



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# DIGITAL TWIN

TEKIJÄ:

Samuli Kumo

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Samuli Kumo	
Työn nimi Digital Twin	
Päiväys 28.11.2021	Sivumäärä/Liitteet 22
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia ammattikorkeakoulu	
Tiivistelmä <p>Tämän projektin aiheena oli luoda katsaus Digital Twin-tekнологiaan, sen perusominaisuuksin ja mahdollisiin käyttökohteisiin. Mielenkiinnon kohteena oli myös tarkastella, kuinka tätä uutta teknologiaa sovelletaan käytännössä ja miten sitä hyödynnetään eri toimialoilla.</p> <p>Digital Twin mielletään yhdeksi osaksi suurempaa Industry 4.0-konseptia, jonka odotetaan yhdessä teollisen esineiden internetin ja muiden viime vuosikymmenen aikana esiteltyjen avainteknologioiden kanssa tuovan merkittäviä muutoksia ja integroituvan osaksi modernia tuotantoprosessia. Keskeisinä ominaisuuksina ovat avoin informaationkulku ja sen pohjalta luodun digitaalisen mallin hyödyntämisen suunnittelussa, tuotannossa ja muissa uusissa liiketoimintamalleissa. Digital Twiniin perustuvia ratkaisuja ja palveluita on jo hyvin saatavilla julkisilla markkinoilla ja se on jo käytössä monentyyppisissä sovelluksissa, tuotannosta ja suunnittelusta kiinteistöhuollon ja kunnossapidon tehtäviin. Esimerkiksi Microsoft ja IBM tarjoavat jo valmiit Digital Twin-ratkaisut omille palvelualustoilleen, mutta myös muut toimialakohtaiset palveluntarjoajat kuten Siemens ovat mukana tarjoamassa omia versioitaan.</p> <p>Digital Twin on selkeästi kiinnostava aihe teollisuuden parissa, se ei ole yhtä hyvin tunnettu kuin muut Industry 4.0-konseptin teknologiat, mutta valmiiden ratkaisujen ja käytännön esimerkkien myötä kiinnostus sitä kohtaan on selvästi kasvanut viimeisen kahden vuoden aikana ja tämän kasvun todennäköisesti tulee jatkumaan koska tekniikka on jo valmista ja Digital Twin-toteutus on mahdollista rakentaa olemassa-olevan IIoT-infrastruktuurin päälle.</p>	
Avainsanat Digital Twin, IoT, AI	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author(s) Samuli Kumo	
Title of Thesis Digital Twin	
Date 28 November 2021	Pages/Appendices 22
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences	
<p>Abstract</p> <p>The subject of this project was to investigate the use of Digital Twin, its basic functionalities and find out how it can be applied in modern industrial processes alongside other emerging technologies. Another area of interest was finding out existing examples of the technology being used in practical applications and gain better understanding on how the use-cases differ depending on the target application.</p> <p>Digital Twin is considered to be one component of Industry 4.0-concept which together with industrial internet-of-things and other key technologies unveiled in past decade is expected to bring major changes to the whole industrial sector and integrate itself as one of the key components of modern manufacturing processes. Its central features are open transfer of information and a digital model that is built from that information, which is then utilized in design, manufacturing and other new business opportunities. There are already numerous ready-made solutions based on Digital Twin technology available on the market and it is being used in various different applications, from production and design to property maintenance and up-keep. Major service providers such as IBM and Microsoft already offer their own Digital Twin-solutions that integrate within their existing ecosystem with more specialized solutions available from other providers within their respective industries.</p> <p>In conclusion, Digital Twin is gaining interest as an important tool and it can be adapted to very wide range of different applications. The supporting technology is mature and while there is still some confusion around the topic, since year 2020 there has been significant increase in interest regarding Digital Twin due to better availability of ready-made solutions and this growth and working real-world examples of successful implementations.</p>	
<p>Keywords Digital Twin, IoT, AI</p>	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
1.1	Opinnäytetyön aihe, tavoitteet ja rajaukset.....	6
1.2	Lyhenteet ja määritelmät.....	6
2	POHJATIETO.....	7
2.1	Peruskonsepti .....	7
2.2	Kolmas teollinen vallankumous ja Industry 4.0.....	9
2.3	Ominaisuudet .....	9
2.3.1	Yhdistettävyys ja tiedonsiirto .....	9
2.3.2	Homogeeninen tietorakenne .....	9
2.3.3	Muokattavuus ja älykäs toiminta .....	10
2.3.4	Lokitiedot ja seuranta .....	10
2.3.5	Modulaarisuus.....	10
2.4	Rakenne.....	10
2.4.1	Virtuaalinen anturi.....	11
3	KÄYTTÖKOHTEET.....	13
3.1	Suunnittelu.....	13
3.2	Tuotanto .....	13
3.3	Kunnossapito.....	13
3.4	Palvelut.....	13
4	KAUPALLISET RATKAISUT .....	15
4.1	Siemens Mindsphere .....	15
4.2	Microsoft .....	15
4.3	IBM.....	16
5	KÄYTÄNNÖN ESIMERKIT .....	17

5.1	Tuotanto .....	17
5.2	Kiinteistöautomaatio ja kunnossapito .....	17
5.3	Kaupunkisuunnittelu.....	18
6	YHTEENVETO.....	20
	LÄHTEET .....	21

## KUVALUETTELO

KUVA 1	Termostaatti .....	7
KUVA 2	GE Sähkömoottorin elinkaaren simulointi (GE, 2018) .....	11
KUVA 3	Water Street Tampa -arkkitehtimalli .....	19

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Opinnäytetyön aihe, tavoitteet ja rajaukset

Raportin aiheena on luoda katsaus Digital Twin -konseptiin ja sen perusideaan. Tavoitteena on havainnollistaa sen hyötyjä ja ominaisuuksia sekä selvittää minkälaisissa käyttökohteissa sitä tänä päivänä jo hyödynnetään.

