

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Tietoliikennetekniikka

Opinnäytetyö

Mikko Kotala

## **Langattomat sensoriverkot**

Työn ohjaaja  
Tampere, 05/2010

Kai Poutanen

Tekijä	Mikko Kotala
Työn nimi	Langattomat sensoriverkot
Sivumäärä	30
Valmistumisaika	Kesäkuu 2010
Työn ohjaaja	Kai Poutanen

---

## TIIVISTELMÄ

Sensoriverkoissa sensoryksiköiden anturit mittaavat ympäristöä ja muuntavat mittaus-tiedon sähköiseksi. Verkko koostuu monesta sensoryksiköstä, jotka osallistuvat tiedon prosessointiin ja välitykseen. Kokonaisvaltaiset mittaustulokset välitetään käyttäjälle. Sensoriverkkoja voidaan käyttää monella eri yhteiskunnan alueilla, esim. sotilas-, sairaala-, teollisuus- ja kotiympäristöissä.

Langattomat sensoriverkot on verrattain uusi tieteenala. Muiden tekniikoiden kehittyessä sensoriverkot saavat uusia ominaisuuksia ja sovelluksia. Sensoriverkot sisältävät paljon uutta, vain sensoriverkoille kehitettyä tekniikkaa. Sensoryksiköiden ollessa langattomia, virtalähde on toiminnan kannalta tärkeä komponentti. Sähkönsäästö on otettu huomioon verkon suunnittelun yhteydessä. Tarkoitukseen on kehitetty erilaisia virransäästötiloja, käyttöjaksoja ja tiedonkäsittelymenetelmiä.

Sensoriverkkoihin liittyy monia turvallisuusuhkia. Monet uhista esiintyvät myös muissa tietoverkoissa, joten näihin on olemassa ratkaisuja. Osa uhista on yksilöllisiä sensoriverkoille, kuten sensoryksikön kaappaus ja uudelleenohjelmointi. Vastatoimien lisääminen sensoriverkkoon vie laitteiden muistia ja sähköä, joista on muutenkin pulaa.

Erilaisia langattomia tekniikoita on sensoriverkoille useita. ZigBee ja 6LoWPAN on suunniteltu erityisesti sensoriverkkoja varten, Bluetooth, WiMAX ja WLAN taas yleisesti langattomille laitteille. Verkkostandardeilla on erilaiset ominaisuudet ja ne sopivat tiettyihin sensoriverkon sovelluksiin erilailla.

Sensoriverkkojen käyttöjärjestelmä täytyy rakentaa niiden yksilölliseen toimintaan sopivaksi. Sen täytyy olla energiaa säästävä ja vähän muistia vievä. TinyOS on tällainen järjestelmä. Se on komponenteista koostuva järjestelmä, joka mahdollistaa modulaarisen ja tapahtumapohjaisen ohjelmoinnin.

Writer	Mikko Kotala
Thesis	Wireless sensor networks
Pages	30
Graduation time	June 2010
Thesis Supervisor	Kai Poutanen

---

## ABSTRACT

Sensor network contains sensor nodes that measure the environment and transforms the measured information to data streams. Multiple sensor nodes take part in the processing and delivering of the information. A summary of the measured data is delivered to the user, who gets unique information on the measured target. Sensor networks can be used in military, industrial, hospital and home environments.

Wireless sensor networks is a fairly new field of science. Sensor networks gain new features and applications as other technologies advance. Sensor networks contain a lot of new technology, specially meant for its unique use.

Because sensor networks are wireless, the power source is the most important component. Energy efficiency has been taken into consideration when designing the network. Different energy saving operating modes and methods has been implemented.

There are many security threats in wireless sensor networks. Many threats are present on other networks as well, so there are solutions for some of them. Some of the threats are unique to sensor networks, like capturing of a node and reprogramming it to gain access to the network. The countermeasures need to have a low memory overhead and be energy efficient.

Different wireless technologies have been proposed for sensor networks. Some of them have been designed specially for sensor networks, like ZigBee and 6LoWPAN, other are more common wireless standards, like Bluetooth, WiMAX and WLAN. The standards have different features and fit other applications differently.

The nodes operating system must be built with the unique characteristics of the sensor network in mind. It needs to be energy saving and little memory. TinyOS is an operating system often used in wireless sensor networks. Its component based system, that uses modular and event based programming.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	SOVELLUKSET.....	2
	2.1 Luonnon tarkkailu.....	2
	2.2 Armeijan sovellukset.....	2
	2.3 Terveystenhoito.....	3
	2.4 Kuluttajille suunnatut sovellukset.....	3
	2.5 Talotekniikka.....	4
3	SUUNNITTELUN NÄKÖKOHTIA.....	5
	3.1 Tehon syöttö.....	5
	3.2 Hinta.....	6
	3.3 Virransäästökeinot.....	6
	3.4 Ajan synkronointi.....	7
	3.5 Liikkuvuus.....	8
	3.6 Turvallisuus.....	8
4	TIEDONSIIRTO.....	10
	4.1 Tiedonsiirto sensoreilta.....	10
	4.2 Tiedonsiirto sensoreille.....	12
	4.3 Tiedonvälitys käyttäjälle.....	12
5	LANGATTOMAT TEKNIIKAT.....	13
	5.1 ZigBee.....	13
	5.2 Bluetooth.....	14
	5.3 WLAN, Wi-Fi.....	15
	5.4 WiMAX.....	15
	5.5 6LoWPAN.....	15
	5.6 IEEE 1451.....	16
	5.7 Yhteenveto.....	16
6	SENSORIYKSIKKÖ.....	17
	6.1 Imote2.....	18
	6.2 Waspnote.....	19
7	KÄYTTÖJÄRJESTELMÄ.....	21
	7.1 Ohjelmointitavat.....	21
	7.2 Käyttöjärjestelmän rakenne.....	22
	7.3 TinyOS.....	22
8	TULEVAISUUS.....	23
9	YHTEENVETO.....	25
	LÄHTEET.....	26
	LIITTEET.....	29
	Liite 1: Imote2-sensoriverkkoalustan tarkemmat tiedot.....	29
	Liite 2: Waspnote-sensoriverkkoalustan tarkemmat tiedot.....	30

## Lyhenteiden ja termien luettelo

GPS	Global Positioning System, satelliittipaikannusjärjestelmä.
Multi-hop	Monihyppy, tietoverkko, jossa tiedonsiirto tapahtuu laitteiden välillä hyppyillä laitteelta laitteelle. Monta eri laitetta voi osallistua tiedonvälitykseen.
Protokolla	Käytäntö tai standardi, joka mahdollistaa laitteiden välisen kommunikaation.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikanalan järjestö, joka määrittää alan keskeisiä standardeja.
ISM-taajuusalue	Industrial, Scientific and Medical -taajuusalue, jonka käyttö ei vaadi erillistä lisenssiä. Se on alun perin tarkoitettu teolliseen, tieteelliseen ja lääketieteelliseen käyttöön.
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems, mikrosysteemit. Komponentteja, joissa yhdistyy monta eri toimintoa. Sen yksittäiset osat ovat kooltaan mikrometrin luokkaa.
LVI	Lyhenne, jota käytetään tarkoittamaan laitteita, jotka liittyvät tilan lämmön, veden tai ilman tuontiin ja säätelyyn.
IP	Internet Protocol, Internetin protokolla, joka huolehtii tietoliikennepakettien perille toimittamisesta.
I/O-liitännät	Input/Output liitännät, tiedonsiirtämiseen tai signaloimiseen laitteiston komponenttien välillä käytettävä liitäntä.
SDRAM	Synchronous dynamic random access memory, muistityyppi, joka vaatii säännöllistä virkistämistä, eli tieto häviää muistista ilman virtaa.
Flash	Haihtumaton muistityyppi, jossa tieto säilyy vaikka virta kytkeäisiin pois. Se voidaan sähköisesti tyhjentää ja uudelleenohjelmoida.
Li-Ion	Litiumioniakku, jossa käytetään litiumia energian tuottamiseen.
Li-Poly	Litiumpolymeeriakku, litiumioniakun kehittyneempi versio.

GSM	Global System for Mobile Communications, maailmanlaajuinen matkapuhelinjärjestelmä. Toisen sukupolven matkapuhelinverkko.
GPRS	General Packet Radio Service, GSM-verkossa toimiva pakettikytkentäinen tiedonsiirtopalvelu.
SD	Secure Digital, muistikorttityyppi.
CRC	Cyclic Redundancy Check, tarkisteavaimen luontiin tarkoitettu algoritmi.
FIFO	First In First Out, menetelmä, jossa tehtävät käsitellään jonomaisesti, jonon ensimmäinen käsitellään ensimmäiseksi, toinen ensimmäisen jälkeen jne.

## 1 JOHDANTO

Sensoriverkko on ns. jaettu järjestelmä, joka integroituu ympäröivään maailmaan. Sensorit keräävät tietoa ympäristöstä, toisin kuin yleisesti tietokoneet, jotka käsittelevät ihmisen niille antamaa tietoa. /1/

Sensori tai anturi mittaa eri ilmiöitä ja muuntaa ne sähköiseen muotoon. Sensori välittää tiedon mittalaitteelle tai rekisterille, joka voi näyttää tiedon näytöllä tai tallettaa sen muistiin. Sensori voi mitata eri suureita, joihin lukeutuu mm. lämpötila ja paine. Sensoriverkot koostuvat monista pienistä sensoreista tai sensoriyksiköistä, jotka muodostavat verkon tutkittavalle alueelle. Vaikka aluetta voitaisiin tutkia sensoreilla kauempaa, eivät ne anna yhtä tarkkaa kuvaa ympäröivästä maailmasta, jolloin tietyt ilmiöt jäävät näkemättä. Pienemmällä alueella tiheään ripotetuilla sensoreilla, voidaan havaita ilmiöitä, joista ei välttämättä ole edes paljon tietoa. Tästä johtuen sensoriverkot ovat monella eri alalla suosittu tutkimuskohde. /1/

Sensoriyksiköt voidaan sijoittaa mitattavan kohteen sisään tai sen läheisyyteen. Yksiköt toimivat ryhmänä ja työskentelevät yhdessä suorittaen käyttäjän niille antamaa tehtävää. Sensorien fyysinen sijainti ei välttämättä ole ennalta määritelty. Tästä johtuen sensoriverkot soveltuvat moniin eri mittaushaasteisiin, kuten paikannukseen ja kemialliseen ilmaisuun alueilla, joissa ei voida käyttää tavallisia mittauslaitteistoja. /1/

Langattomat sensoriverkot tuovat monia hyötyjä verrattuna langallisiin sensoreihin. Langaton verkko ei tuota niin suuria kustannuksia asennusvaiheessa, koska langattomien yksiköiden välille ei tarvitse vetää johtoja. Tällöin langattomilla sensoriverkoilla saadaan enemmän mittaavia yksiköitä halvemmalla, jolloin on mahdollista rakentaa laajemmat verkot. /2/

Sensoriverkot eroavat normaaleista kuluttajille suunnatuista laitteista. Sensoreiden tiedon kulku tapahtuu pääasiassa toisten sensoreiden välillä, eikä käyttäjän ja sensoriyksikön välillä. Sensoriverkoissa käyttäjä ei hallinnoi tiedon kulkua, vaan verkko hoitaa tiedon prosessoinnin itse ja välittää saadut mittaustulokset käyttäjälle. Perinteisessä langallisten sensorien mittauksissa mitattu tieto siirretään keskusyksikölle, joka prosessoi tiedon. Tiedonsiirto tarvitsee siirtoyhteyden sensorin ja keskusyksikön välillä, joka vie paljon energiaa, jota langattomilla sensoreilla ei ole tuhlattavaksi. Sensoriverkoissa ei siis yleensä ole käytäntönä tallettaa kaikkea raakaa dataa, mitä sensoriyksiköt mittaavat, vaan vain tärkein yleistieto tutkittavasta kohteesta. Sensoriverkkojen haasteena onkin saada mahdollisimman tarkat mittaustulokset, ottaen huomioon kapean kaistanleveyden ja prosessointikyvyn. /2/

Langattomat sensoriverkot on kasvava tekninen ala. Eri tekniset saavutukset ja edistykset ovat edesauttaneet sensoriverkkojen kehittämistä. Langaton teknologia on edistynyt mahdollistaen erilaisia sovelluksia, joista ennen vain haaveiltiin. Uudet piiritekniikat ovat mahdollistaneet pienemmät komponentit ja pienemmän virran kulutuksen. Modernit instrumentit, mikrosysteemit (MEMS) ja viisaat sensorit ovat mahdollistaneet laajat

ja halvat langattomat sensoriverkot. Laitemäärän kasvaessa verkon monimutkaisuus kasvaa, joka vaikeuttaa laitteiden ohjelmointia ja asennusta. /2/

