

Henrik Mellberg

Liikuteltava sisäilman mittausjärjestelmä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

3.2.2013

Tekijä Otsikko	Henrik Mellberg Liikuteltava sisäilman mittaussjärjestelmä
Sivumäärä Aika	37 sivua + 6 liitettä 3.2.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	elektroniikka
Ohjaaja	yliopettaja Kari Salmi
<p>Tässä insinöörityössä tutkittiin sisäilmanlaadun mittauksessa käytettäviä ilmanmittausantureita, niiden toimintaperiaatteita sekä mitattavia suureita. Lisäksi suunniteltiin liikuteltava ilmanmittausjärjestelmä, jolla voidaan mitata sisäilman laatua.</p> <p>Työssä tutkittiin sisäilmanlaadun mittaamisen kannalta oleellisia ilmanmittausantureita ja tutustuttiin niiden toimintaperiaatteisiin, etuihin, haittoihin ja yleisiin sovellusalueisiin. Tietojen perusteella valittiin tämän työn kannalta oleelliset mitattavat suureet sekä parhaiten sopivat anturit ja anturityypit.</p> <p>Työtä varten suunniteltiin kaksi anturikorttia, joilla voidaan mitata sisäilman lämpötila, kosteus ja hiilidioksidipitoisuus. Anturikortit eroavat toisistaan hiilidioksidianturin ja virranhallinnan osalta. Työssä testattiin ilmanmittausantureiden toimintaa ja tarkasteltiin hiilidioksidiantureiden eroavaisuuksia. Anturikortit jäävät Metropolia Ammattikorkeakoulun opetuskäyttöön.</p>	
Avainsanat	sisäilma, ilmanlaatu, ilmanmittaus, anturi

Author Title	Henrik Mellberg Mobile indoor air quality metering system
Number of Pages Date	37 pages + 6 appendices 3 February 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Instructor	Kari Salmi, Principal Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to study the sensors, sensor types, and measured qualities used in the measurement of indoor air quality. Additionally, a mobile indoor air quality measurement system was designed, built and tested.</p> <p>Sensors used in the measurement of indoor air quality, their principles of operation, advantages and disadvantages as well as areas of use were investigated. On the basis of this information, the qualities to be measured and the appropriate sensors were selected.</p> <p>Two sensor boards, capable of measuring indoor air temperature, humidity and carbon dioxide content were designed. The boards differ from each other in the type of carbon dioxide sensor and power management. The functionality of the air quality system and the performance of the carbon dioxide sensors were observed. The sensor boards are given to the Metropolia University of Applied Sciences to be used for educational purposes.</p>	
Keywords	indoor air, indoor air quality, sensor

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

1 Johdanto	1
2 Sisäilman laatu	1
2.1 Sisäilman vaikutus viihtyvyyteen	1
2.2 Sisäilman laatuun vaikuttavat tekijät	2
2.2.1 Sisäilman kemiallinen koostumus	2
2.2.2 Sisäilman fysikaaliset ominaisuudet	3
2.2.3 Sisäilman hiukkaset	4
3 Ilmanmittausanturit	4
3.1 Lämpötila-anturit	5
3.1.1 Integroitu lämpötila-anturi	5
3.1.2 Vastuslämpötila-anturi	7
3.1.3 Termistori	9
3.1.4 Termopari	10
3.2 Kosteusanturit	13
3.2.1 Resistiivinen kosteusanturi	13
3.2.2 Kapasitiivinen kosteusanturi	14
3.2.3 Lämmönjohtavuuteen perustuva kosteusanturi	15
3.3 Hiilidioksidianturit	17
3.3.1 Kemiallinen hiilidioksidianturi	18
3.3.2 Infrapunahiilidioksidianturi	19

3.4 Happianturit	20
3.4.1 Lambda-anturi	20
3.4.2 Kemiallinen happianturi	22
4 Piirilevyn suunnittelu	23
4.1 Anturit	23
4.1.1 Hiilidioksidianturi	23
4.1.2 Kosteusanturi	26
4.1.3 Lämpötila-anturi	27
4.2 Virranhallinta	28
5 Piirilevyn valmistus ja testaus	29
5.1 Hiilidioksidiantureiden testaus	30
5.2 Lämpöanturin testaus	31
5.3 Kosteusanturin testaus	32
6 Yhteenveto	32
Lähteet	34
Liitteet	
Liite 1. Alphasense-piirikaavio	
Liite 2. Alphasense-osasijoittelukuva	
Liite 3. Alphasense-komponenttiluettelo	
Liite 4. Figaro-piirikaavio	
Liite 5. Figaro-osasijoittelukuva	
Liite 6. Figaro-komponenttiluettelo	

1 Johdanto

Tämä insinööriö käsittelee sisäilman mittauksessa käytettävää anturikorttia sekä siinä käytettäviä antureita. Sisäilmaa mittaavia sovelluksia on jo laajalti käytössä, mutta usein ne ovat osana kiinteistön automaatiota. Olemassa olevat kannettavat laitteet ovat kalliita tai erityiskäyttöön tarkoitettuja. Tässä työssä esitellään piirikortti, joka on helposti siirrettävä, hinnaltaan kohtuullinen sekä pienikokoinen. Lisäksi tutustutaan ilmanlaadun mittauksessa käytettäviin anturityyppeihin, niiden saatavuuteen, hintaan ja mitattaviin suureisiin. Anturikortti tulee Metropolia Ammattikorkeakoulun käyttöön sisäilman mittaukseen sekä opetustarkoitukseen.

Sisäilmasta mitataan ilman kosteus, hiilidioksidipitoisuus ja lämpötila. Anturikortti saa käyttöjännitteensä ladattavasta 3.7 V:n litiumpolymeeriakusta, ja siinä on analogiset mittaustietojen ulostulot sekä liitinpaikat, joilla kortille voidaan liittää erillinen mikrokontrolleri mittausdatan käsittelyä varten. Työssä käytetään valmiiksi kalibroituja antureita sisäisellä mittaustuloksen kompensoinnilla. Tällä tavoin käyttäjäystävällisyys sekä huollon tarve saadaan optimoitu.

2 Sisäilman laatu

2.1 Sisäilman vaikutus viihtyvyyteen

Sisäilma on sisätiloissa hengitettävä ilma, jonka koostumus ja fyysiset ominaisuudet vaikuttavat sisätilojen viihtyvyyteen. Hyvä sisäilma lisää viihtyvyyttä, parantaa työtehoa ja vähentää sairauksia. Huono sisäilma heikentää työtehoa ja oppimiskykyä, herkistää sairauksille ja lisää oireilua. Ilmanlaadun tarkkailulla ja ilmanvaihdolla on suuri merkitys työtehon ja terveyden edistämiseksi. Puutteet sisäilman laadussa voivat aiheuttaa myös rakenteellisia ongelmia kuten home- tai kosteusvaurioita.

Sisäilman laatuun vaikuttavat sekä ilman fysikaaliset ominaisuudet kuten lämpö, ilman kosteus ja kemiallinen koostumus sekä ilmassa olevat hiukkasmaiset epäpuhtaudet kuten pöly tai home. Näihin ominaisuuksiin pyritään vaikuttamaan lämpötilaa säätämällä, tuulettamalla sekä puhdistamalla sisäilmaa siihen tarkoitettulla laitteistolla. [1.]

2.2 Sisäilman laatuun vaikuttavat tekijät

Sisäilman laatuun vaikuttavat sen kemiallinen koostumus, fyysiset ominaisuudet ja siinä leijuvat pienhiukkaset. Näihin pyritään vaikuttamaan jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa sekä vanhojen rakennusten tapauksessa ilmanvaihtojärjestelmiä uusittaessa. Mikäli ilmanlaadussa havaitaan puutteita, tehdään ilmanlaadun mittaus ja ryhdytään tarpeellisiin toimiin ongelmien korjaamiseksi. Yleensä ongelmista selvittää ilmanvaihtojärjestelmän päivityksellä mutta joissain tapauksissa voidaan joutua tekemään peruskorjauksia esimerkiksi rakenteissa piilevän homeen tai kosteuden takia. [1; 2.]

2.2.1 Sisäilman kemiallinen koostumus

Maan ilmakehä koostuu suurimmaksi osaksi typestä (78.1 %) sekä hapesta (20.9 %). Näiden lisäksi ilmassa on pieniä määriä jalokaasuja, hiilidioksidia, vesihöyryä sekä jäämiä noin kolmesta tuhannesta muusta yhdisteestä. Yleisimmät maan ilmankehän koostavista aineista esitetään taulukossa 1:

Taulukko 1. Ilmakehän yleisimmät ainesosat [3, s. 69]

Yhdiste	Osuus prosentteina
typpi	78,1
happi	20,9
argon	0,93
hiilidioksidi	0,039
neon	0,0018
helium	0,0005
metaani	0,0002
krypton	0,00011
vety	0,00005
otsoni	0,000004

Kuten taulukossa 1 esitettiin, suurin osa ilmakehän yhdisteistä esiintyy erittäin pieninä pitoisuuksina. Tämä asettaa suuria vaatimuksia ilmanmittauksessa käytettävien antureiden mittaustarkkuudelle ja kalibrointiin. Huomataan myös, että pienetkin epätoivottujen ainesosien, kuten hiilidioksidin, pitoisuudet voivat vaikuttaa heikentävästi sisäilman laatuun. [1; 3, s. 68 - 69.]

Hengittäessään ihminen vetää ilmaa keuhkoihin ja siirtää happea keuhkorakkuloista verenkiertoon. Samalla elimistöstä siirretään hiilidioksidia keuhkojen kautta ilmaan, joka poistuu kehosta ulos hengitettäessä. Mikäli ilmanvaihto ei ole riittävää, kertyy ilmaan hiilidioksidia, joka korvaa ihmisen ottaman hapen, jolloin hiilidioksidipitoisuus ilmassa nousee. Pitkällä aikavälillä tämä aiheuttaa väsymystä, huonoa oloa ja tajunnantilan alenemista.

Mikäli hiilidioksidipitoisuus nousee yli kahdeksan prosentin, seuraa tajunnan menetys ja lopulta kuolema. Koska jo pieni määrä hiilidioksidia nopeuttaa hengitystä ja aiheuttaa väsymystä, tulee sen taso pyrkiä pitämään alle 1,2 promillen työtehon ja mukavuuden varmistamiseksi. [4, s. 259 - 260; 5.]

2.2.2 Sisäilman fysikaaliset ominaisuudet

Sisäilman fysikaaliset ominaisuudet koskevat vain ilmaa, eikä niissä oteta huomioon mahdollisia kemiallisia tekijöitä tai pienhiukkasia. Tilan viihtyvyyteen vaikuttavia sisäilman tärkeimpiä fysikaalisia ominaisuuksia ovat ilman lämpötila, kosteus sekä ilman virtaus eli veto. Sisäilman lämpötilasta ja kosteudesta on annettu ohjeet sisäilmasto- luokituksessa, joka toimii rakennusalan ohjenuorana sisäilmastoa suunniteltaessa.

Lämpötilalla on suurin vaikutus sisätilojen viihtyvyyteen. Lämpötilalle ihanteellinen arvo asettuu 21 - 22 °C:seen, jolloin lämpötilaan tyytyväisten ihmisten osuus on suurin. Lämpötilaan on helppoa vaikuttaa jo rakennusten suunnitteluvaiheessa varmistamalla riittävä rakennuksen tiivistys. Toimistoissa, kouluissa ja yleisissä tiloissa on usein lisäksi ilmastointijärjestelmä, jolla voidaan säätää lämpötila haluttuun arvoon.

Sisäilman kosteus vaikuttaa sekä ihmisten viihtyvyyteen että rakennuksen kuntoon. Liian matala ilmankosteus ärsyttää suun ja nenän limakalvoja, kuivattaa silmiä ja rasittaa ihoa. Liian korkea ilmankosteus edistää homeen ja mikrobin kasvua rakennuksissa ja aiheuttaa epämiellyttävän ja nihkeän olon.

Sisäilman kosteuden tulee olla vähintään 30 prosenttia ja enintään 60 prosenttia, jotta sisäilmanlaatu olisi tyydyttävä. Alle 50 prosentin suhteellista kosteutta suositetaan, koska korkeampi arvo voi edistää mikrobien ja homeen kasvua.

Vedon tunne syntyy, kun iholta siirtyy lämpöä ympäröivään ilmaan. Lämmön siirtymiseen vaikuttavat ilman liike ja lämpötila, vaatetus sekä lämpösäteily. Vedon tuntee herkimmin niskassa, nilkoissa ja muilla paljailla alueilla. Vedon tunne on yksilöllistä ja aiheuttaa ongelmia vain, kun sisäilma on viileää. Tällöin veto voimistaa kylmän tunnetta ja aiheuttaa siten epämukavuutta.

Lämpimissä tiloissa veto tehostaa ihon viilenemistä ja parantaa näin lämmönsietoa. Tästä syystä vedosta aiheutuu ongelmia lähinnä kylminä vuodenaikoina tai liian viileäksi säädetyissä tiloissa. Usein ongelmia syntyy ilmastoinnin ja kylmien pintojen, kuten ikkunoiden aiheuttamasta ilman liikkeestä ja lämpösäteilystä. Ongelmia voidaan välttää ilmastoinnin hyvällä suunnittelulla, hyvin eristetyillä ikkunoilla ja asianmukaisella vaateuksella. [6; 7; 8; 9.]

2.2.3 Sisäilman hiukkaset

Ilmassa oleviksi hiukkasiksi kutsutaan kiinteitä kappaleita, joiden koko vaihtelee muutamasta mikrometrinä muutamaan kymmeneen mikrometriin. Tällaisia ovat esimerkiksi pöly, savu, mikrobit tai siitepöly. Näitä sisään hengitettäessä ne voivat päätyä nenän limakalvoille ja aiheuttaa ärsytystä. Pienimmät kappaleet voivat päätyä syväälle keuhkoihin ja aiheuttaa yskää, keuhkojen vajaatoimintaa, astmaa, allergisia reaktioita ja jopa sydänoireita.

Sisäilman hiukkasten määrää pyritään alentamaan tuloilmaa suodattamalla ja sisätilojen puhtaudella. Lisäksi tulee varmistaa, ettei tilassa ole rakenteellisia ongelmia, kuten hometta, kosteutta tai puutteita pintakäsittelyssä, kuten esimerkiksi hilseilevää maalia. [6; 8.]

3 Ilmanmittausanturit

Anturia voidaan kutsua muuntajaksi, joka muuttaa fyysisen suureen muutoksen sähköiseksi signaaliksi. Fyysisen suureen muuttuessa, anturin lähettämä signaali muuttuu

vastaavasti, ja tämä signaali voidaan muuttaa luettavaksi arvoksi. Ilmaa mittaavat anturit voivat mitata ilman fyysisiä ominaisuuksia, esimerkiksi lämpötilaa ja kosteutta tai kemiallisia ominaisuuksia kuten ilman sisältämiä kaasuja.