## 1.2 Lyhenteet ja määritelmät

IoT = Internet of Things, esineiden internet

PLC = Product Lifecycle Costing, tuotteen elinkaarikustannusten laskenta

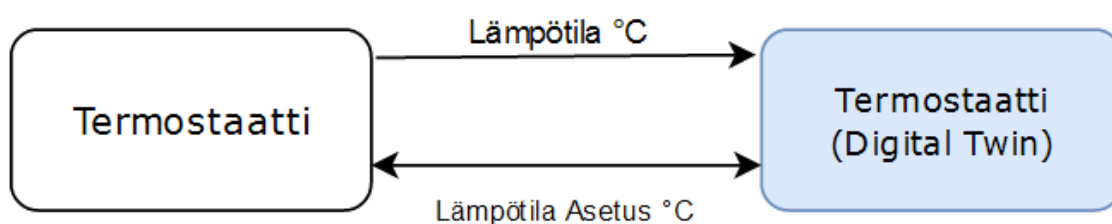
Industry 4.0 = Saksan teollisuuden käyttämä termi neljännessä teollisuuden vallankumouksesta

## 2 POHJATIETO

### 2.1 Peruskonsepti

Digital Twin on fyysiselle objektille luotu virtuaalinen referenssi, joka on ominaisuuksiltaan identtinen fyysisen objektin kanssa. Reaaliaikaisen tiedon on myös kuljettava fyysisen ja digitaalisen mallin välillä kaksisuuntaisesti, jolloin näiden olotila on synkronoitu keskenään ja muutokset esimerkiksi tuotantoprosessissa heijastuvat myös virtuaaliseen objektiin. Digital Twin -konseptia on mahdollista soveltaa fyysisten esineiden ja tuotteiden sijaan myös abstrakteihin objekteihin ja kokonaisuuksiin kuten tuotantoprosessiin tai jakeluketjuun.

Voimme havainnollistaa toteutusta alla olevalla esimerkillä termostaatista ja sille luodusta Digital Twin:stä (KUVA 1).



KUVA 1 Termostaatti

Termostaatille on määritetty kaksi parametria, joiden arvo lähetetään reaaliajassa Digital Twin:iin ja näistä lämpötilan asetusarvo on mahdollista lähettää molempiin suuntiin, mahdollistaen lämpötilan asettamisen etäältä. Näin ollen molempiin asetettu sama lämpötila ja mittausarvon pitäisi olla identtinen fyysisen ja virtuaalisen objektin välillä, jos mittauslukemat poikkeavat merkittävästi virtuaalisesta objektista, voi tämä viitata mahdolliseen laitteistovikaan. Digital Twinin mahdollistaa myös tarkkojen simulaatioiden ajamisen, esimerkiksi tekoälyn avulla voi olla mahdollista löytää rakennukselle optimaalinen lämmitysprofiili vuodenajasta riippuen. Koska jokaisella yksittäisellä termostaatilla on olemassa Digital Twin, mahdollistaa tämä kaikkien säätämisen reaaliajassa ja ennakoivasti. Esimerkiksi lounastilan lämmitystä voidaan pudottaa hieman ennen keskipäivää ja sen sijaan hyödyntää ruuanlaitosta syntyvää hukkalämpöä.

Termin on kuitenkin vielä varsin uusi ja sen väärinkäyttö on hyvin yleistä myös ammattilaisten keskuudessa. Tämä ongelma käy hyvin selville v.2020 IEEE:n julkaisemasta tutkimuksesta, jossa tarkastelun kohteeksi valittiin 23kpl raporttia Digital Twin-konseptista (Fuller;Fan;Day;& Barlow, 2020) ja näistä kymmenessä raportissa heidän tulkintansa mukaan todellisuudessa esiteltiin Digital Model (DM) tai Digital Shadow (DS) konseptia (TAULUKKO 1). Digital Model on passiivinen kopio, josta puuttuu reaaliaikainen datakomponentti kokonaan, esimerkiksi rakennuksen CAD-malli. Digital Shadow ottaa vastaan reaaliaikaista dataa fyysiseltä objektilta, mutta tämä tiedonsiirto on vain yhden-suuntainen. Tässä tapauksessa digitaalinen kopio toimii enemmänkin apuvälineenä päätöksenteossa ja näiden pohjalta tehtävät muutokset on tehtävä manuaalisesti.

## TAULUKKO 1 Viitatussa tutkimuksessa arvioidut raportit

Paper	Type	Defined Twin	Actual Twin	Broad Area	Specific Area	Technology
Billberg, Malik (2019) [1]	Case Study	DT	DS	Manufacturing	Smart Factory	Simulation
Chhetri et al. (2019) [74]	Case Study	DT	DT	Manufacturing	Assembly Line	AI, Sensors, Simulation
He et al. (2018) [75]	Review	DT	DS	Manufacturing	Power System	Simulation, AI, Analytics
Howard (2019) [11]	Concept	DT	DM	Manufacturing	Product Development	EDA, Visualisation
Jain et al. (2019) [76]	Concept	DT	DT	Manufacturing	Fault Diagnosis	Industry 4.0
Karadeniz et al. (2019) [77]	Case Study	DT	DS	Manufacturing	Ice Cream Machines	AR, VR, Industry 4.0, AI, CPS
Kuehn (2019) [78]	Concept	DT	DS	Manufacturing	Smart Factory	Simulation
Lu (2019) [79]	Review	DT	No Example	Manufacturing	Smart Factory	Cloud, CPS, Industry 4.0
Mandolla et al. (2019) [2]	Case Study	DT	No Example	Manufacturing	Aircraft	Blockchain, Visualisation
Mawson, Hughes (2019) [27]	Case Study	DT	DT	Manufacturing	Energy Modelling	Industry 4.0
Min et al. (2019) [35]	Case Study	DT	DS	Manufacturing	Petrochemical Factory	AI, Optimisation
Qi, Tao (2018) [24]	Review	DT	DT	Manufacturing	Smart Factory	Industry 4.0, AI, Cloud, Big Data
Shangguan et al. (2019) [80]	Case Study	DT	DM	Manufacturing	Wind Turbine	CPS
Sivalingam et al. (2018) [17]	Review	DT	DS	Manufacturing	Wind Turbine	CPS, Simulation
Tao et al. (2019) [81]	Review	DT	DT	Manufacturing	Smart Factory	CPS, Industry 4.0, AI
Tao et al. (2018) [82]	Review	DT	DT	Manufacturing	Assembly Line	CPS, Industry 4.0, AI
Xu et al. (2018) [23]	Concept	DT	DS	Manufacturing	Fault Diagnosis	CPS, Industry 4.0, AI, Transfer Learning
El Saddik (2018) [39]	Definition	DT	DT	Healthcare	Patient Monitoring	VR, AI
Laaki et al. (2019) [32]	Concept	Undefined	DS	Healthcare	Surgery Robotics	Industry 4.0, AI, VR
Liu et al (2019) [37]	Concept	DT	DT	Healthcare	Health Management, Elderly Health	Cloud, CPS
Ross (2016) [40]	Review	DT	DT	Healthcare	Predictive Health & Well-being	VR, 3D Modelling
Chen et al. (2018) [22]	Review	Undefined	DS	Smart City	Driving	Simulation, AI
Jo (2018) [15]	Review	DT	DT	Smart City	Livestock Farms	Industry 4.0
Mohammadi, Taylor (2017) [3]	Concept	DT	DT	Smart City	Infrastructure Analysis	Simulation, VR
Pargmann et al. (2018) [18]	Review	DT	DS	Smart City	Wind Farm	AR, AI, Cloud
Ruohomäki et al. (2018) [83]	Case Study	DT	DS	Smart City	3D Energy Mapping	Visualisation, Sensors Ontology