Sensoriverkkoja voidaan käyttää monilla eri yhteiskunnan alueilla esim. sotilas-, sairaala-, teollisuus- ja kotiympäristöissä. /1/

## 2 SOVELLUKSET

Sensoriverkko voi sisältää monia hyvin erilaisia sensoreita, jotka mittaavat eri asioita, kuten esim. lämpötilaa, painetta, kosteutta, äänenvoimakkuutta, kohteen nopeutta ja suuntaa, jne. Mm. tästä syystä sensoriverkkojen soveltaminen eri tutkimusaloihin on hyvin laajaa. Sensoriverkkoja on hyödynnetty mm. teollisuuden toiminnoissa, luonnon tarkkailussa, liikenteen tarkkailussa, armeijan eri toiminnoissa, eläinten käyttäytymisen seurannassa, kuluttajille suunnatuissa laitteissa ja ihmisten terveydenhoidossa. Joissain edellä mainituissa toiminnoissa sensoriverkot ovat olleet käytössä aikaisemminkin, ai-noastaan langallisilla sensoreilla toteutettuna. Langattomuus tuo sovelluksille uusia ulottuvuuksia ja helpottaa sovellusten käyttöönottoa, kun kalliita ja asennuksen vaativia kaapeleita ei tarvitse vetää mitattavaan kohteeseen. /2/

### 2.1 Luonnon tarkkailu

Langattomia sensoriverkkoja voidaan soveltaa luonnon tarkkailussa mm. lintujen tai hyönteisten seurantaan, koko maapallon ilmaston seurantaan, meteorologiseen tai geofysikaaliseen tutkimukseen, tulvien havaitsemiseen, ympäristösaasteiden tutkimiseen tai metsäpalojen havaitsemiseen. /18/

Koska sensorit voidaan ripotella luontoon sattumanvaraisesti ja tiheästi, voivat ne metsässä havaita metsäpalon alun ja estää sen leviämisen hallitsemattomaksi. Miljoonia sensoreita voidaan asettaa metsään, josta ne pystyvät kommunikoimaan käyttäjälle radioaaltoja käyttäen. /18/

Tulvien havaitsemiseen on Yhdysvalloissa kehitetty ALERT-järjestelmä (Automated Local Evaluation in Real Time), joka sisältää sensoreita, jotka mittavat veden korkeuden, sademäärän ja yleisesti ilmaston arvoja. Sensorit lähettävät mittaustiedot keskustietokoneelle, joka uhkaavassa tilanteessa asettaa hälytystilan päälle. /18/, /19/

### 2.2 Armeijan sovellukset /18/

Langattomat sensoriverkot voivat olla osana armeijan eri toimintojen tarkkailua. Niiden avulla voidaan tehostaa omien joukkojen toimintaa tai saada tärkeää tietoa vastustajan liikkeistä. Sensoriverkot soveltuvat sodankäyntiin sensoreiden pienen kustannuksen takia. Vaikka sensoryyksikkö tuhoutuisi taistelussa, ei koko verkko ole menetetty, eikä sensoria välttämättä tarvitse korvata uudella.



Sotamiehiä, kalustoa ja ammuksia voidaan tarkkailla sensoriverkkojen avulla, jolloin johtajat ja komentajat saavat tarkan kuvan joukkojensa suuruudesta ja kunnosta. Jokaiseen tärkeään tarkkailtavaan kohteeseen voidaan liittää sensori, joka lähettää tietoa tiedon keräävälle yksikölle, joka koostaa tiedosta yhteenvedon joukkojen komentajille.

Taistelukenttää voidaan tarkkailla sensoriverkkojen avulla. Tärkeille teille ja kuluväylille voidaan asettaa sensoreita, jotka kertovat vihollisten liikkeistä. Myös maastoon asetetut sensorit voivat kertoa vihollisten hyökkäysaikomuksista, ennen kuin laukaustakaan on ammuttu.

Kemiallisessa ja biologisessa sodankäynnissä sensoriverkkoja voidaan käyttää käytettävien aseiden nopeaan ja tarkkaan tunnistamiseen. Omalle taistelualueelle asetetut sensoriverkot voivat havaita nämä hyökkäykset ja mahdollistaa nopean vastatoimiin ryhtymisen, vähentäen näin omien sotilaiden kuolemia.

### 2.3 Terveydenhoito /18/

Sensoriverkoilla voidaan esim. tarkkailla ihmisen verenpainetta tai lämpötilaa, jolloin saadaan kuva henkilön terveydentilasta. Pienet sensorit antavat tarkkailtavalle potilaalle enemmän vapautta liikkua ja lääkäreille mahdollisuuden nähdä oireet aikaisemmin. Nämä lisäävät potilaan elämän laatua, kun henkilön ei välttämättä tarvitse olla hoitolaitoksessa.

Sairaaloissa voidaan sensoreita liittää potilaisiin. Pienen kokonsa ansiosta potilaille voidaan laittaa useita sensoreita. Myös lääkärit voivat kantaa sensoreita, jotka ilmaisevat tarvittaessa heidän sijaintinsa sairaalassa.

Potilaille määrättyihin lääkkeisiin voi liittää sensoriyksikön. Tällöin väärän lääkkeen antamista voidaan vähentää. Potilailla voi olla sensoreita, jotka ilmaisevat henkilön sairauden ja siihen tarvittavan lääkkeen. Tällaiset tietokoneistetut järjestelmät auttavat estämään lääkkeiden väärinkäyttöä.

### 2.4 Kuluttajille suunnatut sovellukset

Kodin automatisointi on mahdollista sensoriverkoilla. Sensoriyksiköitä voidaan sisällyttää useisiin elektroniikkalaitteisiin tai kodinkoneisiin. Nämä sensorit voivat siirtää tietoa toisilleen ja tehdä vaikka kotityöt automaattisesti omistajan ollessa töissä. Järjestelmää voitaisiin hallita joko asunnossa tai vaikka matkapuhelimen kautta. /18/

Sensoreita on myös matkapuhelimissa. Perusmallit sisältävät lämpöantureita, valoantureita ja tehonkulutukseen tarkoitettuja laitteita, kehittyneemmissä malleissa voi jopa olla paikannukseen liittyviä laitteita. Miljoonat matkapuhelimen käyttäjät voivat tulevaisuudessa saada tietoa toisilta käyttäjiltä automaattisesti. Sen hetkinen säätieto voidaan saada monelta eri matkapuhelimelta tai tiellä syntyneestä liikenneuhkasta voidaan varoit-

taa muita, automaattisesti. Matkapuhelimet toimisivat tällöin sensoriverkon tavoin mitaten ympäristöä ja ilmaisten mittaustiedot käyttäjälle. /25/

## 2.5 Talotekniikka

LVI-laitteissa (lämpö, vesi, ilma) on antureita huoneilman tarkkailua varten, jotka mittaavat huonetilan lämpötilaa ja kosteutta ja säättävät lämmitystä tai ilmastointia mittaustiedon mukaan. Anturit on yleensä sijoitettu mahdollisimman lähelle ihmistä esimerkiksi pään korkeudelle. Pelkästään katon rajassa olevan sensorin mittaustieto olisi hyödytöntä, koska tilan lämpötilaa halutaan säädellä juuri ihmisiä varten. Yleisesti sensoriyksiköitä on maksimissaan yksi per huone johtuen niiden hinnasta. Itse anturi on halpa, lähes 90 % kokonaishinnasta tulee johdotuksesta ja sen asennuksesta. /14/

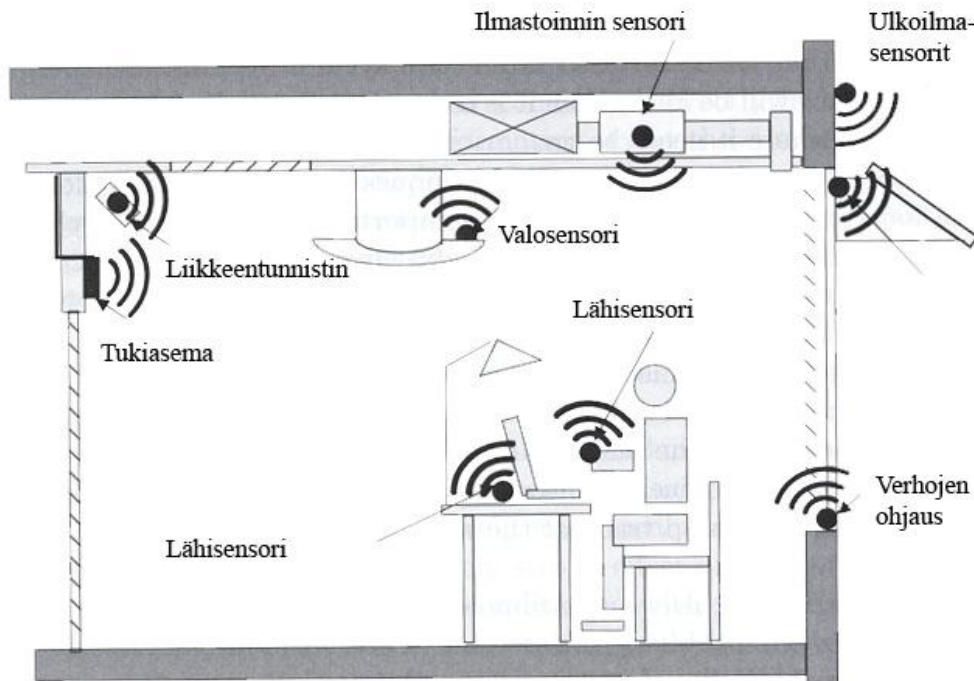
Perinteistä langallista anturia ei voida asentaa lähelle ihmistä. Esimerkiksi langallinen anturi ei voi olla työpisteen pöydällä tai tuolissa, jossa työskentelevä ihminen viettää suurimman osan työajasta. Kiinteät anturit ovat myös herkkiä mittaamaan vääriä tuloksia. Jos esimerkiksi aurinko paistaa ainoastaan anturin kohdalle eikä muualle tilaan, mittaa anturi ilman lämpötilan liian suureksi, laskee lämmitystä ja tekee tilasta liian kylmän työskennellä. /14/

Kuvassa 1 on esitetty tilanne, jossa huonetilaa mitataan eri paikkoihin asetetuilla sensoreilla. Tilassa olevalla ihmisellä on ranteessa ja työpöydällä lähisensorit, jotka mittaavat lähiympäristön lämpötilaa. Katon rajassa on liikkeentunnistin, joka ilmaisee onko huoneessa ihmisiä. Katossa olevassa lampussa on sensori, joka mittaa valaistusta ja säättää valaistuksen voimakkuutta tarpeen tullen. Ikkunan sälekaihtimissa on sensori, joka myös mittaa valaistuksen voimakkuutta ja avaa tai sulkee sälekaihtimia tarvittaessa. Talon ulkopuolella on myös sensorit, jotka mittaavat ulkolämpötilaa. Kaikki mainitut sensorit jakavat tietoa tehden tilasta sopivan lämpöisen energiaa säästävällä tavalla.

Monta sensoria yhdessä tilassa tuo lämmityksen ja ilmastoinnin suhteen säästöä. Tutkimusten<sup>1</sup> mukaan jo kahdella sensorilla tilassa saadaan 8 % energian säästö verrattuna yhden sensorin käyttöön.

---

<sup>1</sup> Wang, D. - Arens, E. - Webster, T. - Shi, M.: How the Number and Placement of Sensors Controlling Room Air Distribution Systems Affect Energy Use and Comfort. International Conference for Enhanced Building Operations, 2002.



Kuva 1. Esimerkki sensoriverkkojen käytöstä sisätiloissa. (Kuva on muunneltu lähteestä /14/)

### 3 SUUNNITTELUN NÄKÖKOHTIA

Koska lukuisat pienet yksiköt toimivat itsenäisesti maastossa, on laitteiden suunnittelu vaikeaa. Koska sensorit ovat langattomia, energian saanti on ongelma.

