

Karel Parkkola

**TIETOLIIKENNEPROTOKOLLAT ÄLYKOTIYMPÄ-  
RISTÖSSÄ**

# TIIVISTELMÄ

Parkkola, Karel

Tietoliikenneprotokollat älykotiympäristössä

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2024, 24 s.

Tietojärjestelmätiede, Kandidaatintutkielma

Ohjaaja: Kokko, Tuomas

Nykyisessä älykotiympäristössä on käytössä monia eri tiedonsiirtoprotokollia. Tämän tutkielman tarkoitus on perehdyttää lukija älykodeissa käytössä oleviin tiedonsiirtoteknologioihin kirjallisuuskatsauksen muodossa. Tutkielmassa huomattiin, että älykotiympäristössä käytössä olevia tiedonsiirtoteknologioita on monia ja iso osa niistä ei kykene yhteistyöhön toisten teknologioiden kanssa. Eri teknologioilla on myös erilaisia ominaisuuksia, joiden ansiosta ne soveltuvat tiettyihin tilanteisiin paremmin kuin toisiin ja tätä käsiteltiin myös tutkielmassa. Tutkielman lopputuloksena lukijalla on parempi ymmärrys eri teknologioista älykotiympäristössä sekä tietoa aihealueen hämäräksi jäävistä kohdista, jotka kaipaisivat lisää tutkimusta.

Asiasanat: Älykoti, IoT, IoT-protokollat

## **ABSTRACT**

Parkkola, Karel

Communication protocols in smart home environment

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2024, 24 pp.

Major subject, type of the publication (e.g. Information Systems/Cognitive Information Systems Science, Bachelor's Theses

Supervisor: Kokko, Tuomas

There are many data transfer technologies in a modern smart home environment. The goal of this thesis is to familiarize the reader with different data transfer technologies used in smart homes via a literature review. It was noted in the study that there are many data transfer technologies available in the smart home environment, and a large portion of them are unable to communicate with other technologies. Different technologies also have different characteristics that make them more suitable for certain situations than others, and this was also addressed in the thesis. As a result of the thesis, the reader gains a better understanding of the different technologies in the smart home environment, as well as information about areas within the topic that remain unclear and could benefit from further research.

Keywords: Smart home, IoT, IoT-protocols

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ ABSTRACT

1	JOHDANTO .....	5
2	ÄLYKOTI .....	7
2.1	Älykodin määritelmä ja sen koostumus .....	7
2.2	Älykodin kehitys .....	8
2.3	Älykoti ympäristönä .....	9
3	TIEDONSIIRTOPROTOKOLLAT .....	11
3.1	WiFi .....	11
3.2	Ethernet .....	12
3.3	Zigbee .....	13
3.4	Z-Wave .....	13
3.5	MQTT .....	14
3.6	Thread .....	14
4	TEKNOLOGIOIDEN SOVELTUVUUS .....	15
4.1	Langattomat taajuudet .....	15
4.2	Virta .....	16
4.3	Infrastrukturi .....	17
5	YHTEENVETO .....	19
	LÄHTEET .....	21

# 1 JOHDANTO

IoT eli Internet of Things, kotiautomaatio ja älykodit ovat yhä suosituimpia ja kodeista löytyy yhä enemmän älylaitteita. Tällä hetkellä on käytössä paljon eri protokollia ja teknologioita näiden älylaitteiden väliseen viestintään. Yhteistä standardia ei toistaiseksi ole valittu ja laitteiden yhteentoimivuus on vielä hyvin epävakaa pohjalla. Monella valmistajalla on oma toteutuksensa, jota heidän laitteensa noudattavat ja vain harvat eri valmistajien tuotteet toimivat suoraan keskenään. Näitä laitteiden väliseen viestintään kehitettyjä teknologioita on monia, jotka toimivat joko langattomasti eri radiotaajuuksilla tai langallisesti. Osa niistä hyödyntää jo olemassa olevaa teknologiaa kuten esimerkiksi MQTT, joka hyödyntää lähiverkkoa sekä tcp/ip protokollaa (MQTT, 2023). Osa taas käyttää täysin uutta teknologiaa, kuten Z-Wave joka on oma protokollansa ja hyödyntää langattomia radiotaajuuksia 800MHz - 950MHz (Z-Wave Alliance, A, ei pvm.). Protokollien paljouden takia aihealueella on myös paljon epätietoisuutta ja sekaannusta. Tämä näkyy esimerkiksi siinä, että kuluttajat saattavat tehdä huonoja valintoja valitessaan kotiautomaatioekosysteemiä omaan kotiinsa, jonka seurauksena käyttökokemus saattaa olla epämiellyttävä. Ongelmia voi tulla esimerkiksi verkon ruuhkaantumisesta, radiotaajuuden ruuhkaantumisesta tai signaalien heikkoudesta. On tärkeää tutkia aihealuetta lisää, jotta saadaan parempi ymmärrys teknologioiden soveltuvuudesta eri käyttöympäristöihin. Täten kuluttajilla on paremmat puitteet tehdä valvutuneita ratkaisuja ja välttyä ylimääräisiltä kustannuksilta ja vaikeuksilta.

Käsittelen tutkielmassani kotiympäristössä yleisesti käytettäviä protokollia sekä laitteita ja järjestelmiä, jotka ovat kotiympäristöön tarkoitettuja. Näistä verkko- ja tietoliikenneprotokollista ja teknologioista tutkielmaan päätyi Zigbee, Z-Wave, MQTT, Thread, WiFi ja Ethernet. Tutkielmassani perehdyn näihin protokolliin ja selvitan näiden protokollien ominaisuuksia. Tämän avulla arvioin protokollien vahvuuksia sekä heikkouksia ja pohdin näiden soveltuvuutta erilaisiin käyttötarkoituksiin. Käyttötarkoituksia ja protokollien soveltuvuutta pohtiessa pitäydyn kuitenkin kotiympäristössä ja muissa raameissa, jotka määrittelen seuraavaksi.

Tutkielmassa tarkastelen kuinka eri teknologiat ja protokollat toimivat sekä kuinka tämä vaikuttaa niiden soveltuvuuteen kotiautomaation käyttötarkoituksiin. Asiaa tarkastellaan kuluttajan näkökulmasta keskittyen kotiin käyttöympäristönä. Tutkimuksessa keskityn vain jo nyt laajasti käytössä oleviin protokolleihin ja teknologioihin, enkä lähde pohtimaan mahdollisia nousevia vaihtoehtoja. Tutkimus ei myöskään tarkastele tai ota kantaa teknologioihin ja protokolleihin kotiympäristön ulkopuolella. Tämä rajaa pois esimerkiksi vain teollisuudessa, joukkoliikenteessä tai muulla toimialalla käytössä olevat ratkaisut, jos ne eivät ole levinneet laajempaan käyttöön myös kotiympäristössä. Tutkielman tutkimuskysymyksiksi muodostan seuraavat:

- Mitkä ovat valittujen teknologioiden ja protokollien vahvuudet ja heikkoudet?
- Kuinka nämä vahvuudet ja heikkoudet vaikuttavat ja mitkä ovat protokollien ja teknologioiden soveltuvat käyttökohteet näiden heikkouksien ja vahvuuksien pohjalta?