Tilanne ei ole merkittävästi muuttunut vuoden aikana ja vastaavat väärinkäsitykset nousivat pinnalle myös tätä raporttia varten tehdyssä taustatutkimuksessa, ja lukijan on näin ollen suhtauduttava kriittisesti aiheeseen liittyvää materiaalia kohtaan. Esimerkiksi Siemens:n ylläpitämä ja monessa paikassa lainattu blogikirjoitus (Freguson, ei pvm) esittää varhaisimpana esimerkkinä Digital Twinin käytöstä NASA:n 1970-luvun avaruushjelman ja erityisesti Apollo 13 -lennon, mutta tutkinta-raportin (NASA, 1970) ja radioviestien (NASA, 1970) pohjalta voimme päätellä että tiedonsiirto oli toteutettu vain yksisuuntaisesti avaruusalukselta simulaattoriin, eikä tästä syystä täytää aiemmin esitettyä Digital Twin:n määritelmää vaan kyseessä on Digital Shadow.

Siinä missä simulaatiomalli tai tuoteprototyyppiä edustaa koko tuotesarjaa, Digital Twin voi olla sidottu yksilölliseen fyysiseen objektiin, esimerkiksi yhteen tiettyyn sähkömoottoriin joka tarkka sijainti ja käyttöhistoria on synkronoitu Digital Twiniin. Tämä tarjoaa mahdollisuuden huomattavasti syvällisempään analysointiin ja tiedon käsittelyyn kuin kohteessa tai sen lähellä sijaitsevien instrumenttien lukemiseen perustuva analysointi.

## 2.2 Kolmas teollinen vallankumous ja Industry 4.0

Digitaalisen teknologian kehittyminen 1900-luvun loppupuolella mielletään kolmanneksi teolliseksi vallankumoukseksi johtuen sen tuomista merkittävistä, koko yhteiskuntaa ravisuttavista muuttoksista. Mikroprosessoritekniikka toi mukanaan entistä pienempien ja edullisempien laitteiden valmistamisen, teollisen automaation ja ohjelmoitavan logiikan. Ajan myötä laskentatehon kasvaessa ja prosessien monimutkaistuessa pullonkaulaksi on muodostunut ihmisen äly ja kyky havainnollistaa näitä monimutkaisia kokonaisuuksia.

Viime vuosikymmenen aikana on kuitenkin tapahtunut merkittäviä teknisiä innovaatioita, jotka mahdollistavat monien uusien menetelmien käyttöönoton ja onkin puhuttu, että käynnissä on neljäs teollinen vallankumous. Termi "Industry 4.0" esiteltiin Hannoverin tekniikkamessuilla (VDI Nachrichten, 2011) ja sillä viitataan juuri tähän vallankumoukseen, vaikka onkin huomioitava että ei ole olemassa virallista määritystä sille mikä täyttää nämä kriteerit. Yleisellä tasolla ero perinteisen automaation ja Industry 4.0 periaatteiden välillä on laitteiden verkottuminen ja kommunikointi, prosessista kerättävä tiedon määrä ja teknologian, kuten tekoälyn, suurempi rooli päätöksenteossa ja ongelmanratkonnassa, esimerkiksi mikroprosessoreiden suunnittelussa tekoäly on jo ohittanut ihmisen suorituskyvyn (Inside Science, 2021). Mikään yksittäinen teknologia, kuten IoT tai tekoäly ei yksinään riitä vaan yhdessä nämä mahdollistavat täysin uudenlaiset prosessit kuten Digital Twin -konseptin.

## 2.3 Ominaisuudet

Digital Twiniltä voi odottaa tiettyjä ominaisuuksia jotka jo osaltaan auttavat ymmärtämään sen vaatimuksia ja hyötyjä. Näistä löytyy selkeästi koostettu lista Wikipediasta jota lainaamme esittelemällä seuraavat keskeiset ominaisuudet (Wikipedia). microprocessor design artificial intelligence

### 2.3.1 Yhdistettävyyden ja tiedonsiirto

Ehkä merkittävin ominaisuus ja päämäärä Digital Twinin käytössä on yhdistää kaikki järjestelmän osat keskenään yhdeksi kokonaisuudeksi, jossa informaatio pääsee liikkumaan vapaasti reaaliajassa fyysisiltä laitteilta internetin pilvipalvelimille ja takaisinpäin. Tämä on linjassa Industry 4.0 periaatteiden kanssa ja osaltaan vähentää pyrkii vähentämään virheellisen tiedon jakamista jota saattaa syntyä jos mittaustiedon on kuljettava useiden eri järjestelmien kautta. Esimerkiksi jos laitevalmistaja pyytää asiakkaalta tietoa laitteen toiminnasta, olisi huomattavasti luotettavampaa jos tämä tieto olisi etäluettavissa suoraan laitteelta sen sijaan että se välitettäisiin suullisesti tai käsinkirjoitettuna.

### 2.3.2 Homogeeninen tietorakenne

Digitaalisen tiedonsiirron nopea kehitys ja uudet innovaatiot ovat osaltaan johtaneet teknologioiden ja formaattien pirstaloitumiseen. Tällä hetkellä yleisessä käytössä on valtava määrä erilaisia keskenään yhteensopimattomia formaatteja tiedonsiirtoon ja -tallennukseen. Saman tiedon voi esittää sarjaliikenteenä binäärimuodossa tai JSON dokumenttina eivätkä ne ole keskenään helposti verrattavissa.

Digital Twin pyrkii selkeyttämään tätä luomalla yhtenäisen tietorakenteen jossa samankaltainen tieto on tallennettu samaan formaattiin riippumatta sen alkuperäisestä formaatista. Tämä selkeyttää jatkokäsittelyä koska Digital Twinin päälle rakennettujen lisäpalveluiden ei tarvitse erikseen välittää siitä, kuinka mittaustieto pitäisi lukea ja parsia riippuen siitä mistä se on poimittu.

### 2.3.3 Muokattavuus ja älykäs toiminta

Koska Digital Twin kykenee valvomaan koko prosessiaketjua tai kokonaisuutta, tulisi sitä myös hyödyntää aktiivisesti ja säätää prosessin toimintaa tämän tiedon perusteella. Siinä missä PLC-kontrolleri on sokea sille mitä muualla prosessissa tapahtuu eikä tämän vuoksi kykene reagoimaan muutoksiin ennakoivasti, Digital Twin saa tietoa joka osa-alueelta ja kykenee tekemään nämä vaaditut muutokset ennakoivasti. Tämä logiikka voi olla käyttäjän ennakkoon määrittelemää mutta tekoälyn hyödyntäminen on myös mahdollista jolloin Digital Twin löytää itsenäisesti optimaaliset asetukset simulaatioiden perusteella.

