

Iiris Palviainen

# 5G URLLC: TEKNIikka JA TEOLLISUUSOVELLUKSET

Kandidaattitutkielma  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Mikko Valkama  
Kesäkuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Iiris Palviainen: 5G URLLC: Tekniikka ja teollisuussovellukset  
Kandidaattitutkielma  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma  
Kesäkuu 2022

---

Koska mobiiliverkkojen käyttö on jatkuvassa kasvussa ja internetissä olevien laitteiden määrä on moninkertaistunut viime vuosina, tarvitaan uusia, moderneja ratkaisuja tukemaan entistä yksilöllisempiä tarpeita sekä keinoja hallita alati kasvavaa datan määrää. Viidennen sukupolven mobiiliviestintäteknologia eli 5G on kykenevä vastaamaan näihin haasteisiin, ja se avaa paljon ovia myös uusille sovelluksille, joita voidaan hyödyntää monialaisesti.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on perehtyä syvemmin 5G:n potentiaaliin sekä sen myötä syntyneisiin mahdollisuuksiin eri käytännön aloilla ja sovelluskohteissa. Lisäksi työssä tarkastellaan URLLC:tä (engl. Ultra-Reliable, Low-Latency Communications) ja sen merkitystä osana 5G:n tärkeimpiä teknologioita. Tutkielma tehtiin kirjallisuuskatsauksena, ja aineistona käytettiin muun muassa tieteellisiä artikkeleita sekä muita tekstilähteitä.

5G on uusi mobiiliverkkoteknologia, joka toimii edellisiä teknologioita suuremmilla taajuuskais-toilla. Tämän ansiosta sitä voidaan hyödyntää eri tavoin, ja kapasiteetti riittää kattamaan suuretkin tietoliikennemäärät. Koska URLLC yhdessä muiden 5G:n avainteknologioiden kanssa mahdollistaa luotettavan ja nopean tiedonsiirron, näkyy 5G:n luomat parannukset muun muassa vapaa-aikaan, maatalouteen ja teollisuuteen liittyvissä käyttökohteissa hyvinkin selkeästi. Työssä keskitytään pääasiassa teollisuuden sovelluksiin, sillä 5G:n myötä myös teollisuus on kokenut suuren muutoksen, ja puhutaankin teollisuuden neljännestä vallankumouksesta. Teollisuus keskittyy entistä enemmän digitaalisiin sovelluksiin, joita 5G yhdessä URLLC:n kanssa mahdollistaa. Näitä ovat esimerkiksi teollisuusautomaatio, reaaliaikaiset järjestelmät ja koneoppiminen.

Tutkielma osoittaa, että 5G:n merkitys teollisuuden saralla on korvaamattoman arvokas. Kustannustehokkaina sekä joustavina pidetyt langattomat tiedonsiirtomenetelmät voivat korvata entiset langalliset järjestelmät ja näin ollen parantaa tuotannon ja teollisuuden luotettavuutta, tehokkuutta ja adaptiivisuutta. Tyypillisimpänä haasteena 5G-teknologiaan liittyen on sen käyttöönotto. Uuden teknologian myötä vanhoja laitteita joudutaan päivittämään, langattoman tiedonsiirron varmistamiseksi saatetaan joutua tekemään fyysisiäkin muutoksia työtiloissa ja henkilöstöä tulee perehdyttää uusiin toimintamalleihin. 5G-teknologiassa on kuitenkin tavoiteltu sen jatkuvuutta, eli kun käyttöönottoon liittyvät haasteet saadaan suoritettua, ei isoja muutoksia tarvitse enää hetkeen tehdä.

Avainsanat: 5G, URLLC, mobiiliverkko, teollisuus, sovellus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Haluan kiittää työni ohjaajaa Mikko Valkamaa arvokkaasta tuesta, ymmärryksestä ja avusta koko kirjoitusprosessin aikana. Lisäksi ison kiitoksen ansaitsevat perheeni ja ystäväni, jotka ovat olleet korvaamaton tuki myös koko työn ajan.

Tampereella, 15.06.2022

Iiris Palviainen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. 5G YLEISESTI .....	2
2.1 5G-teknologia.....	4
2.1.1 5G:n eroavaisuudet LTE-verkkoon verrattuna.....	5
2.1.2 MIMO ja keilanmuodostus.....	6
2.1.3 Verkon viipalointi.....	7
2.2 URLLC.....	8
2.3 IoT ja IIoT.....	9
3. 5G:N KÄYTTÖTAPAUKSISTA.....	11
3.1 Tehtaat ja teollisuusautomaatio.....	13
3.1.1 Robotit .....	14
3.1.2 Reaaliaikaiset järjestelmät .....	15
3.1.3 Koneoppiminen.....	15
3.2 Logistiikka ja älykkäät kulkuneuvot.....	16
3.2.1 Teknologia älylogistiikan taustalla .....	18
3.2.2 Älykkäät kulkuneuvot .....	19
4. YHTEENVETO.....	20
LÄHTEET .....	23

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project, organisaatio jonka tarkoituksena on määritellä ja selittää verkkoteknologioiden vaatimuksia
AI	Artificial Intelligence, tekoäly
AR	Augmented reality, lisätty todellisuus
eMBB	Enhanced Mobile Broadband, paranneltu mobiililaajakaista
GSM	Global System for Mobile communications, digitaalinen matkapuhelinjärjestelmä
IIoT	Industrial Internet of Things, teollisuuteen liittyvä esineiden internet
IoT	Internet of Things, esineiden internet
LPWAN	Low-Power, Wide-Area Networks, pienitehoinen suuren alueen kattava verkko
LTE	Long Term Evolution, 4G langaton tiedonsiirtotekniikka
MIMO	Multiple Inputs, Multiple Outputs, tiedonsiirtotekniikka jossa sekä lähetykseen että vastaanottoon käytetään useampaa kuin yhtä antennia
mMTC	Massive Machine Type Communications, massiivinen koneiden välinen kommunikaatio
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing, tiedonsiirtoa useilla toisiaan häiritsemättömillä taajuuskanavilla samanaikaisesti
RFID	Radio Frequency Identification, radiotaajuinen etätunnistus
URLLC	Ultra Reliable, Low Latency Communications, luotettava ja nopea kommunikaatio
V2X	Vehicle to Anything, kulkuneuvon kommunikaatio minkä tahansa kanssa
VR	Virtual Reality, virtuaalinen todellisuus

# 1. JOHDANTO

Langaton 5G-verkko suunniteltiin kattamaan alati kehittyvät tietoliikenteen tarpeet. Sen on tarkoitus mahdollistaa niin ikään sosiaalinen tietoverkko, jossa informaatiota voidaan käyttää ja jakaa kaikkialla ja kaikkien toimesta, ajankohdasta riippumatta. 5G tarjoaa langattoman yhteyden kaikelle, joka siitä jollakin tapaa hyötyy. Jotta voitaisiin saavuttaa tämänkaltainen tietoverkko, kohdataan monia eri haasteita, joista tärkeimpiä ovat muun muassa keskenään kommunikoivien laitteiden valtava ja jatkuvasti kasvava määrä sekä sen myötä kasvava tietoliikenteen määrä. Lisäksi laitteet ovat keskenään hyvin erilaisia ja niillä on moninaiset vaatimukset ja tunnuspiirteet, jotka tulee ottaa huomioon tietoverkkoa suunniteltaessa. [1] Näiden haasteiden ratkaisemiseksi langattomat 5G-yhteydet vaativat paitsi uusia toimintoja myös huomattavasti laajempia taajuuskaistoja.

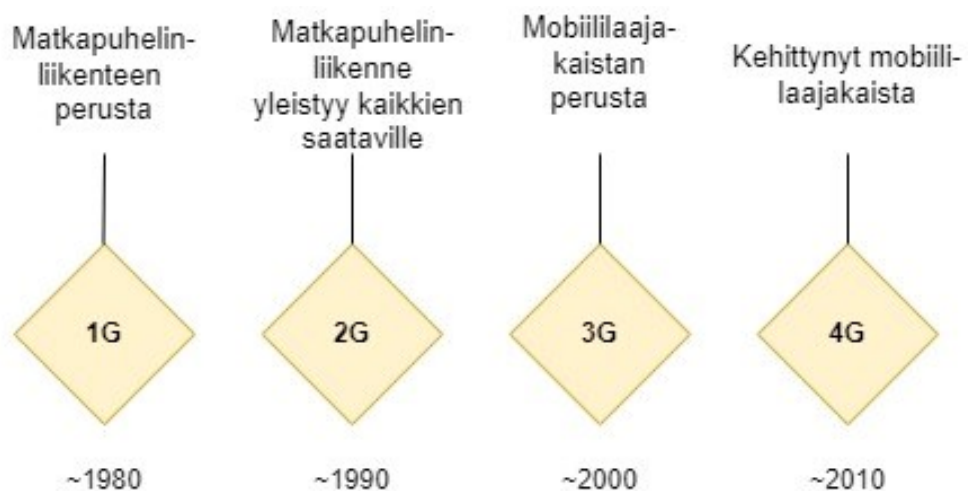
5G-teknologia mahdollistaa entistä tehokkaampia työskentelymenetelmiä myös teollisuuden aloilla. 5G:n yksi mahdollistavista tekijöistä on URLLC, joka takaa nopean mutta luotettavan datansiirron niin laitteiden kuin myös ihmistenkin välillä. Työn tarkoituksena on tutkia, millaisia eri keinoja teollisuuden aloilla on hyödyntää 5G:tä ja siten myös URLLC:tä. Samalla pohditaan myös esineiden internetin tarjoamia mahdollisuuksia teollisuudessa.

Luku 2 käsittelee 5G-teknologiaa yleisellä tasolla ja sen tavoitteena on auttaa lukijaa ymmärtämään, mistä työssä on kyse ja mihin se pohjautuu. Kappaleen tarkoituksena on avata taustalla vaikuttavaa teoriaa tulevia kappaleita varten. Kappale 2 käsittelee myös 5G:n teknologiaa, ja siinä kerrotaan lyhyesti tärkeimmistä 5G:n mahdollistajista. Lisäksi kappale myös vertailee 5G:tä aiempiin verkkoteknologioihin. Viimeisessä aliluvussa avataan URLLC:n teoriaa.

Kolmannessa luvussa pohditaan 5G-sovellusten tarpeellisuutta sekä tarkastellaan erilaisia teollisuussovelluksia. Pääpaino on Teollisuus 4.0:n eli teollisuuden neljännen vallankumouksen tärkeimmistä tekijöissä: teollisuusautomaatiossa, reaaliaikaisissa järjestelmissä sekä koneoppimisessa. Lisäksi kolmannessa luvussa käsitellään älylogistiikkaa sekä älykkäitä kulkuneuvoja, jotka olennaisesti kuuluvat teollisuuden sovelluskohteisiin. Logistiikka on digitalisaation ja 5G:n myötä kehittynyt nopeasti, uusien teknologioiden ansiosta tehostunut sekä sen luotettavuudenkin on huomattu parantuneen.