Tutkielmassa perehdyn aiheeseen ja protokolleihin tutustumalla jo olemassa oleviin tutkimuksiin ja artikkeleihin, perehtymällä protokollien dokumentaatioon sekä langattomien taajuuksien ja muiden käytettävien teknologioiden dokumentaatioihin ja asetuksiin. Eri protokollia ja teknologioita ja niiden vahvuuksia sekä heikkouksia tarkastellaan tämänhetkisen tiedon pohjalta.

Tämä tutkielma on toteutettu perinteisenä kirjallisuuskatsauksena. Kirjallisuuskatsauksella pyrin tuomaan esille älykotiympäristön tietoliikenneprotokollien paljouteen liittyviä ongelmia, sekä tuoda esille, kuinka eri teknologiat soveltuvat kyseiseen ympäristöön.

Aineistoa tutkielmaan on kerätty tieteellisistä tietokannoista, julkaistuista standardeista sekä eri organisaatioiden sivuilta. Tietokantoina tutkielmassa käytettiin IEEE Xplore Digital Library ja Google Scholar tietokantoja. Näiden tietokantojen lisäksi aineistoa on kerätty IEEE standardeista. Myös joitakin internet julkaisuja on käytetty kriittisen tarkastelun jälkeen.

Tutkielmassa esittelen ja määrittelen valitun kohdeympäristön eli kotiympäristön. Tutkin ja pohdin myös, millaisia vaatimuksia ja haasteita kotiympäristössä on sekä mitkä asiat eivät ole niin oleellisia kotiympäristössä. Tämän jälkeen perehdyn tutkielmaan valittuihin protokolleihin ja teknologioihin. Näistä rakennan kuvan kunkin ominaisuuksista ja millaisia heikkouksia tai vahvuuksia niillä on. Lopuksi pohdin kunkin protokollan soveltuvuutta kotiympäristöön sekä millaisiin käyttötarkoituksiin se soveltuu. Tutkielman tuloksena saa kattavan kuvan tämän hetken yleisimmistä tietoliikenneprotokollista ja niiden hyödyntämisestä teknologioista, joita kotiautomaatioympäristössä käytetään sekä millaisiin käyttötarkoituksiin ne kyseisessä ympäristössä soveltuvat.

## 2 ÄLYKOTI

Tässä luvussa käsittelen, mitä tarkoittaa älykoti, miten älykoti on kehittynyt ja mikä on älykotiympäristö. Lisäksi luvussa määrittelen älykodin luoman ympäristön asettamat vaatimukset älykodeissa käytettäville tiedonsiirtoteknologioille. Tämä antaa valmiuden ymmärtää ja pohtia, kuinka kolmannessa luvussa esitellyt tiedonsiirtoprotokollat ja teknologiat soveltuvat älykodin luomaan ympäristöön.

### 2.1 Älykodin määritelmä ja sen koostumus

Jos tällä vuosikymmenellä on tehnyt mitään kodinkoneostoksia tai muita sähkölaitehankintoja kotiin, on termi *älykoti* tullut varmasti vastaan monta kertaa. Esimerkiksi Romaniassa vuonna 2023 tehdyn kyselytutkimuksen mukaan keskimäärin yli 70 prosenttia vastaajista oli tietoisia älykodista konseptina (Roscia, Dancu & Lazaroiu, 2023) ja Yhdysvalloissa vuonna 2016 internetkyselyyn vastanneista 81 prosenttia oli tietoisia älykodin laitteista konseptina (PricewaterhouseCooper Oy, 2017).

Yhden määritelmän mukaan älykoti on koti, jossa on yksi tai useampi toisiinsa kytketty kotiautomaatio- tai viihdelaitte, jotka ovat yhteydessä internetiin ja joita voidaan kontrolloida etänä (Roscia ym., 2023). Varhaisemman määritelmän mukaan älykoti on konsepti, jossa erilaisia talonsisäisiä palveluja integroidaan käyttäen yhteistä kommunikaatiojärjestelmää (Lütolf, 1992). Näitä molempia määritelmiä yhdistää vaatimus laitteiden keskinäisestä kommunikaatiosta. Voimme kuitenkin todeta, että ensimmäinen määritelmä ei vastaa välttämättä täysin sitä, mitä älykoti voi olla, sillä tänä päivänä on saatavilla myös älykotiratkaisuja, jotka eivät välttämättä ole yhteydessä internetiin. Tästä hyvänä esimerkkinä on Home Assistant, joka on avoimen lähdekoodin kotiautomaatiojärjestelmä, jonka voi konfiguroida toimimaan täysin lokaalissa verkossa ilman internetyhteyttä. Satpathy L. määrittelee, että älykodiksi voidaan kutsua kotia, joka on riittävän älykäs avustamaan asukkaita elämään itsenäisesti ja

mukavasti teknologian avulla (Satpathy, 2006). Satpathy myös mainitsee, että älykodissa kaikki mekaaniset ja digitaaliset laitteet on liitetty toisiinsa muodostaen verkon, jossa laitteet voivat kommunikoida sekä keskenään että käyttäjän kanssa. Edellä esiteltyjen määritelmien pohjalta voimme siis todeta, että älykoti on konsepti, jossa joukko kodin sisäisiä laitteita ja/tai toimintoja on automatisoitu ja ne ovat integroitu yhtenäiseen järjestelmään, jonka tehtävä on helpottaa asukkaiden arkea.

Älykoti voi koostua monipuolisesta kirjosta erilaisia laitteita eri käyttötarkoituksiin. Monimutkaisimmillaan älykoti voi mahdollisesti sisältää useamman eri järjestelmän. Älykodin laitteita voivat olla esimerkiksi älyvalaisimet, älykaihtimet, älyovikellot, turvakamerat tai vaikka leivänpaahdin, kuten jo IoT:n varhaisessa vaiheessa todettiin (Romkey, 2017).

## 2.2 Älykodin kehitys

Älykodin juuret juontavat 1900-luvun alkupuolelle, jolloin arjen töitä ruvettiin automatisoimaan. Kodinkoneista ensimmäisenä tuli pölyimuri ja pyykinpesukone. Vaikka nämä eivät olleet vielä älylaitteita, niin voidaan näitä ensimmäisiä kodinkoneita pitää ensiaskeleina kohti älykotia, sillä tämä merkitsi käsin tehtyjen askareiden automatisointia sekä helpottamista. Seuraavaksi käyn läpi älykodin kehityksen kannalta merkittäviä kohtia pohjautuen Tristan Perryn kirjoittamaan artikkeliin älykotilaitteiden historiasta (Perry, 2023).

Älykodin esivanhempana voidaan pitää vuonna 1950 keksijän Emil Mathiaksen "Push-Button Manor" taloa. Vaikka internetiin ja nykypäivän älylaitteisiin oli tuolloin vielä matkaa, vastasi talo ajatukseltaan pitkälti nykyisiä älykoteja. Lähes kaikki tehtävät talossa oli automatisoitu napin painallukseen tai sensorin avulla toimivaksi. Esimerkiksi talon ikkunat sulkeutuivat automaattisesti sataessa ja radio meni päälle aamuisin (Cookson-Rabouhi, 2018). Kaikki tämä oli tuolloin toteutettu vielä mekaanisilla kytkimillä, johdoilla ja moottoreilla. Jos verrataan esittelemääni älykodin määritelmään, vastasi Push-Button Manor jo melkein tätä määritelmää, mutta siitä uupui vielä yhteinen kommunikaatiomenetelmä.