3.1 Lämpötila-anturit

Elektroniset lämpötila-anturit voidaan jakaa kahteen ryhmään riippuen siitä, ovatko ne kosketuksessa mitattavaan kohteeseen. Koskettaviin antureihin kuuluvat integroidut lämpöanturit, vastuslämpötila-anturit, termistorit ja termoparit. Ei-koskettavia antureita ovat infrapuna- ja kuituoptiset lämpöanturit.

Tässä työssä keskitytään koskettaviin lämpöantureihin, sillä infrapuna- ja kuituoptiset lämpöanturit ovat pikemminkin mittauslaitteita. Anturityypin valintaan vaikuttavat muun muassa mitattavat lämpötilat, mittausympäristö ja tarkkuusvaatimukset. Seuraavaksi esitellään yleisimmät lämpötilan mittauksessa käytettävät anturityypit. [10; 11.]

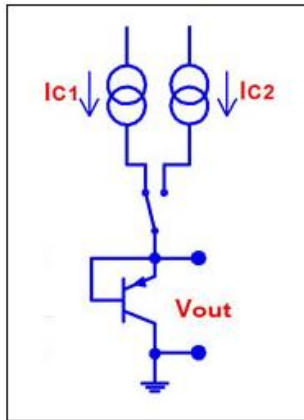
3.1.1 Integroitu lämpöanturi

Integroidun lämpöanturin toiminta perustuu lämpötilan aiheuttamaan jännitteen tai virran muutokseen anturin ulostulossa. Ulostulo voi myös olla digitaalinen, tai se voidaan suunnitella jonkin liitännästandardin mukaiseksi.

Integroidut lämpöanturit ovat hyvin laajalti käytössä sovelluksissa, joissa käyttölämpötila voi vaikuttaa laitteen tai piirilevyn toimintaan. Tällaisia sovelluksia ovat lämpötilan valvonta esimerkiksi tietokoneissa, televisioissa tai muissa elektronisissa laitteissa. Anturit on suunniteltu pakattaviksi yleisimpiin käytössä oleviin koteloihin, jolloin ne voidaan helposti suunnitella osaksi piirilevyä.

Yleisesti integroidun lämpöanturin toiminta perustuu bipolaariseen piidiodiin, jonka jännite on riippuvainen sitä ympäröivästä lämpötilasta. Integroidussa lämpöanturissa diodi korvataan pnp-transistorilla, jonka kanta on kytketty oikosulkuun emitterin kanssa. Transistorin kollektorille kytketään kaksi erisuuruista virtalähdettä, jotka kytkeytyvät päälle vuorotellen muuttaen ulostulojännitettä.

Kuvassa 1 esitetään integroidussa lämpöanturissa käytettävä transistorikytkentä virtalähteineen:



Kuva 1. Lämpötilaa mittaava transistorikytkentä [12]

Transistorin ulostulojännite V_{out} on riippuvainen kollektorille tulevasta virrasta sekä lämpötilasta ja saadaan laskettua yhtälöllä 1:

$$\Delta V_{out} = (kT/q) \ln (I_{C1}/I_{C2}) \quad (1)$$

ΔV_{out}	ulostulojännitteiden erotus
k	Boltzmannin vakio
T	lämpötila kelvinasteina
q	elektronin varaus
I_{C1}	ensimmäisen virtalähteen virta
I_{C2}	toisen virtalähteen virta

Integroituja lämpöantureita suunniteltaessa on yleistä valita virralle I_{C2} kymmenen kertaa I_{C1} :tä suurempi arvo. Näin toimittaessa anturin lämpövaste on noin $200 \mu\text{V}/\text{C}^\circ$. Integroidussa anturissa on transistorikytkennän lisäksi vahvistin ulostulosignaaliille sekä muita komponentteja, jotka suorittavat kompensointi- ja muita toimintoja, joita piiri tarvitsee toimiakseen.

Integroidun lämpötila-anturin mittausalue on tyypillisesti noin $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ - $150 \text{ }^\circ\text{C}$, ja mittaustarkkuus voi olla jopa $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Korkein tarkkuus saavutetaan yleensä vain rajatulla mittausalueella, joka riippuu valitusta anturista.

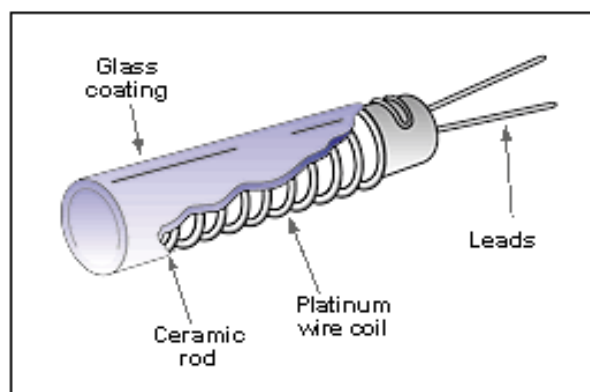
Näiden antureiden etuna ovat alhaiset valmistuskustannukset, tarkkuus, helppokäyttöisyys sekä tasainen laatu. Tästä syystä ne soveltuvat kulutuselektroniikkaan, jossa pyritään mahdollisimman pieniin suunnittelu- ja valmistuskustannuksiin massavalmistuksen ja yksinkertaisten suunnitteluratkaisujen avulla. Integroitujen lämpöantureiden haittapuolina on rajallinen käyttölämpötila ja mittaussala sekä hidas vasteaika. [13; 14; 15.]

3.1.2 Vastuslämpötila-anturi

Vastuslämpötila-anturin toiminta perustuu anturissa olevan vastuslangan resistanssin muuttumiseen lämpötilan suhteen. Tämä suhde on riippuvainen anturin vastuslangan ominaisuuksista, jota kuvataan symbolilla α , ja se on anturivalmistajan määrittelemä.

Anturissa on platinasta, nikkelistä tai kuparista tehty vastuslanka, joka on kierretty ke-raamisen tai lasisen ytimen ympärille ja suljettu suojaavaan kuoreen. Resistanssia mitataan johtamalla matala virta anturin vastuslankaan. Koska tämä voi lämmitellä vastuslankaa, suunnittelussa tulee ottaa huomioon lämmön tehokas siirto pois vastuslangasta.

Kuvassa 2 esitetään vastuslämpötila-anturin rakenne ja tärkeimmät osat. Anturi kestää erittäin matalia sekä erittäin korkeita lämpötiloja, ja mittaussala vaihtelee läheltä absoluuttista nollapistettä noin 600 °C:seen asti. Laajan mittaussalueen ja korkeiden lämpötilojen keston ansiosta vastuslämpötila-antureita käytetään usein prosessi- ja muussa teollisuudessa.



Kuva 2. Vastuslämpötila-anturin rakenne [16]

Yleisimmin vastuslämpötila-anturin vastuslanka valmistetaan platinasta, sillä sen resistanssin ja lämpötilan suhde on lähes lineaarinen laajalla lämpötila-alueella.

Vastuslämpötila-anturin vastuslangan resistanssi muuttuu lähes lineaarisesti lämpötilan suhteen, tätä suhdetta kuvataan yhtälöllä 2:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad (2)$$

R_{100} vastuslangan resistanssi 100 °C:ssa
 R_0 vastuslangan resistanssi 0 °C:ssa

Yhtälöstä 2 laskettua α :n arvoa käytetään vastuslangan lämpötilan ja resistiivisyyden suhteen lineaarisessa approksimaatiossa. Tyypillisesti lanka mitoitetaan standardin BS EN 60751:1996 mukaan siten, että resistanssi on 100 Ω nollassa celsiusasteessa. Puhtaalla platinalla α on 0.003925 °C⁻¹, ja vastuslämpötila-antureissa käytettävän platinasta tehdyn vastuslangan α on standardien IEC 6075 ja ASTM E-1137 mukaisesti 0.00385 °C⁻¹. Kun α :n arvo tiedetään, voidaan anturi kalibroida. Kalibrointi voidaan tehdä joko ns. kiinteän pisteen kalibrointina tai vertauskalibrointina.

Kiinteän pisteen kalibroinnissa anturi upotetaan altaaseen, jossa on puhdasta vettä, sinkkiä, argonia tai muuta ainetta tarkasti säädetyssä lämpötilassa. Anturin mittaama lämpötila asetetaan samaksi kuin altaassa. Koe toistetaan eri lämpötiloissa riippuen anturille suunnitellusta käyttöympäristöstä ja mittausalueesta. Näin voidaan saavuttaa erittäin korkea mittaustarkkuus sekä toistettavuus. Kiinteän pisteen kalibroinnin tarkkuus on ± 0.001 °C, ja se on perustana ITS-90-standardille, jossa säädetään lämpötila-kalibroinnin tarkkuusvaatimuksista.

Vertauskalibroinnissa anturi upotetaan altaaseen, jossa on valmiiksi kalibroitu anturi referenssipisteenä. Kalibroitavana oleva anturi kalibroidaan referenssianturin mukaan samanarvoiseksi. Menetelmän etuna on mahdollisuus kalibroida suuri määrä antureita koneellisesti yhdellä kerralla, ja se soveltuu siten antureiden massavalmistukseen. Menetelmän kalibrointitarkkuus ei saavuta kiinteän pisteen menetelmällä saavutettavaa tarkkuutta, mutta se on riittävä teollisuudessa käytettävien antureiden kalibrointiin.

Vastuslämpötila-antureiden etuina ovat tarkkuus, laaja mittausala, monikäyttöisyys sekä stabiilius. Termistoreihin verrattuna vastuslämpötila-anturin mittausalue ja stabiilius ovat parempia.

Vastuslämpötila-antureiden haittapuolia ovat käyttölämpötila, joka ei saa ylittää 660 °C. Tätä korkeammassa lämpötiloissa vastuslankaan voi joutua epäpuhtauksia, jotka vääristävät mittaustuloksia. Erittäin matalissa, noin -270 °C:n lämpötiloissa vastuslangan resistiivisyyteen vaikuttavat lähinnä langassa olevat epäpuhtaudet, eikä lämpötilasta saada luotettavia mittaustuloksia. Termistoreihin verrattuna vastuslämpötila-anturi ei ole yhtä herkkä pienille lämpötilan muutoksille, ja vasteaika on pidempi. [12; 17; 18; 19.]

3.1.3 Termistori

Termistorin toimintaperiaate on sama kuin vastuslämpötila-antureilla. Erona on se, että puhtaan metallilangan sijaan vastuslanka on keraaminen tai polymeeri. Termistorit ovat vastuslämpötila-antureita tarkempia, mutta niiden toiminta-alue on kapeampi. Termistori on rakenteeltaan samanlainen kuin vastus, mutta sen vastusarvo on suunniteltu muuttumaan lämpötilan mukaan. Tämä lämpötilan ja resistanssin suhde olettaen, että suhde on lineaarinen, kuvataan yhtälöllä 3:

$$\Delta R = k \Delta T \quad (3)$$

ΔR	resistanssin muutos
k	vastuksen lämpötilakerroin
ΔT	lämpötilan muutos

Termistorit voidaan jakaa kahteen tyyppiin riippuen siitä, onko vastuksen lämpötilakerroin positiivinen vai negatiivinen. Lämpötilakerroimen valinnalla voidaan vaikuttaa mitaustarkkuuteen, käyttölämpötilaan ja lämpövasteeseen. Toisin kuin termistorissa, tavallisen vastuksen resistanssi ei saa muuttua lämpötilan mukaan, jolloin lämpötilakerroin pyritään asettamaan nolllaksi.

Koska yhtälö 3 toimii vain rajatulla lämpötila-alueella, kuvataan lämpötilan ja resistanssin suhdetta yleensä käyttämällä Steinhart-Hartin yhtälöä:

$$1/T = a + b \ln(R) + c(\ln(R))^3 \quad (4)$$

T	lämpötila kelvinasteina
a, b, c	ns. laitekohtaiset Steinhart-Hart –parametrit
R	resistanssi ohmeina

Steinhart-Hartin yhtälöllä saavutetaan noin 0.02 °C:n laskennallinen tarkkuus 200 °C:n lämpötila-alueella. Steinhart-Hart-parametrit, jotka yhtälössä 4 kuvattiin kirjaimilla a , b ja c , riippuvat käytettävistä vastusmateriaaleista.

Termistorin etuna vastuslämpötila-antureihin verrattuna on pienempi koko, yksinkertainen rakenne ja halvempi hinta. Tämän lisäksi niillä on parempi erottelukyky pienten lämpötilanmuutosten suhteen. Yksinkertaisuutensa vuoksi ne soveltuvat paremmin massavalmistukseen ja ovat vastuslämpötila-antureita suositumpia matalampien lämpötilojen mittauksessa.

Koska resistanssi laskee korkeissa lämpötiloissa epälineaarisesti, termistorit eivät sovellu erittäin korkeiden lämpötilojen mittaukseen. Korkein suositeltu käyttölämpötila rajoittuu noin +200 °C:seen. Tätä korkeammissa lämpötiloissa suositetaan vastuslämpötila-antureita tai termopareja. Matalampien lämpötilojen mittaukseen termistorit ovat suositumpia niiden halvan hinnan ja pienten lämpötilaerojen erottelukyvyn vuoksi. [20; 21; 22; 23.]

3.1.4 Termopari

Termoparin toiminta perustuu kahden vastuksen metallien liitoksessa syntyvän, lämpötilasta riippuvan jännitteen mittaamiseen. Toinen vastuspareista pidetään tunnetussa vertailulämpötilassa ja toinen mitattavassa lämpötilassa. Vastusparien lämpötilaerojen noustessa, myös niiden välinen jännite nousee. Tätä jännite-eroa tarkasteltaessa voidaan selvittää mitattava lämpötila. Vastusparien lämpötilaerojen synnyttämä jännite perustuu seebeck-ilmiöön.

Tämä ilmiö voidaan kuvata yhtälöllä 5:

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (5)$$

V	jännite voltteina
T_1	yhden vastuksen lämpötila
T_2	toisen vastuksen lämpötila
S_A ja S_B	vastusten <i>seebeck</i> -kertoimet
dT	metalliparien lämpötilojen erotus

Seebeck-kertoimilla kuvataan metallin lämpötilaeron funktiona tuottamaa jännitettä. Yhtälöä 5 käytetään silloin, kun *seebeck*-kertoimet eivät ole lämpötilan muutoksen suhteen lineaarisia. Mikäli näin kuitenkin on, jännite voidaan approksimoida yhtälöllä 6:

$$V = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1) \quad (6)$$

V	jännite voltteina
T_1	yhden metalliparin lämpötila
T_2	toisen metalliparin lämpötila
S_A ja S_B	metalliparien <i>seebeck</i> -kertoimet

Termopareissa voidaan käyttää eri metalleja halutun lämpövasteen, mittaustarkkuuden ja käyttölämpötilan saavuttamiseksi. Termoparit jaetaan eri luokkiin, riippuen valituista materiaaleista ja ominaisuuksista. Vastusmateriaalina käytetään yleensä kahden tai useamman metallin seosta. Seokset valitaan hinnan, saatavuuden, käyttötarkoituksen ja kemiallisten ominaisuuksien perusteella.