#### 3.1 Tehon syöttö

Luotettava, pitkään kestävä virtalähde on hyvin tärkeä komponentti langattomissa sensoreissa. Huono virtalähde lyhentää laitteiden käyttöikää. Erilaisia virtalähteitä voi soveltaa laitteen suunnittelun yhteydessä. Tällaisia virtalähteitä voisi olla mm. paristot, radioaaltoenergia, liikkeestä syntyvä energia, aurinkoenergia, lämpötilan vaihtelut, johtoa pitkin siirrettävä energia jne. Toiset virtalähteet ovat hyvin heikkoja (liikkeestä syntyvä energia), kun taas toiset rajoittavat laitteen liikkuvuutta (johtoa pitkin siirrettävä vaihtovirta). Mm. näistä syistä sensoriyksiköiden valmistajat suosivat paristoja, joskin paristojen käytössä on myös haittapuolia. Lämpötila vaikuttaa paristojen tehoon, varaukseen ja jännitteeseen. Pariston jännite riippuu kuormavirran suuruudesta. Paristojen käyttöikä on normaalisti noin 3 vuotta, joka rajoittaa laitteiden käyttöikää, vaikka niiden virrankulutus ei olisi niin suurta, ettei pariston virta riittäisi pidemmäksikin aikaa. /2/

Sensoriverkkojen laitteissa ei yleensä ole mahdollista vaihtaa käytettävää paristoa. Jos sensoriyksiköitä on ripoteltu luontoon satoja, ellei jopa tuhansia kappaleita, ei pariston

vaihto ole välttämättä edes taloudellisesti kannattavaa. Sensorit pystyttäisiin löytämään niiden sisältämien GPS-paikantimien avulla, mutta tarvittava työvoima paristojen vaihtoon voisi tulla kalliimmaksi, kuin kokonaan uusien sensoreiden valmistus ja asennus mittausalueelle. Laitteet ja niiden sisältämät paristot ja paristojen kemikaalit päätyisivät tällöin luontoon, joka saastuttaisi ympäristöä.

### 3.2 Hinta

Mitä enemmän ominaisuuksia sensoriyksiköt sisältävät, sitä kalliimmaksi laitteet tulevat. Kaikissa sovelluksissa ei välttämättä tarvita jokaista mahdollista anturia. Sensoriverkoissa yksiköitä tarvitaan useita, joten yhden kustannus ei saa nousta liian korkeaksi. /2/

### 3.3 Virransäästökeinot

Virran saannin ollessa sensoriverkoissa vaikeaa, langattomuuden takia, täytyy laitteet suunnitella vähän energiaa kuluttaviksi. Valitsemalla käytettävään laitteeseen vain tarvittavat komponentit ja asettamalla laitteelle lepotiloja ja käyttöjaksoja, saadaan laitteista energiaa säästäviä. /2/

#### 3.3.1 Virransäästötilat

Sensoriyksiköt laittavat itsensä lepotilaan, jolloin virtaa säästyy. Jos laite olisi koko sen toiminta-ajan aktiivitilassa, kuluttaisi se virtaa enemmän. Eri tiloja laitteilla on yleensä kolme: Aktiivitila, valmiustila, ja lepotila. Aktiivitilassa laitteen lähetin lähettää ja anturit mittaavat tietoa. Tämä on eniten virtaa vievä tila. Valmiustilassa sensoriyksikkö on, nimensä mukaan, valmiudessa käyttämään sen eri toimintoja, kuten sensoreita mittaamaan ympäristöä tai käyttämään lähetintä tai vastaanotinta tiedonsiirtoon. Lepotilassa laitteen komponentit eivät saa virtaa. Vain laitteen herättävät osat, kuten kello, saavat tällöin virtaa. Koska nämä komponentit ovat hyvin vähän virtaa vieviä, on myös koko sensoriyksikön virrankulutus lepotilassa erittäin vähäistä. Huomattava asia lepotilojen käytössä kuitenkin on se, että laitteen herätessä lepotilasta kuluttaa se hetkellisesti enemmän virtaa. Toisaalta säästetty energia lepotilassa ollessa on huomattavasti suurempi kuin herättämiseen tarvittava energia. /1/

#### 3.3.2 Käyttöjaksot

Tehokkuutta voidaan lisätä käyttämällä sensoriverkossa käyttöjaksoja. Käyttöjaksoilla tarkoitetaan, että laite on käytössä vain tiettyinä ajankohtina. Käyttöjaksojen asettaminen vaatii kaikkien sensoriverkkoon osallistuvien laitteiden toiminnan samoissa käyttö-

jaksoissa, muuten verkko ei ole enää toimiva. Toimintojen asettaminen tiettyihin aikaväleihin voi lisätä laitteen käyttöikää kymmen- tai jopa satakertaiseksi. /2/

### 3.3.3 Tiedonkäsittely

Sähkösäästö on otettu huomioon myös muissa tavallisissa tiedonkäsittelyyn liittyvissä toiminnoissa. Prosessoinnissa käytetään erittäin vähän virtaa vieviä prosessoreita, joilla on myös erilaisia virransäästötoimintoja, kuten dynaaminen jännitteen säätö. Sensoriyksiköissä käytettävässä ohjelmistossa on otettu huomioon energian vähäisyys. Ohjelmisto osaa asettaa oikeina ajankohtina laitteen eri osat lepotiloihin, säästäten virtaa. Sensoriverkoissa tapahtuva multi-hop-tiedonsiirto vie paljon energiaa. Suurin osa sensoriyksikön saamasta tiedosta on oikeastaan vain välitettävää tietoa, joka on tarkoitettu toiselle laitteelle. Rakentamalla radion, joka osaa välittää nämä viestit eteenpäin käyttämättä laitteen omaa prosessoria, mahdollistaa prosessointiin tarkoitettujen komponenttien pysymisen lepotilassa. /1/

*Heräävä radio* (wake up radio) on vähän energiaa kuluttava konsepti. Siinä vastaanotin kuuntelee ilmatieltä mahdollisia datapaketteja ja kuluttaa energiaa alle 1  $\mu$ W. Vastaanotin täytyy rakentaa tällöin sellaiseksi että se osaa havaita, kun paketti saapuu ja ilmoittaa muille komponenteille tulevasta paketista. Jokin muu komponentti voisi olla päävastaanotin, joka varsinaisesti ottaa paketit vastaan. Heräävästä radiosta ei ole vielä saatu rakennettua luotettavaa ja hyvin toimivaa sovellusta, mutta sellaiset radiot olisivat erittäin hyödyllisiä langattomissa sensoriverkoissa. /22/

### 3.4 Ajan synkronointi

Aikavälien käyttö edellyttää laitteiden synkronista toimintaa. Sensoriyksiköt siirtävät tietoa toistensa kanssa vain tiettyinä ajanhetkinä, jolloin molemmilla täytyy olla sovittu ajankohta tarkasti tiedossa. Vaikka tiedonsiirtoajankohta olisi tiedossa, voi laitteen oma kello olla virheellisessä ajassa ulkopuolisista vaikutuksista johtuen. Laitteen sisäiseen kelloon voi vaikuttaa lämpötila, vaiheen tai taajuuden häiriöt, sekä tiedonsiirrossa tapahtuva viive. On esitetty kolme erilaista ajan synkronointimenetelmää, jotka korjaisivat eri syistä johtuvan ajan virheen. /1/

Ensimmäinen tapa on asettaa verkkoon aikaservereitä, jotka tahdistavat verkon samaan aikaan. Näillä servereillä on erittäin tarkka ja luotettava kello. Aikaservereiden käyttö saattaa kuitenkin aiheuttaa joihinkin osiin sensoriverkkoa virheellisen kellon tahdistuksen, joka syntyy tiedonsiirrossa tapahtuvista häiriöistä tai ympäristön aiheuttamasta viiveestä. Internetissä on käytössä aikaservereihin pohjautuva *Network Time Protocol* (NTP), joka voisi sopia sensoriverkkoihin muutamin parannuksin. /1/

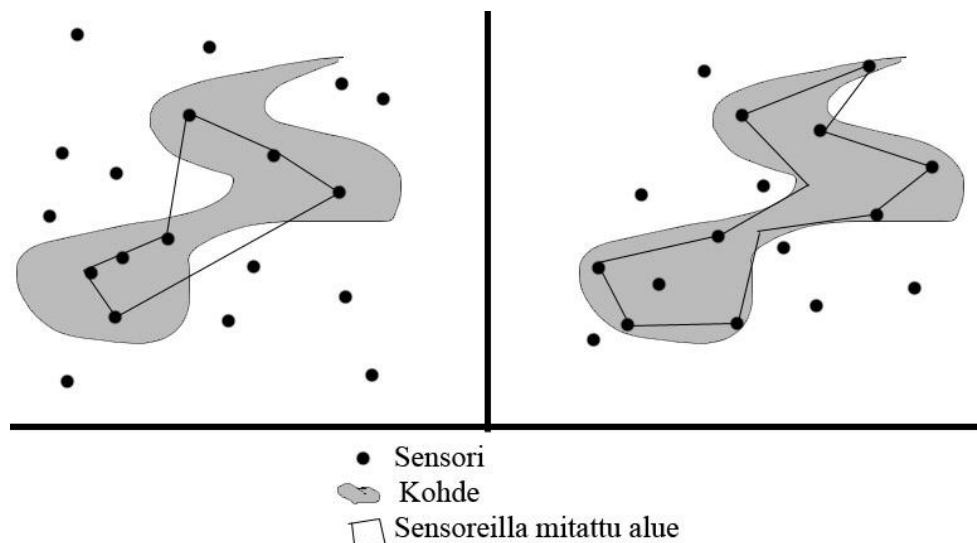
Toinen tapa on käyttää referenssilähetystä. Tiedon lähettäjä lähettää ennen varsinaista tietoa referenssipaketteja. Vastaanottajat tallentavat pakettien vastaanottoajan, vertaavat niitä keskenään ja määrittävät omien kellojensa vääristymän. /1/

Kolmas tapa on yrittää pitää verkon laitteiden kellot tietyn virhemarginaalin sisällä. *Time-Diffusion Synchronization Protocol* (TDP) toimii automaattisesti synkronisoimalla verkon sisällä olevat laitteet sen määrittämän laitteen kelloon. TDP:n valitsema laite määräytyy sen energiamäärästä ja kellon tarkkuudesta. Verkon aika ei siis välttämättä ole täysin sama kuin verkon ulkopuolella, mutta verkon sisällä laitteiden kellot pysyvät samassa ajassa. /1/

### 3.5 Liikkuvuus

Vaikka pieniä mittausyksiköitä olisi suuri määrä, ei mitattavan poikkeaman suuruudesta tule välttämättä tarkkaa kuvaa. Sensoreita ei aina aseteta tai edes voida asettaa suoraan mitattavan ilmiön ympärille. Sensoriyksiköt täytyisi tällöin saada liikkumaan paremmille mittaustaikoihin. Sensoriyksiköt eivät liiku ilman huomattavaa määrää energiaa, joka lyhentää niiden käyttöikää. /1/

Sensoriverkon yksiköiden liikkuvuudesta on esimerkki kuvassa 2.



Kuva 2. Vasen puoli, sensorit on asetettu mitattavan alueen päälle ilman minkäänlaista tietoa kohdealueen koosta. Oikea puoli, sensorit liikkuvat kohteen läheisyyteen saaden tarkemman kuvan mitattavasta kohteesta. /1/

### 3.6 Turvallisuus /16/

Langattomien sensoriverkkojen rakenne tuo monia uusia ongelmia turvallisuuteen. Tavallisissa tietoverkoissa olevat tietoturvaongelmat ja niiden ratkaisut eivät välttämättä

päde sensoriverkkoihin. Sensoriverkoilla on langaton yhteys ja mahdollisesti suuri yksikkömäärä, jotka edistävät verkkoa häiritseviä tai kuuntelevia tahoja tekemään tuhoja. Sensoriverkon yksiköt eivät pysty ylläpitämään muiden verkkojen kehittyneitä turvallisuutta edistäviä ominaisuuksia, koska niillä on hitaampi siirtonopeus, sekä vähemmän muistia ja energiaa. Toisaalta yksinkertainen kommunikointitapa tekee tunkeutumisen havaitsemisesta helpompaa. Jos langattomat sensoriverkot solutetaan jokapäiväiseen elämäämme ja välittävät tietoa, joka voi mahdollisesti olla arkaluontoista, tulisi turvallisuuden olla toimivaa ja tehokasta.

### 3.6.1 Uhat

Sensoryksikkö voidaan kaapata ja lukea sen sisältämät tiedot. Sensoryksiköstä voidaan myös asettaa uudelleen asetuksia, jolloin verkkoon hyökkääjä voi mahdollisesti päästä käsiksi myös toisten sensorien tietoihin. Kaapattu laite voidaan myös ohjelmoida kirjoittamalla reititystaulut houkuttelevammiksi. Muut laitteet luulevat kaapatun sensoryksikön olevan lähellä tiedon keräävää laitetta, jolloin kaikki tieto tulee uudelleen ohjelmoidulle sensoryksikölle ja näin verkkoon hyökkäävälle. Myös muissa verkoissa mahdollista lähetysten salakuuntelua voi tapahtua sensoriverkoissa.

Sensoryksiköiden liikennemääriä seuraamalla voidaan määrittää laitteet, jotka ovat lähellä tiedon keräävää laitetta. Mitä suuremmat pakettimäärät sensoryksikkö lähettää tiettyyn suuntaan, sitä varmemmin siellä suunnassa sijaitsee myös tiedon keräävä laite. Näin verkkoon tunkeutuja voi löytää yhden tärkeimmän sensoriverkon laitteen ja kaapata sen saaden verkon kaiken tiedon haltuunsa.