Vuodet 1960-luvulta 2000-luvulle oli älykotien kannalta merkittävässä roolissa, sillä näinä vuosikymmeninä kehitettiin tekniikka, joka mahdollistaa tämän päivän älykodit. Näinä vuosikymmeninä keksittiin esimerkiksi tietokoneet ja internet sekä paljon eri viestintätekniikoita. Älykoteihin liittyen yksi merkittävimpiä innovaatioita oli vuonna 1975 kehitetty X10. X10 oli standardi, joka mahdollisti kotitalouden laitteiden yhteisen kommunikaation. Tätä voidaan pitää ensimmäisenä älykoteihin tarkoitettuna tietoliikenneprotokollana. Viimeinen tärkeä älykodit mahdollistava teknologia kehitettiin vuonna 1997, kun langattomassa verkkoteknologiassa otettiin käyttöön 802.11 standardi, joka yhtenäisti langattomissa lähiverkoissa käytetyn teknologian.

2000-luvun alkupuoli oli modernien älykotien syntyäikää. Tuolloin yritykset ja lehdet pyörittivät konsepteja älykodeista runsaasti. Vuonna 2007 Apple



julkaisi ensimmäisen Iphone älypuhelimien, joka oli suunnattu massoille ja moni onkin sitä mieltä, että tästä alkoi älypuhelinien aikakausi.

2010-lukua voidaan pitää älykotiin kultakuumeena. Tällöin markkinoille tuotiin ensimmäisiä moderneja älykotijärjestelmiä ja vuosikymmenen loppua kohden älykodit olivatkin jo nykyisessä muodossaan, ja markkinoilta alkoi löytyä tuhansittain erilaisia laitteita älykoteihin integroitavaksi.

## 2.3 Älykoti ympäristönä

Kuten edellisessä luvussa määriteltiin, niin älykoti sisältää joukon keskenään kommunikoivia laitteita. Tämä laitteiden välinen kommunikaatio voi tapahtua joko langattomasti tai langallisesti. Älykodin luoman ympäristön kannalta tämä kahtiajako on hyvin merkittävässä asemassa, sillä se määrittää tarvittavan infrastruktuurin sekä ympäristössä esiintyvien signaalien merkityksen. Käytetty kommunikointimenetelmä vaikuttaa myös vahvasti siihen, kuinka häiriö herkkää tietoliikenne älykotiverkossa on. Langattomien teknologioiden sisällä voi olla suurtakin vaihtelua häiriöherkkyydessä. Tähän vaikuttaa esimerkiksi se, moneenko kanavaan käytetty taajuusalue on jaettu. Myös käytetty aallonpituus vaikuttaa siihen, kuinka hyvin signaali läpäisee esteitä (Du ym., 2016). Kuluttajille suunnatuissa laitteissa ja älykotiratkaisuissa langallinen kommunikaatio tapahtuu lähestulkoon aina Ethernetin välityksellä. Langaton kommunikaatio on huomattavasti monipuolisempi vaihtoehtoisten kommunikaatiotapojen puolesta. Yleisesti käytössä olevia langattomia teknologioita älykotiympäristössä on esimerkiksi Z-Wave, ZigBee, Wi-Fi ja Bluetooth (Rathnayaka, Potdar & Kuruppu, 2011).

Älykodin langattomat ratkaisut käyttävät vaihtelevan pituisia radioaaltoja. Nämä taajuudet vaihtelevat aallonpituudelta pisimmillään ZigBeen ja Z-Wave:n käyttämästä 868 megahertsistä (Rathnayaka ym. 2011) juuri standardoidun Wi-Fi 7:n käyttämään 6 gigahertsin (Wi-Fi Alliance, 2024) taajuuksiin saakka. Langattomien teknologioiden kohdalla voi nousta ongelmaksi taajuuksien ruuhkautuminen. Esimerkiksi älykoti, jonka laitteet hyödyntävät Wi-Fi teknologiaa, vaatii jo parin korkeakaistaisen IoT-laitteen jälkeen tavallista paremman langattoman reitittimen, jotta kaikille verkon laitteille riittää kaistaa (Kauling, AlTaei & Mahmoud, 2018). Wi-Fi verkossa tämä ongelma on erityisen korostunut varsinkin tiheään asutulla alueella, sillä myös mahdollisten naapurien verkot voivat aiheuttaa häiriöitä ja kaistan ruuhkautumista. On myös syytä huomioida, että ZigBee liikenne voi häiriintyä 2,4 gigahertsin taajuudella, jos läheisyydessä on paljon Wi-Fi liikennettä, koska se jakaa samat taajuudet 2,4 gigahertsin Wi-Fi:n kanssa (Jiang, Liu & Chen, 2017).

Yksi merkittävä muuttuja älykodin ympäristössä on itse talo ja talon lähi-alue. Koska langattomat tiedonsiirtomenetelmät perustuvat radioaaltoihin, vaikuttaa esimerkiksi seinien materiaali paljon siihen, kuinka haastava ympäristö on älylaitteiden näkökulmasta. Pienemmällä aallonpituuksilla kuten 5 tai 6 gigahertsin taajuuksilla signaalien kaista on huomattavasti leveämpi, mutta sig-

naalien läpäisykyky ja kantama on huomattavasti pienempi. Vuonna 2022 Imam ElKassabi ja Atef Abdrabou tekivät tutkimuksen, jossa todettiin 2,4 gigahertsisen WiFi signaalin päihittävän 5 gigahertsisen signaalin kun etäisyys nousee yli 50 metriin (ElKassabi & Abdrabou, 2022). Tutkimuksessa testattiin vain etäisyyden vaikutusta, eli realistisessa käyttötapauksessa, jossa välissä voi olla myös rakenteita, on tämä raja-arvo vielä pienempi. Tämän seurauksena esimerkiksi omakotitalon piha-alueelle sijoitettavien älylaitteiden valinnassa joudutaan ottamaan huomioon laitteen käyttämä aallonpituus. Toisaalta esimerkiksi alueella, jossa on paljon signaaleja, kuten kerrostaloympäristössä, voi korkeammat taajuudet olla parempia juuri kantaman ja läpäisykyvyn puutteen takia, koska tämä edesauttaa signaaleja pysymään rajatulla alueella.

### 3 TIEDONSIIRTOPROTOKOLLAT

Tässä luvussa esittelen muutaman älykodeissa laajasti käytössä olevaan teknologian. Kaksi ensimmäistä WiFi sekä Ethernet voivat toimia tiedonsiirtoon itsenäisesti samaa tcp/ip protokollaa hyödyntäen, kuin moni muukin kodin internetiin yhdistetty laite. Ethernet voi myös toimia monen muun tässä esitellyn teknologian apuna langallisen liikenteen kuljettajana sovittimien avulla.

WiFi:n ja Ethernetin lisäksi varsinaisia IoT-laitteille suunnattuja protokollia, jotka valitsin mukaan tutkielmaan on Thread, Z-Wave, Zigbee ja MQTT. Nämä ovat kaikki 2000-luvun vaihteessa kehitettyjä protokollia paitsi Thread, joka on vasta viime vuosina tullut markkinoille.

Kuten aiemmassa luvussa totesin, älykoti on joukko toisiinsa integroituja laitteita ja tämä vaati sen, että laitteet pystyvät kommunikoimaan keskenään. Älykodin laitteiden mahdollistumisen kannalta merkittävin käänne historiassa tapahtui vuonna 1969, kun ARPANET valmistui (Navarria, 2016). Tämä merkitsi alkusysäystä maailman laajuiselle verkolle ja toisiinsa kytketyille laitteille. Seuraava merkittävä tapahtuma tuli vuonna 1989, jolloin Tim Berners-Lee kehitti World Wide Web:in CERN:issä (CERN, ei pvm.).