Yleisimmin käytetyt termoparit on jaettu kahdeksaan eri luokkaan tai tyyppiin, jotka kuvataan omalla kirjaimellaan. Luokat on jaettu sen mukaan, mitä materiaaleja vastuksissa käytetään, ja mihin käyttölämpötiloihin ne soveltuvat. Taulukossa 2 (ks. seur. s.) esitetään yleisimmät termoparien luokat, niiden mittaalueet ja yleisimmin käytetyt metalliseokset:

Taulukko 2. Termoparien luokat, mittausalueet ja materiaalit [24]

Luokka	Mittausalue (°C)	Materiaali
K	-180 ... +1 300	Chromel
J	-180 ... +800	Rauta-konstantaani
N	-270 ... +1 300	Nicrosil-nisil
R	-50 ... +1 700	Platina-rodium
S	-50 ... +1 750	Platina-rodium
B	0 ... +1 820	Platina-rodium
T	-250 ... +400	Kupari-konstantaani
E	-40 ... +900	Chromel-konstantaani

Taulukossa 2 esitetyt materiaalit *konstantaani*, *chromel* ja *nisil* ovat vastuksiin ja puoli-johteisiin kehitettyjä metalliseoksia. *Konstantaani* sisältää 55 % kuparia ja 45 % nikkeliä. *Chromel* sisältää 90 % nikkeliä ja 10 % kromia. *Nisil* sisältää 95.6 % nikkeliä ja 4.4 % piitä.

Termoparin etuna muihin lämpöantureihin verrattuna on niiden laaja mittausalue ja korkeiden lämpötilojen kesto. Niitä voidaan käyttää paljon korkeammissa lämpötiloissa kuin termistoreita tai vastuslämpötila-antureita, ja niiden tarkkuus erittäin matalissa lämpötiloissa on suurempi. Koska termopareilla voidaan mitata yli 2 000 °C:n lämpötiloja, käytetään niitä usein metalliteollisuudessa sulan metallin lämpötilavalvonnassa.

Koska termopari synnyttää jännitteen lämpötilaerojen avulla, voidaan niillä myös tuottaa sähköä. Tuotettua sähköä voidaan käyttää osana jotakin sovellusta, esimerkiksi releen sulkemiseen osana prosessin lämpötilan ylärajan valvontaa.

Termoparin haittapuolina on niiden heikompi tarkkuus verrattuna termistoreihin tai vastuslämpötila-antureihin. Termopareilla voidaan saavuttaa yleisesti vain noin 1 °C:n tarkkuus, mikä ei riitä kaikkiin sovelluksiin. Lisäksi niiden antama signaali on voimakkuudeltaan heikko ja altis häiriöille, mikäli sähkömagneettinen suojaus on puutteellista. [25; 26; 27.]

3.2 Kosteusanturit

Kosteusanturi, tai hygrometri mittaa sitä ympäröivän ilman kosteuspitoisuutta. Yleisessä käytössä olevien elektronisten kosteusantureiden toiminta perustuu ilmankosteuden muutoksesta johtuvaan signaalin muuttumiseen. Signaalin muutos syntyy, kun ilmankosteus vaikuttaa anturissa olevaan ilmankosteuteen reagoivaan elementtiin. Elementin vaikutus signaaliin voi perustua ilmankosteuden aiheuttamaan kapasitanssin, resistanssin, tai lämmönjohtavuuden muutokseen.

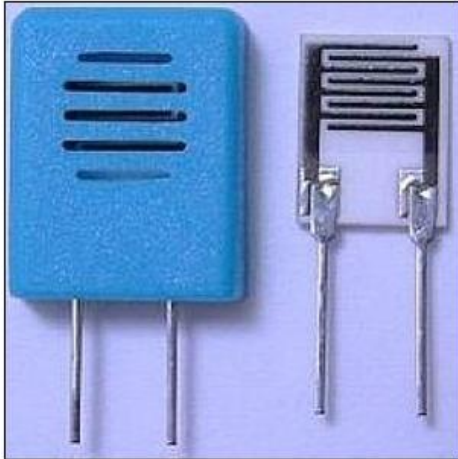
Edellä mainittujen anturityyppien lisäksi on olemassa erilaisia kosteusantureiden kalibrointiin tarkoitettuja huipputarkkoja anturityyppejä. Tällaisia ovat esimerkiksi gravimetrisen hygrometri, joka mittaa ilmasta otetusta näytteestä siinä olevan veden painon.

Kosteusantureita tarkastellessa tulee ottaa huomioon, mittaako anturi suhteellista vai absoluuttista ilmankosteutta. Absoluuttinen ilmankosteus tarkoittaa ilmassa olevan veden massaa suhteutettuna ilman tilavuuteen ja ilmoitetaan yleisesti grammoina kuutiometriä kohden. Suhteellinen ilmankosteus ilmaisee ilmassa olevan veden määrää verrattuna korkeimpaan mahdolliseen määrään, mitä samassa lämpötilassa oleva ilma voi sisältää. Suhteellinen ilmankosteus ilmaistaan prosentteina, ja sitä käytetään yleisimmin ilmankosteusantureiden mittaustulosten yksikkönä. [28.]

3.2.1 Resistiivinen kosteusanturi

Resistiivisen kosteusanturin toiminta perustuu ilmankosteuden aiheuttamaan resistanssin muutokseen anturielementissä. Muutoksen voimakkuus riippuu anturin ominaisuuksista ja ilmoitetaan yleensä anturin datalehdessä. Ilmankosteuden muuttuessa, anturielementin resistanssi, ja samalla ulostulojännite muuttuu vastaavasti. Kun tunnetaan ulostulojännite tietyssä ilmankosteudessa, ulostulojännitteen muutoksesta voidaan laskea ilmankosteuden muutos.

Resistiivinen kosteusanturi koostuu yleensä metallisesta elektrodiparista, joiden välissä on suola- tai polymeeriseoksella käsitelty substraatti. Tämä rakenne esitetään kuvassa 3 (ks. seur. s.), jossa oikealla puolella on resistiivinen kosteusanturi ilman koteloa, ja vasemmalla on samanlainen anturi tyyppillisessä ilmaa läpäisevässä kotelossa:



Kuva 3. Resistiivisen kosteusanturin rakenne [29]

Anturin substraatti absorboi kosteutta sitä ympäröivästä ilmasta, jolloin sen resistanssi muuttuu. Koska absorboituvan kosteuden määrä on riippuvainen ilmankosteudesta, voidaan resistanssin muutoksen avulla laskea ilman suhteellisen kosteuden muutos.

Resistiivisen kosteusanturin etuina ovat yksinkertainen rakenne ja halpa hinta. Lisäksi ne voidaan tarvittaessa uusia ilman uudelleenkalibroinnin tarvetta. Halpa hinta yhdistettynä kohtuulliseen noin 3 suhteellisen kosteusprosentin tarkkuuteen tekevät resistiivisestä kosteusanturista suosittua koulutus- ja harrastekäytössä.

Resistiivisen kosteusanturin haittapuolina on niiden tarve oheiselektronikalle. Resisttiivinen kosteusanturi vaatii toimiakseen sisääntuloonsa vaihtojännitteen, jotta välttyttäisiin anturielementin polarisaatiolta. Lisäksi, koska resistanssi ei ole ilmankosteuden tai lämpötilan suhteen lineaarinen, tarvitaan usein myös oheiselektronikkaa ulostulosignaalin käsittelyyn. Näistä ominaisuuksista huolimatta resistiivinen kosteusanturi on hyvä valinta silloin, kun etusijalla ovat matalat kustannukset ja alhainen huollon tarve. [30, 31, s. 273 - 274.]

3.2.2 Kapasitiivinen kosteusanturi

Kapasitiivisen kosteusanturin toiminta perustuu ilmankosteuden aiheuttamaan kapasitanssin muutokseen. Ilmankosteuden muuttuessa muuttuu anturin kapasitanssi vastaavasti, ja tätä kapasitanssia tarkastelemalla voidaan laskea ilman suhteellinen kosteus.

Kapasitiivinen kosteusanturi koostuu kahdesta elektrodista, joiden välissä on keraaminen polymeerillä pinnoitettu substraatti. Mittauspinta on peitetty mikrohuokoisella metallilla, joka päästää kosteuden läpi, mutta estää epäpuhtauksien pääsyn anturille. Kosteus päätyy kahden elektrodin välillä olevalle polymeerille, joka absorboi sen. Kosteuden vaikutuksesta polymeerin dielektrinen vakio muuttuu muuttaen anturin kapasitanssia.

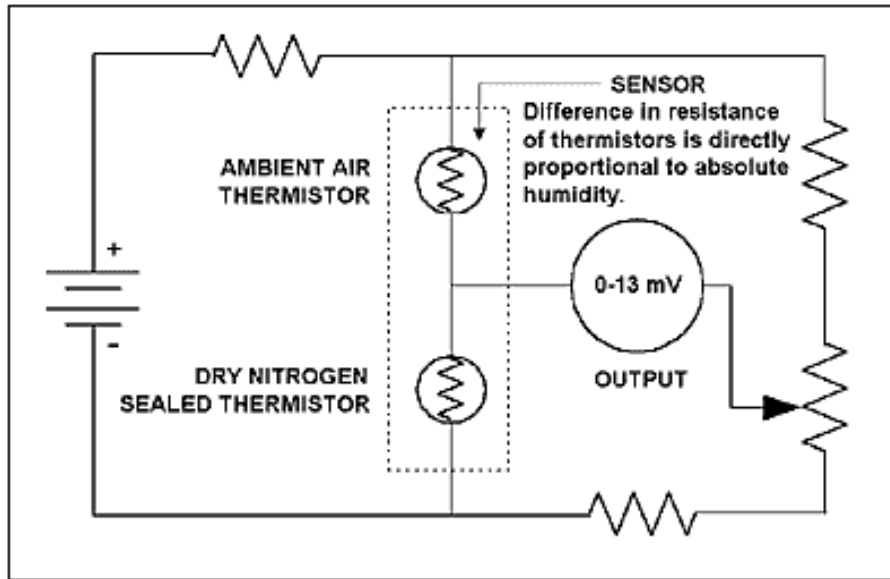
Koska polymeerin dielektrinen vakio muuttuu lähes lineaarisesti kosteuden mukana, myös anturin kapasitanssi on lähes lineaarinen ilmankosteuden suhteen. Tämän takia kapasitiivisillä kosteusantureilla voidaan saada hyvin tarkkoja mittaustuloksia.

Kapasitiivisten kosteusantureiden etuja resistiivisiin kosteusantureihin verrattuna ovat parempi tarkkuus ja yksinkertaisempi kytkentä, korkeiden lämpötilojen sekä kosteuden sieto. Koska kapasitiivinen kosteusanturi ei tarvitse lämpöanturia korjaamaan lämpötilan vaikutusta mittaukseen, ja koska ilmankosteuden aiheuttama kapasitanssin muutos on lähes lineaarinen, sillä ei ole yhtä suurta tarvetta linearisoinnille. Tällä saavutetaan pienempi ja yksinkertaisempi rakenne piirilevyllä, jolloin valmistuskustannukset pysyvät alhaisempina.

Kapasitiivisten kosteusantureiden haittapuolina ovat tarve vaihtovirtasignaaliin sisään-tulossa sekä heikko signaali-kohinasuhde ulostulossa. Koska kapasitanssin muutos kosteuden suhteen on melko pieni, ja anturin kapasitanssi on satojen pikofaradien luokkaa, ulostulossa ei saa olla pitkiä johtoja tai muuta häiriöille altistavaa. Kapasitiivinen kosteusanturi tarvitsee hyvin suunnitellun ja häiriöiltä suojatun piirilevyn toimiakseen luotettavasti. [29, 31, s. 272 - 273.]

3.2.3 Lämmönjohtavuuteen perustuva kosteusanturi

Lämmönjohtavuuteen perustuvassa kosteusanturissa on kaksi siltaan kytkettyä termistoria, joiden välistä ulostulojännitettä tarkastellaan. Kuvassa 4 (ks. seur. s.) esitetään yksi yleinen termistorin kytkentätapa. Toinen termistoreista on suljettu hermeettiseen, tyypellä täytettyyn kapseliin. Toinen termistori on ilmaa läpäisevässä suojakuoressa.

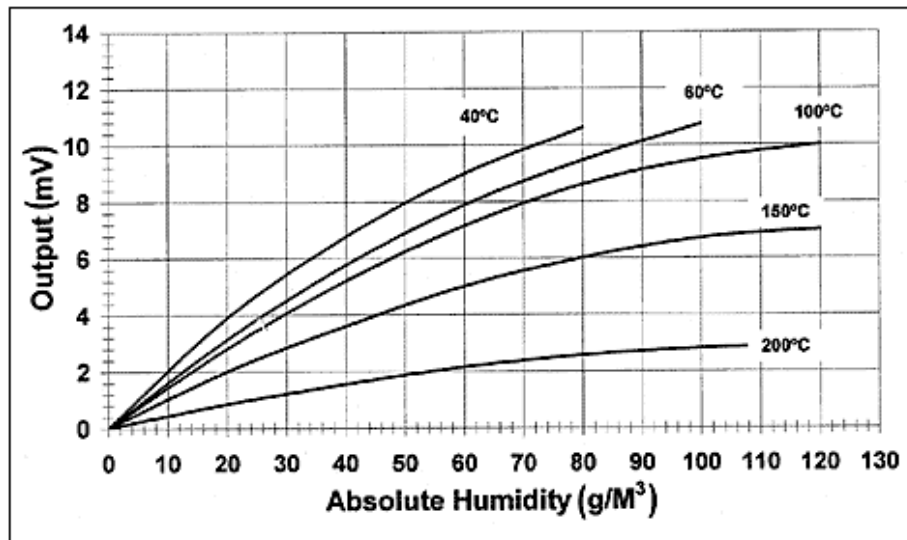


Kuva 4. Yleinen termistorikytkentä kosteusanturissa [31, s. 275]

Kun termistoreihin johdetaan virtaa, ne lämpenevät. Koska toinen termistoreista on suljetussa tyyppikapselissa, siitä haihtuva lämpömäärä on suurempi kuin avoimessa kuoressa olevassa termistorissa. Tämä johtuu siitä, että kuivan typen ja kostean ilman lämmönjohtavuudet ovat erisuuruisia.

Suljetussa kapselissa olevan termistorin lämpöhäviö pysyy vakiona, kun taas avoimessa kapselissa olevan termistorin lämpöhäviö on riippuvainen sitä ympäröivän ilman kosteudesta. Näin ollen termistorien resistanssien erot ovat suoraan absoluuttiseen ilmankosteuteen verrannolliset.