## 2. 5G YLEISESTI

Mobiiliviestintä on viime vuosikymmeninä kehittynyt valtavasti. Kuten kuvasta 1 näkee, kaikki alkoi 1980-luvun tienoilla, kun 1G-analogiseen tiedonsiirtoon perustuva teknologia kehitettiin ja julkaistiin. 1G:n ansiosta mobiilikommunikaatio oli ensimmäistä kertaa myös tavallisten ihmisten saatavilla, joskin sen käyttö ei vielä ollut kovin yleistä. Seuraava sukupolvi 2G perustui digitaaliseen tiedonsiirtoon ja esiteltiin 1990-luvun alkupuolella. 2G:hen kuului merkittävä uusi teknologia GSM (Global System for Mobile communication), jonka ansiosta mobiilikommunikaatio todella saavutti tavallisten käyttäjien suosion. 2000-luvun alussa 3G tuli yleiseen käyttöön, ja sen tärkeimpiä uusia ominaisuuksia oli langaton internetyhteys. Seuraava merkittävä askel 2010-luvulla oli 4G ja sen ominaisuus LTE (Long Term Evolution), joka tarjosi entistä tehokkaamman mobiililaajakaistan.



**Kuva 1.** Mobiiliviestinnän historiaa, mukailen [2].

Teknologian käytön jatkuvasti kiihtyvässä kasvussa tarvitaan uusia ratkaisuja, jotka tukevat alati kehittyvää tarvetta monipuoliselle, älykkäällekin tietoliikenteelle. Aiemmat teknologiat ovat tarjonneet mahdollisuuksia kommunikointivälineiden, kuten puhelinten ja tietokoneiden sujuvalle kuluttajakäytölle, mutta 5G luo uuden alustan entistä älykkäämmälle tietoverkolle. Yksi 5G:n sovelluskohteista, IoT eli esineiden internet mahdollistaa pohjan älykkäille kaupungeille, kulkuvälineiden keskinäiselle kommunikaatiolle sekä esimerkiksi älykodeille. 5G-teknologian ansiosta myös teollisuuteen on tarjolla uusia keinoja tehostaa, nopeuttaa sekä luoda entistä sujuvampia ja turvallisempia toimintomalleja. Langattoman 5G-teknologian odotetaan tarjoavan äärimmäisiä tiedonsiirtonopeuksia ja kaikenkattavia verkkorakenteita nopeasti,

luotettavasti ja tehokkaasti sekä valtavan määrän moninaisia yhteyksiä erilaisten laitteiden välille.

Langaton 4G-verkko tarjosi perustan 5G-verkon kehittämiseksi. Toisin kuin 4G-verkossa, 5G:n signaalit välittyvät useiden, pienisoluisten asemien lävitse. Nämä tukiasemat on sijoitettu niin, että verkko kattaa toivotun alueen. Millimetritaajuuksia käyttävä 5G tarvitsee useita tukiasemia, sillä suuret nopeudet voivat edetä vain lyhyen välimatkan, joten sijoittamalla asemia tiheästi voidaan turvata kattava 5G-yhteys. [3]

5G:n yhteydessä usein puhutaan kolmesta tärkeästä käyttötapausluokittelusta: parannellusta mobiililaajakaistasta (eMBB), massiivisesta koneiden välisestä kommunikaatiosta (mMTC) sekä luotettavasta ja matalaviiveisestä kommunikaatiosta (URLLC). EMBB vastaa enenevässä määrin nykyaikaisesta mobiililaajakaistan kehityksestä ja mahdollistaa kasvavan datamäärän käsittelyn sekä entistä paremman käyttäjäkokemuksen tukemalla suuria loppukäyttäjien tiedonsiirtonopeuksia. mMTC:llä tarkoitetaan nykyverkossa olevaa, massiivista määrää laitteita, jotka kommunikoivat keskenään. Tärkeimpiä vaatimuksia tämän kaltaisilla laitteilla ja palveluilla ovat muun muassa matalat kustannukset ja energian säästö. [2] URLLC takaa erittäin nopean mutta samalla luotettavan kommunikaation ja mahdollistaa kriittistä dataa vaativat käyttökohteet, kuten autonomiset kulkuvälineet ja teollisuuskoneet. Nämä kolme käyttötapauslaajaa ovat kuitenkin vain karkea jaottelu, ja niiden tarkoituksena on yksinkertaistaa vaatimusten määrittelyä. On tärkeää ymmärtää, että on olemassa useita sellaisia käyttötapauksia ja sovellutuksia, jotka eivät aivan suoranaisesti sovi yhteenkään näistä yllä esitellyistä luokituksista.

3GPP (3rd Generation Partnership Project) koostuu monesta standardointijärjestöstä, jotka muodostavat yhteistyöhön perustuvan organisaation. Organisaation tarkoituksena oli alun perin luoda 3G-järjestelmille kansainvälisiä määrittelyjä ja näin ollen yhtenäistää eri järjestelmiä. Vaikka nimi viittaaakin 3G-järjestelmiin, on organisaation toimintaa laajennettu vuosien saatossa, ja nykyään sen pääasiallinen toiminta perustuu 5G-järjestelmiin. 3GPP:n julkaisuissa esitellään määrittelyjä ja tavoitteita, joiden perusteella eri järjestelmien kehitystä voidaan seurata ja arvioida. Ensimmäinen 5G-järjestelmiä koskeva julkaisu oli numero 15 vuodelta 2018, ja se keskittyi pääasiassa eMBB:n ja URLLC:n tarjoamiin mahdollisuuksiin [4]. Jokaisessa uudessa julkaisussa esiteltiin aina uusia ominaisuuksia 5G-verkolle. Tällä hetkellä 3GPP on siirtymässä julkaisuun numero 18, jossa jälleen annetaan uusia määrittelyitä 5G-järjestelmille. Taulukkoon 1 on koottu tärkeimpiä ominaisuuksia jokaisen julkaisun myötä.



Taulukko 1. 3GPP:n julkaisuversiot [4,5,6,7]

Julkaisu	Vuosi	Tärkeimpiä ominaisuuksia
15	2019	5G:n ensimmäinen vaihe: mMTC, IoT, V2X, verkkojen viipalointi
16	2020	5G:n toinen vaihe: Multimedia, parannellut 1. vaiheen sovellukset, lokalisointi, MIMO, teollisuuteen liittyvät sovellutukset
17	2020 ->	IoT teollisuudessa, tehokkuus, käyttökokemus, kompleksisuuden minimointi
18	2021 ->	Koneoppiminen, tekoäly, edellisten toimintojen parantelu

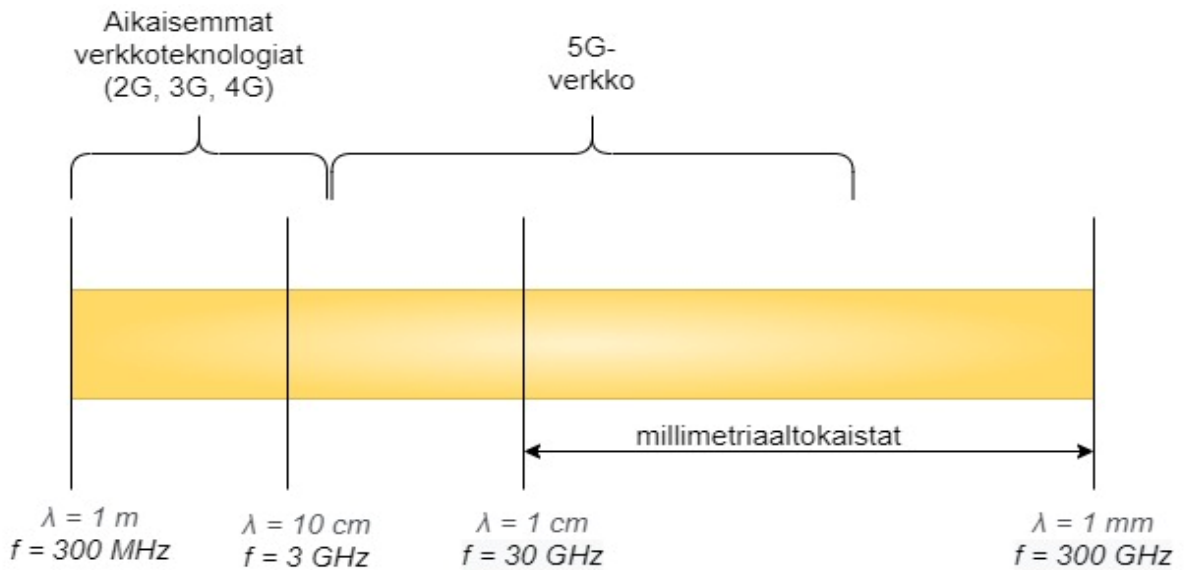
V2X (Vehicles to anything) on IoT:n mahdollistama sovellutus, jonka myötä kulkuneuvot voivat kommunikoida muiden samassa verkossa olevien laitteiden, kuten toisten kulkuneuvojen, liikennemerkkien tai esimerkiksi puhelimien kanssa. V2X-sovelluksia voidaan spesifioida eri lyhentein, kuten V2V (vehicle to vehicle) ja V2P (vehicle to people). Verkkojen viipaloinnista sekä MIMO:sta kerrotaan lisää seuraavissa aliluvuissa.