Toinen käännteentekevä hetki älykotiteknologian kannalta oli vuonna 1985 kun Yhdysvaltain telehallintovirasto vapautti tiettyjä radiotaajuuksia vapaasti käytettäväksi. Näihin taajuuksiin sisältyi esimerkiksi 2,4 gigahertsin taajuus, jota Wi-Fi sekä moni muu langaton tiedonsiirtoprotokolla käyttää (ECFR, 2024).

#### 3.1 WiFi

WiFi on termi WiFi Alliance:n luoma ja tunnetuksi tekemä käsite, jonka tarkoituksena on taata langattomien verkkolaitteiden yhteentoimivuus (Wi-Fi Alliance, A, 2019). Wi-Fi:n pohjalla on langaton lähiverkko eli wlan, joka on määritetty IEEE 802.11 standardissa (IEEE, B, 2021). Wi-Fi Alliance on julkaissut kuluttajaystävälliset termit eri langattomille standardeille. IEEE 802.11n on tuttavallisemmin Wi-Fi 4, IEEE 802.11ac on taas Wi-Fi 5, IEEE 802.11ax on Wi-Fi 6 ja vas-

taikään julkaistu Wi-Fi 7 pohjautuu IEEE 802.11be standardiin. Näistä Wi-Fi 4 on jo käytännössä vanhentunut ja Wi-Fi 7 on julkaistu vasta tammikuussa 2024 (Wi-Fi Alliance, B, 2024), joten sitä ei vielä laajasti käytetä älykotiympäristössä. On tosin odotettavissa, että Wi-Fi 7 tulee leviämään nopeasti myös IoT-laitteisiin.

Yleisimmät käytössä olevat versiot tällä hetkellä ovat Wi-Fi 5 ja Wi-Fi 6. Edellä mainituista Wi-Fi 6 hyödyntää sekä 2,4 gigahertsin taajuutta että 5 gigahertsin taajuutta, kun taas Wi-Fi 5 keskittyy 5 gigahertsiin. Wi-Fi 6 eli IEEE 802.11ax paransi huomattavasti langattoman verkon kykyä tukea samanaikaisia yhteyksiä kummallakin taajuudella tehden siitä hyvän alustan IoT-laitteille (Cisco Meraki, 2019).

Wi-Fi:n isoin etu älykoteja ajatellen on se, että monessa tapauksessa talosta löytyy jo valmis Wi-Fi infrastruktuuri ja jos se ei ole riittävä, voidaan sitä helpposti laajentaa vastaamaan älykodin tarpeita. Esimerkiksi vuonna 2021 Suomessa kaikista kotitalouksista 67 prosentilla oli käytössä asunnon sisäinen langaton verkko (STV, 2021). Muita Wi-Fi:n etuja on esimerkiksi Wi-Fi laitteiden, kuten vahvistimien ja tukiasemien laaja saatavuus ja lähes aina suora yhteensopivuus muiden laitteiden kanssa.

Heikkouksia Wi-Fi teknologiassa on se, ettei sitä ole alun perin suunniteltu älykotiympäristöön sekä sen yleisyys yhdistettynä alttiuteen häiriölle ympäröivistä Wi-Fi verkoista.

## 3.2 Ethernet

Ethernet on standardissa IEEE 802.3 (IEEE, A, 2022) määritelty tiedonsiirtomenetelmä, jossa tieto kulkee fyysistä kaapelia pitkin. Käytännössä kaikki kotitalouksille suunnatut langalliset verkkoratkaisut käyttävät Ethernetiä tavalla tai toisella. Älykodissa ja IoT-verkoissa Ethernet toimii monesti vähintään tiedonsiirrossa eri langattomien yhteyspisteiden välillä tai yhteytenä internetiin. Älykodin enemmän virtaa tai enemmän kaistaa vaativat laitteet kuten kamerat tarjoavat monesti vaihtoehdon langalliseen yhteyteen ja myös virransyöttöön Power over Ethernet eli PoE-teknologiaa hyödyntäen.

Ethernetin suurin etu on sen kyky kuljettaa suuria määriä dataa pitkiäkin etäisyyksiä ja langattomiin teknologioihin verrattuna huomattavan häiriövaapaasti. Myös PoE on älykotiympäristössä erinomainen ominaisuus, jos tahdotaan vähentää tarvittavien kaapeleiden määrää laitteisiin, jotka eivät kykene toimimaan akulla.

Ethernetin haittoihin lukeutuu sen vaatimat kaapelit, joita joudutaan vetämään rakenteisiin. Fyysiset kaapelit voivat olla myös alttiita rikkoutumiselle, mikäli niitä ei suojata huolellisesti.

### 3.3 Zigbee

Zigbee protokolla määritellään IEEE 802.15.4 standardissa (IEEE, C, 2016). Se toimii Euroopassa 868 megahertsin taajuudella, Amerikassa 915 megahertsin taajuudella sekä kaikkialla maailmassa avoimella 2,4 gigahertsin taajuudella (Wang, He & Wan, 2011). Zigbee standardi kuluttaa erittäin vähän virtaa ja kykenee kommunikoimaan huomattavia etäisyyksiä hyödyntäen alle gigahertsin taajuuksia ja likiverkkoa (Suresh, Daniel, Parthasarathy & Aswathy, 2014).

Zigbee:n vahvuudet ovat matala virrankulutus, kyky muodostaa likiverkkoja, suuret kommunikaatioetäisyydet alle gigahertsin taajuuksilla sekä halpa hinta. Etenkin Zigbee:n halpa hinta ja matala virrankulutus on ollut osana Zigbee:n yleistymistä IoT-laitteissa.

Heikkoutena Zigbee:ssä on osittain sama taajuus laajasti käytössä olevien Wi-Fi verkkojen kanssa ja sen häiriöherkkyys tuolla 2,4 gigahertsin taajuudella (Nomura & Sato, 2014). Tämän lisäksi Laitevalmistajat joutuvat huomioimaan eri maissa sallitut alle gigahertsin taajuudet. Tästä syystä Zigbee laitteita joudutaan valmistamaan aluekohtaisesti.

### 3.4 Z-Wave

Monesta muusta käytössä olevasta teknologiasta poiketen Z-Wave ei toimi ollenkaan 2,4 gigahertsin taajuudelle vaan käyttää ainoastaan alle gigahertsin taajuuksia. Nämä taajuudet vaihtelee 800 ja 900 megahertsin taajuusalueilla riippuen maasta (Silicon Labs, 2024). Z-Wave kehitettiin alun perin suljetusti Zensys:in toimesta (The Ambient, 2024) ja avattiin myöhemmin avoimemmaksi Z-Wave Alliance:n muodossa Z-Wave Alliancen jäsenille (Z-Wave Alliance, B, 2022). Vuonna 2022 Z-Wave Alliance ilmoitti saaneensa valmiiksi lähdekoodin projektin, jonka myötä Z-Wave:n lähdekoodi tehtiin avoimeksi kaikille Z-Wave Alliancen jäsenille. (Z-Wave Alliance, B, 2022).