Ympäristön lämpötila vaikuttaa suuresti termistorin resistanssiin, ja tämä tulee ottaa huomioon anturia suunniteltaessa. Kuvassa 5 (ks. seur. s.) esitetään lämpötilan ja absoluuttisen ilmankosteuden vaikutus anturin ulostulojännitteeseen:



Kuva 5. Anturin ulostulojännite kosteuden funktiona eri lämpötiloissa [31, s. 278]

Kuten kuvasta 5 voitiin havaita, lämpötilalla on suurempi vaikutus anturin ulostuloon kuin ilmankosteudella. Tämä vaikuttaa anturin toimintaan silloin, kun anturia käytetään vaihtelevissa lämpötiloissa. Ongelma voidaan ratkaista liittämällä piiriin lämpöanturi, jonka avulla voidaan tehdä tarvittavat kompensatiot.

Lämmönjohtavuuteen perustuvan kosteusanturin suurin etu on muita kosteusanturityyppejä laajempi käyttölämpötila. Kun resistiivisen ja kapasitiivisen kosteusanturin käyttölämpötilan yläraja on noin 100 °C, lämmönjohtavuuteen perustuvia antureita voidaan käyttää jopa +300 °C:n lämpötiloissa.

Lämmönjohtavuuteen perustuva kosteusanturi ei ole yhtä tarkka kuin resistiivinen tai kapasitiivinen kosteusanturi. Anturin tarkkuus on tyypillisesti noin 3 g/m³, mikä vastaa noin 5 suhteellista kosteusprosenttia +40 °C:ssa.

Tarkkuus paranee lämpötilan noustessa. Tätä anturityyppiä käytetään usein kosteuden mittaukseen korkeissa lämpötiloissa, esimerkiksi sellu-, vaate- ja puuteollisuudessa.

3.3 Hiilidioksidianturit

Hiilidioksidianturi mittaa ilmassa olevan hiilidioksidin määrää. Anturi voi mitata hiilidioksidin määrää joko kemiallisesti, tai optisesti. Hiilidioksidiantureita on käytössä esimerkiksi sisäilmaa valvovissa laitteissa ja kasvihuoneissa. Ne ovat myös oleellinen osa

teollisuuden prosessivalvonnassa sekä erityyppisten palamisreaktioiden optimoinnissa, esimerkiksi polttomoottoreissa.

Kemiallisesti hiilidioksidia mittaavan anturin toiminta perustuu hiilidioksidin aiheuttamaan kemialliseen reaktioon anturielementissä. Optisesti toimiva hiilidioksidianturi mittaa hiilidioksidin määrää ilmassa hiilidioksidin aiheuttaman valon dispersion perusteella.

3.3.1 Kemiallinen hiilidioksidianturi

Kemiallinen hiilidioksidianturi mittaa hiilidioksidin määrää sitä ympäröivässä ilmassa. Anturin toiminta perustuu ilmassa olevan hiilidioksidin aiheuttaman kemiallisen reaktion synnyttämän jännitteen mittaamiseen anturielementissä.

Kemiallinen hiilidioksidianturi koostuu ilmaa läpäisevästä kuoresta ja sen sisällä olevasta anturielementistä. Anturielementistä lähtee jalkapari, joiden väliin syntyy hiilidioksidipitoisuudesta riippuvainen jännite. Koska anturin tulee olla ilmaa läpäisevä, sen kotelossa on reikiä tai ohut ilmaa läpäisevä verkko. Tämä tulee ottaa huomioon anturityyppejä valitessa, sillä kemiallinen hiilidioksidianturi ei kestä roiskevettä tai veden alle joutumista.

Kun ilmassa oleva hiilidioksidi joutuu kosketukseen anturielementin kanssa, aiheuttaa se kemiallisen reaktion. Tämä reaktio synnyttää jännitteen anturielementin ja elektrodin välille. Tämä jännite riippuu ilmassa olevan hiilidioksidin määrästä, ja sen voimakkuutta mittaamalla voidaan selvittää hiilidioksidin osuus ilmassa.

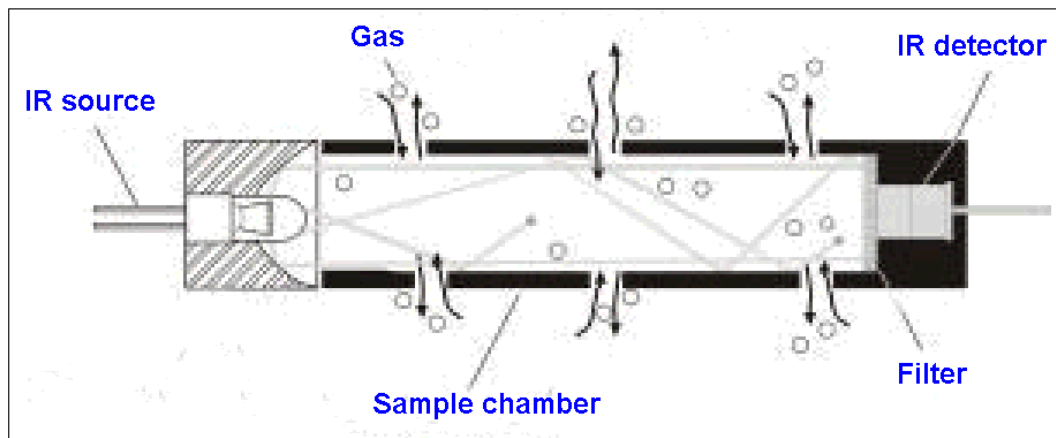
Kemiallisen hiilidioksidianturin suurimpana etuna on sen edullinen hinta. Anturi on rakenteeltaan yksinkertainen ja helppo valmistaa, ja sen tarkkuus riittää useimpiin sovelluksiin. Edellä mainittujen seikkojen takia kemiallisia hiilidioksidiantureita käytetään lähinnä opetus- ja harrastetarkoituksiin sekä muihin ei-kriittisiin sovelluksiin.

Kemiallisten hiilidioksidianturien suurin haittapuoli on niiden epästabiilisuus. Ajan mittaan anturielementtiin kertyy epäpuhtauksia, jotka vääristävät mittaustuloksia ja heikentävät anturin tarkkuutta. Tästä syystä anturien vaihtoväli on lyhyt, alle 6 kuukautta eikä niitä suositeta teollisissa tai kaupallisissa sovelluksissa. [32.]

3.3.2 Infrapunahiilidioksidianturi

Infrapunahiilidioksidianturi tai NDIR (Non Dispersive Infra Red) -anturi mittaa ilmassa olevan hiilidioksidin määrää hiilidioksidin aiheuttaman valon absorptioon perusteella. Anturissa on infrapunavaloa säteilevä diodi, jonka lähettämän valon aallonpituuden muutosta tarkkailemalla saadaan selville ilman sisältämän hiilidioksidin määrä.

NDIR-anturin koostuu infrapunadiodista, kahdesta kaasukammioista sekä infrapunavalon vastaanottimesta. Anturissa on avoin kammiot, johon mitattava ilma pääsee kulkemaan, toisessa kammiossa on referenssikaasua, joka on yleensä puhdasta typpeä. Anturissa oleva infrapunavaloa säteilevän diodin valo kulkee molempien kammioiden läpi vastaanottimelle. Kuvassa 6 esitetään NDIR-anturin näytekammion rakenne:



Kuva 6. NDIR-anturin näytekammion rakenne [33]

Vastaanottimen edessä on optinen suodatin, joka päästää läpi vain haluttuja valon aallonpituuksia. Suodatin valitaan siten, että läpi pääsee vain aallonpituuksia, joihin hiilidioksidi ei vaikuta.

Näin voidaan mittakammioista vastaanottimelle pääsevän valon ja referenssikammioilta pääsevän valon erojen perusteella selvittää hiilidioksidin määrä ilmassa. Suodattimen avulla voidaan myös optimoida anturin herkkyys hiilidioksidille tietyissä oloissa.

NDIR-antureita voidaan käyttää monien eri yhdisteiden mittaamiseen, mutta hiilidioksidin mittaaminen ilmassa on niiden yleisin käyttökohde. Menetelmän suurimpana etuna on antureiden tarkkuus, niiden erottelukyky on parhaimmillaan 1 - 10 ppm:n luokkaa. Anturi ei myöskään kärsi kemiallisen hiilidioksidianturin tapaan hitaasta

mittausvasteesta, vaan reagoi muutoksiin lähes saman tien. NDIR-anturia ei myöskään tarvitse huoltaa, eikä sen suorituskyky heikkene ajan myötä.

NDIR-antureiden suurin haittapuoli on niiden monimutkainen rakenne ja tästä johtuva suuri koko. Anturin tarkkuus on osittain riippuvainen näyteputken pituudesta, joten tarkat anturit vievät paljon tilaa piirilevyiltä. NDIR-anturin kotelo on tyypillisesti pituudeltaan noin kaksi senttimetriä ja muodoltaan sylinterimäinen. Kotelon koon kasvaessa paranee myös anturin tarkkuus, joten suunnitteluvaiheessa tulee valita oikea kompromissi näiden ominaisuuksien väliltä. [33.]

3.4 Happianturit

Happianturi mittaa ilmassa olevan hapen määrää. Happiantureita käytetään laajalti erityyppisissä sovelluksissa teollisuudessa, lääketieteessä sekä polttomoottoreissa. Useimmiten käyttötarkoituksena on erityyppisten palamisreaktioiden valvonta ja optimointi.

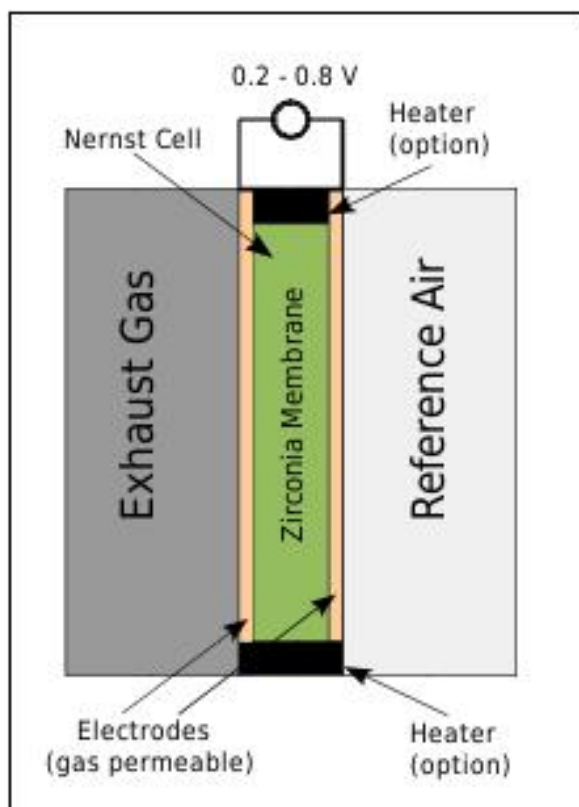
Happianturin toiminta voi perustua kahden elektrodin välisen jännitteen mittaamiseen, tai hapen aiheuttamaan kemialliseen reaktioon anturielementissä. Happianturi voi myös perustua ilmassa olevan hiilidioksidin ja hapen välisen suhteen arviointiin. Lisäksi on olemassa erityyppisiä optisia happiantureita.

3.4.1 Lambda-anturi

Lambda-anturi on elektroninen anturi, joka mittaa hapen osuutta mitattavassa kaasussa tai nesteessä. Lambda-anturi tunnetaan parhaiten automaailmasta, sillä sitä käytetään polttomoottoreiden pakokaasujen hapen määrän mittauksessa.

Lambda-antureita on olemassa useita eri tyyppisiä, joista yleisin on niin sanottu Zirkoniumdioksidianturi (ks. seur. s.). Muut anturityypit eroavat zirkoniumdioksidianturista lähinnä anturielementin muodon tai anturielementin materiaalin osalta. Näillä eroilla voidaan jossain määrin muokata anturin ominaisuuksia, esimerkiksi mittausvasteen ja tarkkuuden osalta.

Lambda-anturi (kuva 7) koostuu kahdesta elektrodista, joista toinen on kosketuksessa mitattavaan ilmaan, ja toinen on kosketuksessa suljetussa kammiossa olevaan referenssikaasuun. Ilmassa ja referenssikaasussa oleva happi reagoi anturin keskellä olevan Zirkoniumelementin ja elektrodien kanssa ja tuottaa sähköenergiaa. Elektrodien välille syntyy jännite, jota mittaamalla saadaan selville hapen määrä mitattavassa kaasussa.



Kuva 7. Lambda-anturin rakenne [34]

Kun tunnetaan elektrodien välinen jännite ja referenssikaasun koostumus, voidaan hapen määrä mitattavassa kaasussa laskea Nernstin yhtälöllä (ks. seur. s.):

$$U_s = (RT/4F) * \ln[p(O_{2REF}) / p(O_2)] \quad [7]$$

U_s	elektrodien välinen jännite
R	kaasuvakio
T	lämpötila kelvinasteina
F	Faradayn vakio
p	kaasujen osapaine
O_{2REF}	referenssikammion happipitoisuus
O_2	mitattavan kaasun happipitoisuus

Lambda-antureiden etuja on korkea saavutettavissa oleva tarkkuus sekä korkeiden lämpötilojen sieto. Lisäksi antureiden mittaussvaste on nopea, ja ne ovat rakenteeltaan kestäviä ja yksinkertaisia.

Lambda-antureiden haittapuolia niiden vaatima korkea käyttölämpötila. Anturit on suunniteltu käytettäväksi yli 200 °C:n lämpötiloissa, eivätkä ne toimi alemmissä lämpötiloissa oikein. Tämä rajoittaa anturin käyttökohteet korkeissa lämpötiloissa tapahtuviin mittauksiin kuten teollisuuteen tai polttomoottoreihin. [35.]

3.4.2 Kemiallinen happianturi

Kemiallinen happianturi, jota kutsutaan myös galvaaniseksi happianturiksi, koostuu yleensä kahdesta elektrolyyttiin suljetusta elektrodista. Happimolekyylien diffusoituessa puoliläpäisevän kalvon läpi anturin yhdellä puolella, reagoivat ne elektrodin kanssa ja muodostavat positiivisesti varautuneen hydroksyyli-ionin. Ioni siirtyy toisen elektrodin luo ja aiheuttaa hapettumisreaktion.

Tämä hapettumisreaktio synnyttää jännitteen, jonka voimakkuus on suhteessa mitattavan kaasun happipitoisuuteen. Jännitteen voimakkuus happipitoisuuteen nähden riippuu anturissa käytettävien materiaalien määristä ja tyypeistä.

Kemiallisen happianturin etuja ovat korkea tarkkuus ja kyky havaita pienetkin pitoisuuksien muutokset. Kemiallisella happianturilla voidaan havaita jopa yhden miljoonasosan muutos ilman happipitoisuudessa.