## 2.1 5G-teknologia

5G-tietoverkot ovat soluverkkoja. Suuria alueita on tukiasemien mukaan jaettu pienemmiksi soluiksi, joissa kaikki 5G-verkossa olevat laitteet kommunikoivat keskenään radioaaltojen välityksellä. Yksi tukiasema voi palvella yhtä pienempää solua tai vaihtoehtoisesti hyödyntää ympärisäteileviä antennoja palvellakseen useampia pieniä soluja. Solujen verkoilla ei ole selkeitä rajoja, vaan ne voivat olla toistensa kanssa päällekkäin. Siten yksi mobiililaite voi kommunikoida useankin tukiaseman kanssa ja siirtyessään solusta toiseen laite siirtyy tukiasemalle, jolla on voimakkain yhteys. [8]

Aiemmat verkkoteknologiat (2G, 3G ja 4G) toimivat alle kuuden gigahertsin taajuuksilla. Saavuttaakseen mahdollisimman suuren tehokkuuden 5G-teknologia toimii näiden yläpuolella. Alle kuuden gigahertsin taajuuskaistat ovat ruuhkautuneet aikaisemmista verkkoteknologioista ja niiden käyttäjistä, joten tilaa piti etsiä sen ulkopuolelta. 5G-verkkoja on kahta eri tyyppiä: millimetriaaltotaajuuksia, jotka kattavat yhteydet yli kuuden gigahertsin taajuuksilla, sekä alle kuuden GHz taajuuksia. Millimetriaaltojen taajuusalueella (30–300 GHz) on paljon enemmän taajuuksia käytettävissä, joskaan kaupallisia matkaviestinjärjestelmiä, jotka toimisivat millimetriaaltotaajuuksilla, ei vielä juurikaan ole. Puhekielessä 5G:llä tarkoitetaan yleisesti millimetriaaltotaajuuksia, vaikka todellisuudessa suurin osa tavallisista käyttäjistä toimiikin alle kuuden GHz:in alueella.

5G:n avulla päästään käsiksi 1 GHz:n taajuuksista aina 100 GHz:iin. Kuvassa 2 on havainnollistettu eri taajuusalueita, jotka eri teknologiat kattavat. Kuvassa on esitetty aallonpituudet  $\lambda$  sekä taajuudet  $f$  eri verkoissa.



**Kuva 2.** Eri teknologioiden käyttämät taajuusalueet, mukailten [1]

Dahlman *et al.* esittävät teoksessaan [2] 5G:n luomia etuja vanhoihin verkkoihin ja eritoten LTE-teknologiaan nähden. Osa näistä voidaan luokitella suunnitteluun liittyviksi piirteiksi, ja osa koskettaa enemmän 5G:n teknologista puolta.

### 2.1.1 5G:n eroavaisuudet LTE-verkkoon verrattuna

Yksi tärkeimmistä 5G:n eduista LTE-teknologiaan verrattaessa ovat huomattavasti korkeammat taajuuskaistat, joiden avulla voidaan saavuttaa lisää spektriä laajojen siirtokaistanleveyksien ja niihin liitettävien tiedonsiirtonopeuksien tukemiseksi. 5G:n lisensoitu spektri on yhdestä gigahertsistä jopa 52,6 GHz:iin jo heti alusta alkaen, toisin kuin aiemmissa verkkoteknologioissa. Yli 52,6 GHz:n taajuuksia koskevia vaatimuksia suunnitellaan julkaistavaksi myöhemmissä 3GPP:n julkaisuissa. Millimetriaaltotaajuudet sen sijaan mahdollistavat vielä suuremman toimintaspektrin sekä laajakaistan, minkä ansiosta pystytään käsittelemään todella suurta määrää dataliikennettä. [2]

Toinen suunnitteluun liittyvä vaatimus liittyy verkon kevyeen rakenteeseen. Edellisten teknologioiden ongelma on ollut se, että suuria määriä dataa liikkuu tukiasemien välillä riippumatta käyttäjien määrästä. Niin kutsuttuihin "always on"-signaaleihin kuuluvat muun muassa tukiasemien havaitsemiseen ja järjestelmätietojen lähettämiseen liittyvät signaalit. [2] LTE:n tapauksessa "always on"-signaaleilla on vain pieni vaikutus verkon kuormitukseen, mutta 5G-verkoissa näin ei kuitenkaan ole. Siksi kevyeseen

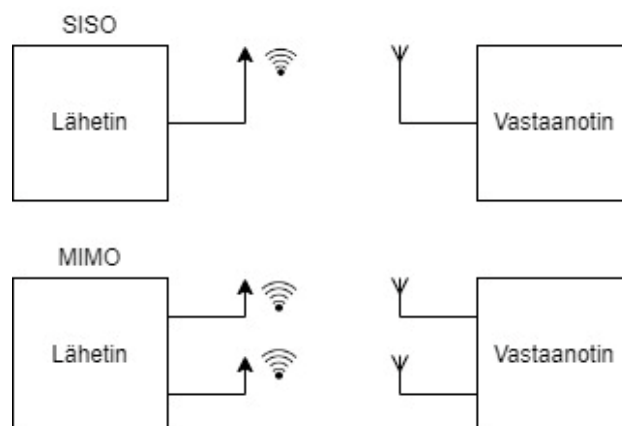
rakenteeseen tulee kiinnittää huomiota 5G-verkkoa suunniteltaessa. Ultrakevyt rakenne minimoi kaikki lähetykset, jotka eivät ole relevantteja käyttäjätiedon kannalta [9]. Tämän ansiosta myös tukiasemien välillä liikkuu vähemmän dataa, ja asemat voivat olla enemmän "lepotilassa", mikä itsessään toimii energiaa säästävänä tekijänä.

Dahlmanin *et al.* [2] mukaan yksi tärkeä vaatimus 5G:tä määriteltäessä on yhteensopivuuden varmistaminen myös jatkossa. Yhteensopivuuden tarkoitus on taata, että myös jatkossa uusien teknologioiden käyttöönotto on mahdollista, vaikka näiden teknologioiden ominaisuudet olisivatkin vielä tuntemattomia. Yhteensopivuuden ansiosta uusia malleja voidaan hyödyntää jo olemassa olevilla laitteilla. Tämä säästää muun muassa kustannuksia, kun laitteistoa ei tarvitse uusien jokaisen päivityksen myötä.

## 2.1.2 MIMO ja keilanmuodostus

5G vaatii toimiakseen suuren määrän tukiasemia sekä antennejä. Eräs keskeisiä 5G:n ominaisuuksia on ohjattavien antennien tukeminen sekä lähetystä että vastaanottoa varten. Moniantenninen lähetys on siis keskeinen piirre 5G-tekniikassa, niin alle kuuden GHz:n taajuuksilla kuin myös millimetriaaltotaajuuksilla.

Massiivinen MIMO (Multiple Input, Multiple Output) on yksi lupaavimmista tekniikoista, mitä tulee langattomiin kommunikaatiosysteemeihin ja moniantennitekniikkaan. Sen tarkoituksena on tukea useita, jopa kymmeniä päätelaitteita yhden tukiaseman sadoilla eri antennilla [10]. Alla olevassa kuvassa on vertailun vuoksi esitetty SISO (Single Input, Single Output) sekä MIMO. Kuvasta (kuva 3) nähdään, miten MIMO:n tapauksessa lähettimestä lähtee useampi signaali, sekä vastaanottimelle saapuvat signaalit.



**Kuva 3.** SISO:n ja MIMO:n eroavaisuus. Mukailten [11].

Sen lisäksi, että MIMO parantaa spektristä tehokkuutta, se myös madaltaa viivettä, kasvattaa kapasiteettia ja parantaa signaalin häiriönsietoa. Massiivinen MIMO on siis erittäin merkittävä ominaisuus, kun puhutaan häiriöiden eliminoinnista. [11]

Keilanmuodostuksella tarkoitetaan tietynlaista signaalien suodatustekniikkaa, jota käytetään suunnattujen signaalien lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Sen avulla voidaan keskittää antennin säteilyteho joko yhteen tai useampaan, ennaltamääritellyyn suuntaan. Useimmiten puhuttaessa keilanmuodostuksesta 5G-tekologiaan liitettynä, tarkoitetaan signaalin lähettämistä kapeassa muodossa vastaanottajalle siten, että vain tietty käyttäjä voi vastaanottaa signaalin mukana kulkevaa dataa. Lähettävä antenni ohjaa keilamaisen signaalin vastaanottajan suuntaan hyödyntäen aallon vaihetta ja amplitudia. [12]

### **2.1.3 Verkon viipalointi**

Ennen mobiiliviestintäverkot ovat olleet aina samankokoisia, eikä eri käyttäjien yksilöllisiä tarpeita ole juurikaan huomioitu. Verkon viipaloinnin ansiosta käyttäjien vaatimuksiin pystytään vastaamaan entistä paremmin ja yksilöllisemmin, ja viipalointiin liittyvät ratkaisut tukevat tehokkaampaa verkkojen käyttöä.

Koska 5G-tekniikan vaatimuksiin liittyy useiden erilaisten palveluiden takaaminen, tulee verkkojen jakaminen ajankohtaiseksi. Koska osa 5G-sovelluksista vaatii nopeaa läpimenoaikaa, osa korkeaa luotettavuutta ja osa priorisoi turvallisuutta, ei yksi, tietynmallinen ratkaisu sovi enää jokaiselle. Verkon viipalointi on yksi keskeisimmistä 5G-tekniikan menetelmistä. Verkon viipalointi perustuu tekniikkaan, jolla käyttäjälle varataan verkosta vain tarpeita vastaava osuus. [13]

Kuten Li *et al.* [13] kirjoittavat, verkon viipaloinnilla on useita etuuksia jakamattomaan verkkorakenteeseen verrattuna. Viipalointi mahdollistaa entistä loogisempia verkkoratkaisuja ja paremman suorituskyvyn, kun jokainen osio on luotu vain tarvetta vastaamaan. Osioita voidaan myös muokata käytön aikana vaatimusten muuttuessa, mikä tekee viipaloinnista dynaamisen ja monikäyttöisen. Lisäksi viipaloinnin avulla verkon eri osioita voidaan eristää toisistaan, jolloin ne eivät kommunikoi keskenään ja näin ollen lisäävät verkon luotettavuutta ja turvallisuutta. Viipaloinnista on siis paljon hyötyä ja verkko voidaan jakaa juuri vaatimuksia vastaaviin osuuksiin.

## 2.2 URLLC

Kuten Popovski *et al.* kirjoittavat artikkelissaan [14], viime vuosikymmeninä mobiiliviestintä on kasvattanut asemaansa huomattavasti. Nykyään on itsestään selvää, että hyödykkeenä koettava langaton tiedonsiirto on aina saavutettavissa, ja se huomataan vain silloin, kun sitä ei ole. Siksi onkin luonnollista, että luottamus langattomien sovelluksien toimintaan on suuri ja uskotaan, että on mahdollista käyttää langatonta tiedonsiirtoa jopa kriittistä dataa vaativissa sovellutuksissa. URLLC on vastaus näihin vaatimuksiin, sillä se takaa nopean tiedonsiirron luotettavasti.