Koska Z-Wave toimii yleisesti käytetyn 2,4 gigahertsin taajuusalueen ulkopuolella, on se erittäin häiriövapaa kotiympäristössä, jossa on monesti paljon kyseistä taajuusaluetta käyttäviä laitteita. Kuten moni muu IoT-laitteita varten suunniteltu teknologia, myös Z-Wave on erittäin vähän virtaa kuluttavaksi (Android Authority, 2024).

Yksi Z-Wave:n heikkous on se, ettei se käytä IP protokollaa. Tämän seurauksena Z-Wave verkko tai laitteet eivät ole suoraan yhteensopivia monien muiden verkkolaitteiden kanssa ja vaativat erillisen laitteen sillaksi Z-Wave verkon ja tavallisen IP protokollaa käyttävän verkon välille (Phan & Taehong, 2018). Z-Wave käyttää myös alle gigahertsin taajuuksia, joilla esiintyy maakohontaista vaihtelua sallituista taajuusalueista. Tämän takia Z-Wave laitteita joudutaan valmistamaan aluekohtaisesti.

### 3.5 MQTT

MQTT on OASIS standardi IoT-yhteyksiin. Se on suunniteltu erittäin kevyeksi kaksisuuntaiseksi kommunikaatioprotokollaksi ja perustuu datan julkaisuun ja tilaamiseen (publish/subscribe) (MQTT, 2024). MQTT on TCP protokolla, joka toimii IP verkoissa (HiveMQ, 2023).

Suurin hyöty MQTT:ssä on se, että se toimii jo olemassa olevan verkkoinfrastruktuurin päällä hyödyntäen IP protokollaa. Tämän ansiosta MQTT laitteita voidaan lisätä mihin tahansa olemassa olevaan verkkoon helposti ja vaivattomasti. MQTT kykenee toimimaan myös ipv6 osoitteilla. Johtuen MQTT:n toimimisesta tavallisessa verkossa, voidaan MQTT laitteet kytkeä yhtä helposti myös ethernetin välityksellä ja sitä kautta hyödyntää PoE-ominaisuutta.

Koska MQTT toimii samassa verkossa kuin kodin muutkin laitteet, voi se aiheuttaa verkon ruuhkautumista etenkin, jos verkossa on paljon langattomia laitteita. Yksi mahdollinen haittapuoli MQTT:ssä on se, että vakiona MQTT liikenne ei ole suojattua, jolloin kaikki samassa verkossa olevat laitteet pystyvät lukemaan siellä kulkevia MQTT paketteja. Monet MQTT välittäjät (Broker) tarjoavat kuitenkin mahdollisuuden suojata liikenteen käyttäen TLS protokollaa (Transport Layer Security).

### 3.6 Thread

Thread perustuu 6LoWPAN standardiin ja toimii 2,4 gigahertsin taajuudella. Sen esitteli NEST yhdessä isojen IoT-yhtiöiden kanssa suoraksi kilpailijaksi Zigbee:lle (Rzepecki & Ryba, 2019). Thread:in tavoite on mahdollistaa eri OSI-mallin sovelluserroksen protokollien yhteistoiminta ja Thread itsessään toimii ainoastaan verkko- ja kuljetuserroksissa (Thread Group, 2024). Thread verkko on likiverkko, josta yhteys ulkopuolelle tapahtuu reunareitittimen (Border router) avulla (Thread Group, 2024). Thread:ia käyttävien laitteiden täytyy toteuttaa ipv6 spesifikaatio (Unwala, Taqvi, Z & Lu, 2018).

Thread:in yksi merkittävä ominaisuus on natiivi toteutus ipv6 spesifikaatiolle, mikä takaa yhteentoimivuuden IP sovelluserrokseen perustuvien protokollien kanssa (Rzepecki & Ryba, 2019). Iso hyödyllinen ominaisuus Thread:issa on myös sen likiverkkotopologia, joka edistää verkon ongelmavapaata toimintaa signaaleille haastavissa ympäristöissä.

Alueella jossa on paljon Wi-Fi verkkoja voi Thread olla häiriöaltis (Grohmann, Nophut, Sobe, Perez & Fitzek, 2021). Tämä luo haasteita Thread:in käyttöön tiheään asutulla alueella, jossa Wi-Fi verkkoja voi olla erittäin tiheässä ja 2,4 gigahertsin taajuus ruuhkautunut.

## 4 TEKNOLOGIOIDEN SOVELTUVUUS

Koteja on monenlaisia ja niin myös älykodeissa käytettäviä olevia teknologioita. Tässä luvussa vertailen aiemmin esiteltyjen teknologioiden soveltuvuutta erilaisiin älykotiympäristöihin. Soveltuvuutta tarkastelen kolmen osa-alueen näkökulmasta. Ensimmäisenä tarkastelen langattomien taajuuksien näkökulmasta. Tämän jälkeen tarkastelen teknologioiden toimintaa virran ja virrankulutuksen osalta. Lopuksi tutkin kunkin teknologian tarvitsemaa infrastruktuuria.

### 4.1 Langattomat taajuudet

Modernissa älykodissa on paljon liikennettä eri radiotaajuuksilla ja johtuen lainsäädännöstä, tämä liikenne on pakkautunut vain tietyille taajuuksille. Näitä taajuuksia on esimerkiksi alle gigahertsin alueella 800–900 megahertsin alueet, 2,4 gigahertsin alue, 5 gigahertsin alue ja tuoreimpana 6 gigahertsin alue. Näissä esiintyy jonkin verran maakohtaista vaihtelua etenkin alle gigahertsin taajuuksilla. Suurin osa langattomasta liikenteestä modernissa kodissa tapahtuu joko 2,4 gigahertsin tai 5 gigahertsin taajuudella. Tämä johtuu siitä, että erittäin laajalti käytetty Wi-Fi teknologia hyödyntää kyseisiä taajuusalueita. 6 gigahertsin taajuusalue on tulossa Wi-Fi 7 standardin mukana, mutta se ei ole vielä laajasti käytössä.

Koska 2,4 gigahertsin taajuus voi monesti olla jo ruuhkainen, on hyödyllistä, jos älylaitteiden välisessä liikenteessä voidaan hyödyntää jotakin muuta taajuutta tai menetelmää. Aiemmin esitellyistä teknologioista Z-Wave käyttää ainostaan alle gigahertsin taajuuksia ja Zigbee toimii myös alle gigahertsin taajuuksilla 2,4 gigahertsin lisäksi. MQTT toimii langattomassa verkossa, mikäli laite on langaton, mutta sitä voidaan myös käyttää Ethernet yhteydellä. Lisäksi koska MQTT toimii tavallisessa verkossa, kyetään sitä käyttämään myös uudemmilla ja suurempia laitemääriä tukevilla 5 ja 6 gigahertsin taajuusalueilla uudemmilla Wi-Fi standardeilla. Vain Thread on täysin lukittu 2,4 gigahertsin taajuusalueeseen.