Pelkästään sensoriverkkojen toiminnallisuutta voidaan myös haluta häiritä, esim. jos verkkoa käytetään vartioinnissa. Tällöin tunkeutuja voi käyttää erilaisia palvelunestohyökkäyksiä (Denial of Service, DoS). Tulvahyökkäyksessä tehdään koko ajan uusia yhteisyriä sensoryksiköille, joka ylikuormittaa niiden päämuistin. Muistin täytyessä kaikki uudet viestit, oli ne laillisia tai ei, jätetään huomiotta. Sensoryksiköiden radiotaajuuksia voidaan myös häiritä, jolloin yksiköt eivät pysty keskustelemaan muiden laitteiden kanssa.

### 3.6.2 Vastatoimet

Sensoriverkoissa käytettävät turvallisuusuhkien vastatoimet täytyy olla tehokkaita ja vähän muistia vieviä. Vastatoimien täytyy turvata verkon eri toiminnot kokoaikaisesti, varmistaa, että sensoryksiköiden välinen liikenne on oikeaa, lähetetty tieto on tuoretta, eikä tunkeutujan lähettämää vanhaa tietoa, sekä suojata langattomat yhteydet.

Avainten hallinnalla (key management) voidaan tehdä sensorien välinen liikenne koodatuksi. Jos lähetetty tieto halutaan lukea, tarvitaan avain koodatun tiedon avaamiseksi. Avainten käyttö tuo tietoturvallisuutta, mutta vie verkon resursseja.

Autentikointia voidaan käyttää tiedon lähettävän osapuolen tunnistamiseen. Sen avulla tiedetään, onko lähettäjä osa verkkoa vai ulkopuolinen taho. Sitä voidaan myös käyttää siirrossa tapahtuvien virheiden havaitsemiseen ja ehkäisemiseen. Autentikointi, kuten avainten hallinta, käyttää avainta tunnistamisprosessissa. Tämä vastatoimi tuo hyvän turvan, mutta vie paljon verkon resursseja.

Tunkeutumisen havaitseminen (intrusion detection) näkee sisältäpäin tulevat hyökkäykset, jotka pääsevät läpi autentikoinnista avaimen avulla. Tunkeutumisen havaitseminen tarkoittaa verkon tarkkailua sen ollessa toiminnassa. Ne voidaan luokitella kolmeen eri luokkaan niiden käyttämien tekniikoiden mukaan: tunnusten mukaan havaitseminen, spesifikaation mukaan havaitseminen ja poikkeamien havaitseminen. Kahta viimeistä on eniten tutkittu sensoriverkkoja varten. Tunkeutumisen havaitseminen on käytössä hyvin onnistuneesti Internetissä, mutta langattomissa sensoriverkoissa sen käyttö on vaikeaa.

Kaikki ehdotetut turvatoimet vievät laitteiden resursseja. Verkon suunnittelun yhteydessä täytyy valita verkon mahdollisesti tarvitsevat turvatoimet ja huomioida laitteiden tarvitsema muistimäärä ja käyttöikä komponentteja valitessa.

## 4 TIEDONSIIRTO

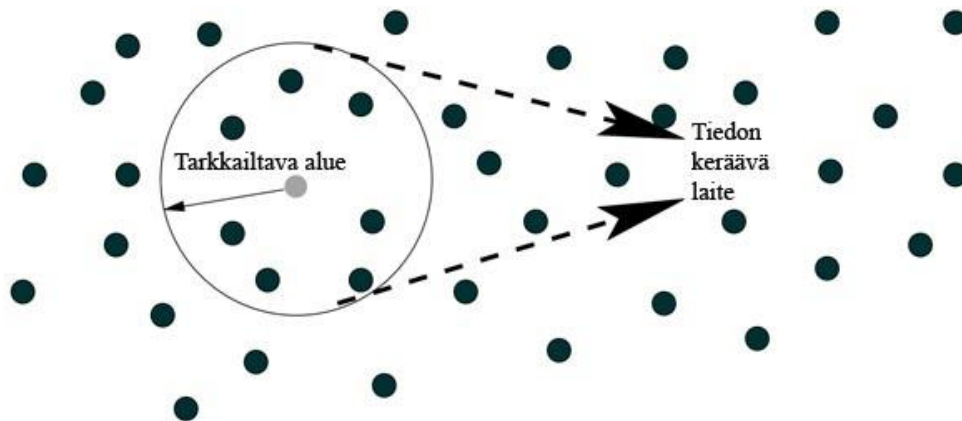
Sensoriverkkojen tiedonsiirtoprotokollat ja algoritmit eroavat muiden samankaltaisten verkkojen tekniikoista. Verkon rakenne vastaa ad-hoc-verkkoja, joissa tiedonvälityksestä ei vastaa ainoastaan yksi laite, kuten reititin, vaan kaikki verkon laitteet voivat tarvittaessa osallistua tiedon välitykseen. Ad-hoc-verkoille suunnitellut protokollat eivät sovellu sensoriverkoille mm. siitä syystä, että laitteita on verkossa huomattavasti enemmän kuin ad-hoc-verkoissa, verkon topologia muuttuu hyvin usein ja langattomilla sensoryksiköillä ei ole tarpeeksi muistia, eikä prosessointitehoa tukeakseen niitä. /1/

Tiedonsiirto voi tapahtua radioteitse, optisesti tai ultraäänellä. Sensoriverkoissa suosituin tiedonsiirtotapa on radioteitse tapahtuva tiedonsiirto. /22/

### 4.1 Tiedonsiirto sensoreilta

Mittausdatan tutkittavalta alueelta kerää tiedon keräävä yksikkö (sink), joka saa tiivistetyn tiedon alueen sensoreilta (katso kuva 3). Tiedon keräävä laite toimii eräänlaisena reitittimenä sensoriverkon ja käyttäjän välillä. Se voi välittää tiedon suoraan käyttäjälle tai laitteelle, jolla on paremmat tiedonlähetysominaisuudet. Tiedon keräävä laite voi olla samanlainen sensoryksikkö kuin verkon muut laitteet, mutta se voi myös olla tiedon keruuseen erikoistunut laite, joka sisältää tehokkaamman lähettimen. /1/





Kuva 3. Tiedon keräävä laite (englanniksi yleensä sink) on kiinnostunut vain tarkkailtavan alueen tiivistetystä tiedosta, eikä jokaisen sensorin raaka-astatista. /1/

Jotta sensoriverkkojen potentiaali saadaan täysin hyödynnettyä, täytyy mittaavien sensoriyksiköiden ja tiedon keräävän yksikön välillä olla luotettava siirtotie. Tällainen siirtotie saadaan luotettavalla kuljetuskerroksen (transport layer) protokollalla. Pakettipohjainen siirto ei ole mahdollista, vaan tarvitaan siirtotapa, jolla mitattavan alueen tieto saadaan käyttäjälle luotettavasti ilman siirtotiestä johtuvia virheitä. /1/

Kun mitattavalla alueella tapahtuu jotain yhtäkkiä, joka aktivoi sitä mittaavat sensorit, saattaa tiedonvälityksessä syntyä ruuhkaa tiedon keräävän yksikön päässä. Ruuhka syntyy, kun jokainen sensori yrittää lähettää sille omat tiedot tapahtumasta samanaikaisesti. Tämän vuoksi tarvitaan kuljetuskerroksessa ruuhkautumisen estämistä varten protokolla. /1/

#### 4.1.1 Event-to-sink Reliable Transport -protokolla

Perinteiset langattomien laitteiden tiedonsiirto-protokollat eivät sovi sensoriverkkoihin siitä syystä, että niiden tiedonsiirron luotettavuus syntyy pakettien vastaanottamiseen tarkoitettujen acknowledgement-viestien lähettämisestä ja viestien uudelleen lähettämisestä. Sensoriverkossa tapahtuvan tiedonsiirron tavasta johtuen nämä tekniikat vievät vain liikaa energiaa ja lyhentävät sensoriverkon käyttöikää. Myös sensoriyksiköiden vähäinen muistin määrä estää näiden protokollien käytön. /1/

Tapahtuman mittaavan sensorin ja tietoa keräävän sensorin välille on ehdotettu käytettäväksi *Event-to-sink Reliable Transport* -protokollaa (ESRT). Se on sensoriverkoissa kehitetty tuottamaan luotettava tiedonvälitys mahdollisimman vähäisellä virrankulutuksella. Se sisältää ruuhkautumisen estämiseen tarkoitetun protokollan. ESRT toimii pääasiassa tietoa keräävässä laitteessa, jolloin ohjelmiston suoritus vie vain vähän prosessointiaikaa ja muistia mittaavilta sensoriyksiköiltä. ESRT ei myöskään tarvitse yksittäis-

ten sensorien tunnistukseen käytettävää tunnusta, vaan pelkkä mitatun kohteen tunnus riittää. /1/

*Enhanced ESRT* ( $E^2$ SRT) kehitettiin parantamaan ESRT:n luotettavuutta ja estämään ruuhkautumista paremmin dynaamisesti vaihtuvassa verkossa.  $E^2$ SRT parantaa verkon luotettavuutta, sekä säästää enemmän energiaa tietyissä tilanteissa. /20/

#### 4.2 Tiedonsiirto sensoreille

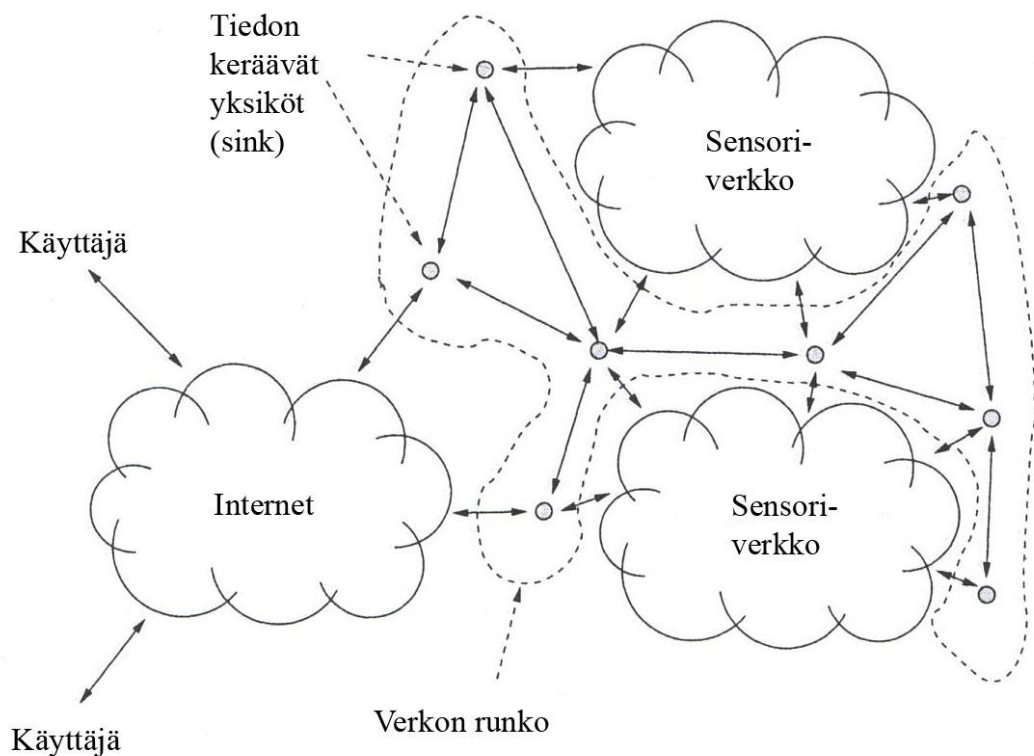
Vaikka tiedonsiirtoa ei tapahdu sensoreiden suuntaan yhtä paljon kuin käyttäjälle päin, täytyy sensoreille saada siirrettyä tärkeätä, niiden toimintaan liittyvää tietoa, kuten sensoriyksiköiden käyttöjärjestelmä, erilaiset asetustiedostot tai sovelluskohtaiset käskyt. Tällaisen tiedonsiirron täytyy olla luotettavaa tai muuten sensoriverkkoon voi syntyä vääriin säädettyjä yksiköitä, jotka voivat mahdollisesti muuttua käyttökelvottomiksi. Edellä esitetty ESRT-protokolla ei sovi tähän tarkoitukseen, sillä se ei lupaa täysin 100 % luotettavuutta. /1/

