** saadaan väliaineen virtaus aikaan ulkoisen voiman vaikutuksesta joko puhaltimella tai pumpulla.

Alla olevassa kuvassa sileän kappaleen pinnalla virtaavaan väliaineeseen muodostuu rajakerros (nopeus ja lämpötilarajakерros), jossa virtaavan väliaineen nopeus ja lämpötila muuttuvat levyn pinnan arvoista kohti vapaan virtauksen (potentiaalivirtauksen) arvoja. Virtauksen ja levyn törmäyskohdan jälkeen nopeusrajakerros on aluksi laminaarinen ja muuttuu muutosvyöhykkeen jälkeen täysin turbulenttiseksi. Laminaarisessa virtauksessa väliaineen virtaviivat ovat yhdensuuntaisia ja lämpö siirtyy lami-

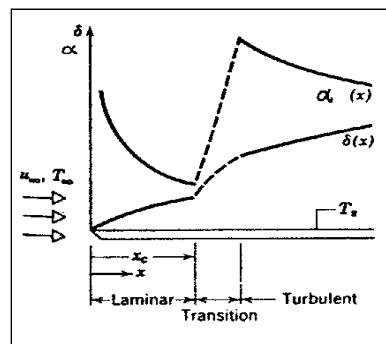
naarisesti väliainekerroksen läpi pääosin diffuusiolla (johtumalla).



Turbulentissa rajakerroksessa syntyy virtauskentässä pyörteilyä, väliaine sekoittuu ja lämmönsiirtyminen pinnan ja väliaineen välillä tehostuu, jolloin johtumisen sijasta hallitsevaksi lämmönsiirtymisen muoto on konvektio eli virtaavaan aineeseen sitoutunut ja sen mukana siirtyvä energia. Myös turbulentissa virtauskentässä on aivan pinnan lähellä ohut laminaarinen rajakerros, jonka läpi lämpö pinnan ja virtaavan aineen välillä siirtyy johtumalla. Koska laminaarinen rajakerros on ohut, on sen aiheuttama lämpöresistanssi pieni. Kiinteälle pinnalle rajakerros alkaa kehittyä virtauksen ja kiinteän pinnan törmäyspisteestä. Aluksi rajakerros on ohut, mutta paksunee virtauksen kulkusuunnassa. Lämmönsiirron kannalta huono alue on paksu laminaarinen rajakerros, missä lämmön siirtyminen pinnan ja pinnalla virtaavan väliaineen välillä on pieniä.

Potentiaali- ja rajakerrosvirtauksen käyttäytymistä kuvaavat perusyhtälöt (1), (2) ja (3). Numeerisessa laskennassa virtauskenttä jaetaan halutun tarkkuuden mukaisesti sopivan kokosiin osiin (taseloihin, elementteihin) ja taseille lasketaan perusyhtälöistä käyttäen nopeus-, paine- ja lämpötilajakaumat.

Analyttisessä tarkastelussa konvektiolla siirtyvän lämpövirran likimääräiseen arviointiin voidaan käyttää ns. Newtonin jäähtymisyhtälöä, jossa keskimääräinen lämmönsiirtymiskertoimen arvo voidaan määrittää käyttäen soviteyhtälöitä. Kuvassa on esitetty periaatekuva lämmönsiirtymiskertoimen  $\alpha$  suuruuden vaihtelusta laminaarisessa ja turbulentissa virtauksessa. Kuvassa  $\delta$  on rajakerroksen paksuus.



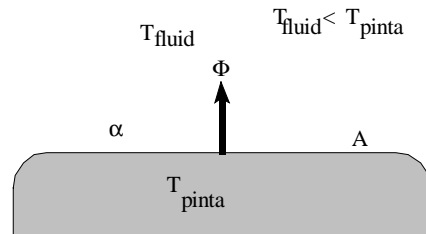
Newtonin jäähtymisyhtälön mukaan pinnan ja väliaineen välillä siirtynyt lämpövirta saadaan yhtälöistä

Yhtälöissä  $\alpha$  on kiinteän pinnan ja väliaineen välinen keskimääräinen lämmönsiirtymiskerroin ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),

$A$  on lämpöpinta-ala ( $\text{m}^2$ ),  $R$  on **lämpöresistanssi** ( $\text{K}/\text{W}$ ) ja  $T = T_{\text{pinta}} - T_{\text{fluid}}$  on lämpötilaero ( $\text{K}$ ), missä  $T_{\text{pinta}}$  on kiinteän pinnan lämpötila ja  $T_{\text{fluid}}$  on ympäröivän vapaan virtauksen lämpötila.

$$\begin{aligned} \phi &= \alpha A \Delta T = \frac{l}{R} \Delta T \\ R &= \frac{l}{\alpha A} \\ \phi'' &= \alpha \Delta T = \frac{l}{R''} \Delta T \\ R'' &= \frac{l}{\alpha} \end{aligned} \quad (6)$$

Tietyllä lämpötilaeron arvolla konvektiolla pinnan ja väliaineen välillä siirtyvä lämpövirta on sitä suurempi, mitä pienempi on lämpöresistanssin  $R$  arvo. Konvektiivisessa lämmönsiirrossa pieni lämpöresistanssi saavutetaan, kun lämmönsiirtymiskertoimen arvon ja lämmönsiirtopinta-alan tulo on suuri. Yhtälöstä nähdään, että lämmönsiirtokertoimen arvon ollessa pieni voidaan lämpöresistanssia pienentää suurettamalla lämmönsiirtopinta-alaa (rivat).