### 2.3.4 Lokitiedot ja seuranta

Koska Digital Twin muuntaa tiedon yhteiseen formaattiin ja hyödyntää pilvipalvelun tarjoamaa edullista tallennustilaa, se ei ole riippuvainen yksittäisten laitteiden tai järjestelmien tarjoamista lokitiedoista. Hitaasti kehittyvien vikatilanteiden havaitseminen voi olla vaikeaa jos lokitietoa ei ole saatavilla pitkältä aikajaksolta tai ei ole suoraan mahdollisuutta verrata yhden laitteen lokitietoja toiseen.

Digital Twin tarjoaa kolme merkittävää etua: mahdollisuuden tallentaa valtavia määriä lokitietoa edullisella hinnalla, eri datapisteiden ja lokitietojen yhdistämisen sekä mahdollisuuden esittää tieto selkeässä, helposti ymmärrettävässä muodossa.

### 2.3.5 Modulaarisuus

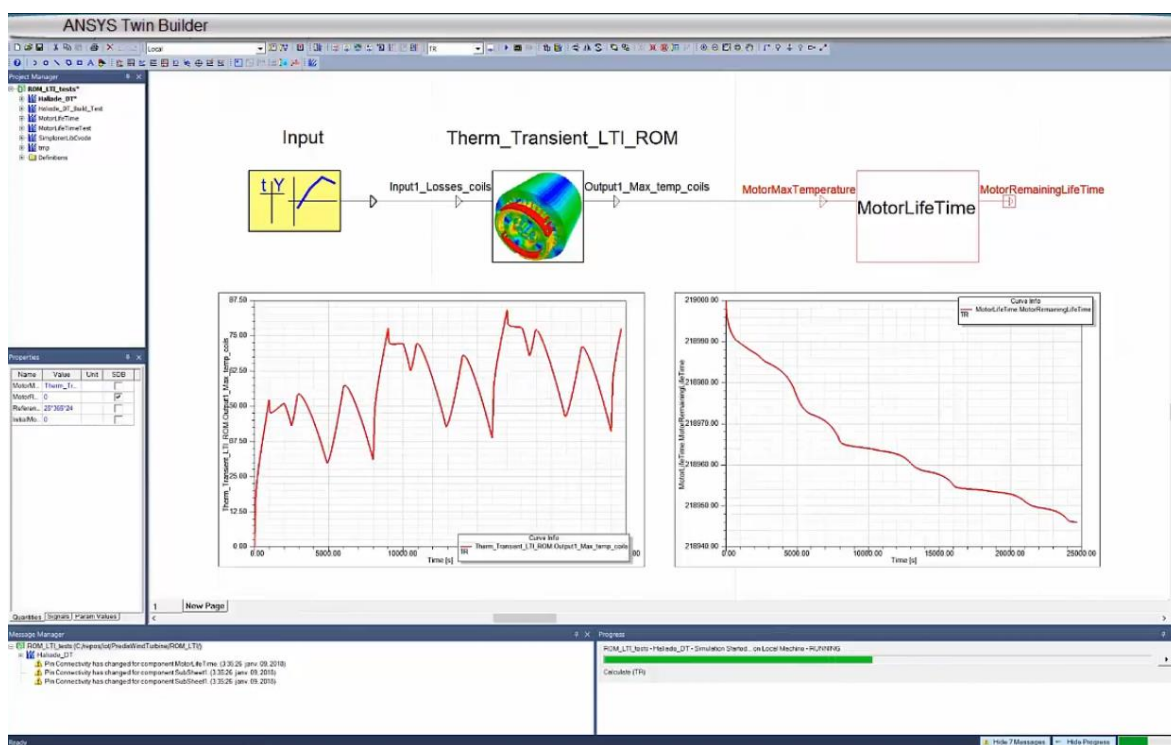
Tällä tarkoitetaan komponenttien ja osakokonaisuuksien suunnittelua ottaen huomioon muokattavuuden eri käyttökohteisiin ja tarpeisiin. Digital Twinin keräämää tietoa analysoimalla voidaan tarkastella muutoksien vaikutusta laitteen toimintaan ja varmistaa että muutoksilla on toivottu lopputulos. Suunnitteluosasto kykenee myös hyödyntämään tätä tietoa tuotteen parantamiseksi niiltä osa-alueilta joilla suorituskyvyssä havaitaan puutteita tai ongelmia.

## 2.4 Rakenne

Koska Digital Twin mallinnetaan fyysisestä objektista kerätyn datan pohjalta, edellyttää se ensinnäkin tähän soveltuvaa laitteistoa ja mittaustekniikkaa. Itse anturilla tai sen tyyppillä ei ole niinkään merkitystä, kunhan vain se on liitetty järjestelmään jolla on yhteys internetiin ja Digital Twinin pilvipalvelualustaan. Yksinkertaisimmillaan kyseessä voi olla digitaalinen on/off kytkin jonka on liitetty suoraan internetiin liitettyyn Raspberry Pi-alustaan. Tehdasympäristössä rakenne voi olla hieman monimutkaisempi, anturin ja pilvipalvelun välistä voi löytyä esimerkiksi ADC-muunnin, PLC-järjestelmä ja tehtaan oma intranet.

### 2.4.1 Virtuaalinen anturi

Digital Twinin käytössäolevan datan ei välttämättä tarvitse perustua vain ja ainoastaan oikeilta, fyysisiltä antureilta kerättyyn dataan vaan näiden rinnalle voidaan luoda myös virtuaalisia antureita. Näiden kautta on mahdollista visualisoida informaatiota, jota voi olla joko hankala tai mahdoton mitata fyysisillä antureilla. Tällaista tietoa voi olla esimerkiksi metallirakenteiden rasitusaste tai kuluminen tai mittauspisteen tulisi sijaita rakenteiden sisällä jonne anturin asentaminen ei ole mahdollista. Esimerkkinä tästä on VERBUNG Hydro Power GmbH:n vesivoimalan uusi kunnossapitojärjestelmä jossa yhdistämällä fyysisten ja virtuaalisten antureiden tuottamat mittaustulokset, kykenee Digital Twin esittämään hyvin luotettavan kuvan esimerkiksi turbiinien kunnosta ja huollon tarpeesta (CADFEM GmHH). Alla olevassa kuvassa on myös GE:n tarjoama esimerkki moottorin ennakkoiden elinkaaren simuloinnista kuormituksen perusteella (KUVA 2) , vasen käyrä näyttää kuvastaa moottorin käämien lämpötilaa ja oikealla laskeva käyrä visualisoi moottorin elinikää.