Luotettavuus onkin yksi kriittisimmistä avainsanoista, kun puhutaan 5G-tekniologiasta. Luotettavuuden kanssa käsi kädessä kulkee myös nopeus. Tämä yhdistelmä on toteutuksen näkökulmasta haastava. Aiemmin, kun URLLC ei vielä esiintynyt nykyisenään, puhuttiin kahdesta erityyppisestä URC:stä (Ultra-Reliable Communications); pitkän välin sekä lyhyen välin URC:stä. Pitkän välin URC:n viiveeksi määriteltiin yli 10 millisekuntia, kun taas lyhyelle välille sama viivearvo oli 10 millisekuntia tai vähemmän. Kuitenkin, kun URLLC kokonaisuudessaan esiteltiin, siirtyivät sekä pitkän että lyhyen välin URC:t siivummalle. [14]

URLLC:n merkittävyys 5G-järjestelmiin on suuri. Yhdessä mMTC:n kanssa se tekee 5G:stä verrattain hyvinkin erilaisen edellisiin mobiiliviestintäteknologioihin nähden. URLLC mahdollistaa laajan joukon sovelluksia, joista ei välttämättä vielä edes tiedetä. 3GPP:n määritelmien mukaisesti URLLC:itä vaaditaan jopa 99,99 % luotettavuutta datansiirrossa, sekä viiveeksi on määritelty yksi millisekunti tavallisen 32-bittisen paketin siirtoon. [14] Taulukossa 2 on esitetty erilaisia URLLC:tä ja mMTC:tä yhdisteleviä teknologisia sovelluksia, sekä niiden vaatimuksia viiveelle ja luotettavuudelle datansiirtoon.

Taulukko 2. *Sovellusten luotettavuus- ja viivevaatimuksia, mukaillen [15]*

Sovellus	Viive (ms)	Luotettavuus (%)
VR	0,5–2	99,9
AR	0,5–2	> 99,9
Teollisuus 4.0	Video: 2	> 99,9
	Audio: 2	99,9
	Haptinen: 0,5–50	≥ 99,9
Autonomiset kulkuneuvot	Kriittinen: 0,5	99,9
	Joustava: 5	> 99,9
	Video: 5–50	> 99,9
	Audio: 2	99,9

Taulukossa esitetyt sovellukset hyödyntävät niin URLLC:tä kuin mMTC:tä. Virtuaalinen (VR) ja lisätty todellisuus (AR) edellyttävät todella lyhyttä viivettä. Teollisuuden neljäs

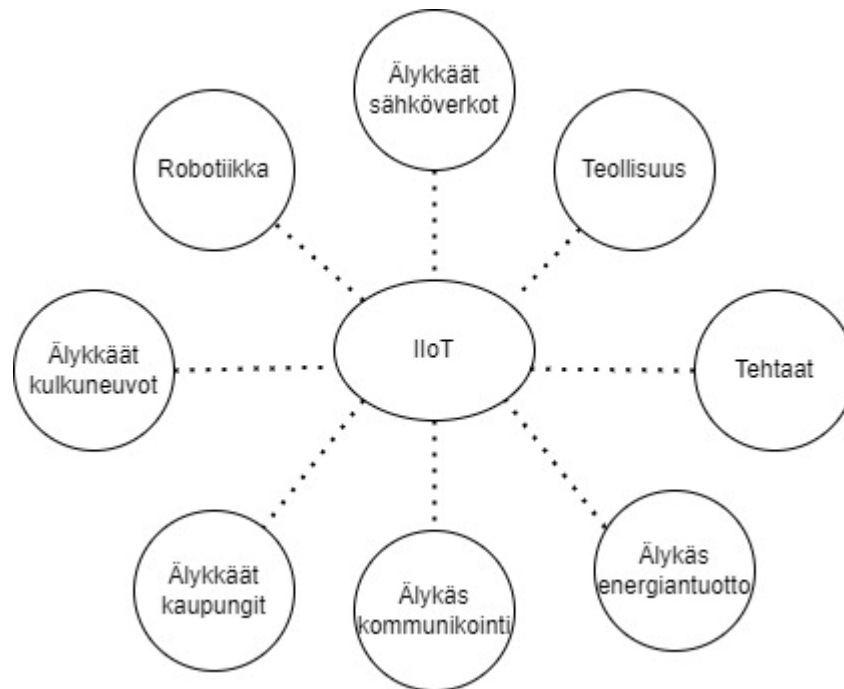
vallankumous eli Teollisuus 4.0 hyödyntää entistä enemmän esineiden internetiä, koneälyä ja reaaliaikaisia järjestelmiä, minkä takia se voidaan laskea osaksi URLLC- ja mMTC-sovelluksia [16]. Autonomiset kulkuneuvot kuten esimerkiksi itseohjautuvat autot edellyttävät todetusti todella kriittistä tiedonsiirtoa nopeasti ja luotettavasti.

URLLC voidaan nähdä mahdollistavana tekijänä sellaisissa sovelluskohteissa, jotka vaativat kriittisen datansiirron ominaisuuksia. Näitä ovat esimerkiksi erilaiset teollisuuden sekä erityisesti teollisuusautomaation käyttökohteet ja älykkäät kulkuneuvot. [15] Tehtaissa eri toiminnot, koneet ja työkalut vaativat välitöntä tiedonsiirtoa toimiakseen. Älykkäät kulkuneuvot kommunikoivat ympäristönsä kanssa jatkuvasti, ja niidenkin toiminta perustuu välittömään tiedonsiirtoon, minkä ansiosta esimerkiksi törmäyksiltä voidaan välttyä.

## 2.3 IoT ja IloT

IoT eli esineiden internet nimensä mukaisesti mahdollistaa lukuisten eri asioiden ja esineiden välisen yhteyden samassa verkossa. Sitä voidaan hyödyntää niin tavallisten loppukäyttäjien elämässä, maanviljelyssä ja kaupunkirakentamisessa, mutta myös teollisuudessa. IoT:n tavoitteena on muun muassa yksinkertaistaa ja tehostaa teollisuuden prosesseja, ja se nähdäänkin yhtenä Teollisuus 4.0:n mahdollistajista.

IloT (Industrial Internet of Things) nähdään yhtenä tärkeimmistä tekijöistä, kun puhutaan teollisuuden neljännessä vallankumouksesta. Teollisuuden näkökulmasta data on kriittistä ja massiivista sekä sen turvallisuudesta tulisi huolehtia. 5G:n myötä aiemmat haasteet kuten langattoman tiedonsiirron epäluotettavuus, laitteiden kova energiankulutus, tiedonsiirron viive sekä laitteiden määrän rajoittuvuus voidaan katsoa selätetyiksi. [17] Kuvassa 4 havainnollistetaan 5G:n ja IloT:n monipuolisuutta, ja siitä voidaan havaita, miten IloT toimii monialaisesti erilaisissakin sovelluskohteissa.

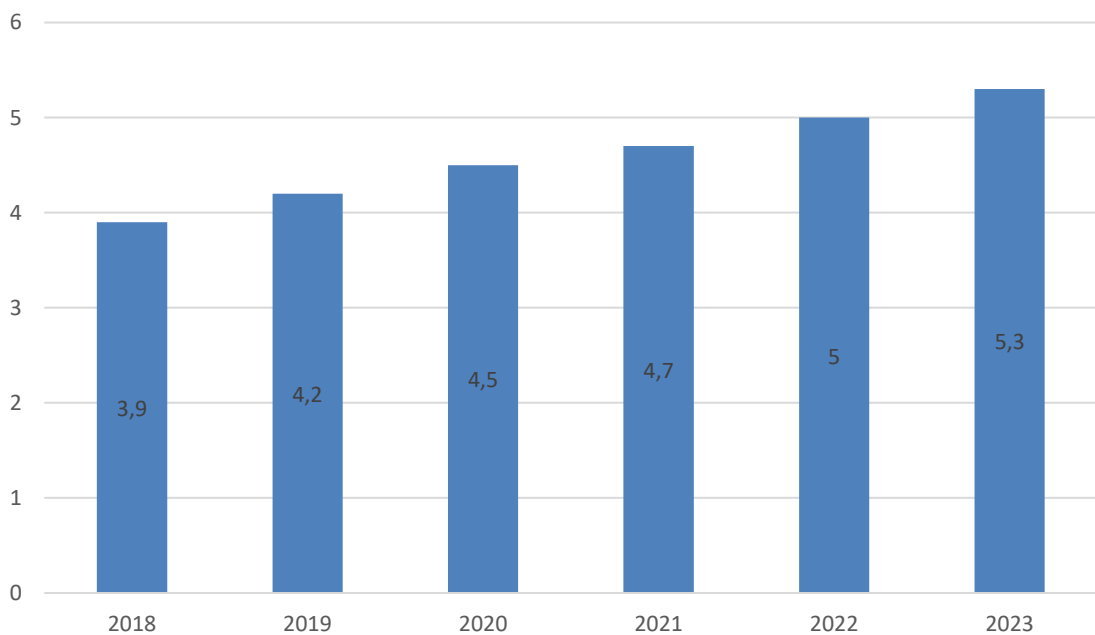


**Kuva 4.** IloT ja sen sovelluskohteita, mukailen [18].

Kaikki samaan IloT-verkkoon kuuluvat laitteet muodostavat yhdessä älykkään systeemin, joka monitoroi, kerää, vaihtaa ja analysoi dataa. IloT-verkot voivat rakentua eri yrityksissä eri lailla, mutta pääpiirteittäin jokaisesta vähintäänkin löytyy muun muassa keskenään kommunikoivat laitteet, jotka keräävät, välittävät ja säilövät dataa, tiedonsiirtoon liittyvät infrastruktuuriset rakenteet, sovellukset, jotka analysoivat ja tuottavat yritykselle arvokasta dataa sekä ihmiset. [18]

### 3. 5G:N KÄYTTÖTAPAUKSISTA

4G-tekniikan lähestyessä kypsyympistettään, on 5G kasvattanut asemaansa mobiiliviestinnän ja siihen liittyvien sovellusten saralla. Uusi tekniikka on mahdollistanut lukuisen määrän sovelluksia lähes jokaisella eri osa-alueella aina teollisuudesta tavallisten käyttäjien vapaa-ajan viettoon. Uusien laitteiden määrä kasvaa jatkuvasti, mikä osaltaan mahdollistaa ja toisaalta myös vaatii erilaisten sovellusten kehittämistä ja käyttöönottoa. Ciscon tutkimuksen mukaan vuoteen 2023 mennessä lähes kaksi kolmasosaa maailman väestöstä käyttää internetiä, ja viiden vuoden sisällä käyttäjien määrä on kasvanut 3,9 miljardista 5,3 miljardiin. Saman tutkimuksen mukaan internetiin yhdistettyjen laitteiden määrä myös kasvaa; vuonna 2018 yhdellä henkilöllä oli keskimäärin 2,4 yhdistettyä laitetta, mutta vuonna 2023 niitä on 3,6. [19] Kuvasta 5 voidaan havaita käyttäjien määrän kasvu.