Konvektiivisessa lämmönsiirrossa käytetään keskimääräisen lämmönsiirtokertoimen määrittämiseen erilaisia dimensiottomien lukujen avulla esitettyjä soviteyhtälöitä. Mainittuja yhtälöitä on esitetty sekä vapaalle että pakotetulle konvektiolle erilaisille virtaustapauksille lämmönsiirron kirjoissa, esim. /3/ ja /4/. Lämmönsiirtokertoimen  $\alpha$  arvoon vaikuttavat mm. virtaavan aineen nopeus ja aineominaisuudet sekä virtauskanavan geometria. Lämmönsiirtoon vaikuttavia väliaineen aineominaisuuksia ovat mm. viskositeetti, lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpö.

Laitteiston ja virtauskanavien geometrialla voidaan vaikuttaa jäähdytystehoon sekä vapaassa että pakotetussa konvektiossa. Koteloinnin tai kaapin suunnittelussa on kiinnitettävä huomiota kotelon muotoon, käytettyihin materiaaleihin ja pinnan laatuun sekä jäähdytysilma-aukkojen sijaintiin. Kotelon sisään asennettävien komponenttilevyjen sijoituksessa on kiinnitettävä huomiota levyn asentoon, muotoon, materiaaleihin sekä komponenttilevyjen keskinäiseen sijoitteluun kotelon sisässä. Levyille asen-

nettavien komponenttien muoto, pintamateriaalit ja pinnan laatu sekä komponenttien keskinäinen sijainti levyllä vaikuttavat komponenttien jäähtymiseen. Vapaalla konvektiolla toteutetussa jäähtytyksessä säteilylämmönsiirron osuus on merkittävä.

### Säteilylämmönsiirto

Säteilylämmönsiirto on sähkömagneettista säteilyä, jossa lämpö siirtyy kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä siten, että pintojen välinen lämpötilaero pyrkii tasoittumaan. Kaikki pinnat säteilevät lämpötilansa perusteella, mutta nettolämpövirta tapahtuu kuumemmasta pinnasta kylmempään pintaan.

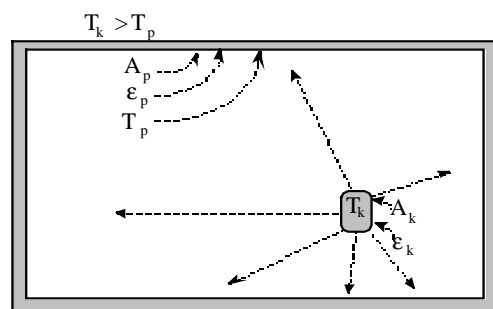
Pinnalle kohdistuvalle säteilylämpövirtalle on ominaista, että osa siitä heijastuu pois pinnalta ( $\rho$  heijastuskerroin), osa absorboituu pinnan sisään ( $\alpha$  absorptiokerroin) ja osa läpäisee pinnan ( $\tau$  läpäisykerroin).

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (7)$$

Pinnalle tulevan säteilylämpövirran jakautuminen, riippuu pinnan ominaisuuksista. Kiinteille, läpinäkymättömille pinnoille on ominaista, että niiden läpäisykerroin ( $\tau$ ) on nolla. Hyvin kiillotetuissa pinnoissa heijastuskerroin on suuri, jolloin suurin osa pinnalle tulevasta säteilylämpövirrasta heijastuu pois pinnasta pienen osan absorboituessa pintaan ( $\alpha = 1 - \rho$ , kun läpäisykerroin  $\tau = 0$ ).

Pinnalta säteilemällä lähtevän lämpövirran suuruus riippu pinnan lämpötilasta ja pinnan säteilyominaisuuksista. Pinnan emissiivisyys  $\epsilon$  kuvaa pinnan säteilytehokkuutta. Täydelliselle säteilijälle, joka on ns. musta kapale,  $\epsilon$ :n arvo on yksi. Pinnan emissiivisyyden arvo on lämpötilan, aallonpituuden ja säteilykulman funktio. Eri materiaalien emissiivisyyden arvoja on esitetty alan kirjallisuudessa.