Koska anturissa olevaa jännitettä mitataan koko ajan, voidaan muutos mitattavassa suuressa havaita lähes reaaliaikaisesti. Kemiallisia happiantureita käytetään pääosin lääketieteessä ja siihen liittyvässä teollisuudessa, esimerkiksi puhtaan lääkekäyttöön tarkoitetun hapen valmistuksessa.

Kemiallisen happianturin suurin haittapuoli on anturin fyysisten ääriolojen huono kesto. Happianturiin ei saa päästä syövyttäviä kaasuja, esimerkiksi rikkidioksidia tai vetysulfidia. Happianturi ei myöskään kestä jäätymistä, ja sen mittaustarkkuus on riippuvainen vallitsevasta ilmanpaineesta. Kuten muutkin kemialliset anturit, sen elinikä on melko lyhyt, usein vain vuoden verran. [36, 37, 38.]

4 Piirilevyn suunnittelu

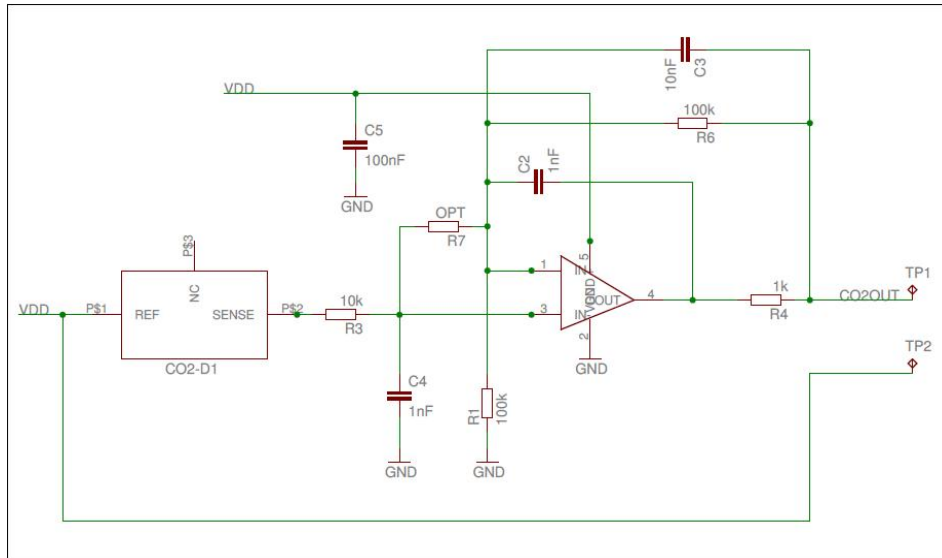
Tätä insinööriyötä varten suunniteltiin kaksi sisäilman laadun mittaukseen soveltuvaa pienikokoista, helposti siirreltävää piirilevyä. Piirilevyjä tehtiin kaksi eri versiota, jotka eroavat toisistaan hiilidioksidianturin ja virranhallinnan osalta. Piirilevyillä on kolme anturia, jotka mittaavat ilman lämpötilaa, kosteutta ja hiilidioksidipitoisuutta.

4.1 Anturit

Piirilevyillä mitataan ilmankosteutta, hiilidioksidipitoisuutta ja lämpötilaa. Hiilidioksidipitoisuuden mittaamiseen käytetään Alphasensen valmistamaa CO2-D1-hiilidioksidianturia sekä Figaron valmistamaa TGS4161 -hiilidioksidianturia. Lämpötilaa ja kosteutta mitataan GE Sensingin yhdistetyllä kosteus- ja lämpötila-anturilla.

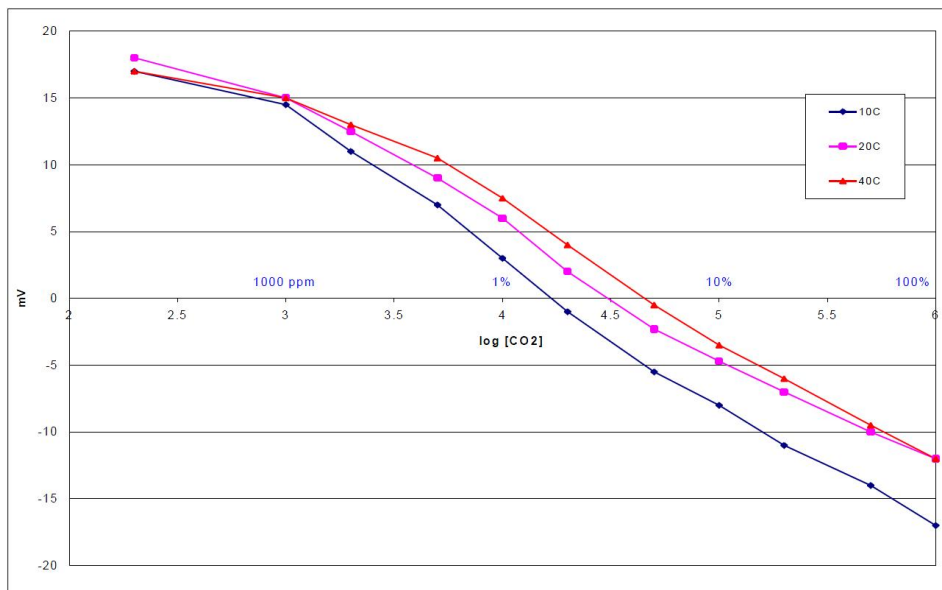
4.1.1 Hiilidioksidianturit

Toinen tässä työssä käytettävistä hiilidioksidiantureista on Alphasensen valmistama kemiallinen anturi CO2-D1. Anturin ulostuloon on lisätty valmistajan ohjeiden mukaan mitoitettu optimointipiiri, jonka tehtävänä on vahvistaa ja linearisoida anturin ulostulosignaalia. Kuvassa 8 (ks. seur. s.) esitetään hiilidioksidianturin ja optimointipiirin kytkentäkaavio:



Kuva 8. Hiilidioksidianturin kytkentäkaavio

Anturin ulostulona on lähes lineaarisesti hiilidioksidipitoisuuden mukaan muuttuvaa jännitettä. Tämä suhde ja lämpötilan aiheuttama vaikutus siihen esitetään kuvassa 9:



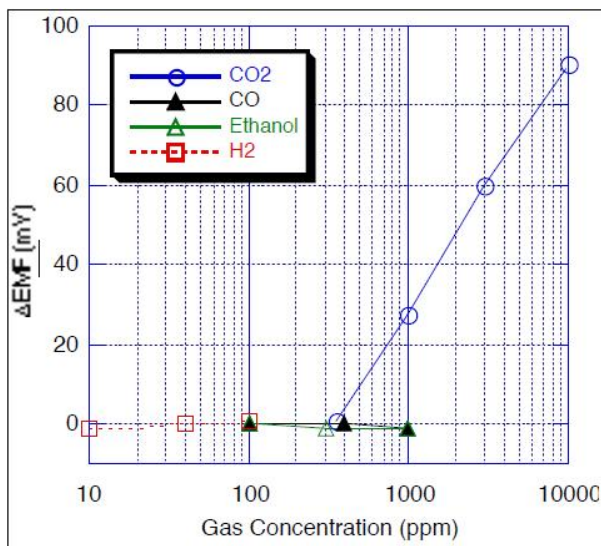
Kuva 9. Hiilidioksidianturin ulostulojännite hiilidioksidimäärän suhteen [39]

Kuten kuvasta 9 voitiin nähdä, jännitteen muutos anturin ulostulossa on vain kymmeniä millivolteja. Tästä syystä ulostuloon on kytketty vahvistin- ja optimointipiiri, jolla signaalia vahvistetaan ja linearisoidaan, jotta se voidaan lukea luotettavasti.

Toisessa piirilevyversiossa käytetään Figaro TGS4161-hiilidioksidianturia, joka eroaa muutamilta osin Alphasensen anturista. Suurin ero on se, että TGS4161 vaatii anturielementin lämmityksen toimiakseen. Tämä tulee ottaa huomioon anturikorttia suunniteltaessa jotta lämmitys ei pääse vaikuttamaan lämpöanturin mittaustulokseen. Anturin käyttöjännitteenä on 3.3 voltin sijaan noin 5 voltia, joten virranhallinta joudutaan myös toteuttamaan eri tavalla tälle anturikortille.

TGS4161:n suurin etu verrattuna Alphasensen anturiin on sen pidempi elinikä ja parempi kosteuden kesto. Nämä ominaisuudet aiheuttavat sen, ettei anturia tarvitse huolta eikä säännöllistä vaihtotarvetta ole. Lisäksi anturia voidaan käyttää itsenäisesti ilman erillistä vahvistin- tai optimointipiiriä sen ulostulossa.

Figaro TGS4161:n toiminta perustuu ilman hiilidioksidipitoisuuden aiheuttamaan jännitteen muutokseen kahden elektrodin välillä. Elektrodien välissä on lämmitetty ruteenidioksidista koostuva anturielementti. Elementissä tapahtuu hiilidioksidin vaikutuksesta hapettumisreaktio, joka synnyttää jännitteen. Jännitteen muutosta tarkkailemalla voidaan päätellä ilman hiilidioksidipitoisuus ja sen muutokset. Jännitteen voimakkuus suhteessa hiilidioksidin määrään ilmassa esitetään kuvassa 10:



Kuva 10. Anturin elektrodien välinen jännite hiilidioksidin suhteen [40]

Kuten kuvasta 10 voitiin havaita, anturin ulostulojännite nousee lähes lineaarisesti ilman hiilidioksidipitoisuuden noustessa yli 350 ppm. Tarkka jännitteen ja hiilidioksidipitoisuuden suhde saadaan laskettua yhtälöstä 8 (ks. seur. s.):

$$\Delta EMF = EMF1 - EMF2 \quad [8]$$

EMF1 ulostulojännite hiilidioksidipitoisuudessa 350 ppm (0 V)

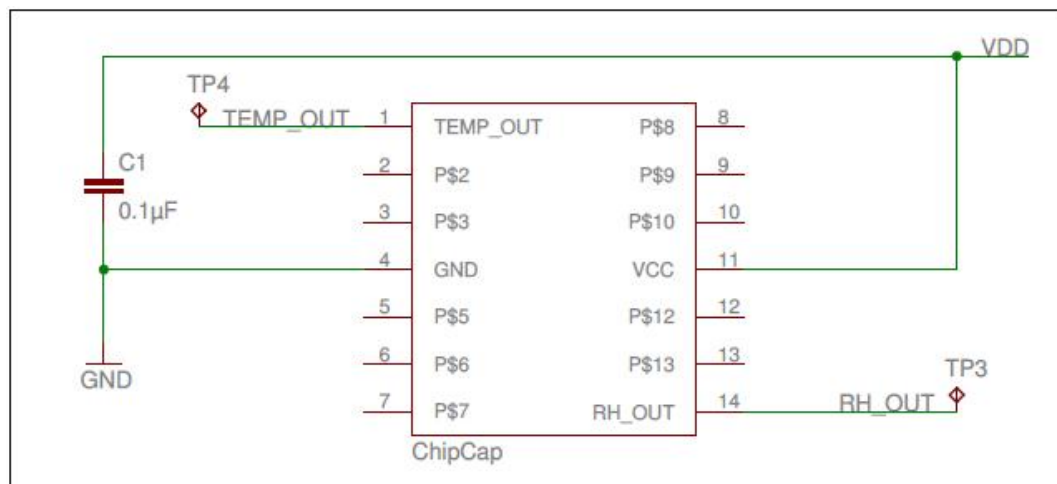
EMF2 ulostulojännite mitatussa hiilidioksidipitoisuudessa

Yhtälön 8 avulla voidaan laskea hiilidioksidipitoisuus siten, että vähennetään anturin ulostulojännite nollasta, kun mitataan hiilidioksidipitoisuutta. Taulukon avulla voidaan todeta, että esimerkiksi anturin ulostulojännitteen ollessa -60 millivolttia, ilman hiilidioksidipitoisuus on 1 200 ppm. [40, 41.]

4.1.2 Kosteusanturi

Kosteusanturiksi valittiin GE Sensingin ChipCap lineaarisella jänniteulostulolla. Tämä mittausdatan ulostulomuoto valittiin, koska se voidaan helposti muuntaa celsiusasteiksi joko yksinkertaisella mikroprosessorin koodilla tai päässälaskulla

Kosteusanturi kytkettiin valmistajan datalehdessä antamien ohjeiden mukaisesti. Tarvetta optimointipiirille ei ole, sillä optimointi tapahtuu piirin sisällä. Näin saavutetaan pienempi tilantarve piirilevyllä ja vähemmän häiriöiden aiheuttamia virheitä mittauksissa. Kosteusanturin kytkentäkaavio esitetään kuvassa 11:



Kuva 11. Kosteusanturin kytkentäkaavio

Anturin toiminta perustuu ilmakehän kosteuden aiheuttamaan kapasitanssin muutokseen anturin polymeerirakenteissa. Kapasitanssin muutos näkyy anturin ulostulossa

jännitteen muutoksena ilmankosteuden suhteen. Ulostulojännite muuttuu ilmankosteuden vaikutuksesta yhtälön 9 mukaisesti:

$$V_{out} = 0.01 \cdot (RH) \quad [9]$$

V_{out} ulostulojännite
 RH ilman suhteellinen kosteus prosentteina

Yhtälöstä 8 voitiin havaita, että ulostulojännite muuttuu 0 - 1 voltia siten, että 1 % suhteellista kosteutta vastaa 0.01 voltin muutosta. Tämä jännite mitataan ja käsitellään halutulla tavalla, jotta ilmankosteuden muutosta voidaan tarkkailla. Koska ulostulojännite on lähes lineaarinen, lukema voidaan helposti muuntaa suhteelliseksi kosteusprosentiksi. Kosteusanturin tarkkuus on $\pm 2 \%$, kun mitataan 20 - 80 % suhteellisen kosteuden välillä ja $\pm 3 \%$ koko mittausalueella.