**Kuva 5.** Mobiilikäyttäjien määrä miljardeissa, mukailten [19].

Ciscon raportin mukaan internetissä on siis jopa 5,3 miljardia käyttäjää vuoteen 2023 mennessä, ja jokaisella heistä on 3,6 aktiivista laitetta. Tämä tarkoittaa yhteensä yli 19 miljardia verkkoon yhdistettyä laitetta, joka on miltei kolme kertaa suurempi arvo maailman koko väkilukuun verrattuna. Voidaan siis todeta, että erilaisia käyttökohteita ja -tarpeita löytyy paljon.



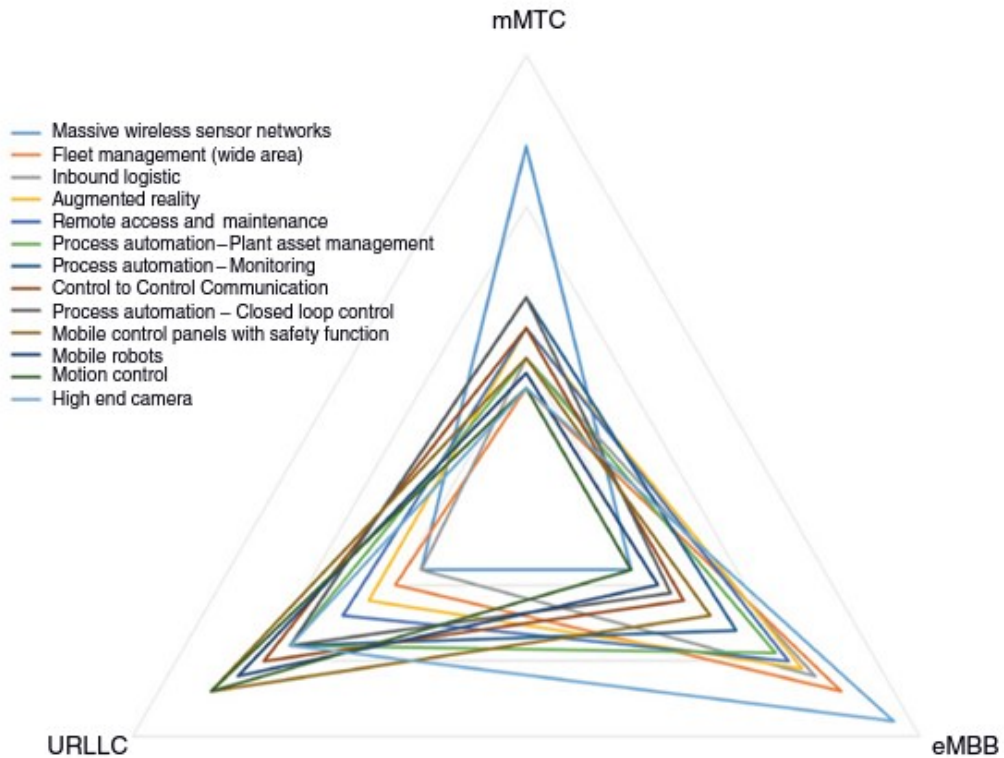
Koska 5G-teknologia kykenee vastaamaan sille annettuihin uusiin vaatimuksiin, on myös sitä hyödyntävien sovellusten kirjo suuri. 5G tarjoaa rajattoman, nopean ja luotettavan yhteyden internetiin riippumatta kellonajasta tai sijainnista. 5G:n tarjoamia sovelluksia ovat muun muassa todella nopea mobiiliverkko, viihdepalvelut, IoT ja sen mahdollistamat erilaiset sovellukset sekä esimerkiksi terveydenhuoltoon liittyvät ratkaisut. [20] Tässä työssä pääpaino on kuitenkin edellä mainittujen sovellusten ohella erityisesti teollisuussovelluksissa.

Epiconen [21] mukaan teollisuuden ensimmäisen vallankumouksen kerrotaan alkaneen 1700- ja 1800-lukujen taitteessa, jolloin valmistus keskittyi lähinnä ihmisten manuaalisesti tekemään työhön ja sen optimoimiseen muun muassa vesi- ja höyryvoimaa hyödyntävillä koneilla. Paljon on siis ehtinyt tapahtua vuosisatojen aikana, kun nyt puhutaan neljännessä teollisuuden vallankumouksesta ja teollisuuden digitalisoinnista.

Teollisuus 4.0 keskittyy vahvasti automaatioon, reaaliaikaisiin järjestelmiin, yhdistettävyyteen ja koneoppimiseen. Sen tavoitteena on yhdistää fyysinen tuotanto ja älykkäät laitteistot ja toimintamallit keskenään, jonka avulla voidaan luoda entistä harmonisempia ja tehokkaampia toimintaympäristöjä teollisuuden yrityksille. [21]

Perinteisesti teollisuudessa on hyödynnetty langallista tiedonsiirtoa sen luotettavuuden takia. Tällöin useat erilliset laitteet ovat yhdistettyinä keskusyksikköön johtojen avulla. Luotettavuuden lisäksi langallisilla kytköksillä on kuitenkin myös todettu runsaasti huonoja puolia: korkeat asennus-, ylläpito- ja huoltokustannukset, rajoitettu liikkuvuus sekä alttius kulumiselle. [22] 5G-teknologia nähdäänkin ratkaisuna näihin ongelmiin.

5G:n ja sen eri tekijöiden myötä teollisuus kehittyy valtavasti ja sen on mahdollista toimia yhä tehokkaammin ja vaivattomammin. URLLC:n ansiosta tiedonsiirto on entistä nopeampaa ja luotettavampaa, eMBB tarjoaa kapasiteettia, laajaa kattavuutta ja adaptiivisuutta verkolle ja mMTC puolestaan tukee massiivista yhdistettävyyttä sekä energiatehokkuutta. On huomattu, että yksikään sovellus ei keskity pelkästään yhden teknologian kokonaisvaltaiseen toimivuuteen, vaan yhdistelee useimmiten tarpeidensa mukaisesti kaikkia kolmea. Kuvassa 6 on esitetty muutama eri sovellus sekä niiden vaatimukset URLLC:n, eMBB:n ja mMTC:n suhteen. [23]



**Kuva 6.** Eri sovellusten asettuminen teknologioiden väliin. [23]

Kuvasta voidaan havaita, että erilaiset käyttötapaukset ovat yksilöllisiä ja vaativat teknologioiltaan hyvin erilaisia toiminnallisuksia. Voidaankin siis todeta, että 5G-teknologialta vaaditaan monipuolisuutta ja joustavuutta, jotta se voi vastata kaikkiin sovellusten tarpeisiin.

Seuraavissa aliluvuissa käsitellään tunnetuimpia ja tärkeimpiä eri sovelluskohteita teollisuuden näkökulmasta. Näitä ovat muun muassa reaaliaikaiset järjestelmät, teollisuusautomaatioon liittyvät sovellukset sekä koneoppiminen. Lisäksi luvussa tarkastellaan myös älykästä logistiikkaa, joka on olennainen osa nykyaikaista teollisuutta.

### 3.1 Tehtaat ja teollisuusautomaatio

5G-teknologia tehostaa teollisuuden järjestelmiä, ja näin ollen myös automaatioon liittyviä sovelluksia. Uuden teknologian mahdollistama tehokas langaton tiedonsiirto muodostuu yhä isommaksi tekijäksi, sillä sen on todettu vähentävän kustannuksia ja parantavan luotettavuutta. [22]

Teollisuusautomaatioon kuuluu monia eri osa-alueita, mutta yksi tärkeimmistä on kriittinen data ja siihen liittyvät vaatimukset. Datan odotetaan siirtyvän alle sadassa mikrosekunnissa niin, että pakettivirheiden todennäköisyys on  $10^{-9}$  %. [24] Tämä edellyttää siis

tiedonsiirrolta resursseja, joita aiemmat verkkoteknologiat eivät ole kyenneet täyttämään toivotulla tavalla, mutta 5G URLLC:n ansiosta ne ovat nykyään saavutettavissa.

Nykyaikaiset teollisuusautomaatiojärjestelmät perustuvat hajautettuihin rakenteisiin, joissa tietoliikenneverkkoja hyödynnetään teollisuusohjainten ja erilaisten laitteiden kuten esimerkiksi antureiden liittämiseksi toisiinsa. Prosessin aikana nämä laitteet suorittavat erilaisia tehtäviä, kuten datan keräystä ja analysointia, ohjausta ja datan eteenpäin välittämistä. Jokainen työvaihe tulee olla ajastettu tarkasti, jotta voidaan varmistua prosessin tasaisesta ja häiriöttömästä toiminnasta. Komponenttien välisellä viestinnällä on siis kriittinen rooli tehtävien aikataulutuksessa, koska siihen kuluva aika voi joissakin tapauksissa olla huomattavasti suurempi kuin itse yksittäiseen työvaiheeseen kuluva aika. Ennen kaikkea kommunikaatioon kuluva aika voi vaihdella runsaasti, mikä vaikeuttaa prosessien aikatauluttamista ja suunnittelua. Vaihtelua voi aiheuttaa muun muassa datapakettihäviö, minkä seurauksena paketteja joudutaan lähettää toistuvasti, kunnes voidaan varmistua niiden saavuttaneen kohteensa. [25]

Kuten kuvasta 6 nähdään, automaatioon liittyvät käyttökohteet hyödyntävät melko tasapuolisesti kaikkia kolmea eri teknologiaa: URLLC:tä, eMBB:tä ja mMTC:tä. Suuret datamäärät, kompleksiset systeemit ja kriittinen data edellyttävät tehokasta verkkoteknologiaa, ja edellisillä teknologioilla teollisuusautomaation täysi potentiaali jäisi saavuttamatta, kun vaatimuksiin ei pystyittäisi vastaamaan samalla mittakaavalla kuin 5G-tekniologian myötä pystytään.