KUVA 2 GE Sähkömoottorin elinkaaren simulointi (GE, 2018)

Teoriassa virtuaalisella anturilla on mahdollista korvata fyysiset anturit ja näin säästää kustannuksissa, mutta tästä on vielä hyvin vähän esimerkkejä. Osaltaan tämä voi johtua siitä että jos mittaus-tieto on prosessin kannalta niin tärkeä että fyysisen anturin lisääminen on nähty tarpeelliseksi koska sen arvolle ei ole suoraa laskentakaavaa tai arvoa ei ole mahdollisuutta interpoloida muiden mittaus-tietojen pohjalta, on luotettavan virtuaalisen anturin simuloiminen haastavaa. Digital Twinin koulutus onnistuu olemassaolevan tiedon pohjalta, mutta jos muu data korreloi heikosti tämän mittaus-tiedon kanssa, luotettavin datapiste on se fyysisen anturi jota pyrimme simuloimaan ja muutokset prosessissa ilman sen fyysisen anturin tarjoamaa vertailutietoa saattavat johtaa simulaatiota harhaan.

Tässä tapauksessa virtuaalinen anturia on mahdollisesti parempi hyödyntää fyysisen anturin rinnalla, jolloin esimerkiksi anturin vikaantuessa prosessinohjaus vaihtaa väliaikaisesti virtuaaliseen anturiin kunnes fyysinen anturi on saatu vaihdettua.

## 3 KÄYTTÖKOHTTEET

### 3.1 Suunnittelu

Suunnittelu ja esituotanto tarjoavat mielenkiintoisia mahdollisuuksia Digital Twinin hyödyntämiseen. Siinä missä jo olemassa olevat suunnitteluohjelmistot ja laskentamallit mahdollistavat hyvin tarkan simuloinnin esimerkiksi rakenteiden lujuuslaskentaan, niiden luotettavuus on suoraan riippuvainen niille annettujen lähtöarvojen oikeellisuudesta. Nämä perustuvat usein tiettyihin oletuksiin esimerkiksi käyttöympäristöstä ja käytön aikana laitteeseen tai sen rakenteisiin kohdistuvista kuormituksesta. Tämä saattaa edellyttää pitkää testausta ja muutoksien testaamista fyysisillä prototyypeillä.

Digital Twin mahdollistaa tässä hybridi-strategian jossa fyysisten prototyyppien rinnalla ajetaan samaan aikaan suuria määriä digitaalisia prototyyppejä pienten muutosten ja optimointien tutkimiseen.

### 3.2 Tuotanto

Tuotannon optimointi on yksi selkeimmistä käyttökohteista Digital Twin -konseptin käytölle. Tuotantolinjan suorituskyky voi muuttua ajan myötä mekaanisen kulumisen tai muutosten seurauksena, jolloin linjan todellisen kapasiteetin määrittäminen ja pullonkaulojen havaitseminen on entistä työläämpää. Mutta jos tuotantolinjaston jokaisesta pisteestä on saatavilla reaaliaikaista tietoa, sen pohjalta voidaan luoda Digital Twin ja testata yksittäisten muutoksien, esimerkiksi linjaston nopeuden muutosta ja sen vaikutusta tuotantolinjan lopussa.

### 3.3 Kunnossapito

Kunnossapidon ja ennakoivan huollon tehokkuutta on mahdollista parantaa tuomalla laitteen kunnan osalta oleelliset tiedot helposti ymmärrettävään muotoon ja mahdollistamalla vertailu historialliseen dataan sekä muihin vastaaviin laitteisiin. Tehdasolosuhteissa, laitteiden kunto ja huoltotarve tyypillisesti arvioidaan ulkoisesti, mikä ei ole erityisen tarkka tai kattava menetelmä. Sen sijaan jos laitteen toiminnan kannalta oleellinen telemetria ja historia olisi mahdollista lukea etänä, huoltohenkilökunta voisi sen pohjalta priorisoida resurssien käyttöä tehokkaammin ja huollettavan laitteen paikantaminen on myös helpompaa koska Digital Twinin avulla on mahdollista visualisoida sen fyysinen sijainti laitoksessa tai tehtaassa.

### 3.4 Palvelut

Kun jokaista tuotetta voidaan tarkkailla ja simuloida reaaliajassa, mahdollistaa tämä myös uudenlaisia liiketoimintamalleja. Liikealoilla joilla tuotteiden elinkaari on erityisen pitkä ja vuosittainen myyntivolyymi alhainen, on havaittu että siirtyminen tuotokeskeisestä liiketoimintamallista palvelukeskeiseen jossa tuotteen sijaan myydään tuotteen tarjoamaa hyötyä, voi osoittautua toimivammaksi ratkaisuksi. Ilmailualalla lentokoneen runkojen ja moottoreiden elinikä on erittäin pitkä, mutta elinkaarikustannukset huoltoineen ja ylläpitöineen ovat merkittävät kuluerä. Moottoreiden myynti kiinteähintaisilla ylläpitosopimuksilla onkin kuulunut osana moottorivalmistaja Rolls Roycen strategiaan jo 90-luvulta alkaen mutta sensortechnologian ja analysointimenetelmien kehitys on mahdollistanut tämän viemisen vielä askeleen pidemmälle jossa moottoreita myydään tuntihinnalla (Smith, 2013). Rolls Royce käyttää tämän tyyppisestä sopimuksesta termiä "Power-by-the-Hour" jossa asiakas voi ostaa

moottorin käyttöä kiinteällä tuntiveloituksella ja Rolls Royce vastaa moottorin ylläpidosta ja kunnonvalvonnasta. Modernit suihkumoottorit sisältävät suuren määrän sensoritekniikkaa ja moottorinvalmistajat kykenevät tarkkailemaan jokaisen moottorin parametrejä reaaliajassa. Digital Twinien avulla jokaista yksittäistä moottoria voidaan tarkkailla lennon aikana ja verrata tuhansiin muihin vastaaviin moottorimalleihin mahdollisten poikkeamien tai vikojen havaitsemiseksi. Koska moottorinvalmistaja kykene teoriassa valvomaan ja keräämään dataa jokaisesta valmistetusta moottorista, on heillä tässä merkittävä kilpailuasema lentoyhtiöiden tai kolmannen osapuolen kunnossapito- ja huoltopalveluihin verrattuna johtuen valtavasta määrästä jonka perusteella huollon tarve on tarkemmin määritettävissä ja hinnoiteltavissa.