Tietoa keräävässä yksikössä on paremmat lähetysominaisuudet kuin kentälle ripotelluilla pienillä sensoriyksiköillä. Tietoa keräävä yksikkö voi tällöin käyttää sen suurempaa lähetystehoa lähettääkseen tiedot pienemmille sensoreille suoraan käyttämättä multi-hop-menetelmää, kuten toiseen suuntaan tapahtuvassa tiedonsiirrossa menetellään. Multi-hop-menetelmän käyttö kuluttaisi jokaisen tiedonsiirtoon osallistuvan sensorin energiaa ja saattaisi aiheuttaa tiedonsiirrossa ruuhkaa. Vaikkakin ideaalisin tilanne on verkko, jossa multi-hop-menetelmää ei tarvittaisi ollenkaan, sensoriyksiköillä ei välttämättä ole tarpeeksi suurta lähetystehoa välittää tietoa monia kilometrejä. Tällöin osa sensoreista joutuu välittämään tietoa reunimmaisille sensoreille ja kuluttamaan samalla omaa energiavarastoaan. /1/

Vaikka tiedonsiirto sensoreiden suuntaan on samankaltaista kuin monissa muissa verkoissa, eivät niiden tekniikat sovi sensoriverkkojen käyttöön. *Pump Slowly, Fetch Quickly* -mekanismi (PSFQ) on suunniteltu luotettavaan sensorien uudelleenohjelmointiin. PSFQ lähettää, nimensä mukaisesti, paketteja hitaasti verkkoon. Jos sensoriyksikkö huomaa virheen tapahtuneen siirrossa, kysytään viereisiltä laitteilta korjaavaa pakettia. PSFQ on sensoriverkoille tärkeä kuljetuserroksen sovellus, vaikka se ei sisällekään pakettien ruuhkautumisen estoa. /1/, /26/

#### 4.3 Tiedonvälitys käyttäjälle

Tiedonvälitys käyttäjälle tapahtuu multi-hop-menetelmällä. Kun tiivistetty tieto on saatu kerättyä tietyltä alueelta, lähetetään se tarvittaessa eteenpäin toiselle tietoa keräävälle laitteelle. Tämä taas välittää tiedon eteenpäin, kunnes se saavuttaa laitteen, jossa on isompi lähetysteho, joka siirtää sen esim. Internetiin. Tiedon välityksestä on esimerkki kuvassa 4. /1/



Kuva 4. Esimerkki käyttäjän ja sensoriverkon välisestä tiedonsiirrosta. Tiedon kerää sensoriverkosta tietoa keräävä laite, joka välittää mitatun tiedon eteenpäin esimerkiksi laitteelle, joka on liitetty Internetiin. /1/

## 5 LANGATTOMAT TEKNIIKAT

Sensoriverkoille on sopivia langattomia tekniikoita useita, joista käsitellään vain osaa. Jotkut tekniikat on suunniteltu sensoriverkkoja varten, toiset ovat laajemmassa käytössä.

### 5.1 ZigBee

ZigBee on vähän virtaa vievä ja halpa langaton tekniikka, jolla on kohtalainen kantomatka. Se perustuu IEEE 802.15.4 -radiostandardiin. ZigBeen ominaisuuksiin kuuluu enintään 100 metrin kantavuus ja maksimissaan 250 kb/s tiedonsiirtonopeus. ZigBee on suunniteltu mm. sensoriverkkojen käyttöön. Muita käyttökohteita voisi olla automaattiset mittarinlukijat, valaistuksen ohjaimet, lämpötilan säätely, kodinvalvonta järjestelmät, lääketieteelliset monitoroinnit jne. IEEE 802.15.4 -standardi, johon ZigBee perustuu, toimii globaalisti 2,4 GHz ISM-taajuusalueella (Industrial, Scientific and Medical), jossa saadaan suurin siirtonopeus, sekä alueellisesti Euroopassa 868 MHz (siirtonopeus 20 kbps) ja Amerikassa 915MHz (siirtonopeus 40 kbps) taajuusalueilla. /4/

Keskimääräinen virrankulutus laitteilla on valmistajasta ja käyttökohteesta riippuen 1 mA:sta 100 mA:iin. Pieni virrankulutus tulee Zigbeeen kyvystä siirtyä lepotilaan, jolloin se kuluttaa erittäin vähän virtaa. ZigBee herää lepotilasta tavallisesti 15 millisekunnissa. /4/, /5/

Vaikka IEEE 802.15.4 -standardin mukainen maksimikantavuus on n. 100 metriä, Libeliumin kehittämä Wasmote-alusta ja erityisesti sen suuri lähetysteho, sekä herkkä vastaanotin mahdollistavat 12 km kantavuuden näköyhteydellä. Tehoa tällöin kuluukin jo yli 300 mW. Aavikolla suoritettut testit antoivat myös näköyhteydettömälle yhteydelle kantavuudeksi 6,5 km, teholla 100 mW. Wasmote-alustan tarkemmat tiedot on esitetty liitteessä 2. /10/, /11/

ZigBeetä kehittää ZigBee Alliance, joka on joukko yrityksiä, jotka haluavat kehittää avoimen globaalin standardin ZigBeelle. ZigBee Alliance hallinnoi standardin sertifiointien antamisen. Yrityksen halutessa käyttää ZigBeetä laitteessaan täytyy sen liittyä yhteisöön ja maksaa liittymismaksu. Ilman liittymistä yritys ei voi käyttää ZigBeetä kaupallisissa laitteissaan. /4/

## 5.2 Bluetooth

Bluetooth on halpa ja pienen kantaman langaton tekniikka. Sen kantama on alle 100 metriä ja tiedonsiirtonopeus 1 - 3 Mb/s käytetystä Bluetooth-versiosta riippuen. Se käyttää 2,4 GHz ISM-taajuusalutta. Bluetooth kehitettiin pääasiassa henkilökohtaisen verkon (Personal Area Network) laitteille, kuten matkapuhelinten langattomille handsfree-laitteille. Bluetooth on yleisesti käytössä mm. tulostimissa, näppäimistöissä ja muissa viihdepelaamiseen tarkoitetuissa laitteissa. /2/, /3/

Uusi versio Bluetoothista on vasta tuloillaan. Sille luvataan 200 metrin kantavuus ja 1 Mb/s siirtonopeus virrankulutuksen puolittuessa (vrt. Bluetooth: <30 mA, Bluetooth Low Energy: <15 mA). Luvatut ominaisuudet tekevät Bluetoothista vielä paremman vaihtoehdon sensoriverkkojen tiedonsiirtotekniikaksi. /28/

Vaikka Bluetoothia usein ehdotetaankin sensoriverkkoihin, ei sen fyysinen kerros ole erityisen hyvä tarkoitukseen. Taajuushyppely tekee verkon löytämisestä vaikeaa, kun verkkoa etsivä laite ja verkossa oleva laite eivät ole samalla taajuudella. Kun verkkoon liittyvä laite etsii oikeaa taajuutta, kuluu virtaa turhaan. Bluetoothin modulaatiomenetelmä käyttää myös suhteellisen kapeaa kaistaa, mistä johtuen kanavien erottelu on vaikeampaa. /21/

Bluetoothin kehityksestä vastaa Bluetooth Special Interest Group (SIG). Se määrittää eri Bluetooth-standardit ja hoitaa tekniikan lisensoinnin. Bluetooth SIG ei valmista laitteita vaan sen jäsenyritykset valmistavat ja markkinoivat niitä. /29/

### 5.3 WLAN, Wi-Fi

WLAN tai Wi-Fi, joka on WLAN:in kaupallinen nimitys, on IEEE 802.11 -standardiin perustuva langaton tekniikka. Wi-Fi:n standardoinnin hoitaa Wi-Fi Alliance, jolla on yli 300 jäsenyritystä. Sitä käytetään pääasiassa kodeissa ja julkisissa tiloissa, joissa halutaan käyttää esim. Internetiä langattomasti. WLAN:in yleistymisen perustuu sen käytön helppouteen. Sen perusnopeus on 1 Mb/s ja tämän hetken kehittynein 802.11n-standardi on nopeudeltaan 450 Mb/s. Kantavuudeksi uusin standardi lupaa 200 metriä. Wi-Fi toimii, kuten moni muukin langaton tekniikka, ISM-taajuusalueilla 2,4 GHz ja 5 GHz. Wi-Fi on pääasiassa tarkoitettu laitteille, jotka sisältävät suuren virtalähteen, jota ladataan lähes päivittäin. /6/

Wi-Fi ei välttämättä ole paras vaihtoehto sensoriverkoille sen virran kulutuksen takia, tosin sen helppo käyttöönotto ja suuret siirtonopeudet voivat olla positiivinen asia joillekin sensoriverkkojen sovelluksille.

### 5.4 WiMAX

WiMAX on IP-pohjainen langaton tekniikka, joka pohjautuu IEEE 802.16 -standardiin. Se on lähes yhtä nopea tiedonsiirtotekniikka kuin Wi-Fi, mutta sillä on parempi kantavuus. Teoreettinen maksimisiirtonopeus on 75 Mb/s, joskin todellisuudessa arvo on pienempi, n. 45Mb/s per kanava. Kantavuus WiMAX:illa on näköyhteyssovelluksilla 16 km. WiMAX toimii laajalla ISM-taajuusalueella (2 GHz - 66 GHz). Käytettävä taajuus riippuu sovellusten vaatimuksista. Koska WiMAX:illa on laaja kantavuus, on sitä suunniteltu matkapuhelinkäyttöön, josta ensimmäiset laitteet on jo esitelty Venäjällä. Puhelin toimii WiMAX:illa ollessa oman palveluntarjoajan verkon alueella ja siirtyessä toisen verkon alueelle vaihtaa siirtotien GSM:ksi. /7/

Sensoriverkko käytössä WiMAX on samassa asemassa kuin Wi-Fi. Suuren virran kulutuksen takia se ei ehkä sovellu kaikkiin sensoriverkon sovelluksiin. Sillä on parempi kantavuus, mutta pienempi siirtonopeus kuin Wi-Fi:llä

### 5.5 6LoWPAN

6LoWPAN perustuu samaan IEEE 802.15.4 -standardiin kuin ZigBeekin. Sen ominaisuudet ovat samat kuin ZigBeellä: siirtonopeus maksimissaan 250 kb/s ja kantama alle 100 metriä. Lyhenne 6LoWPAN tulee sanoista IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network. Sen päätarkoitus on nimensä mukaisesti liittää vähävirtaiset langattomat laitteet IP-verkkoon. Tekniikan avulla pienet, esim. sensoriverkkojen yksiköt, voivat siirtää tietoa suoraan IP-protokollaa käyttäville laitteille, kuten Wi-Fi- tai Ethernet-laitteille. Sensoriverkkojen pienten laitteiden takia tämä ei ole mahdollista ilman IP-protokollan pakkaamista pienempään tilaan, jonka 6LoWPAN tekee. Kun protokollaa käytetään sensoriverkossa, reititys toisiin IP-verkkoihin tapahtuu reunareitittimen kaut-

ta, joka reitittää liikenteen esim. Ethernetiä tai WiFi:ä käyttäen muihin verkkoihin. Koska IP-protokolla on hyvin suosittu verkkotekniikka, tuo 6LoWPAN sensoriverkollle joustavuutta. /8/, /9/

## 5.6 IEEE 1451

Sensorien valmistuksessa tarvitaan suunnittelijoiden ja valmistajien tiivistä yhteistyötä, jotta ne vastaavat asetettuja kansainvälisiä standardeja, protokollia ja säädöksiä. Yleinen ongelma on myös useat erilaiset sensoryksiköt, jotka ovat suunnittelultaan erilaisia. Suunnittelun eroavaisuus tekee niiden liittämisen sensoriverkkoon työlääksi, kun mallikohtaisesti laitteet voi joutua asentamaan eri tavalla. IEEE 1451 -standardi perhe kehitettiin auttamaan näissä ongelmissa. Se määrittää asetukset miten sensorit liitetään verkkoon. /2/

Standardiperhe ei sisällä omaa langatonta tekniikkaa, vaan siihen sisältyy eri tekniikoita, joihin kuuluu mm. Wi-Fi, Bluetooth ja ZigBee. Monet yhtiöt ovat ottaneet IEEE 1451 -standardin käyttöön ja eri valmistajat ovat julkistaneet standardin mukaisia sensoreita. /2/

## 5.7 Yhteenveto

Esitetyt langattomat tekniikat edustavat osaa sensoriverkoille ehdotettuja standardeja. Standardeista jokainen on selvästi joissain ominaisuuksissa vahvempi ja ne soveltuvatkin tästä syystä eri sovelluksiin erilailla. Taulukko 1 esittää standardien sensoriverkkojen kannalta tärkeät ominaisuudet. Standardien väliltä löytyy myös monia muita eroja. Taulukosta nähdään, että ZigBee, Bluetooth Low Energy ja 6LoWPAN soveltuvat parhaiten vähän virtaa vieviin sovelluksiin. Jos taas siirtonopeutta tarvitaan enemmän, ovat muut tekniikat parempia tarkoitukseen. Huomattavaa standardien ilmoittamisessa maksimiirtonopeuksissa ja kantamisissa on se, että ne vaikuttavat aina toisiinsa. Esim. WiMAX ei toimi täydellä nopeudella 16 km yhteydellä vaan vain murto-osalla sen 75 Mb/s siirtonopeudesta. Suunnittelun yhteydessä onkin otettava huomioon verkon käyttöikä, tarvittava siirtonopeus ja laitteiden välinen etäisyys. Myös standardin tuomat ominaisuudet vaikuttavat verkon standardin valintaan.