### 3.1.1 Robotit

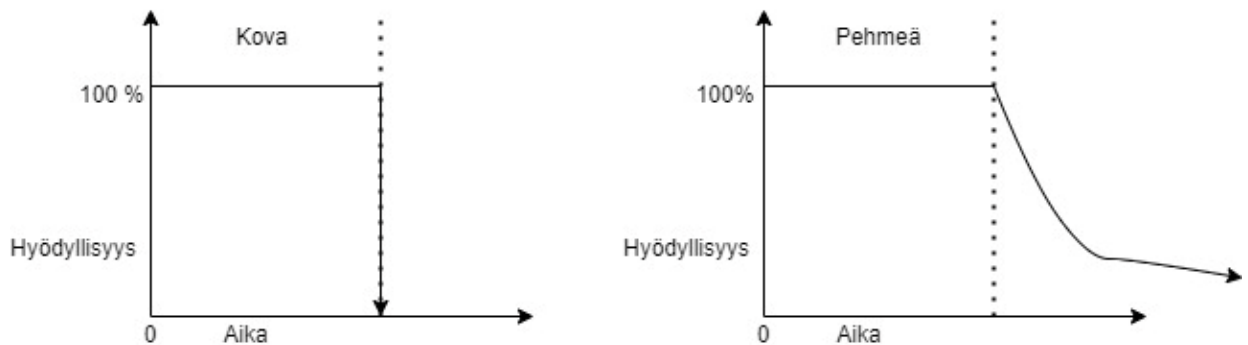
Robottiikka on yksi merkittävistä teollisuusautomaation komponenteista. Robottien avulla voidaan korvata teollisuudesta ihmisiä, ja näin säästää muun muassa henkilöstökuiluissa. Lisäksi robotteja voidaan sijoittaa sellaisiin työtehtäviin, jotka olisivat ihmiselle esimerkiksi vaarallisia tai liian kompleksisia, ja robottien avulla virheitä voidaan minimoida sekä tuotannon laatua parantaa. [26]

Robottinen systeemi teollisuudessa voi koostua yhdestä tai useammasta automaatiolla toimivasta robotista sekä niitä ohjaavista yksiköistä. Robottien toiminta edellyttää nopeaa ja virheetöntä tiedonsiirtoa, sekä kykyä käsitellä massiivista määrää dataa. Systeemi voi siis sisältää useita erilaisia robotteja, joiden vaatimukset tiedonsiirron suhteen voivat vaihdella: kriittistä dataa vaativat sensorit esimerkiksi törmäysten välttämiseksi, ja ei-kriittistä dataa vaativat komponentit esimerkiksi kasvojen tunnistamiseen. Siksi 5G-yhteyden on tarjottava riittävä tiedonsiirtonopeus ja -turva, jotta kaikki oleellinen data siirtyy tarvitussa ajassa. [27]

### 3.1.2 Reaaliaikaiset järjestelmät

Reaaliaikaiset teollisuusverkot ovat viestintäjärjestelmiä, jotka ovat erityisesti suunniteltu yhdistämään tehokkaasti toisiinsa teollisuuden laitteita, kuten ohjaimia, sensoreita tai muita toimilaitteita. Reaaliaikainen järjestelmä voidaan määritellä seuraavasti: ”Käyttöjärjestelmän kyky tarjota vaadittu palvelutaso rajoitetussa vasteajassa”. [28] Tiedon tulee siis siirtyä nopeasti ja luotettavasti, ja tähän 5G ja URLLC ovat avaintekijöitä.

Reaaliaikaiset järjestelmät voidaan jakaa kahteen eri luokkaan: kovaan ja pehmeään reaaliaikaisuuteen. Kovat järjestelmät noudattavat tiukasti tehtävään liittyvää määräaika, eivätkä siedä tiedonsiirron viivettä ollenkaan. Järjestelmän data menettää hyötyarvonsa määräajan umpeutuessa. Pehmeät järjestelmät sen sijaan eivät ole yhtä kriittisiä määräajan suhteen, vaan sallivat hieman viivettä tiedonsiirrossa. Datan hyödyllisyys vähenee hitaasti määräajan umpeutuessa. [28] Kuvassa 7 vertaillaan näiden kahden eri tyyppin eroavaisuuksia.



**Kuva 7.** Kovan ja pehmeän reaaliaikajärjestelmän erot, mukailleen [29].

Monet teollisuuden järjestelmät edellyttävät reaaliaikaista tiedonsiirtoa toimiakseen. Teollisuudessa tiedon kriittisyys vaihtelee, jolloin myös reaali järjestelmien tyyppi voi muuttua kovan ja pehmeän välillä. Automaatiolla toimivat robotit vaativat tyypillisesti hyvin nopeasti liikkuvaa dataa, jotta prosessin eri työvaiheet suoriutuvat häiriöttömästi. Lisäksi esimerkiksi itseohjautuvat kulkuvälineet tehtaassa edellyttävät äärettömän kriittistä dataa, jotta muun muassa törmäyksiltä välttyttäisiin. Jos data ei siirry määräajan puitteissa, on se tämän jälkeen hyödytöntä ja vahinko tehtaassa todennäköisesti on jo tapahtunut.

### 3.1.3 Koneoppiminen

Koneoppiminen on yksi tärkeimmistä Teollisuus 4.0:n osa-alueista, ja se onkin käytössä laajasti lähes kaikkialla, myös teollisuuden ulkopuolella. Koneoppimista hyödynnetään

muun muassa terveydenhuollossa, navigoinnissa ja älykkäissä kulkuneuvoissa. Koneoppiminen on kehittynyt tieteenalana niin pitkälle, että tällä hetkellä sen avulla langattomat tietoverkot voivat oppia pelkästään vuorovaikutuksen välityksellä datan kanssa. [30]

Koneoppiminen on erityisen hyödyllistä kompleksisissa järjestelmissä, jotka vaativat paljon muokkaamista kesken prosessien tai sellaisissa ongelmissa, joihin perinteiset jo olemassa olevat ratkaisut eivät auta. Näitä ongelmia voidaan ratkaista koneoppimisella, jolloin vanhoja ohjelmistoja korvataan uusilla ohjelmistoilla, jotka automaattisesti oppivat olemassa olevasta datasta ja osaavat ennustaa tulevaa dataa ja sen vaatimuksia. [30] URLLC:n myötä myös koneoppimista voidaan parantaa entisestään, mikä toisaalta luo omat haasteensa ja vaatimuksensa.

Teollisuudessa koneoppimista voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotannon laadunvalvonnassa: algoritmit luovat malleja, joiden avulla havaitaan vioittuneita tai kokonaan puuttuvia osia tuotannon eri vaiheissa. Järjestelmä oppii miltä oikeanlainen tuote näyttää, ja mikäli muutoksia havaitaan, tunnistaa se tuotteen virheelliseksi. Lisäksi tuotannossa järjestelmät ja robotiikka voidaan yhdistää koneoppimisalgoritmeihin, minkä avulla prosessia voidaan tehostaa ja tuottavuutta parantaa. Koneoppimisen ansiosta on mahdollista automatisoida vaihteleviakin tehtäviä, joita tavallinen robotti ei pystyisi yksin suorittamaan, kuten esimerkiksi komponenttien, prosessien ja vaihtelevien reittien tunnistaminen ja paikantaminen. Näin voidaan monissa tapauksissa vähentää prosessin kustannuksia. Koneoppimista voidaan myös hyödyntää vikojen ehkäisyssä: analysoimalla eri koneista saatuja tietoja voidaan luoda malleja, joiden avulla ennustetaan virheen ajankohta. Näin voidaan parantaa prosesseja ja ehkäistä vikoja ennen koneiden hajoamista. Ennusteen avulla vältetään tuotantokatkoksia ja lyhennetään korjaukseen kuluva aikaa. [31]

Edellä kuvatuissa käyttötapauksissa on selvää, että 5G yhdessä URLLC:n ja mMTC:n kanssa ovat tärkeässä roolissa myös koneoppimisessa. Dataa liikkuu todella paljon, ja sen on siirryttävä luotettavasti ja usein myös nopeastikin kohteiden välillä, jotta virheiltä ja viiveiltä tuotantoprosesseissa vältytään. Aiemmillä verkkoteknologioilla tämä ei olisi ollut kovinkaan helposti toteutettavissa tai edes mahdollista.

## 3.2 Logistiikka ja älykkäät kulkuneuvot

Teknologian kehittymisen myötä on huomio älykkääseen logistiikkaan hiljalleen kasvanut ja sitä pidetään yhtenä väistämättömistä suuntauksista logistiikan tulevassa kehityksessä. Muutos perinteisistä toimitusketjuista avoimiin toimitusverkostoihin on jo käynnissä, sillä dynaamiset logistiikkamarkkinat ja logistiikkaverkkojen monimutkaistuminen

edellyttävät uusia menetelmiä, tuotteita ja palveluita. Joustavuus ja sopeutumiskyky nähdään entistä tärkeämpinä, ja ne voidaan saavuttaa vain uutta teknologiaa omaksumalla. [32]

Logistiikka käsittelee fyysisen kuljetuksen ja varastoinnin lisäksi myös muiden asioiden – kuten tiedon – järjestämistä ja hallintaa eri pisteiden välillä, aina lopulta kuluttajalle asti. Saapuvalla logistiikalla tarkoitetaan esimerkiksi teollisuusalan yritykselle saapuvaa logistiikkaa, joista tärkeimpinä nähdään tavarankuljetuksen ja kuljetuskaluston seuranta. Seurannan avulla voidaan hallita tuotteiden tehtaalla paikallistamisen lisäksi myös esimerkiksi varastoa. [23] Kuvassa 8 on esitetty älykkääseen logistiikkaan kuuluvat eri osa-alueet.



**Kuva 8.** Älykkään logistiikan osa-alueet, mukailen [33].

Älykästä logistiikkaa ja sen kehitystä tukee 5G-teknologia yhdessä URLLC:n ja eMBB:n kanssa. 5G:n ansiosta tiedonsiirron läpimenoaika on huomattavasti nopeampaa ja turvallisempaa kuin aikaisemmillä viestintäteknologioilla, joten se nähdään tärkeänä vaikuttimena kaikilla logistiikan aloilla. Nopeampi viestintä vähentää viiveitä sekä tehostaa kuljetusten sujuvuutta ja näin ollen logistiikan kustannuksia saadaan vähennettyä pitkällä

aikavälillä. eMBB:n ansiosta laitteiden ja autojen yhdistettävyys on huomattavasti tehokkaampaa kuin aikaisemmin, ja tämän odotetaan vähentävän polttoainekustannuksia ja näin ollen toimivan myös ympäristöystävällisempänä muutoksena. [34]

### 3.2.1 Teknologia älylogistiikan taustalla

Song *et al.* toteavat artikkelissaan [35] älylogistiikan edellyttävän muutamaa eri teknologiaa mahdollistamaan sen täyden potentiaalin. IoT nähdään yhtenä perustavanlaatuisista mahdollistavista tekijöistä älylogistiikalle. Sen ansiosta lukuisat eri laitteet voivat kommunikoida aktiivisesti keskenään samassa verkossa ilman ihmisen osallistumista, mikä nopeuttaa ja tehostaa toimitusketjuja sekä muun muassa varastointia ja vähentää niihin liittyviä kustannuksia.