Eri teknologioiden käyttämistä taajuuksista on myös syytä huomioida, että matalammat taajuudet läpäisevät esteitä, kuten seiniä ja huonekaluja korkeita taajuuksia tehokkaammin. Matalat taajuudet kantavat myös pidemmälle samalla lähetysteholla lähetettyinä kuin korkeat taajuudet. Tästä hyötyy Zigbee ja Z-Wave, jotka molemmat kykenevät käyttämään alle gigahertsin taajuusalueita. Tämän hyödyn vaikutukset näkyvät selkeimmin rakennuksissa, joiden materiaali on huonosti läpäisevää kuten betonia tai kiveä. Lisäksi esimerkiksi piha-alueen koko voi vaikuttaa tämän hyödyn määrään, jos älylaitteiden väliset etäisyydet ovat pitkiä. Toinen kohta, jossa matalat taajuudet ovat hyödyllisiä on käyttökohteet, joissa pieni virrankulutus on kriittistä. Tämä johtuu siitä, että matalat taajuudet vaativat pienemmän lähetystehon saavuttaakseen saman kantaman, kuin korkeampi taajuus. Matalien taajuuksien haasteet korostuvat, jos älylaite lähettää tai vastaanottaa suuria määriä dataa. Tämä johtuu siitä, että matalampien taajuuksien tiedonsiirtonopeudet ovat hitaampia.

Kun puhutaan kaupunkiasumisesta, ovat asunnot monesti kerrostaloasuntoja. Langattomien signaalien kannalta tämä tuo lisähaasteita, koska myös naapureiden signaalit voivat aiheuttaa häiriöitä. Tämä korostuu etenkin matalilla taajuuksilla, joissa käytössä olevia kanavia on vähemmän sekä signaalien läpäisykyky ja kantama on suurempi kuin korkeilla taajuuksilla. Etenkin 2,4 gigahertsin Wi-Fi:n on todettu olevan erittäin altis häiriöille tiheässä asutuksessa (Mhatre ym., 2007). Kerrostaloissa ja muualla radiotaajuuksien kannalta ruuhkaisilla alueilla korostuu verkon ylläpitäjän vastuu säätää käytettävien lähettimien lähetysteho sopivaksi. Radiotaajuuksien ruuhkautumista voidaan vähentää, jos jokainen langaton verkko säädettäisiin lähetysteholtaan sellaiseksi, että se juuri ja juuri kantaa tarvittavalle alueelle. Älykodin laitteiden osalta harva laite itsessään tarjoaa mahdollisuutta säätää lähetystehoa. Lähetystehon optimoimisen kannalta käyttäjälle helpoimman tavan tarjoaakin Wi-Fi ja sitä myötä Wi-Fi:ä hyödyntävät MQTT laitteet. Tämä johtuu siitä, että suuresta osasta kuluttajamarkkinoilla olevista Wi-Fi reitittimistä löytyy asetus lähetystehon säätämiseen.

## 4.2 Virta

Virta on välttämätöntä kaikille älylaitteille. Älylaite voi ottaa virtaa esimerkiksi suoraan pistorasiasta, akusta tai muista ulkoisista virtalähteistä. Etenkin akkuvirralla toimivat älylaitteet hyötyvät suuresti vähän virtaa kuluttavasta kommunikaatioteknologiasta. Näin saavutetaan mahdollisimman pitkä käyttöaika, mutta vaihtoehtoisesti voi olla järkevää yhdistää datan ja virran kuljettaminen samaan kaapeliin hyödyntäen PoE-teknologiaa.

Kun puhutaan akkuvirralla toimivista älylaitteista, joissa matala virrankulutus on kriittistä, on matalalla taajuudella toimiva teknologia hyvällä pohjalla. Tämä johtuu siitä, että samalla lähetysteholla saavutetaan parempi kantama ja läpäisy, kuin korkeammilla taajuuksilla. Z-Wave on tässä tapauksessa erinomainen vaihtoehto, mutta myös Zigbee on varteenotettava vaihtoehto.



Jos laite vaatii enemmän virtaa eikä ole täten toteutettavissa akkuvirralla, joudutaan turvautumaan virtakaapeliin. Tässä tapauksessa laite on riippuvainen virtalähteen, kuten pistorasian sijainnista. Mikäli laitteeseen joudutaan vetämään datakaapeli, on MQTT:n etuna mahdollisuus hyödyntää PoE-teknologiaa, jolloin laitteen sijainti ei tarvitse läheistä pistorasiaa, vaan laite saa virtansa datakaapelia pitkin.

Ympäristöjen kannalta mietittäessä, teknologian soveltuvuus riippuu paljon etäisyyksistä sekä ympäristössä esiintyvistä esteistä ja niiden materiaaleista. Pitkät etäisyydet hankaloittavat virran tarjoamista johtoja pitkin, mutta samaan aikaan myös vaatii enemmän lähetystehoa heikentäen akkuvirran riittävyttä. Samoin paljon esimerkiksi betonisia esteitä sisältävä ympäristö aiheuttaa haasteita lähetystehon ja täten akkuvirran kanssa. Erityisen mielekästä pitkä akun kesto on käyttötapauksissa, joissa laite on hankalasti saavutettavissa. Tällöin mahdollisimman vähän virtaa kuluttavat teknologiat, kuten ne, jotka kykenevät alle gigahertsin aallonpituuksiin tai käyttävät langallista teknologiaa, soveltuvat paremmin.

### 4.3 Infrastrukturi

Älykodissa käytettävä kommunikaatioteknologia vaikuttaa paljon siihen, millaisia laitteita verkon infrastruktuurin rakentamiseen tarvitaan. Osa teknologioista vaatii kokonaan oman verkkoinfrastruktuurin ja osa voidaan integroida suoraan olemassa olevaan infrastruktuuriin. Moni tässä tutkielmassa esitellyistä teknologioista rakentaa itse oman infrastruktuurin luoden likiverkon älylaitteilla, joita verkkoon lisätään. Tällöin käyttäjän vastuulle jää huolehtia ainoastaan virransaantiin liittyvästä infrastruktuurista sekä langattomaan liikenteeseen liittyvien haasteiden kuten kantavuuden ja läpäisyongelmien ratkaiseminen.

Zigbee, Z-Wave ja Thread vaativat täysin oman verkkoinfrastruktuurin ja kaikki edellä mainituista myös tarvitsee laitteen huolehtimaan älylaiteverkon ja muun verkon välisestä liikenteestä. Kaikki edellä mainitut teknologiat luovat likiverkon hyödyntäen laitteita, joita verkkoon lisätään. Moni näitä teknologioita hyödyntävistä laitteista on usein paristokäyttöisiä tai muilla tavoin virran itsenäisesti saavia, mutta jotkin suurempi tehoiset laitteet voivat vaatia verkkovirtaa. Reunareititin, joka huolehtii laitteiden luoman likiverkon liittämistä internettiin sekä muuhun kodin verkkoon tarvitsee myös yhteyden ulkopuoliseen verkkoon, joka voidaan monesti toteuttaa joko langattomasti Wi-Fi:n avulla tai langallisesti Ethernet kaapelilla. Langallinen liitäntä on yleensä varmempi, kuin langaton yhteys. Langallisen yhteyden etuna on myös mahdollisuus tuoda laitteen vaatima virta käyttämällä PoE-teknologiaa, mikäli reunareititin tätä tukee.