Säteilylämmönsiirrossa kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välinen nettosäteilyvirta voidaan määrittää yhtälöllä





$$\phi = \frac{\sigma A_k (T_k^4 - T_p^4)}{\frac{1}{\varepsilon_k} + \left(\frac{A_k}{A_p}\right)\left(\frac{1}{\varepsilon_p} - 1\right)} \quad (8)$$

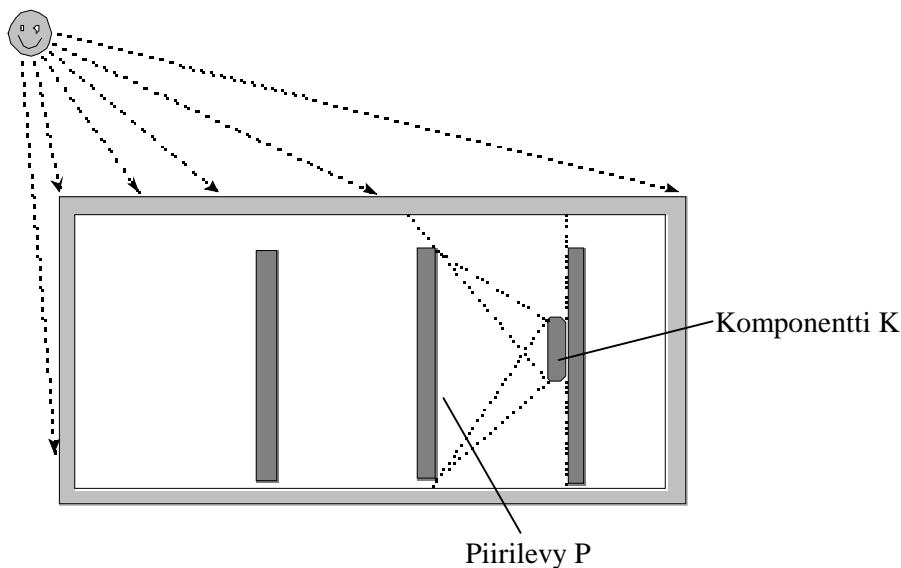
Jos kappaleen pinta-ala  $A_k$  on hyvin pieni verrattuna ympäröivän tilan pinta-alaan  $A_y$ , lähenee pinta-alojen suhde  $A_k/A_y$  arvoa nolla, jolloin netto-säteilyvirran yhtälö saadaan muotoon

$$\phi \approx \sigma A_k \varepsilon_k (T_k^4 - T_p^4) \quad (9)$$

missä Stefan-Boltzmannin vakio  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ .

Näkyvyyskertoimien avulla otetaan huomioon se, kuinka eri pinnat näkevät toisensa ja millainen nettosäteilyvirta pintojen välillä tapahtuu.

Komponentti K näkee osaltaan kotelon pintaa näkyvyyskertoimen ollessa  $F_{\text{komp-kotelon yläsivu}}$ . Toisaalta komponentti K näkee viereisen piirilevyn P näkyvyyskertoimen ollessa  $F_{\text{komp-piirilevy}}$  ja lisäksi komponentti näkee koteloinnin alalaidan näkyvyyskertoimen ollessa  $F_{\text{komp-kotelon alasisu}}$ .



Näkyvyyskertoimien summa on yksi.

$$F_{\text{komp-kotelon yläsivu}} + F_{\text{komp-komp.levy}} + F_{\text{komp-kotelon alasisu}} = 1 \quad (10)$$

Jokaisen komponentin näkemän pinnan ja komponentin K välillä tapahtuu säteilylämmönsiirtoa. Jokaisella pinnalla on tietty lämpötila ja emissiivisyys.

Säteilylämmönsiirron vaikutuksesta nettolämpövirta komponentin K ja ympäröivien pintojen välillä voidaan kirjoittaa muotoon

$$\phi \approx \sum (F_{k-i} \sigma A_k \varepsilon_k (T_k^4 - T_{pi}^4)) \quad (11)$$

Kun säteilylämmönsiirto pinnalle tai kahden pinnan välinen säteilylämmönsiirto halutaan estää, käytetään pintojen välillä säteilysuojia.

Säteilylämmönsiirrolla on merkitystä komponenttien jäähtyksessä, kun jäähtytys tapahtuu vapaalla konvektiolla. Säteilylämmönsiirron merkitys jäähtyksessä vähenee, kun jäähtytys tapahtuu pakotetulla konvektiolla.

#### LIITTEEN 1 LÄHTEET

1. Schlichting, H. Boundary-Layer Theory. USA. McGraw-Hill Book Co. 1977.
2. White, F. M., Viscous fluid flow. Second ed. New York. McGraw-Hill Book Co. 1991.
3. Incropera & DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Third ed. 1990. John Wiley & Sons.
4. Holman, J. P., Heat Transfer. McGraw-Hill Book Co. 1989.