Taulukko 1. Langattomien standardien sensoriverkkojen kannalta tärkeät ominaisuudet.

Standardi	Tiedon-siirtonopeus	Taajuus	Kantama	Tehonkulutus
ZigBee	250 kb/s	2,4 GHz	100 m	Erittäin vähäinen
Bluetooth	3 Mb/s	2,4 GHz	100 m	Vähäinen
Bluetooth Low Energy	1 Mb/s	2,4 GHz	200 m	Erittäin vähäinen
Wi-Fi	450 Mb/s	2,4 GHz, 5 GHz	200 m	Suuri
WiMAX	75 Mb/s	Koko ISM taajuusal.	16 km	Suuri
6LoWPAN	250 kb/s	2,4 GHz	100 m	Erittäin vähäinen

## 6 SENSORIYKSIKKÖ

Sensoryyksikköä rakennettaessa täytyy ottaa huomioon, millaiset ominaisuudet verkolta halutaan. Sovellus, jossa sensoryyksiköitä käytetään, määrittää laitteiden koon, hinnan ja energian kulutuksen. Joissain sovelluksissa laitekoko täytyy olla erittäin pieni, toisissa sovelluksissa riittää, kun laite sisältää tietyt komponentit koon ollessa toissijainen asia.

/22/

Tavallisesti sensoryyksikkö koostuu viidestä pääkomponentista, jotka on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Sensoryyksikön pääkomponentit. /22/

<b>Mikrokontrolleri</b>	Prosessoi kaiken tarvittavan tiedon ja suorittaa annetut käskyt.
<b>Muisti</b>	Säilöö ohjelmiston ja mitattavan tiedon; yleensä ohjelmistolle ja tiedolle on erilliset muistit.
<b>Anturi(t)</b>	Mittaa fysikaalista suuretta, kuten lämpötila tai paine.
<b>Tiedonsiirto</b>	Sensoryyksiköiden väliseen kommunikatioon tarvitaan radiolähetinvastaanotin.
<b>Virtalähde</b>	Mahdollistaa komponenttien toiminnan ympäristössä, jossa ei ole pistorasioita. Yleensä jonkinlaisia paristoja käytetään virran tuottamiseen.

Koska langattomissa sensoriverkoissa ei ole yhtä yhteistä alustaa, yksikön teko itse tulee joissain tapauksissa halvemmaksi, kuin sen tilaaminen valmiina, minkä takia esim. monet oppilaitokset valmistavat omat piirit, säästäen rahaa ja oppien samalla piirien toiminnan. Sensoryyksiköiden valmistajia on nykyään muutamia. Jotkut yritykset ovat lopettaneet pelkästään sensoryyksiköiden valmistuksen ja aloittaneet erilaisten sensoriverkkojen sovellusten kehittämisen ja markkinoinnin. /13/

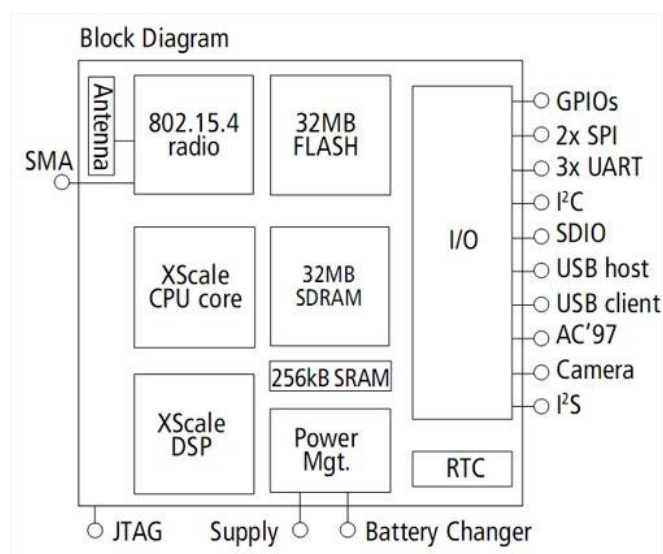
Seuraavaksi on esitetty kahden eri valmistajan sensoryyksiköt.

## 6.1 Imote2



Kuva 3. Imote2 sensoriyksikkö. /17/

Imote2 on yksi Crossbow Technologyn valmistamista sensoriyksiköistä. Se perustuu Intelin suunnittelemaan sensoriyksikköön nimeltään Mote. Imote2 on modulaarinen eli siihen saa liitettyä haluamiaan laajennuspiirejä joko piirilevyn ylä- tai alapuolelle. Yläpuolella sijaitsevat I/O-liitännät ovat laajennuspiirejä varten ja piirilevyn alapuolella on nopeita, eri sovelluksille suunniteltuja I/O-liitäntöjä. Virtalähde voidaan liittää piirilevyn molemmille puolille. Imote2-yksikkö sisältää vähävirtaisen Intelin valmistaman PXA271 XScale -prossessorin, 32 MB SDRAM:n ja 32 MB Flash-muistia. Imote2 käyttää Texas Instrumentsin IEEE 802.15.4 -standardiin perustuvaa radiolähetintä, joka toimii 250 kb/s siirtonopeudella 2,4 GHz taajuusalueella. Yksikköön on sisällytetty pieni antenni, joka mahdollistaa n. 30 metrin kuuluvuuden. Suuremman antennin saa vain juottamalla sellaisen liitäntäpiiriin. Mm. erilaiset I/O-liitännät on listattu alustan lohko-kaaviossa, joka on kuvassa 4. /17/



Kuva 4. Imote2-alustan lohko-kaavio. /17/



Alustaan voidaan liittää tarpeen vaatien erilaisia virtalähteitä. Crossbow valmistaa tarkoitukseen paristomoduulia, joka käyttää kolmea AAA-paristoa. Vaihtoehtoisesti piirilevyyn voi liittää ladattavat Li-Ion- tai Li-Poly-akut. Imote2-yksikössä on sisäänrakennettu laturi tätä varten. Virta voidaan myös ottaa USB-liitännän kautta, jota kautta voidaan myös ladata piirilevyyn liitettyä akkua. Piirilevyn voi juottaa myös ulkoisen virtalähteen. /17/

Mittaavat osat liitetään Imote2-alustaan I/O-porteilla. Yksi tällainen sensorikortti on ITS400. Se sisältää 3-suuntaisen kiihtyvyyssanturin sekä lämpötila-, kosteus- ja valoisuusanturit. Korttiin voidaan liittää päällekkäin useita eri lisäkortteja eli ITS400-sensorikorttiin voidaan liittää toinen lisäkortti, joka saa yhteyden Imote2-alustaan ITS400-sensorikortin kautta. /17/, /24/

Imote2-alustassa toimivia käyttöjärjestelmiä ovat mm. TinyOS, Linux ja SOS. /17/

Tarkemmat Imote2-alustan tiedot on esitetty liitteessä 1.

## 6.2 Waspnote /11/, /12/



Kuva 5. Waspnote-alusta, johon on asennettu XBee-lähetinvastaanotin ja GSM/GPRS-moduuli.

Waspnote on Espanjalaisen sensoriverkkovalmistajan, Libeliumin vuonna 2009 julkaissama langaton sensoriverkkoalusta. Siihen voi liittää valittavissa olevat komponentit. Modulaarisuus tekee Waspnote-alustasta sopivan monelle sovellukselle.

Alustaan täytyy liittää XBee-lähetinvastaanotin, joka voidaan valita saatavilla olevista vaihtoehdoista parhaiten vastaamaan käyttäjän haluamia ominaisuuksia. Lähetinvastaanottimia on seitsemän erilaista. Niiden tiedot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. XBee-lähetinvastaanottimien tiedot.

Malli	Protokolla	Taajuus	Lähetysteho	Vastaanottoherkkyys	Kantavuus
XBee-802.15.4	802.15.4	2,4 GHz	1 mW	-92 dBm	500 m
XBee-802.15.4-Pro	802.15.4	2,4 GHz	100 mW	-100 dBm	7000 m
XBee-ZB	ZigBee-Pro	2,4 GHz	2 mW	-96 dBm	500 m
XBee-ZB-Pro	ZigBee-Pro	2,4 GHz	50 mW	-102 dBm	7000 m
XBee-868	RF	868 MHz	315 mW	-112 dBm	40 km
XBee-900	RF	900 MHz	50 mW	-100 dBm	10 km
XBee-XSC	RF	900 MHz	100 mW	-106 dBm	24 km

Waspmotessa on herkkä vastaanotin, jonka ansiosta yksiköiden linkkiväli on näköyhteydellä pitkä: taajuudella 2,4 GHz kantavuus on 7 km, taajuudella 900 MHz 10 km ja taajuudella 868 MHz kantavuus on 40 km. Kantavuudet ovat suurempia kuin kilpailijoiden tuotteissa. Esim. Imote2-alustan kantavuus on 200 metriä.

Waspmoteen saa liitettyä kolme erilaista sensorimoduulia: kaasuja mittaava moduuli, tapahtumia mittaava moduuli tai erillisen sensorin liittämisen Waspmoteen mahdollistava moduuli. Kaasuja mittaava moduuli havaitsee mm. hiilimonoksidin, etanolin tai hapen määrän. Sitä voidaan käyttää esim. mittaamaan päästöjä, hallitsemaan kemiallisia tai teollisia prosesseja sekä havaitsemaan metsäpaloja. Tapahtumia mittaava moduuli havaitsee mm. paineen, painon, värähtelyn ja nesteen. Sitä voidaankin soveltaa esim. vartioinnissa, logistiikan hallinnoinnissa tai estämään luonnollisista tapahtumista johtuvaa onnettomuutta, kuten tulvaa. Itse Waspmote-alustan piirilevy sisältää lämpötila- ja kiihtyvyysanturit. Sensorimoduulien lisäksi Waspmoteen voi liittää GSM-, GPRS- tai GPS-moduulit, jotka mahdollistavat mm. Internet-yhteyden ja paikannuksen.

Waspmote käyttää lepotiloja, jotka mahdollistavat alimmillaan 0,7  $\mu$ A hetkellisen virran kulutuksen. Valmistaja lupaa tällöin laitteelle käyttöajaksi yhden vuoden. Virtalähteenä voi käyttää litiumakkua, USB-liitäntää tai aurinkokennoja, joille kaikille on omat liitännät piirilevyssä. Piirilevyyn liitettyä akkua voi ladata USB-liitännän tai aurinkokennojen avulla, jolloin pitkäkestoinen käyttö ulkoilmassa on mahdollista.

Waspmotessa on vain 128 kB Flash-muisti, mutta sen SD-korttipaikkaan voidaan asentaa 2GB muistikortti.

Tarkemmat Waspmote-alustan ja siihen liittyvien sensorimoduulien tiedot on esitetty liitteessä 2.