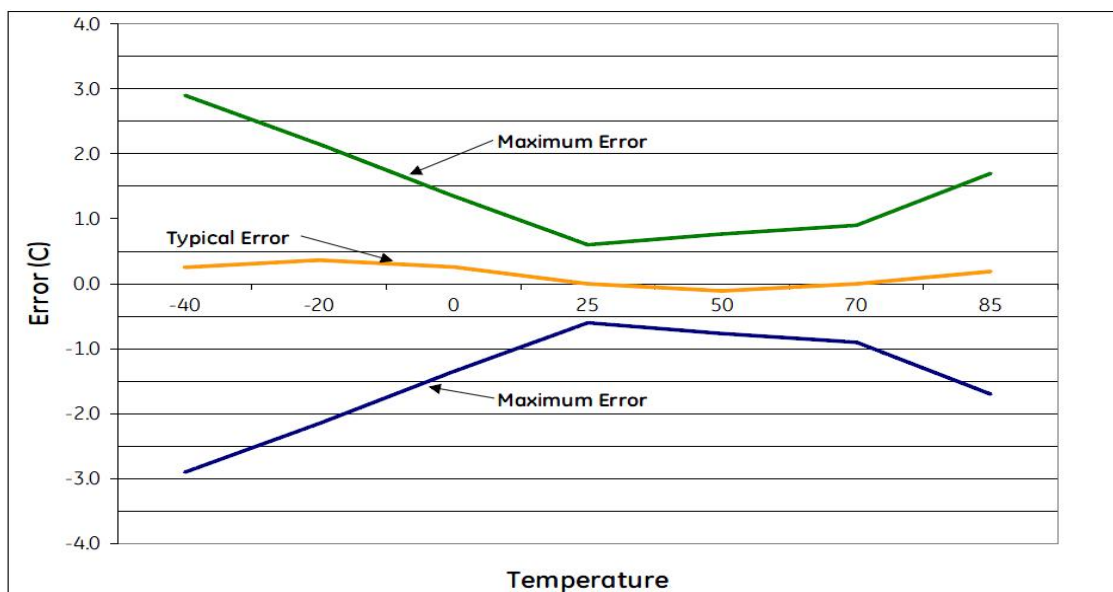
4.1.3 Lämpötila-anturi

Piirilevyllä ei ole erillistä lämpötila-anturia, koska kosteusanturiksi valitussa ChipCap-anturissa on myös lämpötila-anturi, joka on tarkkuudeltaan tähän sovellukseen riittävä. Anturin toiminta perustuu bipolaarisen piidiodin PTAT (Proportional To Absolute Temperature) -virran aiheuttaman jännitteen mittaamiseen. Kuten kosteusanturissa, lämpöanturin ulostulo on lineaarista jännitettä. Ulostulojännitteen voimakkuus on lämpötilasta riippuvainen yhtälön 10 mukaisesti:

$$V_{out} = (0.005 \cdot T) + 0.25 \quad [10]$$

T lämpötila celsiusasteina

Mittausalue on -50 - 150 °C, joten yhtälöstä 11 voitiin havaita, että ulostulojännite vaihtelee lämpötilan mukaan lineaarisesti välillä 0 - 1 V. Lämpötilan mittaus on tarkimmillaan +25 °C:n lämpötilassa, tästä poikkeavissa mittaolosuhteissa syntyy tulokseen poikkeama, jota havainnollistetaan kuvassa 12 (ks. seur. s.).



Kuva 12. Lämpötilan vaikutus lämpöanturin mittaustulokseen [42]

Kuvan 12 mukainen tyypillinen tarkkuus riittää sisäilman lämpötilan mittauksen hyvin, joten tarvetta ulostulon optimoinnille tai korjauksille ei ole tässä sovelluksessa. Kytken-
täkaavio ei poikkea kosteusanturin kaaviosta, joka esitettiin kuvassa 11 sivulla 26. [42.]

4.2 Virranhallinta

Työtä varten suunniteltiin monikäyttöinen ja luotettava virranhallintajärjestelmä (ks. liite 1, s. 2), joka mahdollistaa useiden erilaisten jännitelähteiden käytön. Lisäksi suunniteltiin yksinkertaisempi versio Figaron hiilidioksidianturin sisältävälle piirilevyversiolle (ks. liite 3, s. 2). Järjestelmä koostuu akusta tai muusta jännitelähteestä, hakkurista, latauspiiristä ja USB-liittimestä.

Piirilevyllä on Texas Instrumentsin hakkuriperiaatteella toimiva jännitemuunnin, joka syöttää käyttöjännitteen antureille ja muille komponenteille. Sisäänmenojännite hakkurille voidaan ottaa joko paristoista, ladattavasta litiumpolymeeriakusta tai muusta lähteestä, jonka jännite on korkeintaan 5.5 voltia. Hakkuri antaa ulos 3.3 voltin tasajännitettä, jota käytetään piirilevyn tarpeisiin.

Työssä käytettävä latauspiiri MCP7383 on yleismallinen USB-protokollan mukainen latauspiiri. Piirin avulla voidaan USB-liittimen kautta ladata sellaisia akkuja, jotka ovat tarkoitettu uudelleen ladattavaksi. Piirikaavioissa latauspiiri on mitoitettu datalehden

ohjeiden mukaan siten, että tässä työssä käytetty 200 mAh:n litiumpolymeeriakku latautuu noin tunnissa.

Työtä varten tehdyssä piirilevyssä jännitelähteenä on Powerstreamin valmistama 200 mAh:n litiumpolymeeriakku, jonka nimellisjännite on 3.7 voltia. Akun kapasiteetti riittää Figaron sisältävässä piirilevyssä noin 300 tunnin jatkuvaan mittaamiseen, ennen kuin se pitää ladata. USB-liittimen kautta lataus kestää noin tunnin. Tämäntyyppinen akku valittiin, koska se on pienikokoinen ja halpa sekä mahdollistaa laitteen helpon siirtämisen huoneesta toiseen. Mikäli halutaan, voidaan käyttää suurempaa akkua tai jättää piirilevy esimerkiksi matkapuhelimen USB-laturiin kiinni ja sijoittaa mitattavaan tilaan pysyvästi.

Akun positiiviseen napaan on kytketty 0.5 ampeerin sulake ja sen perään liukukytkin. Sulakkeen tehtävänä on estää lisävahingot ja tulipalo, mikäli piirilevyllä ilmenee oikosulku tai muu vika. Kytkimellä voidaan katkaista virransyöttö akulta piirilevylle, mikäli piirilevyä ei käytetä ja halutaan säästää akkua.

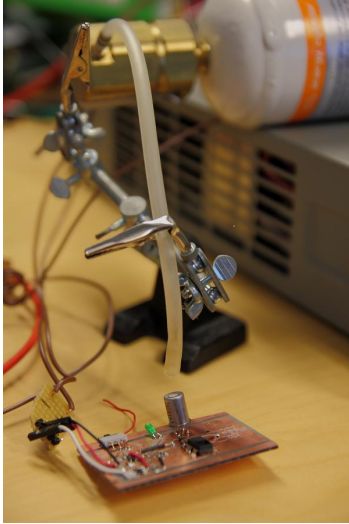
Figaron hiilidioksidianturi vaatii käyttöjännitteeksi noin 5 voltia, tästä syystä yllä mainittu virranhallintajärjestelmä ei sovellu sille. Anturia varten ei suunniteltu erillistä virranhallintajärjestelmää vaan yksinkertaisempi piirilevy, jossa on liitännät ulkoisesti tuotavalle 5 voltin tasajännitteelle. Tarvittu tasajännite voidaan ottaa virtalähteestä, akusta tai muusta soveltuvasta lähteestä.

5 Piirilevyn valmistus ja testaus

Piirilevyn molempia versioita jyrssiin yksi kappale Metropolia Ammattikorkeakoulun LPKF-piirilevyjyrsimellä. Piirilevyn komponentit juotettiin käsin ja juotokset tarkastettiin oikosulkujen varalta mikroskoopin avulla.

Piirilevyn toimintaa testattiin mittaamalla kunkin anturin ulostulojännite. Jännite muunnettiin mitattavaksi suureeksi kunkin anturin datalehden ohjeiden mukaan. Lämpötila-anturin antamia tuloksia verrattiin kahden erillisen lämpömittarin antamiin lukemiin. Toinen verrokilämpömittareista oli perinteinen nestepilarimittari, toinen digitaalinen mittari.

Hiilidioksidiantureiden antamia lukemia testattiin sisäilmassa ja verrattiin sisäilman hiilidioksidipitoisuuden ohjearvoihin. Lisäksi testattiin hiilidioksidiantureiden antamia lukemia silloin, kun suoraan anturiin tuotiin puhdasta hiilidioksidia paineistetusta pullosta kuvan 13 mukaisella tavalla:



Kuva 13. Figaro TGS 4161 mitattavana

Kosteusanturin antamia lukemia mitattiin sisäilmassa ja suljetussa kaapissa, jonka ilman suhteellisen kosteuden tiedetään olevan tasan 70 %. Kosteampaa ilmaa ei mitattu, sillä huoneilman kosteus nousee harvoin lähelle 100 % suhteellista kosteutta. Lisäksi korkea kosteus altistaa piirilevyn mahdolliselle kondensoituvalle vedelle, jolloin levy tai anturi voi vaurioitua. Anturin ulostulojännite mitataan yleismittarilla ja muunnetaan datalehden ohjeiden mukaan suhteellisen kosteuden lukemaksi.

5.1 Hiilidioksidiantureiden testaus

Sisäilmaa mitatessa Figaron hiilidioksidianturin ulostulojännite oli nolla volttia. Tämä tarkoittaa sitä, että sisäilman hiilidioksidipitoisuus on 350 ppm tai vähemmän, mikä on sisäilmalle normaali arvo. Kun anturille tuotiin painesäiliöstä hiilidioksidia, ulostulojännite nousi nopeasti noin sataan millivolttiin. Tällöin ollaan jo anturin virallisen mittausrajan yläpuolella, mikä datalehden mukaan päättyy 90 millivolttiin ja 10 000 ppm hiilidioksidipitoisuuteen. Kun kaasuhanas suljettiin, jännite laski yhtä nopeasti noltaan volttiin.

Anturin mittausvaste on melko nopea, hiilidioksidipitoisuuden muutos näkyy ulostulojännitteessä välittömästi. Nousu nollostavoltista 90 millivolttiin tapahtui noin kahdessa sekunnissa.

Alphasensen anturin ulostulojännite pysyi noin 2.3 voltissa koko ajan. Hiilidioksidin lisääminen tai lämpötilan muuttaminen ei vaikuttanut ulostulojännitteeseen. Datalehden mukaan anturin ulostulojännite olisi sisäilmassa noin 18 millivolttia ja laskee hiilidioksidimäärän noustessa. Vaikuttaa siltä, että anturi on epäkunnossa. Alphasensen anturi on kemiallinen, mikä tarkoittaa sitä, että sillä on rajallinen elinikä sen jälkeen, kun se on poistettu pakkauksestaan. Anturia on ilmeisesti säilytetty liian kauan komponenttihyllyssä, eikä se ole toimintakuntoinen.

5.2 Lämpöanturin testaus

Lämpöanturin toimintaa testattiin mittaamalla anturin ulostulojännitteitä eri lämpötiloissa. Vertailutulokset saatiin mittaamalla lämpötila kahdella erillisellä lämpömittarilla ja ottamalla näiden antamien tulosten keskiarvo. Toinen verrokkimittareista oli perinteinen nestepilarimittari ja toinen elektroninen akvaariolämpötilamittari.

Alhaiset lämpötilat mitattiin ulkona -10 °C:ssa sekä lämmitetyssä pihavarastossa, jonka lämpötilaa säädettiin 0-10 °C:seen lämmitintä säätämällä. Muut lämpötilat mitattiin sisätiloissa huoneilmassa sekä lämmitetyssä suljetussa lasiterraariossa. Mittaus suoritettiin aina silloin, kun verrokkilämpömittareista saatu tulos oli halutulla tasolla. Tällöin mitattiin lämpöanturin ulostulojännite ja kirjattiin se muistiin. Myöhemmin mitatut tulokset muunnettiin datalehden ohjeiden mukaan celsiusasteiksi ja näin saadut tulokset merkittiin taulukkoon 3:

Taulukko 3. Lämpötila-anturin mittaustulokset

Mitattu lämpötila (°C)	Anturin ulostulojännite (V)	Ulostulojännite muutettuna °C:ksi
-10	0,202	-9,6
0	0,251	0,2
10	0,301	10,2
20	0,35	20
25	0,376	25,2
30	0,4	30
50	0,5	50

Kuten taulukosta 3 nähtiin, anturin tarkkuus oli huonoimmillaan $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssä, jolloin anturin antama tulos poikkesi mitatusta 0.4 celsiusastetta. Lämpötilan noustessa tarkkuus parani. Yli $40\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötiloissa ulostulojännite ei pysynyt tasaisena, vaan vaihteli melko paljon. Tästä syystä korkeammista lämpötiloista ei saatu luotettavia lukemia, joten ne jätettiin huomioimatta. Anturin tarkkuus on parhaimmillaan $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa, joten sisälämpötilan mittaamiseen se soveltuu hyvin.

5.3 Kosteusanturin testaus

Kosteus mitattiin ensin sisäilmassa, talvella suoritettu mittaus antoi tuloksen 20% suhteellista kosteutta. Havaittiin, että anturin nopeus ja tarkkuus olivat hyviä: jo anturia päin puhaltaminen aiheutti selvän nousun mitatussa ilmakehässä.

70% ilmakehässä tapahtuva mittaus suoritettiin sikarihumidorissa, jonka ilmakehäksi oli asetettu 70% suhteellista kosteutta. Anturin ulostulojännite alkoi nousta välittömästi, kun se asetettiin kaappiin. Anturin mitattaman kosteuden nousu sisäilman 20% lukemasta humidorin 70% :iin tapahtui noin kolmessa sekunnissa.

Tämä tarkoittaa ulostulojännitteen nousua 20 millivolttista 70 millivolttiin. Kun anturi otettiin ulos, sen ulostulojännite laski nopeasti alkuperäiseen arvoonsa.

6 Yhteenveto

Työssä testatut anturit toimivat Alphasensin hiilidioksidianturia lukuun ottamatta hyvin. GE:n ChipCap-anturi yllätti toimivuudellaan, vaikka siinä on yhdistetty sekä kosteus-, että lämpöanturi. Yhdistetty anturi mahdollistaa kosteuden tai lämpötilan aiheuttaman vaikutuksen vaatiman kompensoinnin anturin sisällä, jolloin erillisille komponenteille ei ole tarvetta. Anturi toimii sellaisenaan, kunhan tarjolla on käyttöjännite ja maa. Tämä mahdollistaa yksinkertaisen ja luotettavan rakenteen.

Figaron hiilidioksidianturi toimi niin ikään hyvin. Anturi reagoi nopeasti hiilidioksidipitoisuuden muutokseen ja palasi yhtä nopeasti alkuarvoonsa. Anturi ei sen vaatimasta anturielementin lämmityksestä huolimatta lämmennyt ulkokuoreltaan, joten se ei vaikuta samalla piirilevyllä tapahtuvaan lämpötilan mittaamiseen.

Alphasensen anturia ei saatu toimimaan. Syynä on todennäköisesti kemiallisen anturin ominaisuuksiin kuuluva vanheneminen. Kemiallisten antureiden käyttöikä on rajallinen, sillä niihin kertyvät kuona-aineet vaikuttavat anturin toimintaan. Alphasensen anturia on ilmeisesti säilytetty liian kauan epähermeettisessä tilassa, jolloin sen toiminta on ajan mittaan heikentynyt.