RFID-teknologia (Radio Frequency Identification) eli radiotaajuinen etätunnistus on tärkeässä roolissa, kun puhutaan älykkäästä logistiikasta, ja sitä hyödynnetään laajalti useissa eri logistiikan käyttökohteissa. RFID perustuu sähkömagneettisiin tunnistisiin, joiden perusteella merkittävät paketteja voidaan tunnistaa ja paikallistaa. Viivakooditekniikasta poiketen RFID-tunnisteen ei tarvitse olla lukijan näköetäisyydellä, joten sitä voidaan hyödyntää myös pidempien etäisyyksien päästä. RFID tehostaa erityisesti varastointia, sillä sen ansiosta tuotteiden paikallistaminen on nopeaa ja helppoa. [35]

Langattomat kommunikointiyhteydet ovat myös ratkaisevassa asemassa älylogistikassa, sillä niiden ansiosta datankeruu ja -lähetys nopeutuu, ja laitteet voivat kommunikoida keskenään joustavasti. Lyhyen kantaman langattomat teknologiat ovat erityisen tärkeitä esimerkiksi varastoinnissa, jossa tarpeellista on datansiirto maksimissaan muutamien metrien mittaisilla etäisyyksillä. RFID:in lisäksi yleisimpiä lyhyen kantaman teknologioita ovat muun muassa Bluetooth ja Wi-Fi. [35]

Pitkän kantaman langattomat yhteydet takaavat nimensä mukaisesti pitkien etäisyyksien väliset yhteydet. LPWAN (Low-Power, Wide-Area Networks) on ratkaisu ongelmiin, joita muodostui, kun haluttiin luoda tehokas ja laajan alueen kattava IoT-verkko. Tärkeimpiä etuja LPWAN-teknologioilla on suuren skaalautuvuuden ja peittävyuden lisäksi matala energiankulutus ja alhaiset kustannukset. LPWAN-teknologioita ovat muun muassa NB-IoT ja LoRaWAN. [35]

Tekoäly eli AI (Artificial Intelligence) on tärkeä teknologia, jonka avulla saavutetaan järjestelmän kyky tulkita ulkopuolista dataa oikein sekä oppia siitä. Opittuja malleja voidaan hyödyntää uusien tavoitteiden ja tehtävien suorittamiseen entistä tehokkaammin. AI:n

avulla tulevaisuudessa esimerkiksi varastoista voidaan poistaa henkilöstö lähes kokonaan, sillä sn algoritmien avulla tuotteita voidaan tunnistaa ja hallita ilman ihmisen apua. Jakelussa AI korvaa aikaisemmin vaaditun henkilöstön työpanoksen: älykäs robotti osaa suunnitella ja järjestellä jakelureitit tehokkaasti. Lisäksi AI:n avulla voidaan tehostaa myös asiakaspalvelua, sillä se mahdollistaa puheentunnistuksen ja luo keinoja vastata erilaisiin asiakkaiden esittämiin kysymyksiin. [35]

### 3.2.2 Älykkäät kulkuneuvot

Osana älylogistiikkaa ovat luonnollisesti älykkäät kulkuneuvot. Älykkäillä kulkuneuvoilla – tai älyliikenteellä – tarkoitetaan liikenteen sujuvuuden sekä turvallisuuden parantamista tieto- ja viestintätekniikoiden avulla. [36] V2X-tyyppinen kommunikaatio mahdollistaa autojen ja muiden kulkuneuvojen interaktiivisen kommunikoinnin ympäristönsä kanssa, johon kuuluu muun muassa liikennemerkit, rakennukset, kadut ja muut tienkäyttäjät.

Siinä missä aiempi LTE-teknologia tukee perustasoisia turvallisuuteen ja liikenteen hallintaan liittyviä älykulkuneuvojen ominaisuuksia, 5G-teknologia kykenee parantamaan niitä entisestään. Sen myötä V2X-käyttötapaukset ovat edellisiä monipuolisempia ja hyödyntävät entistä enemmän automaatiota toiminnoissaan. [37] Lisäksi älykkäämpien kulkuneuvojen ja muun muassa sähköautojen ansiosta myös polttoainekulut vähenevät ja ajaminen on entistä ympäristöystävällisempää.

Nykyaikaisissa kulkuneuvoissa on kymmenittäin tietokoneita ja ohjelmoituja laitteita, jotka yhdessä tekevät kulkuneuvosta älykkään. Toimintoihin voi kuulua muun muassa automaattinen istuimen säätö eri kuskiensa yksilöityjen asetusten mukaisesti, tyhjäkäynnin nopeuden säätely, turvallisuus- ja viihdejärjestelmät sekä automaattiset vaihteet. Nämä kaikki toiminnot perustuvat sähköisiin sensoreihin, jotka välittävät reaaliaikaista dataa kulkuneuvon tietokoneille. Erityisen kriittistä dataa vaativia toimintoja, kuten nopeuden säätelyä, kaistavahteja tai törmäyksenestojärjestelmiä on myös paranneltu 5G:n ja URLLC:n myötä. [38]

Teollisuudessa ja logistiikassa on myös paikkansa älykkäille ajoneuvoille. Älyautojen myötä turvallisuus paranee, kun kuljettajasta johtuvia virheitä pyritään minimoimaan ja autot kykenevät reagoimaan ympäristössään tapahtuviin muutoksiin ihmistä nopeammin. Älykkäät autot voivat myös tehostaa toimitusketjuja; ne ilmoittavat mahdollisesta kuorman hukkatilasta, optimoivat jakelureitit etukäteen ja kykenevät välttämään esimerkiksi liikenneuhkia. Pitkällä tähtäimellä nämä johtavat tyytyväisempiin kuluttajiin ja siten lisäävät asiakasarvoa yritykselle. [39]



## 4. YHTEENVETO

Mobiiliviestintäteknologiat ovat viime vuosikymmeninä kehittyneet suurin harppauksin vastaamaan oman aikakautensa viestintään liittyviin tarpeisiin. Aikaisemmat teknologiat ovat olleet merkittävässä rooleissa mobiiliviestintäjärjestelmän rakentamisessa sellaiseksi, mitä se tänä päivänä on. Nykyinen viidennen sukupolven mobiiliviestintäteknologia eli 5G on kuitenkin hyvin erilainen muihin verrattuna, ja sen ansiosta voidaan suunnitella ja toteuttaa täysin uudenlaisia käyttökohteita, joiden olemassaoloa ei ole aiemmin osattu edes ajatella.

Viestintäteknologian käyttö ja käyttäjämäärä kasvaa jatkuvasti, mikä edellyttää entistä monipuolisempia ja yksilöidympiä ratkaisuja. Internetin käyttäjien määrän oletetaan kasvavan 3,9 miljardista jopa 5,3 miljardiin vuoteen 2023 mennessä. Tänä päivänä teknologian käyttö on siis tärkeässä roolissa lähes kaikkialla, ja 5G muodostaa alustan yhä älykkäämmille sovelluksille ja laitteille. 5G-teknologian ominaisuuksien ansiosta viestintä on entistä nopeampaa, vaivattomampaa sekä luotettavampaa.

5G:n ominaisuuksien taustalla vaikuttaa kolme tärkeää avaintekijää: URLLC, eMBB ja mMTC. eMBB vastaa nykyisestä mobiililaajakaistan kehityksestä sekä mahdollistaa suuren datamäärän käsittelyn ja laadukkaan käyttäjäkokemuksen tukemalla suuria tiedonsiirtonopeuksia. mMTC mahdollistaa massiivisen määrän samassa verkossa olevia laitteita sekä niiden välisen sujuvan ja kustannustehokkaan kommunikaation, ja URLLC tukee todella luotettavaa sekä matalaviiveistä kommunikointia. Yhdessä nämä teknologiat tekevät 5G:stä aiempia viestintäteknologioita selvästi tehokkaamman ja monipuolisemman.

Aiemmat verkkoteknologiat ovat toimineet alle kuuden gigahertsin taajuuksilla, jonka takia kyseiset taajuuskaistat ovat ruuhkautuneita. Jotta 5G voisi saavuttaa täyden potentiaalinsa, piti tilaa etsiä käytössä olleiden kaistojen ulkopuolelta. 5G-verkkoa on kahta eri tyyppiä: alle 6 GHz taajuuksilla toimivat yhteydet sekä millimetriaaltotaajuudet, jotka kattavat yli 6 GHz:n alueet aina 300 GHz:iin asti. Korkeammilla taajuusalueilla on paljon kaistatilaa käytettävissä, joten massiivisiakin datamääriä pystytään käsittelemään.

5G-teknologiaan kuuluu monia elementtejä, joilla on tärkeä tehtävä. Yksi näistä on MIMO, jonka tarkoituksena on tukea jopa kymmeniä päätelaitteita yhden tukiaseman antenneilla. MIMO:n on todettu parantavan yhteyden spektristä tehokkuutta, kapasiteettia ja häiriönsietokykyä sekä vähentävän viivettä. Toinen tärkeä elementti on keilanmuodostus, jota käytetään suunnattujen signaalien lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Näiden

ohella myös verkon viipaloinnilla on tärkeä tehtävä erityisesti 5G-verkoissa, joissa monipuolisuus ja yksilöitävyys on entistä isommassa roolissa. Viipalointi perustuu tekniikkaan, jossa yksittäiselle käyttäjälle varataan verkosta vain tämän tarpeita vastaava osuus.

Tämän työn pääpaino oli URLLC-tekniikassa ja siihen liittyvissä sovelluksissa. Nykyään viestintäteknologioita pidetään lähes itsestäänselvyytenä, ja niiden toimivuuteen luotetaan ajasta ja paikasta riippumatta. Tällöin URLLC nousee tärkeäksi komponentiksi 5G-verkoissa, sillä se takaa luotettavan ja nopean tiedonsiirron. 3GPP:n määritelmien mukaisesti yhden 32-bittisen datapaketin vaaditaan siirtyvän alle millisekunnissa vähintään 99,99 % luotettavuudella. URLLC:n myötä monet kriittistä dataa vaativat sovellukset ovat toteutettavissa, sillä tiedonsiirtoon liittyviin vaatimuksiin pystytään näin vastaamaan.

Työn tarkoituksena oli perehtyä teollisuussovelluksiin, jotka ovat 5G:n myötä kehittyneet merkittävästi. Teollisuus 4.0:n tärkeimpiin osa-alueisiin kuuluu muun muassa teollisuusautomaatio, koneoppiminen ja reaaliaikaiset järjestelmät. Langattoman tiedonsiirron ansiosta teollisuus muovautuu entistä kustannustehokkaammaksi sekä joustavammaksi, kun kalliista johdoista päästään eroon. Teollisuuden toimenpiteet edellyttävät kriittistä tiedonsiirtoa, jotta prosessit etenevät tasaisesti ja häiriöttä. Tämän kaltaisiin työvaiheisiin monesti liittyy niin automaatiota kuin robotiikkaakin, mutta ennen kaikkea reaaliaikaista dataa ja sen luotettavaa siirtoa.