## 7 KÄYTTÖJÄRJESTELMÄ

Tavallinen käyttöjärjestelmä sisältää liikaa ominaisuuksia, joita sensoriverkoissa ei tarvita. Sulautetuissa järjestelmissä suoritettava koodi on huomattavasti rajoittuneempaa ja yhtenäistetympää, kuin yleisessä käytössä olevissa järjestelmissä. Sensoriverkkojen käyttöjärjestelmän täytyy olla suunniteltu sensoriverkkojen yksilölliseen toimintaan sopivaksi; sen täytyy olla energiaa säästävä ja osata hallita energian käyttöä esim. samuttamalla käyttämättömät komponentit. Järjestelmän täytyy myös pystyä käsittelemään tietoa, joka sille syötetään asynkronisesti eli missä tahansa ajankohdassa. Näiden vaatimusten takia tarvitaan ohjelmisto, joka selvästi järjestää protokollapinot ja sisältää energianhallinta toimintoja. Ohjelmiston täytyy myös toimia vähäisellä muistimäärällä. /22/

### 7.1 Ohjelmointitavat

Ohjelmiston täytyy tukea samanaikaisuutta. Samanaikaisesti suoritettava laskenta on sensoriverkoissa tärkeää, sillä laitteiden täytyy pystyä käsittelemään tietoa, joka tulee useasta eri lähteestä. Esim. monesta eri sensorista tai vastaanottimesta saapuva tieto. /22/

#### 7.1.1 Sekvenssiohjelmointi

Sekvenssiohjelmoinnilla tarkoitetaan järjestelmää, joka toimii sekvensseissä ts. suorittaa tehtävät peräkkäin. Järjestelmä voisi esim. ensin prosessoida anturin tiedon, sitten vastaanottimelta tulevan paketin ja taas anturin välittämän uuden tiedon. Ohjelmointitapa on yksinkertainen, ja sen käyttämisessä on riskinä menettää paketteja samalla, kun toista pakettia prosessoidaan. Riski kasvaa, jos yhden paketin käsittely kestää kauan. /22/

#### 7.1.2 Prosessipohjainen ohjelmointi

Yleensä käyttöjärjestelmät suorittavat samanaikaisesti montaa eri prosessia yhdellä prosessorilla. Vaikka tämä toimintatapa kuulostaa sopivalta sensoriverkkoihin, ei se sitä kuitenkaan ole. Jokaiselle protokolla funktiolle tai kerrokselle määrätty prosessit vievät liikaa resursseja, kun prosessista vaihdetaan toiseen. Tällaista tapahtuu, kun tehtävien prosessointiin kulutetaan vähemmän resursseja, kuin prosessin vaihtoon. Aikaa ja energiaa kulutetaan tällöin enemmän prosessien hallinnoimiseen kuin tiedonkäsittelyyn. Sensoriverkoissa suoritettavat tehtävät ovat yleensä pieniä, joten prosessipohjainen ohjelmointi olisi enemmän haitaksi kuin hyödyksi. /22/

### 7.1.3 Tapahtumapohjainen ohjelmointi

Sensoryyksiköiden aktiivisen toiminnan takia tapahtumapohjainen ohjelmointi soveltuu paremmin sensoriverkkoihin. Tässä ohjelmointitavassa järjestelmä odottaa tapahtumien esiintymistä. Tapahtuma voi olla tiedon valmistuminen anturilta, paketin saapuminen vastaanottimelta tai laskurin loppuminen. Tällainen tapahtuma suoritetaan lyhyellä käsilyonolla, joka ainoastaan tallettaa tiedon tapahtuman esiintymisestä ja sen sisältämän tarpeellisen tiedon, kuten anturiarvon tai saapuneen bitin. Itse tiedon prosessointi tapahtuu erikseen. Tapahtumapohjainen ohjelmointi tuo myös tutkimusten<sup>2</sup> mukaan paremman tehokkuuden, vähäisemmän muistin tarpeen ja pienemmän virrankulutuksen. /22/

### 7.2 Käyttöjärjestelmän rakenne

Kommunikaatioprotokollan rakenteen yleinen muoto on käyttää kerroksia. Tässä protokollat on asetettu kerroksiin. Jokainen kerros pystyy käyttämään vain heti alapuolella olevia funktioita. Kerrosten käyttö helpottaa protokollapinon käyttöä ja säilyttää sen kompleksisuuden ja modulaarisuuden. Sensoriverkkojen käyttöön tarkoitettuna kerrosten käyttö ei ole välttämättä riittävää. /22/

Komponenteista koostuva ohjelmointitapa on suosittu sensoriverkoissa. Suuret kerrokset on jaettu pienempiin komponentteihin tai moduuleihin. Yksittäinen komponentti suorittaa vain yhden tarkkaan määritellyn funktion, esim. virheentarkistussumman laskennan (Cyclic Redundancy Check, CRC). Suurin ero verrattuna kerroksittain järjestäytyneeseen järjestelmään on komponenttien kyky olla vuorovaikutuksessa muiden komponenttien kanssa. Kerroksittaisessa järjestelmässä funktioiden vuorovaikutus rajoittuu ylä- tai alapuolella olevien kerrosten funktioihin. Komponenttien käyttö sopii hyvin tapahtumapohjaiseen ohjelmointiin. Laitteisto, tiedonsiirron perusalkiot ja verkon sisäiset funktiot voidaan kätevästi suunnitella ja asettaa komponentteihin. /22/

### 7.3 TinyOS

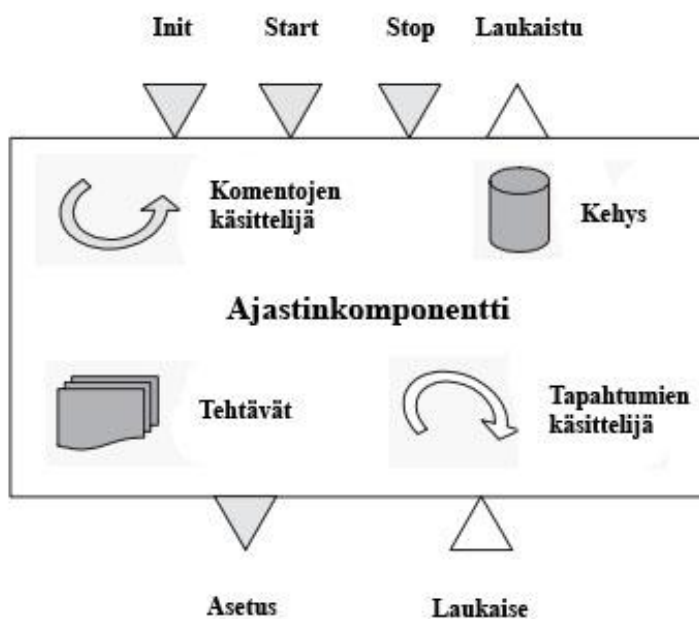
TinyOS on suosittu käyttöjärjestelmä sensoriverkoille. Sitä voikin pitää sensoriverkkojen standardikäyttöjärjestelmänä. Se käyttää edellä mainittua komponenteista koostuvaa ohjelmointitapaa järjestelmän rakentamiseen, joka mahdollistaa modulaarisen ja tapahtumapohjaisen ohjelmoinnin. Yksi komponentti sisältää tarvittavat tilatiedot kehyksessä, ohjelmakoodin normaaleille toiminnoille, sekä tapahtumien ja komentojen käsittelijät. Komponenttien välillä vaihdetaan tietoja tapahtumista ja komennoista. Komponentit on järjestetty hierarkkisesti ala- ja ylätasoihin komponentteihin. Alatason komponentit ovat lähellä laitteistoa, kun taas ylätason komponentit muodostavat laitteistolla ajettavia

---

<sup>2</sup> Li, S.-F. - Sutton, R., - Rabaey, J.: Low Power Operating System for Heterogeneous Wireless Communication Systems. 10th International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques (PACT 01), 2001.

ohjelmia. Tapahtumat syntyvät laitteiston tasolla, josta ne välitetään ylemmille komponenteille. Komennot taas liikkuvat toiseen suuntaan: ylempitasoisilta komponenteilta eli ohjelmilta alemmille tasoille eli laitteistolle. /22/, /23/

Kuvassa 6 on esimerkki komponentista, joka välittää tietoa ajasta. Komponentti ymmärtää komennot *init*, *start* ja *stop*. Se voi käsitellä yhtä tapahtumaa, *laukaise*, joka saapuu toisesta komponentista. Ajastinkomponentti voi asettaa *asetus*-komennon toiselle komponentille ja lähettää itse *laukaistu*-tapahtuman. Tiedon prosessointi tapahtuu tehtävissä. Prosessointi tapahtuu jonoperiaatteella (First In First Out, FIFO). Jos tehtävissä ei ole prosessoitavaa, laite sammuttaa itsensä.



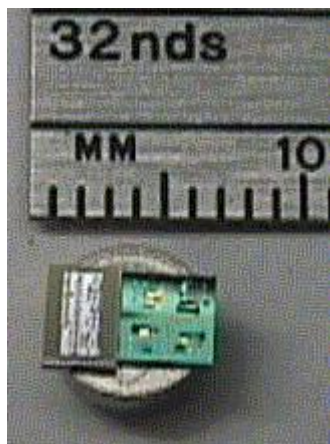
Kuva 6. Komponenttiesimerkki: ajastin. (Muunnettu lähteestä) /22/

Berkleyn yliopisto aloitti TinyOS:n kehittämisen vuonna 1999. TinyOS on siitä lähtien kasvanut kansainväliseksi yhteisöksi, kiitos sen ilmaisen, avoimen lähdekoodin. Sen kehityksestä vastaa TinyOS Alliance. /23/

## 8 TULEVAISUUS

Sensoriverkot on vielä kehitysvaiheessa oleva tieteenala. Vaikka monia laitteiden ongelmia onkin voitettu, on sensoryksiköiden kehitys seisonut lähes paikallaan. Asian huomaa, kun katsoo nykyään suosituinta sensoryksikköä Telos Motea, joka kehitettiin jo vuonna 2004. Vaikka uusia sensoryksiköitä on kehitetty, ovat ne kuitenkin pohjautuneet Telos Moten tekniikkaan. /13/

Yksi paljon julkisuuttakin saanut tekniikka vuodelta 2001 oli Smart Dust tai viisas pöly, jonka tarkoituksena oli kehittää millimetrinluokkaa olevia yksiköitä, jotka mittaisivat ympäröivän maailman suureita. Siis nykyinen sensoriverkkotekniikka erittäin pienessä koossa. Smart Dust jäi prototyypiksi, mutta projekti synnytti Dust Networks yrityksen, joka kehittää sensoriverkkolaitteita ja -tekniikkaa. /13/, /15/, /30/



Kuva 7. Smart Dust prototyyppi vuodelta 1999. /15/

Smart Dust -projektia on viemässä eteenpäin Hewlett Packard, joka kehittää maailmanlaajuisista sensorijärjestelmää nimeltään CeNSE (Central Nervous System for the Earth). Visiona on rakentaa sensoriyksiköt pieniksi nuppineulan kokoisiksi laitteiksi, jotka mitataavat koko maapallon tapahtumia. Sensorit antaisivat maailmasta ja maailman tilasta tarkan kuvan. Verkko vähentäisi tutkijoiden mukaan onnettomuuksia ja tekisi elämistä käytännöllisempää. Tällä hetkellä kehittäjät ovat rakentaneet laitteen, joka on kahden kämmenen kokoinen ja siinä on erittäin herkkä kiihtyvyyssanturi. /27/

Sensoriverkkojen kehitystä voi estää erilaiset ongelmat. Sensoriverkkojen konsepti voi käsittää satoja tai jopa miljoonia sensoriyksiköitä. Tutkijat keskittyvät tutkimaan alle 20 sensoriyksikön verkkoja, eikä yli 200 laitteen verkkoja ole vielä juuri rakennettu. Suurissa verkoissa tulee vastaan ylläpidon ja yksiköiden ohjelmoimisen vaikeus. Sensorit täytyy ohjelmoida, joka vielä onnistuu, jos kyseessä on parinkymmenen yksikön verkko. Kun verkko kasvaa tuhatkertaisesti, ohjelmointi vie huomattavan paljon aikaa, rahaa ja työvoimaa. Myös ylläpito verkon kasvaessa vie paljon työvoimaa. /13/

Smart Dust -konseptissa oli ideana tehdä pieni sensoriyksikkö, joka voitaisiin vain puhaltaa mitattavan kohteen läheisyyteen. Elektroniikka ei aina ole monia kymmeniä vuosia kestävä, kuten ei ole sensoriyksikötkään, joten mitä tapahtuu yksiköille, jotka lopettavat toimintansa. Mitä tapahtuu näiden laitteiden virtalähteille ja elektroniikalle jos ne sisältävät luonnolle haitallisia kemiallisia yhdisteitä, joita nykyiset akut ja paristot sisältävät. Ympäristössämme tulee olemaan useita toimimattomia sensoriyksiköitä, jotka saastuttavat luontoa. Toinen ongelma on yksiköt, jotka ovat vain osittain toimivia. Nä-

mä laitteet saattavat häiritä toisia sensoriverkkoja lähettämällä tietoa vanhalla protokollalla, jonka uudet sensorit saattavat lukea aivan joksikin muuksi kuin mittaustiedoksi. /13/, /15/

Vanhat sensoriyksiköt luovat myös ongelmia uuden sukupolven laitteille. Uusien sensoriverkkojen täytyy olla valmiita havaitsemaan vanhat verkot ja pystyä toimimaan häiriöttä vanhojen verkkojen rinnalla. Sama ehto pätee myös toiseen suuntaan: uudet verkot eivät saisi häiritä vanhempien sensoriverkkojen toimintaa.