MQTT poikkeaa muista tutkielmassa esitellyistä teknologioista siinä, että se pohjautuu täysin tcp protokollaan ja kykenee toimimaan esimerkiksi jo olemassa olevan LAN (Local Area Network) verkon sisällä. MQTT ei myöskään tarvitse erillistä laitetta älykodin ja ulkopuolisen verkon välille, mutta MQTT

tarvitsee kuitenkin välittäjän, joka huolehtii MQTT kanavien tilauksista ja julkaisuista. Tämä välittäjä voi toimia esimerkiksi jo olemassa olevassa älykodin siltalaitteessa, reitittimessä tai kodin ulkopuolella pilvipalveluna. Haittana MQTT:ssä on se, että sen liikenne käyttää samaa kaistaa, kuin kaikki muukin verkon liikenne. Tästä syystä verkon ruuhkautuminen tulee ottaa huomioon isommissa verkoissa. MQTT on kuitenkin suunniteltu liikenteen osalta kevyeksi protokollaksi (MQTT, 2024), mutta muu verkon liikenne voi vaikuttaa MQTT paketteihin negatiivisesti. Tästä syystä älykodissa, jossa käytetään paljon MQTT protokollaa, tulisi varmistaa verkkoinfrastruktuurin kyky kuljettaa liikennettä tarpeeksi paljon. Tämä voi vaatia esimerkiksi tavallista tehokkaamman WLAN reitittimen tai isommassa kodissa useamman tukiaseman, mikäli kuuluvuus ei riitä tarvittaviin paikkoihin.

## 5 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintutkielmassa käsittelemme älykotiympäristössä käytössä olevia tietoliikenneprotokollia ja niiden soveltuvuutta älykotiympäristöön. Älykoti ja IoT eivät ole käsitteinä enää uusia eikä tuntemattomia, mutta aihealue on selvästi vielä kehittyvä ja epäkypsä. Tämä voidaan todeta pirstaloituneena ympäristönä, jossa on käytössä monia erilaisia teknologioita. Pirstaloituminen ja yhteisen standardin puute on voinut olla osasyynä monen eri mekaniikan kautta siihen, miksi älykodit ovat yleistyneet hitaasti. Monet eri teknologiat saavat konseptin vaikuttamaan monimutkaisemmalta, mitä se oikeasti on (Cheek ym., 2022). Myös pienien laitevalmistajien näkökulmasta teknologioiden paljous vaikuttaa negatiivisesti, koska he joutuvat käyttämään enemmän resursseja tutkimukseen ja kehitykseen, sekä lisäksi ostajia on vaikeampi saada houkuteltua juuri heidän kehittämään ekosysteemiin, jos valmistaja on kehittänyt oman ratkaisun.

Tutkielmassani huomasin, että älykoti voi ympäristönä olla hyvinkin vaihteleva. Vaihtelua syntyy etäisyyksistä, esteistä ja alueella esiintyvistä radiosignaaleista. Merkittäviä vaikuttavia tekijöitä on talotyyppi, talon valmistusmateriaalit ja alueen asuintiheys. Nämä muuttujat vaikuttavat paljon siihen, mikä teknologia ja protokolla on toimivin. Harvaan asutulla alueella ja suurilla etäisyyksillä matalia taajuuksia kommunikointiin käyttävät protokollat soveltuvat paremmin, kuin korkeampia taajuuksia käyttävät. Tämä tilanne on myös ympäristössä, joka vaatii hyvää esteiden läpäisyä, kuten kivitaloissa. Jos ympäristössä esiintyy paljon langattomia signaaleja, kuten tiheään asutussa kerrostaloympäristössä, on suurempia taajuuksia käyttävät teknologiat parempia. Tämä johtuu siitä, että suuret taajuudet eivät läpäise seinä niin hyvin ja taajuuksille mahtuu enemmän laitteita. Tämä auttaa estämään radiotaajuuksien ruuhkautumista. Joissain ympäristöissä langallinen yhteys tarjoaa hyvän ratkaisun, mikäli johtojen vieminen on helppoa. Tällöin langalliseen liikenteeseen kykenevät teknologiat toimivat paremmin. Tällainen ympäristö voi syntyä seurauksena esimerkiksi suuresta määrästä esteitä tai radiotaajuuksilta täysin ruuhkautuneesta tilasta.

Tutkielman tavoite oli perehdyttää lukija älykodissa käytettyihin tiedonsiirtoprotokolliin ja näiden ominaisuuksiin sekä soveltuvuuteen erilaisissa ympäristöissä. Tämän pohjalta lukijalla on parempi ymmärrys älykotiympäristössä käytettävistä teknologioista ja tiedonsiirtoprotokollista sekä näiden ominaisuuksista. Tämän tutkielman pohjalta on vaikea lähteä tekemään johtopäätöksiä siitä, mikä olisi soveltuvin teknologia, jos lähdettäisiin valitsemaan yhtä yhteistä standardia älykodin älylaitteille. Aihetta olisi hyvä tutkia lisää, koska älykodit ja älylaitteet ovat vahvassa kasvussa ja alueelle olisi tärkeää saada yhteisiä standardeja. Nämä standardit ovat tärkeitä kuluttajan näkökulmasta, jotta mahdollisimman moni laite olisi yhteensopiva kuluttajan älykotiympäristöön valmistajasta riippumatta. Tämä laskisi kynnystä tutustua älykoteihin, kun asiaan perehtyvä ei joudu ensimmäisenä selviytymään eri protokollien aiheuttamasta tietotulvasta. Kynnyksen madaltuminen edesauttaisi älykotien yleistyistä sekä tekisi siitä saavutettavamman kaikille. Valmistajien näkökulmasta yhteinen standardi helpottaisi laitteiden suunnittelua ja vähentäisi näin ollen kustannuksia, joita kehitystyöstä syntyy. Toisaalta tämä myös helpottaisi kilpailua, jos eri valmistajien laitteet olisivat yhteensopivia. Tämän seurauksena yritys, joka on jo kehittänyt oman protokollan ja saanut ekosysteeminsä laajaan käyttöön, ei välttämättä haluaisi lähteä mukaan uuteen yhteiseen standardiin, jossa heidän täytyisi kehittää järjestelmä uudestaan ja lisäksi kyetä kilpailemaan useamman yrityksen kanssa. Yhteisen protokollan vaikutuksia valmistajiin ja muihin älykotimarkkinoilla toimiviin yrityksiin tulisi myös tutkia lisää, jotta voidaan paremmin ymmärtää mitä vaikutuksia yhteisellä protokollalla on ja kuinka sen hyöty saataisiin maksimoitua myös yritysten näkökulmasta. Näin myös yritykset saataisi mukaan ja tämä edesauttaisi älykotien kehitystä.