Yhteenvedona voidaan todeta, että ChipCap ja Figaro TGS 4161 soveltuvat sisäilman mittaamiseen hyvin. Molemmat mahdollistavat yksinkertaisen piirilevyn suunnittelun, ja niiden tarkkuus ja mittausvaste ovat riittäviä. Antureiden lineaarinen jännite ulostulossa mahdollistaa yksinkertaisen mittaustulosten lukemisen sekä yleismittarilla, että yksinkertaisella mikroprosessorilla.

Hiilidioksidianturia sisäilman mittaamiseen valitessa Alphasense CO2-D1 ei vedä vertoja Figaron anturille, koska sen elinikä on lyhyempi ja anturikytkennän rakenne monimutkaisempi. Alphasensen anturin mittausalue on laajempi, joten se soveltuu käytettäväksi sovelluksissa, joissa mitataan yli 10 %:n hiilidioksidipitoisuuksia.

Lähteet

- 1 Sisäilman tekijät (WWW-dokumentti) Sisäilmayhdistys Ry.
<http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset_tilat/sisailmasto/sisailman_tekijat/>. Luettu 23.12.2012.
- 2 Sisäilmatutkimus (WWW-dokumentti) Tofte Yhtiöt Oy.
<<http://www.haistahome.fi/sisailmatutkimus/>>. Luettu 23.12.2012.
- 3 Karttunen, Koistinen, Saltikoff, Manner. 2008. Ilmakehä, sää ja ilmasto. Keuruu: Ota-
van kirjapaino Oy.
- 4 Nienstedt, Hänninen, Arstila, Björkqvist. 1999. Ihmisen fysiologia ja anatomia.
WSOY.
- 5 Carbon dioxide dangers (WWW-dokumentti) Analox Sensor Technology.
<<http://www.analox.net/carbon-dioxide-dangers.php>>. Luettu 23.12.2012.
- 6 Particular matter (PM) research (WWW-dokumentti) EPA.
<<http://www.epa.gov/airscience/quick-finder/particulate-matter.htm>>. Luettu 3.1.2013.
- 7 Fysikaaliset tekijät (WWW-dokumentti) Sisäilmayhdistys Ry.
<http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset_tilat/sisailmasto/fysikaaliset_tekijat/>. Luettu 3.1.2013.
- 8 IDPH guidelines for indoor air quality (WWW-dokumentti) Illinois Department of pub-
lic health.
<http://www.idph.state.il.us/envhealth/factsheets/indoorairqualityguide_fs.htm>. Luettu
3.1.2013.
- 9 Lämpöolot ja sisäilma (WWW-dokumentti) Työturvallisuuskeskus.
<http://www.tyoturva.fi/tyosuojelu_tyopaikalla/lampoolot_ja_sisailma>. Luettu 3.1.2013.
- 10 Temperature sensors (WWW-dokumentti) PC Control Ltd.
<<http://www.pc-control.co.uk/temperature.htm>>. Luettu 7.1.2013.
- 11 Common temperature measurement sensors (WWW-dokumentti) Microstar Labora-
tories <<http://www.mstarlabs.com/sensors/temperature-sensors.html>>. Luettu 7.1.2013.
- 12 Designing with semiconductor temperature sensors (WWW-dokumentti) Sensor
Tips. <[http://www.sensortips.com/temperature/designing-with-semiconductor-
temperature-sensors/](http://www.sensortips.com/temperature/designing-with-semiconductor-temperature-sensors/)>. Luettu 7.1.2013.

13 What is a platinum resistance thermometer? (WWW-dokumentti) National Physical Laboratory. <[http://www.npl.co.uk/engineering measurements/thermal/temperature/faqs/what-is-a-platinum-resistance-thermometer-\(faq-thermal\)](http://www.npl.co.uk/engineering%20measurements/thermal/temperature/faqs/what-is-a-platinum-resistance-thermometer-(faq-thermal))>. Luettu 7.1.2013.

14 Selection guide: Temperature sensors (WWW-dokumentti) Analog Devices. <http://www.analog.com/static/imported-files/product_highlights/TemperatureSensors.pdf>. Luettu 7.1.2013.

15 Semiconductor sensors (WWW-dokumentti) Temperatures.com. <<http://www.temperatures.com/sensors/csensors/semiconductor-temp-sensors/>>. Luettu 7.1.2013.

16 Platinum resistance thermometer (WWW-dokumentti) National Physical Laboratory <<http://www.npl.co.uk/content/ConMediaFile/113>>. Luettu 8.1.2013.

17 As found calibration data (WWW-dokumentti) Burns Engineering. <http://www.burnsengineering.com/document/papers/As_Found_Calibration_Data.pdf>. Luettu 8.1.2013.

18 Hand held thermometers (WWW-dokumentti) Charnwood instrumentation services ltd. <<http://www.instrumentationservices.net/hand-held-thermometers.php>>. Luettu 8.1.2013.

19 Which sensor? Thermistor, RTD or thermocouple. (WWW-dokumentti). Enercorp instruments ltd. <http://www.enercorp.com/temp/Thermistors_comparision.html>. Luettu 8.1.2013.

20 Thermistors (WWW-dokumentti) Temperatures.com. <<http://www.temperatures.com/thermistors.html>>. Luettu 8.1.2013.

21 NTC engineering notes (WWW-dokumentti) Spectrum Sensors. <<http://www.specsensors.com/ntc-engineering.asp>>. Luettu 8.1.2013.

22 Steinhart-Hart thermistor calculation (WWW-dokumentti) Daycounter inc. <<http://www.daycounter.com/Calculators/Steinhart-Hart-Thermistor-Calculator.phtml>>. Luettu 8.1.2013.

23 Which sensor? Thermistor, RTD or thermocouple. (WWW-dokumentti). Enercorp instruments ltd. <http://www.enercorp.com/temp/Thermistors_comparision.html>. Luettu 8.1.2013.

24 Thermocouple codes/conductor combinations & characteristics (WWW-dokumentti) Thermal corporation. <www.thermalcorp.com/documents/TCCHART.pdf>. Luettu 8.1.2013.

25 Which sensor? Thermistor, RTD or thermocouple. (WWW-dokumentti). Enercorp instruments ltd. <http://www.enercorp.com/temp/Thermistors_comparision.html>. Luettu 8.1.2013.

- 26 Temperature measurement (WWW-dokumentti) Questex media.
<<http://www.sensormag.com/sensors/temperature/temperature-measurement-1030>>. Luettu 8.1.2013.
- 27 Thermocouples (WWW-dokumentti) The engineering toolbox.
<http://www.engineeringtoolbox.com/thermocouples-d_496.html>. Luettu 16.1.2013.
- 28 How hard could that be? Practical humidity calibration experiences (WWW-dokumentti) Vaisala inc. <<http://www.veriteq.com/humidity/calibration.htm>>. Luettu 8.1.2013.
- 29 Resistive relative humidity sensor (WWW-dokumentti) Henan Hanwei Electronics Co., Ltd. <<http://www.directindustry.com/prod/henan-hanwei-electronics-co-ltd/resistive-relative-humidity-sensors-64996-446471.html>>. Luettu 8.1.2013.
- 30 Choosing a humidity sensor: A review of three technologies (WWW-dokumentti) Questex media. <<http://www.sensormag.com/sensors/humidity-moisture/choosing-a-humidity-sensor-a-review-three-technologies-840>>. Luettu 8.1.2013.
- 31 Wilson. 2005. Sensor Technology Handbook. Burlington: Newnes,
- 32 NDIR Gas Sensor Lamps experiences (WWW-dokumentti) Internation Light Technologies. <<http://www.intl-lighttech.com/applications/light-source-apps/ndir-gas-sensor/ndir-gas-sensor-index>>. Luettu 8.1.2013.
- 33 Chemistry and crime (WWW-dokumentti) The Department of Chemistry, University of the West Indies.
<<http://wwwchem.uwimona.edu.jm:1104/courses/CHEM2402/Crime/Breathalyser.html>>. Luettu 8.1.2013.
- 34 File: Zirconia sensor. (WWW-dokumentti) Wikipedia.org.
<<http://en.wikipedia.org/wiki/File:ZirconiaSensor.svg>>. Luettu 8.1.2013.
- 35 Lambda sensor (WWW-dokumentti) Physicochemical institute, University of Göttingen. <<http://www.nernst.de/lambda/lambda-sensor.htm>>. Luettu 8.1.2013.
- 36 Oxygen sensor types (WWW-dokumentti) Alpha Omega Instruments.
<http://www.aoi-corp.com/additional_information/oxygen_sensor_types/>. Luettu 8.1.2013.
- 37 The 5 types of oxygen sensors. (WWW-dokumentti) Safetyxchange.org.
<http://www.safetyxchange.org/wp-content/plugins/st_newsletter/stnl_iframe.php?newsletter=2837&code=>>. Luettu 8.1.2013.
- 38 Electrochemical oxygen sensors (WWW-dokumentti) Versaperm ltd.
<http://www.versaperm.com/Electrochemical_Oxygen_Sensors.php>. Luettu 8.1.2013.

39 Alphasense CO2-D1 datalehti (WWW-dokumentti) Alphasense Ltd.
<<http://www.alphasense.com/environmental-sensors/pdf/CO2D1.pdf>>. Luettu 8.1.2013.

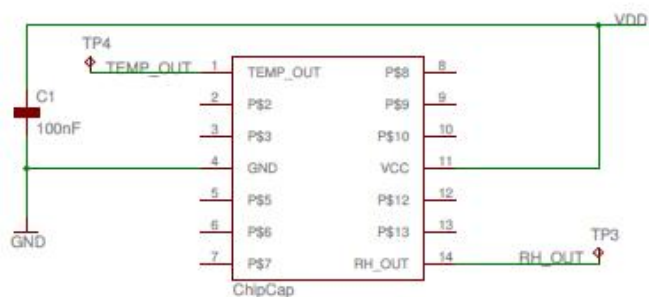
40 Figaro TGS 4161 datalehti (WWW-dokumentti) Figaro USA Inc.
<<http://www.figarosensor.com/products/4161pdf.pdf>>. Luettu 8.1.2013.

41 AAN 401 (WWW-dokumentti) Alphasense Ltd.
<http://www.alphasense.com/industrial-sensors/pdf/AAN_401.pdf>. Luettu 8.1.2013.

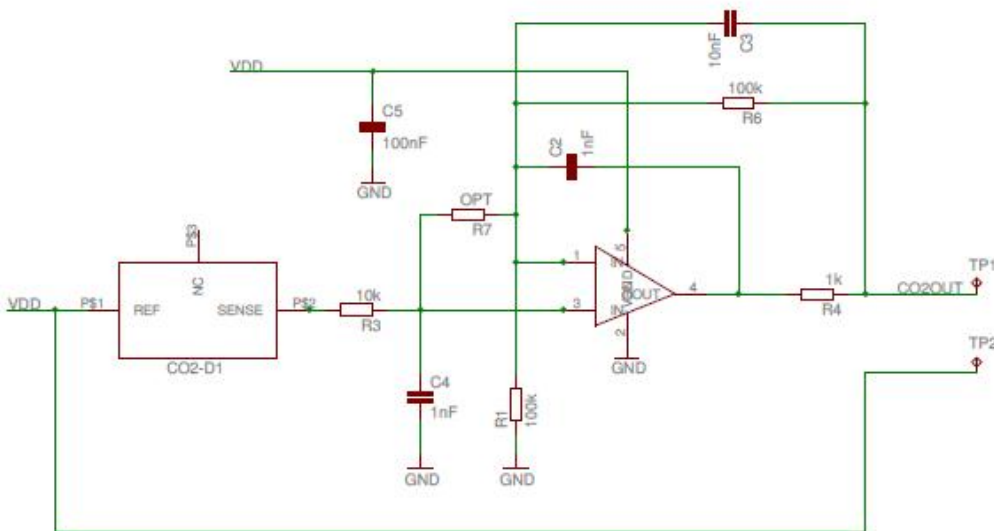
42 GE ChipCap datalehti (WWW-dokumentti) General Electric Company.
<http://www.ge-mcs.com/download/moisture-humidity/920_426b.pdf>. Luettu 8.1.2013.