Jos sensoriverkot sisällytetään monen alan eri sovelluksiin, saattaa anturien mittausten luotettavuus olla joissain sovelluksissa liian alhainen. On eri asia käyttää sensoreita lämpötilan mittaamiseen ja saada joiltain sensoreilta hieman väärää tuloksia, joka näkyy tiedemiesten kuvaajissa virheinä, kuin esim. sensoreiden käyttöä ihmisen sydämen seurantaan ja hallinnoimiseen, jossa pieninkin mittausvirhe voi johtaa hengenvaarallisiin tilanteisiin. Mittaustiedon täytyy tällöin olla ehdottoman luotettavaa. /13/

## 9 YHTEENVETO

Sensoriverkkoja voidaan käyttää monella eri alalla. Erilaisten sovellusten lukumäärä on rajaton. Lähes mitä tahansa voidaan mitata tai tarkkailla. Ymmärtääkseen langattomien sensoriverkkojen toimintaa, täytyy tietää verkon resurssien rajoitukset ja mahdollisuudet. Sensoriverkkoja ei voi rakentaa käyttämällä ainoastaan toisten tietoverkkojen tekniikoita. Lähes kaikkiin tietoverkon toiminnan mahdollistaviin osiin täytyy tehdä muutoksia. Energian vähyys on suurin langattomia sensoriverkkoja rajoittava ominaisuus, joka on otettu huomioon kaikissa laitteiden toiminnoissa. Lepotilat, ohjelmiston kirjoittaminen erityisesti sensoriverkko tarkoitukseen, langattoman tekniikan kehittäminen tarkoitukseen sopivaksi, uudet tiedonsiirtoprotokollat ja uudet turvallisuussovellukset auttavat sensoriyksiköitä energian säästössä.

Langattomat sensoriverkot tuovat monia elämää helpottavia ja mahdollisesti pelastavia sovelluksia. Vaikka tekniikalla saadaan aikaan uudentyyppisiä sovelluksia, joita ei muilla tekniikoilla voida toteuttaa, ollaan vielä kaukana pienistä itsenäisistä sensoriyksiköistä. Sensoriyksiköiden koon täytyy pienentyä ja mittaustulosten tarkentua ennen kuin sensoriverkkoja nähdään laajemmassa käytössä. Myös laitteiden valmistuskustannusten aleneminen on tärkeää laitemäärän kasvaessa. Sensoriverkkojen turvallista käyttöä edistäviä tekniikoita on myös kehitettävä. Jos sensoreita asetetaan ihon alle mittaamaan ihmisen terveyden tilaa, täytyy mittaustieto siirtää turvallisesti tietoa keräävälle laitteelle. Mittaustieto ei saa olla helposti luettavissa, kun sitä siirretään radioteitse laitteelta toiselle.

Maailma tulee sisältämään sensoreita lähes jokaisessa ihmisen tuottamassa asiassa. Ympäristö tulee olemaan sensoreita täynnä. Kun nämä sensorit asetetaan toimimaan verkkomaisesti, syntyy sensoriverkkoja. Miljardit laitteet siirtävät tietoa toistensa kanssa ja välittävät käyttäjälle luotettavaa ihmiselle näkymätöntä tietoa ympäristöstä.

## LÄHTEET

1. Raghavendra, C.S. - Sivalingam, K. M. - Znati, T: Wireless Sensor Networks. Kluwer Academic Publishers, 2004. 426 s.
2. Eren, Halit: Wireless Sensors and Instruments, Networks, Design and Applications. CRC Press, 2006. 297 s.
3. Compare with other Technologies. Bluetooth SIG, Inc., [viitattu 23.02.2010], <http://www.bluetooth.com/English/Technology/Works/Pages/Compare.aspx#1>
4. FAQ. ZigBee Alliance, [viitattu 23.2.2010], <http://www.zigbee.org/About/FAQ.aspx>
5. ZigBee products. RF Monolithics, Inc., [viitattu 23.02.2010], <http://www.rfm.com/products/zigbee.php>
6. Wi-Fi Alliance: Discover and learn. Wi-Fi Alliance, [viitattu 24.02.2010], [http://www.wi-fi.org/discover\\_and\\_learn.php](http://www.wi-fi.org/discover_and_learn.php)
7. What is WiMax? WiMax.com Broadband Solutions, Inc. [viitattu 24.02.2010], [http://www.wimax.com/education/wimax/what\\_is\\_wimax](http://www.wimax.com/education/wimax/what_is_wimax)
8. Arch Rock Corporation: IP-Based Wireless Sensor Networking: Secure, Reliable, Low-Power IP Connectivity for IEEE 802.15.4 Networks. Arch Rock Corporation, 2007. 6 s. [viitattu 02.03.2010], [http://www.cs.berkeley.edu/~jwhui/6lowpan/Arch\\_Rock\\_Whitepaper\\_IP\\_WSNs.pdf](http://www.cs.berkeley.edu/~jwhui/6lowpan/Arch_Rock_Whitepaper_IP_WSNs.pdf)
9. Hui, Jonathan - Culler, David - Chakrabarti, Samita: 6LoWPAN: Incorporating IEEE 802.15.4 into the IP architecture. IPSO Alliance, 2009. 17 s. [viitattu 03.03.2010], <http://www.cs.berkeley.edu/~jwhui/6lowpan/IPSO-WP-3.pdf>
10. Gascón, David: 12Km ZigBee link with Waspote. Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. [viitattu 03.03.2010], <http://www.libelium.com/libeliumworld/articles/100550554427>
11. Waspote Datasheet. Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., 2010. 6 s. [viitattu 03.03.2010], [http://www.libelium.com/documentation/waspote/waspote-datasheet\\_eng.pdf](http://www.libelium.com/documentation/waspote/waspote-datasheet_eng.pdf)
12. Waspote Technical Guide. Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., 2010. 108 s. [viitattu 03.03.2010], [http://www.libelium.com/documentation/waspote/waspote-technical\\_guide\\_eng.pdf](http://www.libelium.com/documentation/waspote/waspote-technical_guide_eng.pdf)
13. Welsh, Matt: EWSN 2010 Keynote Video. [viitattu 05.03.2010], [http://matt-welsh.blogspot.com/2010/02/ewsn-2010-keynote-video\\_22.html](http://matt-welsh.blogspot.com/2010/02/ewsn-2010-keynote-video_22.html)



14. Weber, W. - Rabaey, J.M. - Aarts, E: Ambient Intelligence. Springer, 2005. 373 s.
15. Pister, Kris: Smart Dust. University of California Berkeley. [viitattu 07.03.2010]  
<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>
16. Zhang, Yan - Kitsos, Paris: Security in RFID and Sensor Networks. CRC press LLC, 2009. 560 s.
17. Imote2, high-performance wireless sensor network node. CrossBow Technology, Inc. [viitattu 06.04.2010],  
[http://www.xbow.com/Products/Product\\_pdf\\_files/Wireless\\_pdf/Imote2\\_Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/Imote2_Datasheet.pdf)
18. Akyildiz, I.F. - Su, W. - Sankarasubramaniam, Y. - Cayirci, E.: Wireless sensor networks: a survey. Georgia Institute of Technology, 2002. [viitattu 15.04.2010],  
<http://www.ee.oulu.fi/~carlos/WSNPapers/AK02.pdf>
19. ALERT general information. ALERT Systems. [viitattu 16.04.2010],  
<http://www.alertsystems.org/alert.html>
20. Kumar, Sunil - Feng, Zhenhua - Hu, Fei - Xiao, Yang: E<sup>2</sup>SRT: Enhanced event-to-sink reliable transport for wireless sensor networks. John Wiley & Sons Ltd, 2008. 11 s. [viitattu 16.04.2010],  
[http://attila.sdsu.edu/~kumar/E2SRT\\_WCMC\\_published.pdf](http://attila.sdsu.edu/~kumar/E2SRT_WCMC_published.pdf)
21. Callaway, Edgar H: Wireless Sensor Networks: Architectures and protocols. CRC Press LLC, 2004. 342 s.
22. Karl, Holger - Willig, Andreas: Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons Ltd, 2005. 524 s.
23. TinyOS Community Forum, Mission Statement. UC Berkeley. [viitattu 18.4.2010],  
<http://www.tinyos.net/special/mission>
24. ITS400, Imote2 basic sensor board. Crossbow Technology, Inc. [viitattu 22.5.2010],  
[http://www.xbow.com/Products/Product\\_pdf\\_files/Wireless\\_pdf/ITS400\\_Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/ITS400_Datasheet.pdf)
25. Rubin, Andy: The future of mobile. Google Inc. [viitattu 3.5.2010],  
<http://googleblog.blogspot.com/2008/09/future-of-mobile.html>
26. Wan, Chieh-Yih - Campbell, Andrew T. - Krishnamurthy, Lakshman: PSFQ: A Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks. Association for Computing Machinery, 2002. 11 s. [viitattu 3.5.2010],  
<http://www.ee.oulu.fi/~carlos/WSNPapers/WA02.pdf>

27. Shell to use CeNSE for clearer picture of oil and gas reservoirs. Hewlett Packard Development Company, L.P., 2010. [viitattu 4.5.2010],  
<http://www.hpl.hp.com/news/2009/oct-dec/cense.html>
28. SIG introduces Bluetooth low energy wireless technology, the next generation of Bluetooth wireless technology. Bluetooth SIG, Inc., [viitattu 22.5.2010],  
<http://www.bluetooth.com/English/Press/Pages/PressReleasesDetail.aspx?ID=4>
29. About the Bluetooth SIG. Bluetooth SIG, Inc., [viitattu 22.5.2010],  
<http://www.bluetooth.com/English/SIG/Pages/default.aspx>
30. About Us. Dust Networks, Inc. [viitattu 05.03.2010],  
<http://www.dustnetworks.com/about/>

**LIITTEET****Liite 1: Imote2-sensoriverkkoalustan tarkemmat tiedot. /17/**

<b>Proessori/radio piiri</b>	<b>IPR2400</b>	<b>Huom.</b>
<b>CPU</b>		
Proessori	Intel PXA271	
SRAM-muistia	256 kB	
SDRAM-muistia	32 MB	
FLASH-muistia	32 MB	
<b>VIRRANKULUTUS</b>		
Lepotilassa	390 $\mu$ A	
Aktiivivilassa	31 mA	13 MHz, Radio poissa päältä
Aktiivivilassa	44 mA	13 MHz, Radio käytössä
Aktiivivilassa	66 mA	104 MHz, Radio käytössä
<b>RADIO</b>		
Vastaanotin	TI CC2420	
Taajuuskaista (ISM)	2400,0 - 2483,5 MHz	
Siirtonopeus	250 kb/s	
Lähettimen teho	-24 - 0 dBm	
Vastaanottimen herkkyys	-94 dBm	
Kantavuus (näköyhteydellä)	n. 30 m	Sisäänrakennetulla antennilla
<b>I/O</b>		
USB Client (mini-B), USB Host		
UART 3x, GPIOs, I2C, SDIO		
SPI 2x, I2S, AC97, Kamera		
<b>VIRTA</b>		
Paristomuoduli	3x AAA	
USB-jännite	5,0 V	
Pariston jännite	3,2 - 4,5 V	
Li-Ion-akun laturi		
<b>MEKAANISET</b>		
Imote2-piirilevyn mitat	36mm x 48mm x 9mm	
Paino	12g	

**Liite 2: Wasmote-sensoriverkkoalustan tarkemmat tiedot. /11/**

<b>Proessori/radio piiri</b>	<b>Wasmote</b>
<b>CPU</b>	
Proessori	ATmega1281
SRAM-muistia	8 kB
EEPROM-muistia	4 kB
FLASH-muistia	128 kB
SD-Kortti	1 GB
<b>VIRRANKULUTUS</b>	
Aktiivitilassa	9 mA
Lepotilassa	62 $\mu$ A
Syvässä lepotilassa	62 $\mu$ A
Horrostilassa	0,7 $\mu$ A
<b>I/O-liitännät</b>	
7 analogista (input)	
8 digitaalista (input/output)	
1 PWM, 2 UART, 1 I2C,	
1 mini-USB	
<b>VIRTA</b>	
Paristomoduuli	Käyttäjän valittavissa
USB-jännite	5 V - 100 mA
Pariston jännite	3,3 V - 4,2 V
Varapariston jännite	3 V
<b>MEKAANISET</b>	
Wasmote-piirilevyn mitat	73,5 x 51 x 13 mm
Paino	20 g

Sensorimoduuleilla mitattavat suureet tai arvot.

**Kaasuja mittaava moduuli (Gases board):** Hiilimonoksidi (CO), Hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), Metaani (CH<sub>4</sub>), Happi (O<sub>2</sub>), Vety (H<sub>2</sub>), Ammoniakki (NH<sub>3</sub>), Isobutaani (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), Etanoli (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH), Tolueeni (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>), Rikkivety (H<sub>2</sub>S), Typpioksidi (NO<sub>2</sub>), ilmanpaine, kosteus ja lämpötila.

**Tapahtumia mittaava moduuli (Event Detection Board):** paine, paino, kaarevuus, vetovoima, värinä, isku, kaltevuus, lämpötila, nesteen taso, valo, passiivinen infrapuna (PIR), Hallin ilmiö ja nesteen paikannus.