## LÄHTEET

- Android Authority (2024). What is Z-Wave? Everything you need to know, <https://www.androidauthority.com/what-is-z-wave-3257920/>.
- CERN (ei pvm.). A short history of the Web. <https://home.cern/science/computing/birth-web/short-history-web>.
- Cheek, N., Reutskaja, E., Schwartz, B., Iyengar, S. (2022). Is Having Too Many Choices (Versus Too Few) Really the Greater Problem for Consumers?. <https://behavioralscientist.org/is-having-too-many-choices-versus-too-few-really-the-greater-problem-for-consumers/>.
- Cisco Meraki (2019). Wi-Fi 6: The Next Generation of Wireless. [https://meraki.cisco.com/lib/pdf/meraki\\_whitepaper\\_wifi6.pdf](https://meraki.cisco.com/lib/pdf/meraki_whitepaper_wifi6.pdf).
- Connectivity Standards Alliance. (2023). Zigbee. <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/>.
- Cookson-Rabouhi, G. (2018). Push-Button Manor: The Original Smart Home. <https://www.hotfootdesign.co.uk/white-space/push-button-manor-original-smart-home/>.
- Du, Y., Cao, C., Zou, X., He, J., Yan, H., Wang, G., Steer, D. (2016). Measurement and Modeling of Penetration Loss in the Range from 2 Ghz to 74 Ghz. 2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Washington, DC, USA, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOMW.2016.7848958.
- ECFR. (2024) Title 47, Chapter I, Subchapter A, Part 18. <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-18>. Haettu 29.4.2024.
- ElKassabi, I., Abdrabou, A. (2022). An Experimental Comparative Performance Study of Different WiFi Standards for Smart Cities Outdoor Environments. 2022 IEEE 13th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), New York, NY, NY, USA, 2022, pp. 0450-0455, doi: 10.1109/UEMCON54665.2022.9965626.
- Grohmann, A.I., Nophut, D., Sobe, M., Perez, A.B., Fitzek, F.H.P. (2021). Interference resilience of Thread: A practical performance evaluation. 2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/CCNC49032.2021.9369625.
- HiveMQ. (18.5.2023). MQTT Essentials: Part 1. <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-1-introducing-mqtt/>.
- IEEE., A. (2022). <https://standards.ieee.org/ieee/802.3/10422/>.
- IEEE., B. (2021). Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan

- Area Networks--Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, in IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016), vol., no., pp.1-4379, 26 Feb. 2021, doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.
- IEEE., C. (2016) Standard for Low-Rate Wireless Networks, in IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011) , vol., no., pp.1-709, 22 April 2016, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7460875.
- Jiang, H., Liu, B., Chen, C.W. (2017). Performance analysis for ZigBee under WiFi interference in smart home. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC.2017.7997161.
- Kauling, D., AlTaei, M., Mahmoud, Q.H. (2018). Impact of IoT device saturation on home WiFi networks. Smart Cities Symposium 2018, Bahrain, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2018.1386.
- Lütolf, R. (1992). Smart Home concept and the integration of energy meters into a home based system. Seventh International Conference on Metering Apparatus and Tariffs for Electricity Supply 1992, Glasgow, UK, 1992, pp. 277-278.
- Mhatre, V. P., Papagiannaki, K., Baccelli, F. (2007). Interference Mitigation Through Power Control in High Density 802.11 WLANs. IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on Computer Communications, Anchorage, AK, USA, 2007, pp. 535-543, doi: 10.1109/INFCOM.2007.69.
- MQTT. (2024). MQTT FAQ. <https://mqtt.org/faq/>.
- Navarria, G. (2016). How the Internet was born: The network begins to take shape. <https://theconversation.com/how-the-internet-was-born-the-network-begins-to-take-shape-67904>.
- Nomura, K., Sato, F. (2014). A Performance Study of ZigBee Network under Wi-Fi Interference. 2014 17th International Conference on Network-Based Information Systems, Salerno, Italy, 2014, pp. 201-207, doi: 10.1109/NbiS.2014.86.
- Perry, T. (2023) The Definitive History Of Smart Home Devices. <https://www.smarthomepoint.com/history/>.
- Phan, L.A., Kim, T. (2018). A Study of the Z-Wave Protocol: Implementing Your Own Smart Home Gateway, 2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), Nagoya, Japan, 2018, pp. 411-415, doi: 10.1109/CCOMS.2018.8463281.
- PricewaterhouseCoopers Oy. (2017). PWC Consumer Intelligence Series IoT Connected Home. January 2017. <https://www.pwc.com/us/en/industry/entertainment-media/publications/consumer-intelligence-series/assets/pwc-consumer-intelligence-series-iot-connected-home.pdf>.

- Rathnayaka, A.J.D., Potdar, W.M., Kuruppu, S.J. (2011). Evaluation of wireless home automation technologies. 5th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (IEEE DEST 2011), Daejeon, Korea (South), 2011, pp. 76-81, doi: 10.1109/DEST.2011.5936601.
- Romkey, J. (2017). Toast of the IoT: The 1990 Interop Internet Toaster, IEEE Consumer Electronics Magazine, vol. 6, no 1, pp. 116-119, jan. 2017, doi: 10.1109/MCE.2016.2614740.
- Roscia, M., Dancu, V., Lazaroiu, G.C. (2023). Smart Home Survey Analysis. 2023 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISC257844.2023.10293364.
- Rzepecki, W., Ryba, P. (2019). IoTSP: Thread Mesh vs Other Widely used Wireless Protocols – Comparison and use Cases Study. 2019 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 291-295, doi: 10.1109/FiCloud.2019.00048.
- Satpathy, L. (2006). Smart Housing: Technology to Aid Aging in Place - New Opportunities and Challenges. Theses and Dissertations. 3967.
- Silicon Labs. (7.2.2024) Z-Wave Global Regions.  
<https://www.silabs.com/wireless/z-wave/global-regions>.
- Statista (2024). Average number devices and connections per person worldwide in 2018 and 2023. <https://www.statista.com/statistics/1190270/number-of-devices-and-connections-per-person-worldwide/>.
- Suomen virallinen tilasto (SVT): Väestön tieto- ja viestintätekniikan käyttö [verkkajulkaisu]. ISSN=2341-8699. 2021, Liitetaulukko 9. Kotitalouden käytössä olevia asunnon sisäisiä WLAN-verkkoja 2021, %-osuus talouksista. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 6.2.2024]. Saantitapa: [https://www.stat.fi/til/sutivi/2021/sutivi\\_2021\\_2021-11-30\\_tau\\_009\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/sutivi/2021/sutivi_2021_2021-11-30_tau_009_fi.html).
- Suresh, P., Daniel, J.V., Parthasarathy, V., Aswathy, R.H. (2014) A state of the art review on the Internet of Things (IoT) history, technology and fields of deployment. 2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR), Chennai, India, 2014, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICSEMR.2014.7043637.
- The Ambient. (2024). Z-Wave explained: What is Z-Wave and why is it important for your smart home?. <https://www.the-ambient.com/explainers/zwave-z-wave-smart-home-guide-281/>.
- Thread Group. (2024). Thread Smart Home Fact Sheet.  
<https://www.threadgroup.org/BUILT-FOR-IOT/Smart-Home#Resources>.

- Unwala, I., Taqvi, Z., Lu, J. (2018). Thread: An IoT Protocol, 2018 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), Austin, TX, USA, 2018, pp. 161-167, doi: 10.1109/GreenTech.2018.00037.
- Wang, W., He, G., Wan, J. (2011). Research on Zigbee wireless communication technology. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, Yichang, China, 2011, pp. 1245-1249, doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057961.
- Wi-Fi Alliance., A. (2019). Wi-Fi Alliance celebrates 20 years of Wi-Fi. <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-celebrates-20-years-of-wi-fi>.
- Wi-Fi Alliance., B. (2024) Wi-Fi Alliance introduces Wi-Fi CERTIFIED 7. <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-certified-7>.
- Z-Wave Alliance., A. (ei pvm.). Z-Wave. <https://z-wave.com>. Haettu 8.11.2023
- Z-Wave Alliance., B. (2022). Z-Wave Alliance Announces Z-Wave Source Code Project Is Complete, Now Open And Widely Available To Members. [https://z-wavealliance.org/news\\_p/z-wave-alliance-announces-z-wave-source-code-project-is-complete-now-open-and-widely-available-to-members/](https://z-wavealliance.org/news_p/z-wave-alliance-announces-z-wave-source-code-project-is-complete-now-open-and-widely-available-to-members/).