Yksi esimerkki on vuonna 2003 Rolls Roycen laatima sopimus Yhdysvaltain laivaston kanssa jossa laivasto hankki moottorit 200-lentokoneen koulutuslaivueeseen tuntiveloituksella (Rolls-Royce, 2004). Sopimuksessa Rolls Royce myös lupautui tarjoamaan moottoreille vähintään 80% valmiusastetta, eli tämän määrän lentokoneita oli oltava käyttövalmiina ympäri vuorokauden. Vertailun vuoksi edellinen moottorisopimus edellytti huomattavasti alhaisempaa 70% valmiusastetta mutta jo ensimmäisen vuoden aikana moottorit saavuttivat 85% valmiusasteen ja suurten huoltojen välinen lento-tuntimäärä nousi 700 tunnista 900 tuntiin.

## 4 KAUPALLISET RATKAISUT

### 4.1 Siemens Mindsphere

Siemens on yksi merkittävimmistä automaatioteollisuuden toimittajista ja Mindsphere heidät tarjoama teollisen IoT:n palvelualusta (Siemens AG, ei pvm). Se on osa Siemens:n laajempaa IoT ja teollisuusautomaatioportfoliota ja mahdollistaa pilvipalveluiden kehittämisen datan käsittelyyn ja analysointiin. Tarkoituksena on tarjota yhtenäinen alusta, jonka päälle rakennetaan eri rooleja varten räätälöidyt sovellukset datan analysointiin ja diagnosointiin. Jokaiselle käyttäjälle näytettävät tiedot perustuvat samaan lähdetietoon on joka reaaliaikaisesti yhteydessä prosessin SIMATIC-järjestelmään ja näinollen esimerkiksi mittausarvo on luotettava riippumatta siitä luetaanko se suoraan fyysiseltä anturilta vai etänä pilvestä.

Kehittäjän näkökulmasta Mindsphere on hyvin tyypillinen palvelualusta, tuki löytyy suurimmille pilvipalveluille (AWS, Azure) ja ohjelmointi onnistuu yleisimmillä työkaluilla ja ohjelmointikielillä. Tuki Digital Twineille lisättiin Mindsphere ympäristöön vuonna 2020 ja Siemens käyttää näistä termiä "Closed-Loop".

Siemensin "Closed-Loop"-ympäristö koostuu neljästä pääapplikaatiosta;

- Close-Loop Foundation tarjoaa rajapinnat reaaliaikaiseen prosessidataan ja toimii alustana, jonka päälle muut Closed-Loop applikaatiot on rakennettu (Siemens AG, ei pvm).
- Closed-Loop Product Definition on työkalu Digital Twin objektien hallintaan ja tarkoitettu prosessisuunnittelijoiden käyttöön. Objektien luonti tapahtuu Digital Twin Templates käyttöliittymän kautta eikä edellytä ohjelmointia. Tarvittaessa tämä on kuitenkin mahdollista ja Digital Twin voidaan luoda myös Mindsphereen tallennetusta JSON-objektista (Siemens AG, ei pvm).
- Closed-Loop Discrete Events Simulation mahdollistaa Digital Twinin simuloinnin aidolla, prosessista kerätyllä tiedolla. Esimerkiksi tuotantoprosessissa käytettävän laitteen toimintaa voidaan analysoida syöttämällä edellisen päivän parametrit Digital Twiniin ja verrata simulaatiosta saatua telemetriaa oikeaan laitteeseen (Siemens AG, ei pvm).
- Closed-Loop System Simulation on laajempi simulaatioiden hallintaan tehty työkalu ja tarkoitettu käyttökohteisiin joissa kokonaisuus koostuu useista Digital Twineistä ja rinnakkain ajettavista simulaatioista (Siemens AG, ei pvm).

### 4.2 Microsoft

Azure on Microsoftin tarjoama pilvipalveluratkaisu ja Digital Twin -ominaisuudet, yksinkertaisesti Azure Digital Twins, lisättiin loppuvuodesta 2020 (Microsoft, 2020). Siinä missä Siemens Mindsphere on selkeästi kohdistettu teollisuuden tarpeisiin ja käytettäväksi osana Siemensin tarjoamaa automaatiojärjestelmää, Microsoft Azure IoT on geneerinen, puhtaasti ohjelmistoon perustuva ratkaisu jonka tulisi soveltua moneen eri käyttökohteeseen.

Azure Digital Twins nojautuu vahvasti uuteen, erityisesti tätä käyttötarkoitusta varten laaditun Digital Twins Definition Language:n (Github, n.d.) käyttöön jonka päämääränä on harmonisoida Digital

Twin standardeja ja tarjota valmis, avoin formaatti Digital Twin objektien mallinnukseen. Tätä silmällä pitäen Microsoft on myös vuonna 2020 perustun Digital Twin Consortium:n perustajajäsenistä (Digital Twin Consortium, ei pvm).

#### 4.3 IBM

IBM tarjoaa myös Digital Twin ominaisuuksia osana IBM Maximo ohjelmistoalustaa. Perusominaisuuksiltaan kyseessä on hyvin samankaltainen ratkaisu kuin Azure IoT, mutta yksi IBM:n alustan tarjoamista erikoisuuksista on IBM Digital Twin Exchange (IBM, ei pvm) jonka kautta IBM yhteistyökumppanit ja laitetoimittajat pystyvät myymään Digital Twinejä IBM:n asiakkaille. Tosin vielä loppuvuodesta 2021 markkinapaikka vaikuttaa hyvin keskeneräiseltä ja valikoima käsittää IBM tarjoamien esimerkkien lisäksi lähinnä vain CAD-malleja.

## 5 KÄYTÄNNÖN ESIMERKIT

### 5.1 Tuotanto

Yksi edelläkävijöistä tekoälyn hyödyntämisessä tuotannon apuvälineenä on autonvalmistaja BMW, joka on ottanut Digital Twin:n käyttöön komponenttien valmistuksessa ja loppukokoonpanossa. Tarkastelemme molempia implementaatioita hieman lähemmin koska ne tarjoavat molemmat hieman erilaisen näkökulman tekoälyn käyttöön ja sen tarjoamiin tuotannon optimointimahdollisuuksiin.