Alphasense-piirikaavio, sivu 1

Temp & RH



CO2

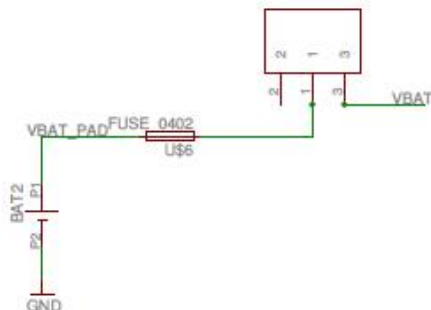


Date: 25.10.2012 10.00

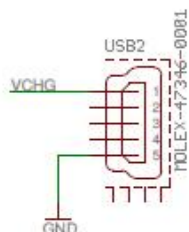
TITLE: anturikortti_asense Sheet: 1/2

Alphasense-piirikaavio, sivu 2

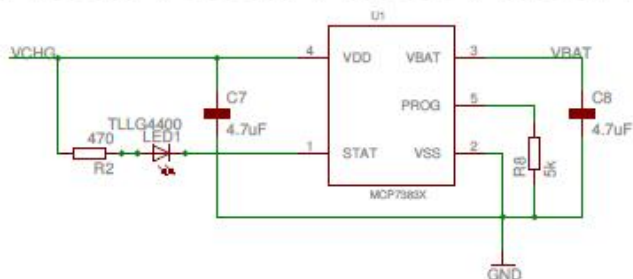
Battery



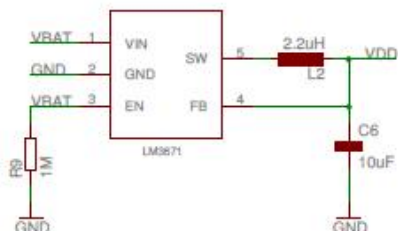
USB



Charger



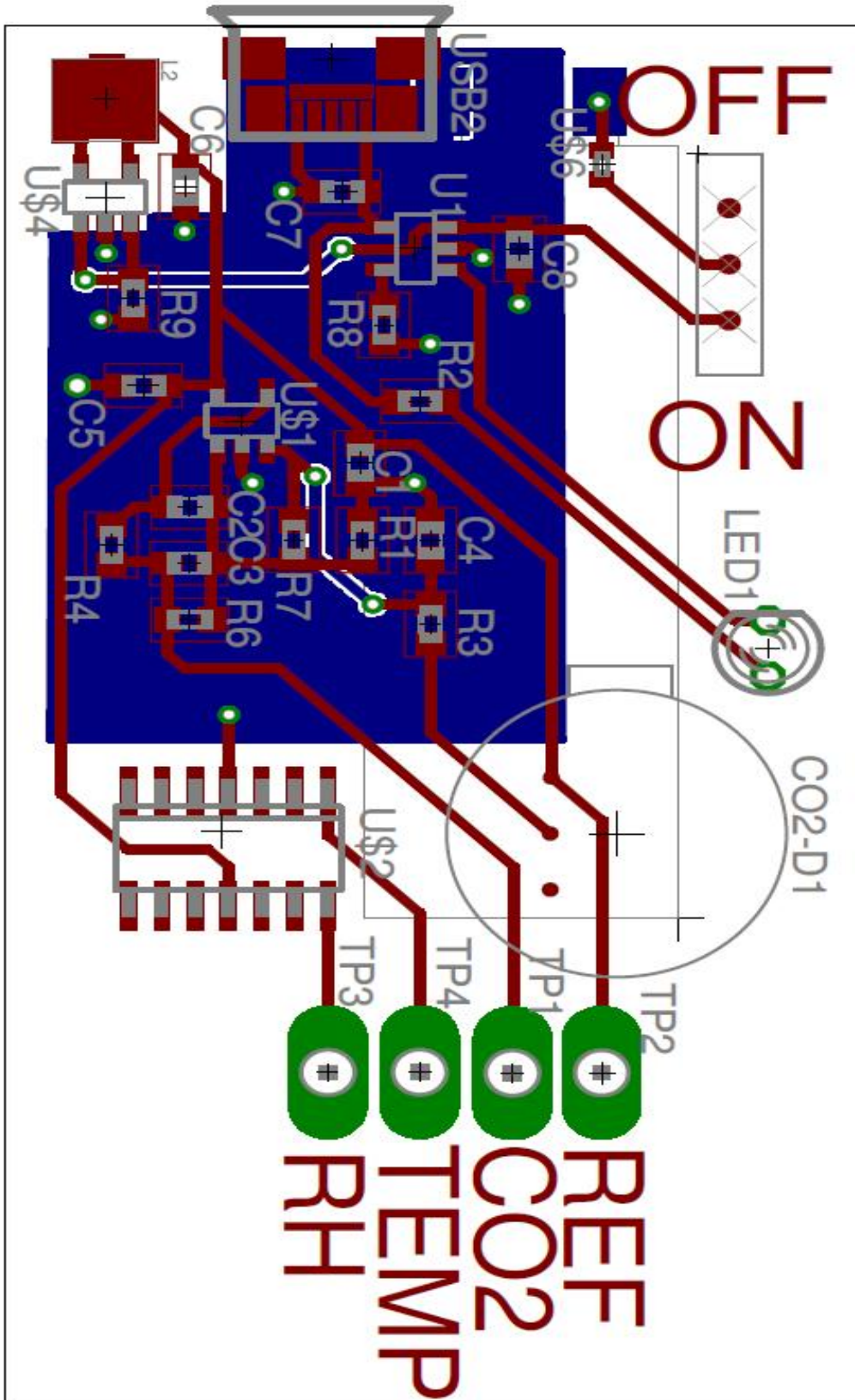
Power



Date: 25.10.2012 10.00

TITLE: anturikortti_asense Sheet: 2/2

Alphasense-osasijoittelukuva

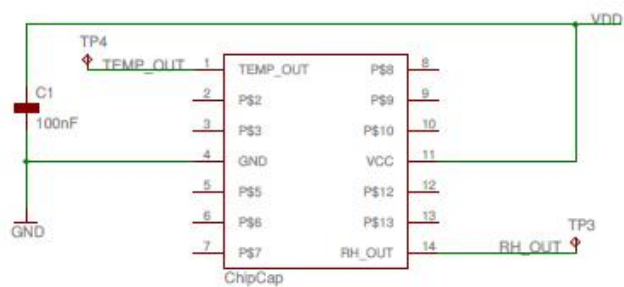


Alphasense-komponenttiluettelo

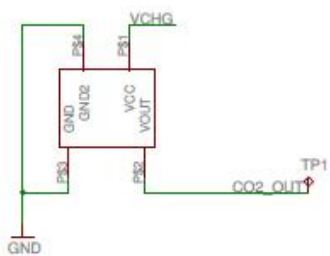
Part	Value	Device	Package	Description
BAT2	BATCON12X35	BATCON12X35	BATCON12X45	
C1	100nF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
C2	1nF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
C3	10nF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
C4	1nF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
C5	100nF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
C6	10uF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
C7	4.7uF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
C8	4.7uF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
L2	2.2uH	LP03310	LP03310	
LED1	TLLG4400	TLLG4400	LED3MM	Low Current (2mA) Green LED
R1	100k	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
R2	470	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
R3	10k	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
R4	1k	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
R6	100k	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
R7	OPT	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
R8	5k	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
R9	1M	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
TP1	TPPAD1-20Y	TPPAD1-20Y	P1-20Y	Test pad
TP2	TPPAD1-20Y	TPPAD1-20Y	P1-20Y	Test pad
TP3	TPPAD1-20Y	TPPAD1-20Y	P1-20Y	Test pad
TP4	TPPAD1-20Y	TPPAD1-20Y	P1-20Y	Test pad
U\$1	TLV2211	TLV2211	SOT23	
U\$2	GECHIPCAP	GECHIPCAP	SOP14	
U\$3	ALPHA SENSE_C02	ALPHA SENSE_C02	CAN3	
U\$4	LM3671	LM3671	SOT23-5	
U\$5	123SLIDESWITCH	123SLIDESWITCH	123SLIDESWITCH	
U\$6	FUSE_0402	FUSE_0402	R0402	
U1	MCP7383X	MCP7383X	SOT-23-5	
USB2	MOLEX-47346-0001	MOLEX-47346-0001	MOLEX-47364-0001	MICRO USB B, BOTTOM MOUNT

Figaro-piirikaavio, sivu 1

Temp & RH



CO2

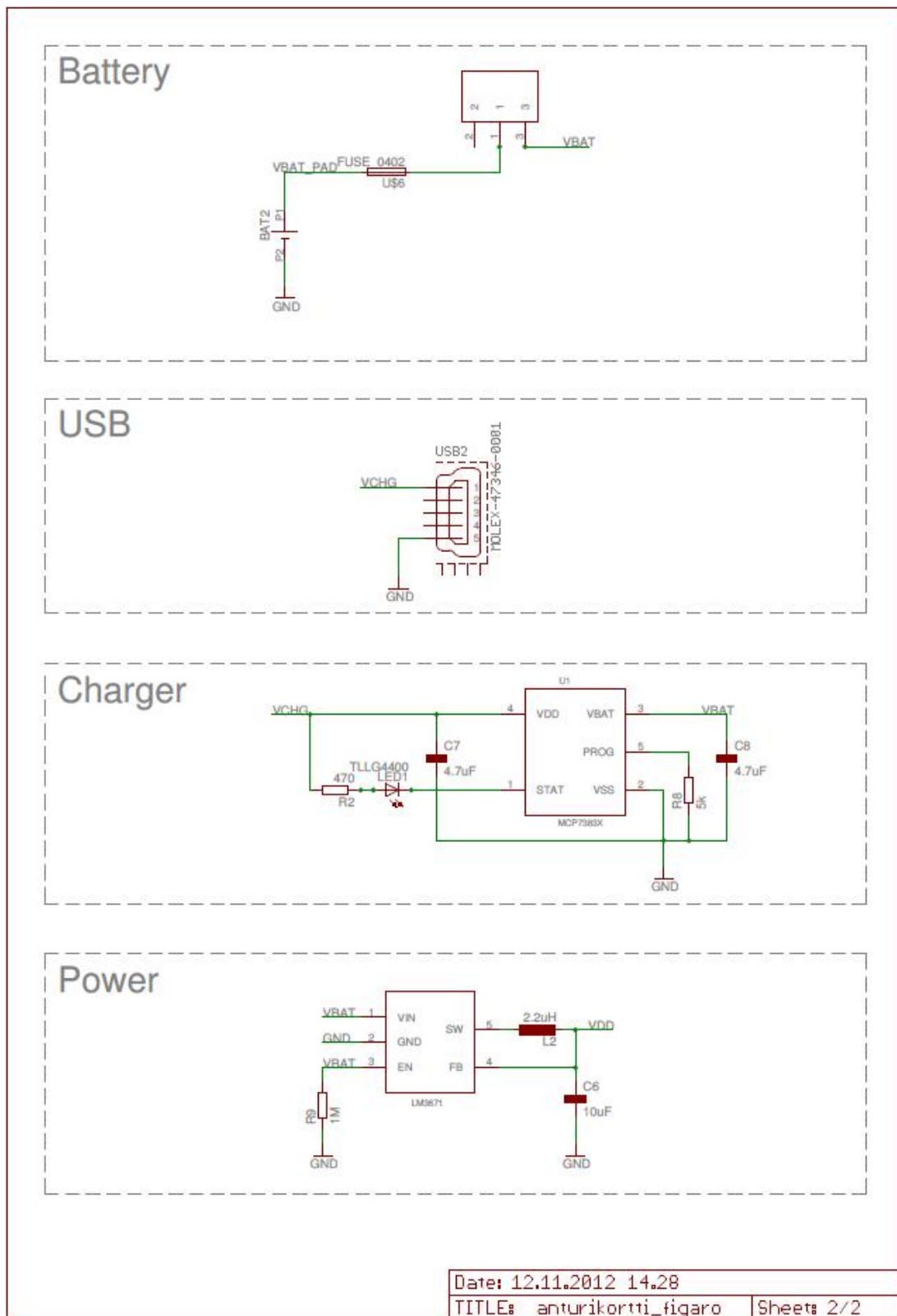


Date: 12.11.2012 14.28

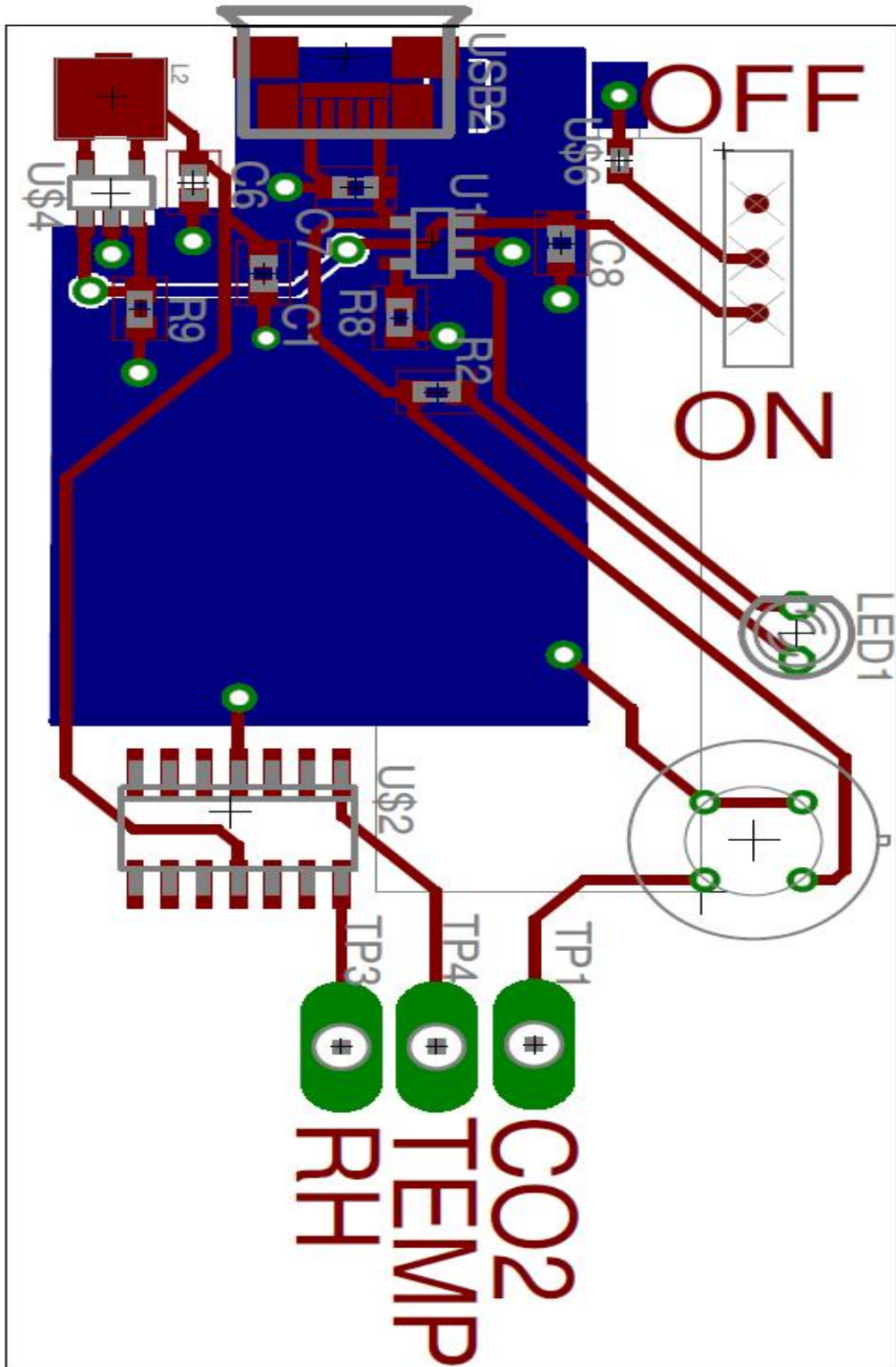
TITLE: anturikortti_figaro

Sheet: 1/2

Figaro-piirikaavio, sivu 2



Figaro-osasijoittelukuva



Figaro-komponenttiluettelo

Part	Value	Device	Package	Description
BAT2	BATCOM12X35	BATCOM12X35	BATCOM12X45	
C1	100nF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
C6	10uF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
C7	4.7uF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
C8	4.7uF	C-EUC0603	C0603	CAPACITOR, European symbol
L2	2.2uH	LP03310	LP03310	
LED1	TLLG4400	TLLG4400	LED3MM	Low Current (2mA) Green LED
R2	470	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
R8	5k	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
R9	1M	R-EU_R0603	R0603	RESISTOR, European symbol
TP1	TPPAD1-20Y	TPPAD1-20Y	P1-20Y	Test pad
TP3	TPPAD1-20Y	TPPAD1-20Y	P1-20Y	Test pad
TP4	TPPAD1-20Y	TPPAD1-20Y	P1-20Y	Test pad
U\$1	FIGARO_TGS4161	FIGARO_TGS4161	TGS4161	
U\$2	GECHIPCAP	GECHIPCAP	S0P14	
U\$3	TLV2211	TLV2211	S0T23	
U\$4	LM3671	LM3671	S0T23-5	
U\$5	123SLIDESWITCH	123SLIDESWITCH	123SLIDESWITCH	
U\$6	FUSE_0402	FUSE_0402	R0402	
U1	MCP7383X	MCP7383X	S0T-23-5	
USB2	MOLEX-47346-0001	MOLEX-47346-0001	MOLEX-47364-0001	MICRO USB B, BOTTOM MOUNT