Koneoppiminen nähdään yhtenä tärkeimmistä Teollisuus 4.0:n elementeistä. Teollisuuden lisäksi koneoppimista hyödynnetään esimerkiksi terveydenhuollossa ja älykkäissä kulkuneuvoissa. Erityisen hyödylliseksi se voidaan katsoa monimutkaisissa teollisuuden järjestelmissä, jotka vaativat paljon muokkaamista kesken prosessien. Koneoppimisen tavoitteena on, että laitteet ja verkostot voivat oppia pelkästään vuorovaikutuksen välityksellä jo olemassa olevasta datasta, ja muodostaa uusia ja parempia toimintatapoja tulevaisuutta varten. URLLC:n ja mMTC:n ansiosta koneoppiminen on entistä tehokkaampaa ja sitä voidaan hyödyntää monipuolisemmin.

Yksi merkittävistä teollisuuden sovelluksista on älykäs logistiikka sekä älykkäät kulkuneuvot. Suurin muutos havaitaan logistiikan rakenteessa: toimitusketjut muovautuvat avoimiksi toimitusverkostoiksi, ja ratkaisevassa asemassa on uusien teknologioiden tehokas omaksuminen. Älykkäät kulkuneuvot parantavat liikenneturvallisuutta, mutta myös tehostavat jakelua. Älykkäiden autojen ja logistiikan vaikutus nähdään parantuneen liikenneturvallisuuden lisäksi myös polttoainekustannuksissa ja tehokkaammassa jakeluverkostoissa, jotka lopulta tuovat yritykselle lisää asiakasarvoa ja ovat siten merkittävä kilpailuetu.

Työn perusteella voidaan vetää johtopäätös, jonka mukaan 5G-teknologia on ennenkuulumattoman arvokkaassa roolissa, ja sen käyttö on vasta alkutekijöissään. Ilman 5G:tä ja siihen liittyviä muita teknologioita teollisuuden prosessit olisivat huomattavasti tehotomampia ja samat tulokset olisivat hankalammin saavutettavissa.

Tulevaisuudessa 5G-teknologian ja siihen liittyvien sovellusten odotetaan kehittyvän entisestään. Yksi 5G:lle määritellyistä vaatimuksista on sen yhteensopivuuden takaaminen myös jatkossa, jolloin jokaista päivitystä varten ei tarvitse uusia laitteistoa ja siten investoida isoja varoja niihin. Myös tulevien teknologioiden, kuten 6G:n käyttöönotosta tulee vaivattomampaa, kun yhteensopivuuteen ja jatkuvuuteen panostetaan jo nyt.

# LÄHTEET

- [1] Zaidi, A., Athley, F., Medbo, J., Gustavsson, U., Durisi, G. & Chen, X. 5G Physical Layer : Principles, Models and Technology Components. San Diego: Elsevier Science & Technology, 2018.
- [2] Dahlman, E., Parkvall, S. & Sköld, J. 5G NR : the next generation wireless access technology. Second edition. London, United Kingdom: Academic Press, 2021.
- [3] Yarali, A. 4G and 5G for PS. In: Public Safety Networks from LTE to 5G. 1st ed. Chichester, UK: Wiley, 2019.
- [4] 3GPP: Release 15. Päivitetty 2019, viitattu 21.03.2022. Saatavissa: <https://www.3gpp.org/release-15>.
- [5] 3GPP: Release 16. Päivitetty 2020, viitattu 21.03.2022. Saatavissa: <https://www.3gpp.org/release-16>.
- [6] 3GPP: Release 17. Päivitetty 2021, viitattu 21.03.2022. Saatavissa: <https://www.3gpp.org/release-17>.
- [7] 3GPP: Release 18. Päivitetty 2021, viitattu 21.03.2022. Saatavissa: <https://www.3gpp.org/release18>.
- [8] Cicioğlu, M. Multi-criteria handover management using entropy-based SAW method for SDN-based 5G small cells. *Wireless Netw* 27, s. 2947–2959, 2021. Saatavissa: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/s11276-021-02625-y>
- [9] Tombaz, S., Frenger, P., Athley, F., Semaan, E., Tidestav, C. & Furuskar, A. Energy performance of 5G-NX Wireless Access Utilizing Massive Beamforming and an Ultra-Lean System Design. *IEEE Global Communications Conference*, 2015, s. 1-7.
- [10] Rajoria, S., Trivedi, A. & Godfrey, W.W. A comprehensive survey: Small cell meets massive MIMO. *Physical Communication*, vol. 26, s. 40-49, 2018.
- [11] Telecom R & D: MIMO (multiple-input and multiple-output). 2019. Available: <https://telecom.altanai.com/2019/07/09/mimo-multiple-input-and-multiple-output/>
- [12] Ahmed, S. Beamforming management and beam training in 5G system. Pro gradu-tutkielma, Tampereen yliopisto, 2019.
- [13] Li, X., Samaka, M., Chan, H.A., Bhamare, D., Gupta, L., Guo, C. & Jain, R. Network Slicing for 5G: Challenges and Opportunities. *IEEE Internet Computing*, vol. 21, no. 5, s. 20-27, 2017.
- [14] Popovski, P., Stefanović, Č., Nielsen, J.J., de Carvalho, E., Angelichinoski, M., Trillingsgaard, K. & Bana, A-S. Wireless Access in Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC). *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 8, 2019.

- [15] Pokhrel, S.R., Ding, J., Park, J., Park, O-S., Choi, J. Towards Enabling Critical mMTC: A Review of URLLC Within mMTC. *IEEE Access*, vol. 8, s. 131796-131813, 2020.
- [16] Heiskari, T. Teollisuus 4.0 saa lisäpotkua koronasta. *TEK*, 2020.
- [17] Varga, P., Peto, J., Franko, A., Balla, D., Haja, D., Janky, F., Soos, G., Ficzer, D., Maliosz, M. & Toka, L. 5G Support for Industrial IoT Applications- Challenges, Solutions, and Research Gaps. *Sensors*, vol. 20, no. 3, 2020.
- [18] Posey, B., Rosencrance, L. & Shea, S. Industrial Internet of Things (IIoT). *Tech-Target*. Päivitetty 2022, viitattu 09.05.2022. Saatavissa: <https://www.tech-target.com/iotagenda/definition/Industrial-Internet-of-Things-IIoT>
- [19] Cisco: Cisco Annual Internet Report (2018-2023) White Paper. Päivitetty 2020, viitattu 23.4.2022. Saatavissa: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [20] Dangi, R., Lalwani, P., Choudhary, G., You, I., & Pau, G. Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review. *Sensors*, vol. 22, 2021.
- [21] Epicor: Mikä on Teollisuus 4.0 – Teollinen esineiden Internet (IIoT, Industrial Internet of Things)? Viitattu 11.05.2022. Saatavissa: <https://www.epicor.com/fi-fi/resources/articles/what-is-industry-4-0/>
- [22] Ren, H., Wang, K. & Pan, C. Intelligent Reflecting Surface-Aided URLLC in a Factory Automation Scenario. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 70, no. 1, s. 707-723, 2022.
- [23] Soong, A. & Vannithamby, R. 5G Verticals: Customizing Applications, Technologies and Deployment Techniques. *John Wiley & Sons*, 2020.
- [24] Ren, H., Pan, C., Deng, Y., Elkashlan, M. & Nallanathan, A. Joint Power and Blocklength Optimization for URLLC in a Factory Automation Scenario. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, s. 1786-1801, 2020.
- [25] Fedullo, T., Tramarin, F. & Vitturi, S. The impact of rate adaption algorithms on wi-fi based factory automation systems. *Sensors*, vol. 20, no. 18, 2020.
- [26] Tilley, J. *Automation, robotics and the factory of the future*. McKinsey, 2017.
- [27] Voigtländer, F., Ramadan, A., Eichinger, J., Lenz, C., Pensky, D. & Knoll, A. 5G for Robotics: Ultra-Low Latency Control of Distributed Robotic Systems. *IEEE International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC)*, s. 69-72, 2017.
- [28] Hambarde, P., Varma, R. & Jha, S. The Survey of Real Time Operating System: RTOS. *International Conference on Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies*, s. 34-39, 2014.
- [29] Shukla, A.K., Sharma, R. & Muhuri, P.K. A Review of the Scopes and Challenges of the Modern Real-Time Operating Systems. *Int. J. Embed. Real Time Commun. Syst.*, vol. 9, s. 66-82, 2018.

- [30] Morocho-Cayamcela, M.E., Lee, H. & Lim, W. Machine Learning for 5G/B5G Mobile and Wireless Communications: Potential, Limitations, and Future Directions. *IEEE Access*, vol. 7, s. 137184-137206, 2019.
- [31] Atria Innovation: Machine learning in industry. Päivitetty 2021, viitattu 16.05.2022. Saatavissa: <https://www.atriainnovation.com/en/machine-learning-in-industry/>
- [32] Uckelmann, D. A Definition Approach to Smart Logistics. *Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking*, vol. 5174, s. 273-284, 2008.
- [33] Umento: Smart logistics. Viitattu 17.05.2022. Saatavissa: <https://umento.sg/smart-logistics/>
- [34] Logistics Titans: The Complete Guide to 5G Technology in Logistics. Viitattu 17.05.2022. Saatavissa: <https://logisticstitans.com/blog/the-complete-guide-to-5g-technology-in-logistics/>
- [35] Song, Y., Yu, F.R., Zhou, L., Yang, X. & He, Z. Applications of the Internet of Things (IoT) in Smart Logistics: A Comprehensive Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 6, 2021.
- [36] Logistiikan Maailma: Älykäs liikenne. Viitattu 17.05.2022. Saatavissa: <https://www.logistiikanmaailma.fi/logistiikka/digitalisaatio/alykas-liikenne/>
- [37] Garcia, M.H.C., Molina-Galan, A., Boban, M., Gozalvez, J., Coll-Perales, B., Şahin, T. & Kousaridas, A. A Tutorial on 5G NR V2X Communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, 2021.
- [38] Miller, M. *The Internet of things: how smart TVs, smart cars, smart homes, and smart cities are changing the world*. Indianapolis, Que Publishing: 2015.
- [39] Liu, S., Zhang, Y., Liu, Y., Wang, L. & Wang, X.V. An 'Internet of Things' enabled dynamic optimization method for smart vehicles and logistics tasks. *Journal of Cleaner Production*, vol. 215, s. 806-820, 2019.