BMW valmistaa osan valukomponenteista itse omalla tehtaalla ja uuden iX-mallisarjan myötä Landshutin tehtaalla tuotannossa on otettu käyttöön Digital Twin -teknologia, tavoitteena valmistaa entistä kevyempiä hybridikomponentteja jotka yhdistyy muovi ja metalli (Spotlight Metal, 2021) mutta ovat huomattavasti vaikeampia kehittää ja testata perinteisin menetelmin. Rakenteelliset komponentit joilta edellytetään lujuutta, on tyyppisesti valettu käyttämällä jotain tiettyä metalliseosta jonka ominaisuudet ovat hyvin tiedossa lujuuslaskelmaa varten. Useampien eri materiaalien käyttö ja yhdisteleminen ei ole uutta teknologiaa, mutta tekoälyn avulla on kuitenkin mahdollista simuloida kokonaan uudenlaisia muotoja ja materiaaleja joissa eri materiaaleja käytetään älykkäästi juuri niissä kohdissa joihin niiden ominaisuudet parhaiten soveltuvat. On kuitenkin mainittava että tämän tyyppiset metamateriaalit ovat hyvin ongelmallisia kierrätyksen ja uusiokäytön osalta, mikä oli yksi BMW:n teemoista vuoden 2021 IAA-messuilla i Vision Circular-konseptin muodossa (BMW AG, ei pvm). Tässä konseptiajoneuvossa koripaneelit oli rakennettu yksinkertaisista ja helposti kierrätettävistä materiaalelementeistä.

Tällaisten materiaalikonseptien konseptien testaaminen prototyypivalmistuksessa on kuitenkin erittäin kallista, työkalujen ja muottien valmistus vie aikaa ja lopputuloksena voi olla suuri määrä hukkamateriaalia mikäli komponentti ei täydy sille asetettuihin vaatimuksiin. Digital Twin mahdollistaa tässä tapauksessa varhaisen testauksen virtuaalisella tuotantolinjalla ottamalla huomioon tuotantolinjan ominaisuudet ja kykenevyyden esimerkiksi toleranssien suhteen.

Loppukokoonpanossa BMW hyödyntää Digital Twiniä kokoonpanolinjan suunnittelussa ja optimoinnissa. Tämä Nvidian kanssa yhteistyössä (Nvidia Corporation, 2021) luotu virtuaalinen kokoonpanolinja perustuu CAD-malleihin ja reaaliaikaiseen dataan, joka mahdollistaa tuotantolinjan visualisoinnin ja mahdollisten ongelmakohtien havaitsemisen esimerkiksi uuden mallin tuotannossa. Toinen mielenkiintoinen käyttökohde on tuotantorobottien tekoälyn koulutus virtuaalisen datan pohjalta.

### 5.2 Kiinteistöautomaatio ja kunnossapito

Digital Twinin käytöstä kiinteistöhuollossa löytyy jo useita julkaistuja raportteja ja tässä kohdassa esimerkiksi valitaan Arkansas Children's Northwest lastensairaalan laajennus (Invicara, 2018). Rakennuksen digitaalisen kunnossapitojärjestelmän tulisi sisältää kaikki käytön ja kunnossapidon kanalta oleellinen tieto yhdessä paikassa, varmistaen että tarvittava informaatio on helposti löydettävissä eikä pääse syntymään tilanteita jossa tieto muutoksista ei kulkeudu kaikille asianomaisille.

Projektista vastannut Bernhard TME lähti liikkeelle keräämällä jokaisesta sairaalalaitteesta yksilölliset tiedot, esimerkiksi sarjanumeron ja tarkan sijainnin. Näiden tietojen pohjalta jokaisesta laitteesta

luotiin digitaalinen objekti joka lisättiin rakennuksen 3D-malliin johon oli mahdollista liittää kaikki siihen liittyvä dokumentaatio kuten käyttöohjeet ja kunnossapitohistoria. Paikanpäällä kunnossapidon helpottamiseksi jokaiseen laitteeseen on myös liitetty viivakoodi jonka skannamalla ylläpitohenkilökunta pystyy tunnistamaan laitteen ja noutamaan sen tiedot paikanpäällä puhelimeen sen sijaan että heidän olisi ensin paikanpäältä käytävä lukemassa laitteen identifikaationumero ja sen jälkeen palattava takaisin toimistoon etsimään laitteen kunnossapitohistoriaa digitaalisesta tai paperisesta tietokannasta.

### 5.3 Kaupunkisuunnittelu

Isomman skaalan projekteissa kuten kokonaisten kaupunginosien suunnittelussa ja havainnollistamisessa on jo olemassa hyviä esimerkkejä Digital Twinin käytöstä. Perinteisesti kiinteistöprojekteissa on myymisen ja markkinoinnin apuna käytetty pienoismalleja havainnollistamaan projektin kaupungille tuomia hyötyjä ja antamaan paremman kuvan siitä miltä kaupunginosa voisi tulevaisuudessa näyttää. Fyysiset pienoismallit antavat myös paremman käsityksen skaalasta ja maallikolle helpommin hahmotettavissa kuin tietokoneen näytöllä pyörivä 3D-malli, mutta kääntöpuolena ne ovat staattisia ja yksityiskohtien tai värien lisääminen on erittäin työlästä.

Water Street Tampa on vuonna 2017 käynnistynyt kiinteistöprojekti (Water Street Tampa, ei pvm) jossa tavoitteena on rakentaa moderni kaupunkiympäristö jossa on erityisesti kiinnitetty huomiota ympäristöön ja hyvinvointiin. Kiinteistöjen myyntiä ja markkinointia varten projektin arkkitehtimallin haluttiin olevan dynaaminen ja mahdollistavan reaaliaikaisen datan esittämisen jotta malli elää ja muuttuu kaupungin mukana, mahdollistaen sen hyödyntämisen suunnittelun ja markkinoinnin apu-

välineenä myös tulevaisuudessa. Koska pohjimmiltaan tarkoituksena on luoda kaupungista digitaalinen kopio reaaliaikaisen datan visualisointiin, Digital Twin soveltuu tähän tarkoitukseen erittäin hyvin.

Lopputuloksena syntyi halkaisijaltaan 4,9 metriä leveä, 3D-tulostettu malli (KUVA 3), jonka pinnalle on mahdollista visualisoida erilaisia datapisteitä 12 teräväpiirtoprojektorin avulla ja modulaarinen rakenne mahdollistaa 3d-tulostettujen rakennusmallien päivittämisen tulevaisuudessa.



KUVA 3 Water Street Tampa -arkkitehtimalli

Taustalla pyörivä Digital Twin on reaaliaikaisesti yhteydessä kaupungin järjestelmiin ja tätä kautta reaaliaikainen data, esimerkiksi liikenne ja energiankäyttö ovat visualisoitavissa suoraan mallin päälle. Simulaatioiden ajaminen on myöskin mahdollista ja Digital Twin:stä vastannut IMERZA mainitsee yhtenä ominaisuutena luonnonvoimien simuloinnin ja niiden aiheuttamat vaikutusten ennakkoinnin (IMERZA, ei pvm). Voi olla esimerkiksi mielenkiintoista tietää onko viemäriverkostossa yksittäisiä pullonkauloja, jotka saattaisivat aiheuttaa ongelmia kovien rankkasateiden aikana.

## 6 YHTEENVETO

Digital Twin on selkeästi yksi Industry 4.0:n vähiten tunnetuista teknologioista ja sen ympärillä on paljon väärinkäsityksiä mitkä osaltaan johtuvat sen abstraktista luonteesta ja on näin ollen erityisesti maallikolle hyvin vaikeasti ymmärrettävissä.

Se on kuitenkin jo osoittautunut varsin merkittäväksi nousevaksi teknologiaksi ja kuten tarkastelun kohteena olevien esimerkkien perustella voimme havaita, kasvua on tapahtunut erityisesti viimeisen parin vuoden aikana. Merkittävä osana tässä on varmasti ollut valmiiden ratkaisujen ja alustojen saatavuuden parantuminen mikä alentaa kynnystä Digital Twinin käyttöönottoon, varsinkin jos käytössä on jo joku Digital Twiniä tukevista alustoista kuten esimerkiksi Microsoft Azure -pilvipalvelu.

Onkin mielenkiintoista seurata miten Digital Twinin käyttö etenee seuraavan parin vuoden aikana, viimeaikaiset ongelmat globaalissa jakeluketjussa ovat mahdollisesti ajaneet yrityksiä etsimään uudenlaisia tapoja investoida toimintaansa aikoina, jolloin fyysisiin laitteistoihin tai infrastruktuuriin panostaminen on osoittautunut haasteelliseksi. Tässä tilanteessa ohjelmistopohjainen investointi kuten Digital Twin voi olla hyvä vaihtoehto joka tuottaa arvoa myös tulevaisuudessa.

## LÄHTEET

- BMW AG. (ei pvm). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://www.bmw.com/en/events/iaa2021/bmw-i-vision-circular-domagoj-dukec-first-look.html>
- CADFEM GmH. (ei pvm). *Digital Twin Looks Ahead - Virtual sensors provide early warning against potential breakdowns*. Haettu 4. 12. 2021 osoitteesta [https://www.cadfem.net/fileadmin/user\\_upload/05-cadfem-informs/resource-library/Digital\\_Twin-CADFEM\\_Customer\\_Case\\_with\\_VERBUND.pdf](https://www.cadfem.net/fileadmin/user_upload/05-cadfem-informs/resource-library/Digital_Twin-CADFEM_Customer_Case_with_VERBUND.pdf)
- Digital Twin Consortium. (ei pvm). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://www.digitaltwinconsortium.org/>
- Freguson, S. (ei pvm). *Siemens*. Haettu 3. 4. 2021 osoitteesta <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>
- Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; & Barlow, C. (2020). *Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research*. Keele University. Keele: IEEE Access. Noudettu osoitteesta <https://ieeexplore.ieee.org/document/9103025>
- GE. (4. 5. 2018). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://www.youtube.com/watch?v=P36yJkE1zIM>
- Gelernter, D. (1991). *Mirror worlds*. New York: Oxford University Press.
- Github. (n.d.). Retrieved 10. 3, 2021, from <https://github.com/Azure/opendigitaltwins-dtdl/tree/master/DTDL>
- IBM. (ei pvm). Haettu 4. 10. 2021 osoitteesta <https://digitaltwinexchange.ibm.com/>
- IMERZA. (ei pvm). *IMERZA Digital Twin*. Haettu 24. 10. 2021 osoitteesta <https://imerza.com/digital-twin>
- Inside Science. (9. 6. 2021). *Inside Science*. Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://insidescience.org/news/artificial-intelligence-may-be-better-humans-designing-microchips>
- Invicara. (1. 12. 2018). *Invicara*. Haettu 3. 4. 2021 osoitteesta <https://invicara-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2018/12/Invicara-Bernhard-TME-Case-Study.pdf>
- Microsoft. (8. 12. 2020). Haettu 3. 10. 2020 osoitteesta <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/azure-digital-twins-now-generally-available-create-iot-solutions-that-model-the-real-world/>
- NASA. (1970). *Apollo 13 Transcripts*. Haettu 18. 5. 2021 osoitteesta <https://www.hq.nasa.gov/alsj/a13/a13trans.html>
- NASA. (1970). *Report of Apollo 13 Review Board*. NASA.
- Nvidia Corporation. (3. 4. 2021). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://blogs.nvidia.com/blog/2021/04/13/nvidia-bmw-factory-future/>
- Rolls-Royce. (2004). *Annual Report 2004*. Rolls-Royce.
- Siemens AG. (ei pvm). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://siemens.mindsphere.io/en>
- Siemens AG. (ei pvm). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://siemens.mindsphere.io/content/dam/cloudcraze-mindsphere-assets/03-catalog-section/03-applications/closedloop/system-simulation/Siemens-SW-MindSphere-Closed-Loop-Product-Definition-FS-81516-C10.pdf>

- Siemens AG. (ei pvm). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://siemens.mindsphere.io/content/dam/cloudcrazemindsphere-assets/03-catalog-section/03-applications/closedloop/system-simulation/Siemens-SW-MindSphere-Closed-Loop-System-Simulation-FS-81518-C13.pdf>
- Siemens AG. (ei pvm). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://siemens.mindsphere.io/content/dam/cloudcrazemindsphere-assets/03-catalog-section/03-applications/closedloop/discrete-event-simulation/Siemens-SW-MindSphere-Closed-Loop-Discrete-Events-Simulation-FS-81517-C11.pdf>
- Siemens AG. (ei pvm). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://siemens.mindsphere.io/content/dam/cloudcrazemindsphere-assets/03-catalog-section/03-applications/closedloop/system-simulation/Siemens-SW-MindSphere-Closed-Loop-Foundation-FS-81515-C8.pdf>
- Smith, D. J. (2013). *Power-by-the-hour: the role of technology in reshaping business strategy at Rolls-Royce*. Nottingham: Nottingham Trent University.
- Spotlight Metal. (23. 10. 2020). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://www.spotlightmetal.com/intelligent-algorithms-data-analysis-in-real-time-a-973931/>
- Spotlight Metal. (5. 3. 2021). Haettu 3. 10. 2021 osoitteesta <https://www.spotlightmetal.com/bmw-ix-cockpit-fabrication-using-artificial-intelligence-and-digital-twin-a-1005725/>
- VDI Nachrichten. (1. 4. 2011). Haettu 14. 4. 2021 osoitteesta <https://web.archive.org/web/20130304101009/http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Industrie-4-0-Mit-dem-Internet-der-Dinge-auf-dem-Weg-zur-4-industriellen-Revolution/52570/1>
- Water Street Tampa. (ei pvm). Haettu 24. 10. 2021 osoitteesta <https://waterstreettampa.com/>
- Wikipedia*. (ei pvm). Haettu 3. 4. 2021 osoitteesta [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_twin](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin)
- Wikipedia*. (ei pvm). *Wikipedia*. Haettu 28. 11. 2021 osoitteesta [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_twin](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin)