

MIIKKA HEINONEN

DIGITAL TWIN KONSEPTINA JA SEN KÄYTTÖMAHDOLLISUU-  
DET TEOLLISUUDESSA

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Miikka Palvalin  
Päivämäärä: 17.4.2019

## TIIVISTELMÄ

**Miikka Heinonen:** Digital twin konseptina ja sen käyttömahdollisuudet teollisuudessa

Tampereen Yliopisto

Kandidaatintyö, 29 sivua,

Huhtikuu 2019

Teknillis-taloudellinen TkK-tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tietojohtaminen

Tarkastaja: Miikka Palvalin

Avainsanat: Digital twin, virtuaalinen kaksonen, digitalisaatio, digitaalinen mallintaminen, simulaatiot, Industry 4.0, lisätty todellisuus

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää digital twinin hyötyjä sekä käyttömahdollisuuksia teollisuudessa. Työ pyrkii vastaamaan siihen, minkälaisia teorialleja on digital twinistä luotu, minkälaisia eroja näillä on sekä minkälaisia hyötyjä ne mahdollistavat pääosin teollisuuskäytössä mukailleen. Työ suoritettiin kirjallisuusselvityksenä, jossa tietokantana lähteille käytettiin Scopus -tietokantaa. Työn uutuusarvo on suuri, joka ilmenee lähteiden julkaisupäivistä, jotka sijoittuvat 2017-2019 välille pääosin.

Digital twin on alun perin 2000-luvun alussa esitetty idea, jossa yhdistetään digitaalinen malli heijastamaan fyysistä mallia. Tätä ideaa vei eteenpäin isoimpana toimijana ensiksi NASA 2010-luvun alussa, jolloin he ottivat idean käyttöönsä. Tämän jälkeen digital twin on alkanut lisääntymään tutkimuksissa sekä konsepteissa, joista eniten on tutkittu digital twinin mahdollisuutta teollisuuden tarpeisiin. Teollisuudelle digital twin pystyy tarjoamaan monipuolisesti ratkaisuja riskien minimoimisesta aina teollisuusjärjestelmien hallinnointiin asti. Digital twinillä pyritään lähtökohtaisesti valjastamaan digitalisaation mahdollisuudet parantamaan teollisuuden prosesseja sekä ehkäisemään haasteita ja ongelmia tuotannossa. Digital twinillä pystytään mallintamaan reaaliaikaisesti fyysisen tehtaan toimintaa, jolla on suuri merkitys esimerkiksi tehtaan prosessin valvomisen sekä hallinnoinnista kannalta. Lisäksi tekoälyä käyttämällä digital twinillä pystytään suorittamaan autonomista ongelmaratkomista ja mallintamaan erilaisia skenaarioita, jotka voivat osoittaa haavoittuvuuksia. Digital twiniä pystytään käyttämään myös pelkästään visuaalisissa tarkoituksissa, jolloin esimerkiksi VR - sekä AR -teknologia ovat käytännöllisiä.

Digital twin ei ole standardoitu teknologia ja se tulee kokemaan suuria muutoksia vielä muiden teknologioiden parantuessa ja ilmaantuessa, mutta sen idea tulee pysymään ja leviämään teollisuuteen enemmän lähivuosina. Haasteina edelleen on tiedon määrä sekä laitteistojen rajapintojen yhteen saaminen sekä ihmisten tekemät virheet, jotka vähentävät digital twinin hyötyjen arvoa.

## ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty osana tietojohdamisen koulutusohjelmaa ja kuuluu teknillis-taloudelliseen tutkinto-ohjelmaan. Aihe on valittu oman teknologiainnokkauteeni sekä uutuusarvon takia, joiden lisäksi aihe on osa työpanostani Swecolle. Työtäni on auttanut esimieheni Jarkko Heikura, kandidaatintyön ohjaaja Miikka Palvalin sekä Henri Pirkkainen. Kandidaatintyön on tarkoitus olla alustava selvitys jatkoselvitykselle, joka tehtäisiin diplomityön muodossa tulevina vuosina.

Tampereella, 17.4.2019

Miikka Heinonen

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Aiheen merkittävyys .....	1
1.2	Aiheen taustalla .....	2
2.	TUTKIMUSONGELMA JA TUTKIMUKSEN TAVOITTEET .....	3
2.1	Tutkimusongelma ja sen rajaaminen .....	3
2.2	Tutkimuskysymykset .....	4
2.3	Tutkimusmenetelmän kuvaus ja tutkimusaineiston esittely .....	5
3.	DIGITAL TWINISTÄ LUODUT TEORIAMALLIT .....	7
3.1	Määritelmien taustalla .....	7
3.2	Erilaiset kehitetyt teoramallit ja määritelmät .....	7
3.2.1	Alkuperäinen digital twin konsepti .....	7
3.2.2	NASA:n kehittelemä digital twinin visio .....	8
3.2.3	Simulaatioteoria älykkäiden kyberfysikaalisten systeemien osana .....	9
3.2.4	Viisi osainen digital twin .....	9
3.2.5	Tiedon ja datan uudelleenkäyttöön perustuva digital twin .....	11
3.2.6	Malliin perustuva digital twin teollisuuden hallintajärjestelmissä .....	12
4.	DIGITAL TWININ HYÖDYT ERILAISISSA KOKONAISUUKSISSA .....	15
4.1	Erilaiset testatut ja pidemmälle viedyt kokonaisuudet .....	15
4.2	NASA:n suunnittelema digital twin .....	15
4.3	Viisiosainen digital twin käytännössä .....	16
4.4	Mallipohjainen suunnittelu ja teollisuusjärjestelmät integroituna digital twiniin .....	17
4.5	Esiteltyjen kokonaisuuksien tuottamat hyödyt .....	18
5.	DIGITAL TWININ LUOMINEN TEOLLISUUDEN TUEKSI .....	21
5.1	Digital twin osana teollisuutta .....	21
5.1.1	Digital twinin luominen .....	21
5.2	Virtuaalinen malli tehtaasta osana digital twiniä .....	24
6.	YHTEENVETO .....	26
	LÄHTEET .....	27

## KESKEISET KÄSITTEET

- **Cyber-Physical Systems (CPS)** – On kyberfysikaalinen systeemi, joilla tarkoitetaan mekanismeja, joita hallitaan tietokoneen sekä verkostojen avulla. Käyttäjät hallinnoivat verkon yli systeemiä, mutta varsinaisen työn tekevät erilaiset algoritmit sekä systeemin osat, jotka ovat usein itsenäisiä älykkäitä kokonaisuuksia, ja jotka kommunikoivat keskenään.
- **Internet Of Things (IOT)** – Tarkoittaa esineiden internettiä, jossa ideana on yhdistää laitteet ja koneet verkkoon, jotka eivät siinä ennen ole olleet. Tarkoituksena on luoda isompi ja kattavampi verkkoympäristö, jossa informaatio sekä data liikkuisi näiden yhdistettyjen eri laitteiden välillä mutkattomasti. Tästä voi olla hyötyä esimerkiksi digital twiniin sisään tulevan informaation välittämisessä sekä yleisesti tiedon siirrolla.
- **Industry 4.0** – Tarkoittaa teollisuudessa vallitsevaa trendiä, jossa automaatiota sekä datan käyttöä halutaan tehostaa. IoT, CPS sekä pilvipalvelimien käyttöönotto teollisuudessa ovat esimerkkejä tästä teollisuuden neljänneestä vallankumouksesta. Tehtaista halutaan tehdä digitaalisia sekä älykkäitä, johon tarkoitukseen Industry 4.0 on innovoitu.
- **Lisätty todellisuus (AR)** – Edustaa myös VR:n kaltaisesti digitaalisen ympäristön tai yksittäisen kohteen heijastamista, mutta tapahtuu oikean ympäristön päälle. Heijastus voidaan tehdä esimerkiksi mobiililaitteilla. Tämä edustaa kätevää ja helppoa teknologiaa esittää tuotetta tai palvelua jopa realistisessa mittakaavassa oikeassa ympäristössään. Myös tähän tutkitaan digital twinin mahdollisuutta tuoda dataa tai informaatiota.
- **Modulaarisuus** – On eri osista saatava kokonaisuus, jossa näitä osia eli moduuleita pystyy poistamaan, vaihtamaan ja lisäämään. Liittyy tässä tutkimuksessa vahvasti digital twinin rakenteeseen.
- **Ohjelmistoarkkitehtuuri** – Arkkitehtuurien kuvaamista koskeva standardi, joka määrittelee ohjelmistoarkkitehtuurin järjestelmän perusorganisaatioksi, joka sisältää järjestelmän osat, niiden keskinäiset suhteet ja niiden suhteet ympäristöön sekä periaatteet, jotka ohjaavat järjestelmän suunnittelua ja evoluutiota.
- **Smart Manufacturing** – Älykäs tuottaminen, jossa tarkoituksena on optimoida valmistamista sekä tuotantotyötä. Tekoälyä sekä informaatiota on tarkoituksena hyödyntää paljon enemmän yhdessä lisääntyneen digitalisuuden kanssa, jolloin yhä enemmän pystytään tekemään digitaalisesti, millä voidaan vaikuttaa suoraan tuotantoon.
- **Standardointi** -Tarkoittaa tässä yhteydessä konseptin vakiointia. Jostakin prosessista tai tuotteesta halutaan tehdä samanlainen kaikille, jolloin myös toistettavuutta vaaditaan.
- **Virtuaalitodellisuus (VR)** – Tarkoittaa digitaalista ympäristöä, jossa käyttäjä erotetaan tyypillisesti näkö- sekä kuuloaistein pois ympäröivästä maailmasta.

Tässä tapauksessa ympäristössä pystytään esittämään esimerkiksi simulaatioita. Digital twinin mahdollisuutta siirtää informaatiota tai dataa tähän on yksi tämänkin tutkimuksen aiheista.

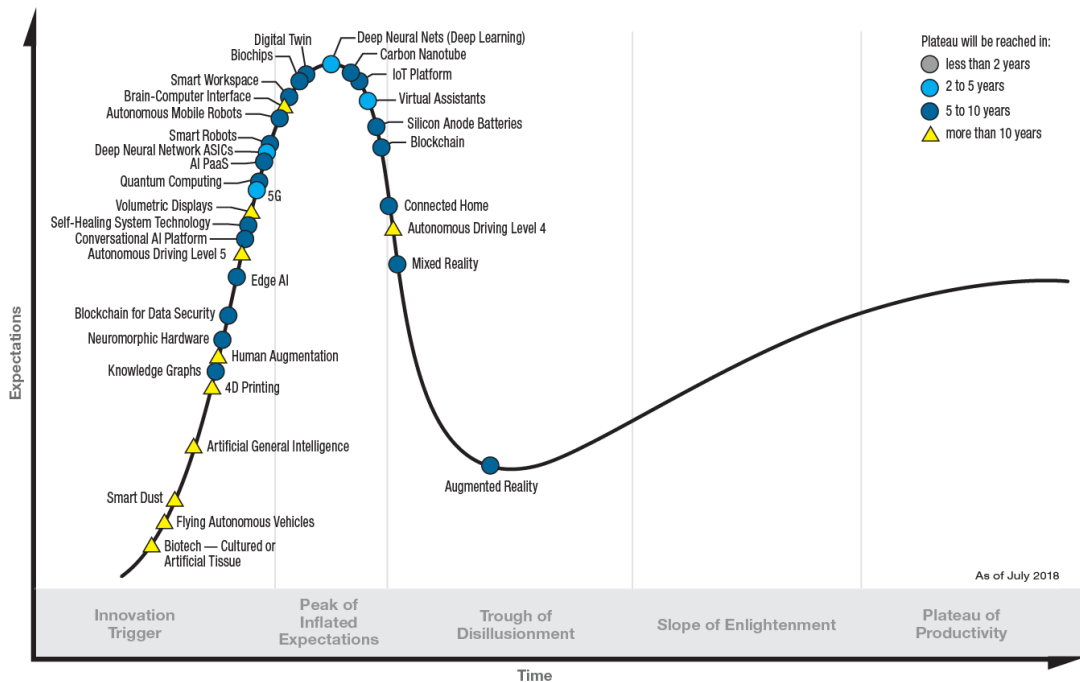
# 1. JOHDANTO

## 1.1 Aiheen merkittävyys

Digital twin on suuri muutoksenteekijä teknologian hallinnoimisen kannalta. Digital twinillä tarkoitetaan konseptia, joka on ensimmäisen kerran esitelty vuonna 2003 Michael Grievesin toimesta. Grievesin mukaan tähän konseptiin kuului fyysikaalinen tuote, virtuaalinen tuote sekä niiden yhteydet. Myöhemmin konseptin määritelmää on muotoiltu eri toimijoiden toimesta, jonka lisäksi sen käyttötarkoitusta ja monipuolisuutta on muokattu. (Tao et al. 2018)

Aiheen kiinnostavuutta lisää huomattavasti digital twinin esiintyminen myös kansainvälisen ICT-alan tutkimus- ja konsultointiyrityksen, Gartnerin, vuoden 2018 ”hypekäyrässä”. Tässä käyrässä, joka esitetään kuvassa 1, digital twin on yksi vuoden 2018 odotetuimmista teknologisista asioista. Digital twiniltä odotetaan paljon, ja siksi tämä tutkimus keskittyy sen mahdollisuuksiin ja siihen, miten sitä pystyttäisiin hyödyntämään erityisesti teollisuudessa.

### Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018



Kuva 1 Gartnerin hypekäyrä 2018 (Gartner, 2018)

## 1.2 Aiheen taustalla

Digital twin on monipuolinen määritelmä monenlaiselle prosessille, mutta sen ydinidea on kaikissa sama. Digital twin tuo tuotteen tai palvelun digitaaliseen ympäristöön, joka saa dataa ja puolestaan siirtää informaatiota ulostulona. Tällä periaatteella pyritään luomaan stimuloiteja, skenaarioita ja ennustuksia sekä tehostamaan tuotteita ja palveluita koskevia prosesseja.

Ensimmäinen merkittävä konseptin muokkaaminen sekä varsinainen hyödyntäminen tehtiin NASA:n (National Aeronautics and Space Administration) toimesta. Glaessgen & Stargel (2012) määritteli digital twinin olevan useaan kerrokseen sekä fysikaaliseen ominaisuuteen perustuva simulaatio, joka on todennäköisyyksien kautta täsmällinen. Lisäksi sen kuvailtiin heijastavan, aika sekä historiallinen data ja fysikaalinen malli huomioiden, digitaalisesti tehtyä mallia reaaliaikaisen sensoridatan avulla. Simulaatio käsitystä tukee myös Gabor et al. (2008), joka määrittelee digital twinin olevan erityinen simulaatio, joka on rakennettu ammatilliseen tietoon ja konkreettiseen dataan, jota kerätään vallitsevasta systeemistä sekä hyödynnetään täsmällisessä simulaatiossa aikajanan ja ympäristön vaihdellessa.

Puolestaan Maurer (2017) määrittelee digital twinin olevan digitaalinen esitys, joka kykenee esittämään tuotantoprosessin sekä tuotteen suorituskyvyn. Tämä edustaa teollisuuden ja tuotannon näkökulmaa, jonka voi päätellä siitä, mihin digital twin konseptia on tarvittu. Simulaatioteoriasta eroaa myös alkuperäisten osien päälle lisäämistä edustava näkemys, jossa Tao & Zhang (2017) lisäsivät digital twiniin kolme osaa lisää, jolloin kokonaisuus olisi: fysikaalinen sekä virtuaalinen osa, niiden yhteys, data sekä palvelu.

Eri lähteisiin pohjautuen voidaan huomata erilaisia käsityksiä digital twinistä. Tyypillisimmät ovat kaksi toisistaan erilaista näkökulmaa: simulaatioteoria sekä erilaisiin osiin ja niiden yhteyksiin perustuva teoria. Kun Tao & Zhang (2017) ja Maurer (2017) sekä alkuperäinen konsepti keskittyvät erilaisiin osiin ja niiden yhteyksiin, niin Glaessgen & Stargel (2010) sekä Gabor et al. (2008) perustelivat konseptin olevan simulaatiopohjainen. Näiden perusteella voidaan tehdä johtopäätös siitä, että digital twinin konseptia ei ole standardoitu, vaikka siinä esiintyy sama peruseriaate näkökulmasta riippumatta. Yhtenä syynä tähän voidaan pitää alariippuvaisuutta, eli miten eri aloilla on hyödyllisintä käyttää konseptin tarjoamia ominaisuuksia.



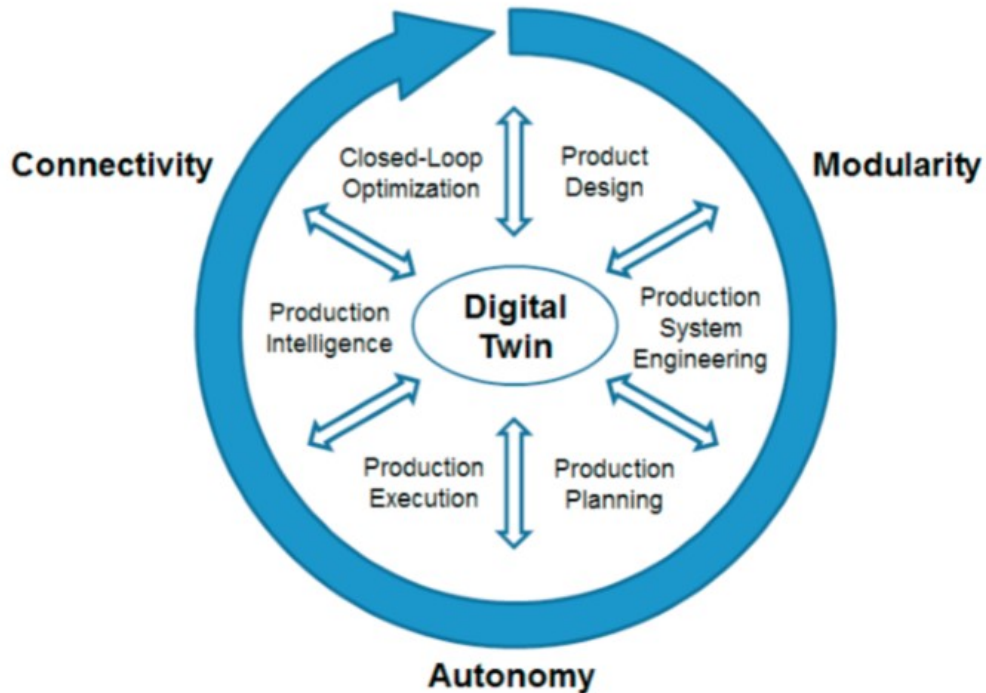
## 2. TUTKIMUSONGELMA JA TUTKIMUKSEN TA- VOITTEET

### 2.1 Tutkimusongelma ja sen rajaaminen

Digital twin on potentiaalinen konsepti, kun ajatellaan teknologian mahdollistaman hyödyn valjastamista tehokkaammin, kuin koskaan ennen. Tämän takia monet eteenpäin suuntautuneet yritykset haluavat tutkia ja analysoida tämän teknologian hyötyjä ja mahdollisuuksia, joka ilmenee Gartnerin käyrästä, joka esitettiin kuvassa 1. Jos konsepti onnistutaan integroimaan yrityksen liiketoimintaan, yritys voi saada huomattavia tehostuksia toimintaansa sekä säästää resurssejaan. Lisäksi yrityksen kilpailukyky nousee, sillä tietoyhteiskunnassa parhaiten tietoa hyödyntävä kykenee vähentämään resurssien hukkaamista sekä tekemään asioita kerralla oikein. Tätä tukee myös Rosen et al. (2015), jonka mukaan päätöksentekoa voidaan tehostaa perustuen simulaatioille ja optimisoinneille, joita digital twin tuottaa. Tämän avulla pystyttäisiin kohdentamaan resursseja oikeisiin paikkoihin sekä saavuttamaan parempi hyötysuhde digitalisoinnin mahdollisuuksista.

Tässä tutkimuksessa keskitytään käsittelemään aihetta pää- sekä alatutkimuskysymysten kautta, jotka esitetään seuraavassa alakappaleessa. Tutkimuksen kysymyksillä pyritään saamaan vastaus siihen, kuinka digital twin konseptia pystytään käyttämään parhaiten hyödyksi sekä minkälainen rakenne on todettu parhaimmaksi yleisellä tasolla, kun konseptia on käytetty. Tarkoituksena on poimia aiemmin tutkittuja toimintamalleja sekä -menetelmiä, joiden tulosten perusteella arvioidaan onnistuneimmat rakenteet. Lisäksi tutkimuksen on tarkoitus tuottaa vastaus tietoyhteiskunnan ja digitalisaation tuomiin haasteisiin, joissa tiedon määrä, sen hallinta sekä hyödyntäminen ei kohtaa niistä tuotettujen hyötyjen kanssa.

Nämä haasteet näkyvät monilla eri aloilla eri tavoin. Rosen et al. (2015) osoittaa, että autonomia, modulaarisuus sekä yhdistettävyyys ovat kolme eri osa-aluetta, joiden kautta haasteita pystyttäisiin ratkomaan, ja joita digital twin pystyisi yhdistämään. Tässä lähteessä mallia on käytetty teollisuusalalla, jossa tavoitteena on ollut tuotannon parantaminen, mikä tulee ottaa huomioon näitä tekijöitä arvioitaessa. Alhaalla oleva kuva 2 esittää tässä kontekstissa käytetyn digital twinin mallin.



*Kuva 2 Digital twin ja tuotteen elinkaari (Rosen et al. 2015)*

Rosen et al. (2015) jatkaa myös, että digital twinin idea ei perustu pelkästään vain eri osien testaamiseen, vaan jopa kokonaisuuksien sekä ympäristöjen simulointiin, jossa toimintamalli noudattaisi kuvan 2 kaltaista ympyrää. Koska eri lähteissä ja eri aloilla on erilainen käsitys konseptista, on huomioitava, kuinka laajasta sekä monikäyttöisestä konseptista on kyse, jonka takia aihetta tuleekin rajata.

Tässä tutkimuksessa rajaaminen tapahtuu keskittymällä pääosin jo tehtyjen tutkimuksien ja testien päätelmiin ja lopputuloksiin. Erilaisia tuloksia tutkitaan teknologia- ja innovaatiojohtamisen näkökulmasta, sekä hyödynnetään työkaluja uuden tiedon luomisesta sekä teknologian ennakoinnista. Tutkimusta suoritetaan lähtökohtaisesti teollisuuden näkökulmasta. Realistisuus sekä ohjelmistoarkkitehtuuri huomioidaan myös, jolloin pystytään keskittymään vain niihin tapauksiin, joista saadaan järkevää sekä yksiselitteistä tietoa. Lisäksi tutkimuksessa keskittyminen tulee olemaan pääosin digital twinin rakenteessa, jonka avulla voidaan vasta keskittyä sen mahdollisuuksiin.

## 2.2 Tutkimuskysymykset

### Päätutkimuskysymys

- *Miten digital twin konseptia pystytään hyödyntämään teollisuudessa?*

## Alatutkimuskysymyksiä

- *Minkälaisia digital twin malleja on kehitetty ja tutkittu?*
- *Millaisia hyötyjä erilaiset digital twin kokonaisuudet tuottavat?*

Tietojohtajan näkökulmasta tähän konseptiin kuuluu vahvasti myös informaationvälitystä koskevat asiat. On tärkeää tietää, mitä dataa esimerkiksi digital twin tulee tarvitsemaan ja mitä informaatiota sen tulisi syöttää ulospäin sekä kuinka tämä vaikuttaa ihmisten väliin tiedon välittämiseen.

## 2.3 Tutkimusmenetelmän kuvaus ja tutkimusaineiston esittely

Kirjallisuustutkimuksessa keskitytään konseptin tutkimiseen käyttäen monia eri aloilla tehtyjä tutkimuksia sekä toteutettuja versioita ja niistä saatuja tuloksia. Tutkimusaineistoa ei ole rakennuskonsultointialalta käyttäen digital twiniä, mutta rakennuskonsultointialalla on kuitenkin toteutettu samaa periaatetta kuin virtuaalisessa kaksosessa, mutta eri toimintamalleja sekä ohjelmistoarkkitehtuureja hyväksi käyttäen. Tähän kuuluu muun muassa virtuaalinen- sekä lisätty todellisuus, joiden avulla voidaan tarkastella etukäteen esimerkiksi rakennusta 3D-mallina ja saada realistinen käsitys lopputuloksesta.

Tällä hetkellä löydetty tutkimusaineisto vaikuttaa positiiviselta, kun ajatellaan työn aiheen yleisyyttä sekä tuoreutta. Ainoa haaste on löytää esimerkiksi digitaalisesta kaksosesta selviä määritelmiä ja sen tarkkoja käyttöprosesseja, koska sitä ei olla tutkittu vielä tarpeeksi tai kirjoitettu. Kuitenkin samankaltaisia prosesseja on käytetty aiemminkin, kuten edellisessä kappaleessa mainittiinkin. Tämän takia pystytään hakemaan tietoa myös tuttuja prosesseja hyödyntäen sekä vertailemaan näiden suhdetta virtuaaliseen kaksoseen. Taulukkoon 1 on koottu erilaisista lähteistä eri vaihtoehdoilla saatua lähteiden määrää.

Löydettyjä lähteitä tullaan analysoimaan sen uskottavuuden ja toimivuuden kannalta. Lähteitä tullaan etsimään ja arvostelemaan eri aloilta, joilla sitä on käytetty. Mitä lähempänä prosessi tai mallin käyttäminen on rakennuskonsultointia tai jo käytössä olevaa VR/AR ja 3D-mallien esittämistä, sitä helpompi lähde on tulkita tähän yhteyteen. Lähteiden keskinäisessä vertailussa auttaa julkaisufoorumin tarjoama arvostelu. Mahdollisimman monipuolinen tarkastelu tuottaa laadullisista tutkimuksista sekä parantaa luotettavuutta.

**Taulukko 1.** Tietokannoista saadut tulokset

Hakulauseke	Andor	ScienceDirect	Scopus
"Digital Twin"	1074	379	510
"Digital Twin" AND "3D"	342	168	50
"Digital twin" AND "civil engineering"	94	12	0
"Digital twin" AND ("Structure" OR "concept")	644	350	198

Kuten taulukosta 1 voi huomata, erilaisilla hakulausekkeilla pystytään nopeasti rajaamaan saatujen tulosten määrää. Aiheen merkittävyyteenkin liittyen voidaan nopeasti tulkita konseptin käytön rakennuskonsultoinnissa olevan vähäistä, jonka takia esimerkiksi Scopus-tietokannasta tuloksia ei juuri löytynyt. Jo näillä hakulausekkeilla pystytään saavuttamaan sopivat määrät tuloksia.

Parhaimman ja työstettävän määrän tarjoaa Scopusen tietokanta, jonka tarjoamat 500 lähdeä, pelkällä ”digital twin” haulla, on pääaineisto tutkimuksessa. Näitä lähteitä rajataan oman harkintakykyni mukaisesti niin, että aluksi sopivimmat lähteet rajataan otsikoiden ja aiheiden perusteella pienemmäksi, aina 64 tulokseen asti. Tästä eteenpäin tuloksia lähdettiin rajaamaan käymällä lähteitä läpi sisällön kannalta. Tässä rajauksessa huomioitiin niin tekstin saatavuudet ja erilaisten lähteiden samankaltaisuudet sekä lähteen sisällön tarkoituksenmukaisuus. Lopullinen rajaus tuotti kaksikymmentä tulosta, joista kolme jouduttiin karsimaan lopulta samankaltaisuuden takia. Lopulta lähteitä jäi Scopusen tietokantahausta 17, ja muita lähteitä tuli 6, jolloin yhteiseksi lähdemääräksi muodostui 23. Scopusen ensimmäisen rajauksen lähteistä 95 %:a oli vuodesta 2017 ylöspäin. Tämä osoittaa hyvin digital twinin uutisarvon lisäksi myös sen, että vasta viime vuosien aikana sen tutkiminen ja käyttöönotto on nähty tärkeäksi eri aloilla, jota tukee vahvasti myös teknologian kehitys.

## 3. DIGITAL TWINISTÄ LUODUT TEORIAMALLIT

### 3.1 Määritelmien taustalla

Kuten jo johdannosta voidaan huomata, digital twinillä on monenlaisia ja erilaisia määritelmiä, mutta kaikissa esiintyy sama alkuperäinen konsepti, jonka Grieves esitteli vuonna 2003. Grievesin esittelemä malli oli osana Product Lifecycle Management (PLM) kurssia, jota Grieves ohjasi. Tämän jälkeen konseptiin on vaikuttanut niin yritysten tarpeet kuin teknologian kehitys. (Tao et al. 2018) Koulamas & Kalogeras (2019) toteavatkin, että digital twinille ei ole olemassa globaalia yleistä määritelmää.

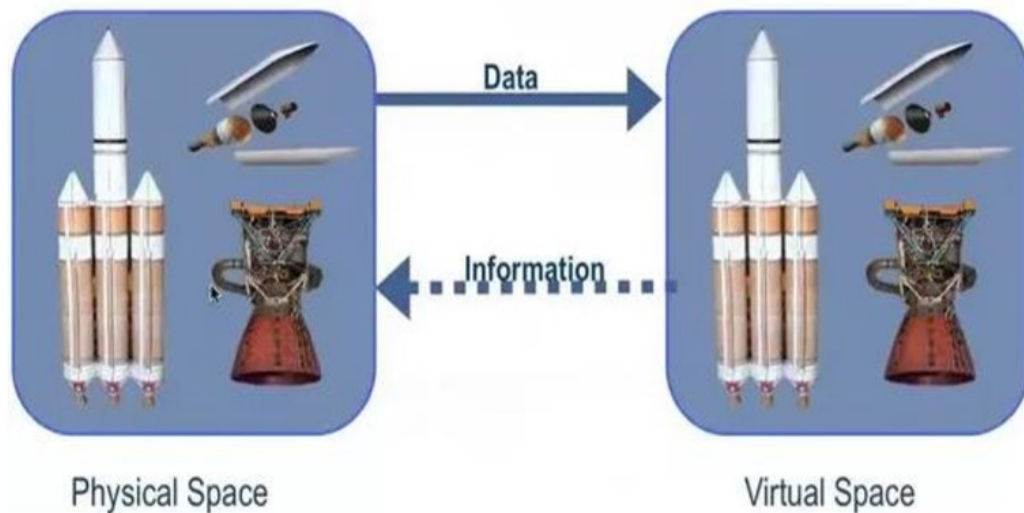
Digital twinin määritelmiin vaikuttaa toimiala, jossa konseptia testataan, sillä jokaisella toimialalla ympäristö on erilainen ja erilainen konsepti on kriittinen eri toimialoille. Digital twiniä on onnistuneesti testattu jo lentokoneiden suunnittelussa, kaluston hallinnassa sekä rakennusalalla (Guo et al. 2019). Guo et al. (2019) jatkaa myös, että konseptia on otettu käyttöön digitaalisissa museoissa, älykkäissä ympäristöissä sekä virtuaalisissa todellisuuksissa. Teollisuutta pidetään kuitenkin tärkeimpänä yksittäisenä tekijänä. Tätä tukee myös Dahmen & Rossman (2018), joiden mukaan digital twiniä vei eteenpäin NASA:n lisäksi erilaiset konseptit, kuten ”smart manufacturing” ja siihen liittyvä ”Industry 4.0” sekä IoT. Haag & Anderl (2017) jatkavat digital twinin taustoittamista siten, että digital twiniin eivät kuulu kaikki digitaaliset asiat, vaan pelkästään relevantit mallit ja niihin tarkoitettu data. Tästä voidaan todeta, että digital twiniä ei ole luotu yhdistelemään IoT:n tyylisesti erilaisia ohjelmistoarkkitehtuureita ja teknologioita yhteen vaan täyttämään sille vaaditut tehtävät yksinkertaisimmalla tavalla.

### 3.2 Erilaiset kehitetyt teoriamallit ja määritelmät

Kuten johdannossa esiteltiin, erilaiset lähteet tukevat erilaisia määritelmiä digital twinistä. Tässä kappaleessa on jaettu erilaiset konseptimallit erilleen ja pohdittu niiden merkitystä, ja kappaleen lopussa näitä vertaillaan keskenään. Erilaisia näkökulmia ja konsepteja on enemmän, mutta tässä esitellään niistä yleisimmät ja eniten toisistaan eroavat.

#### 3.2.1 Alkuperäinen digital twin konsepti

Tässä konseptissa, joka kehitettiin tukemaan tuotteen elinkaaren hallintaa, on kolme erilaista osaa. Grieves loi konseptin fyysisen sekä digitaalisen mallin ja yhteyksien kautta. Tätä on havainnollistettu kuvassa 3, jossa esitellään yksinkertainen määritelmä konseptista.



*Kuva 3 Alkuperäinen teoria (Tao et al. 2018)*

Tämän teorian pohjalta, muut toimijat lähtivät muodostamaan omiin käyttötarkoituksiinsa. Grievesin teoria digital twinistä ei ollut vielä täydellinen, ja toimi vain mallina tarkemmille konsepteille eri käyttötarkoituksiin, jonka voi päätellä muiden konseptien ilmaantumisesta vasta 2010-luvulla. Tähän on voinut vaikuttaa esimerkiksi teknologian kehitys sekä kiristyneempi kilpailu toimintamallien osalta.

### 3.2.2 NASA:n kehittelemä digital twinin visio

National Aeronautics and Space Administration, eli NASA, loi 2010-luvun alussa itselleen digital twin konseptin. Tässä konseptissa digital twin toimii multifysikaalisena sekä monilaajuisena simulaationa, jossa käytetään parhaita mahdollisia fysikaalisia malleja, sensoripäivityksiä sekä kaluston historia dataa todennäköisyyslaskelmien avulla. Tässä kontekstissa kalustolla tarkoitetaan erilaisia ilmassa liikkuvia kulkuvälineitä. Näiden avulla pyritään heijastamaan mahdollisimman tarkasti fysikaalisen kaksosen ominaisuuksia digitaaliseen versioon. Sensoridataa hankitaan fysikaalisen yksikön käyttöaikana koneen sisäisen tietokoneen avulla, johon lisätään tehdyt huoltotoimenpiteet, käyttöhistoria sekä kaikki muut, joka on mahdollista saada datalouhinnan avulla. Yhdistämällä sensoridataa voidaan luoda realistista tilannetta kuvaava jatkuva simulaatio, joka kuvastaa fysikaalisen yksikön kuntoa. Tätä hyödynnetään optimisoimaan tehtävän suoriutumista sekä kaluston elinkaarta. Lisäksi NASA hyödyntää digital twiniä uusien kriittisten vikojen etsimiseen sekä välttämään jo tiedettyjä ongelmia. (Glaessgen & Stargel 2012)

NASA:n luoma konsepti perustuu simulaatiopohjaiseen näkemykseen digital twinistä, johon viitataan laajasti monissa eri tutkimuksissa, kuten Tao et al. (2018) sekä Dahmen & Rossman (2018) mainitsevat tämän olevan yksi merkittävimmistä tekijöistä digital twinin kehityksen ja tunnustuksen kannalta. Vasta NASA:n tekemän tutkimuksen ja käyttöönoton jälkeen, digital twinin käyttäminen ja tutkiminen on laajentunut eri aloilla, jonka voi huomata lähteiden lisääntymisestä viimeisen 3 vuoden aikajaksolla eksponentiaalisesti.

### 3.2.3 Simulaatioteoria älykkäiden kyberfysikaalisten systeemien osana

Koulamos & Kalogeras (2019) määrittelevät digital twinin olevan virtuaalinen esitys, joka toimii reaaliajassa peilikuvana fyysikaaliselle tuotteelle tai prosessille, jonka lisäksi se käsittää sen elinkaaren kokonaan. Digital twin sisältää kuitenkin tietyt ominaisuudet, joista Koulamos & Kalogeras (2019) listaavat virtuaalisuuden, statistisuuden sekä dynaamisuuden, joihin kahteen jälkimmäiseen kuuluu suunnittelu dokumentit sekä simulaatio ominaisuus. Samasta näkökulmasta tukee myös Gabor et al. (2016), joiden mukaan todella luotettavia simulaatioita kutsutaan myös digital twiniksi, jos huomioidaan mallinnettava systeemi. Molemmat lähteet kertovat digital twinin ja kyberfysikaalisten systeemien integroimisesta.

Digital twinin kykenee simuloimaan fyysisen parin käytöstä lisäten sen suorituskykyä huomattavasti ja optimoiden fyysistä versiota tuottamansa datan avulla. Se pystyy lisäksi toimimaan ennakoivan analysoinnin työkaluna, joka laajennettaessa pystyy optimoimaan kokonaisprosessin toimintaa, kuten pullonkaulojen estämisellä, tuotantosysteemien sekä ajanhallinnan tehostamisella ja resurssien tarkemmalla kohdentamisella. Sillä pystyy myös tuottamaan tukea tuotteiden ja prosessien suunnitteluun, jakeluketjun hallintaan sekä uuden tuotteen lanseeraamiseen. Tärkeimpänä erona tavalliseen mallintamiseen on datan saaminen nopeasti tai reaaliajassa fyysiseltä parilta digitaaliselle versiolle. Koulamos & Kalogeras (2019)

Simulaatioteoriaa tukee myös NASA:n kehittämä malli, mutta tässä näkökulmassa on ajateltu enemmän teollisuuden näkökulmasta, joka ilmenee digital twinin käyttötarkoituksesta osana tehtaita ja prosesseja. Tässä näkökulmassa on digital twinillä on osittain lisäksi erilainen käyttötarkoitus. Gabor et al. (2016) toteavat digital twinille olevan tyyppillistä olla osana jo tuotteen tai prosessin alkupäänkehitystä, kun taas NASA:n mallissa keskitytään enemmän ylläpitopuoleen ja hallintointiin. Toisaalta, Gabor et al. (2016) toteaaakin, että digital twinin on kriittistä tuottaa myös digitaaliselle versiolle samankaltaisia tapahtumia sekä toimintoja, joita oikea malli vastaanottaa sekä itse tuottaa, jotta oikeanlaisia havaintoja pystytään muodostamaan.

### 3.2.4 Viisi osainen digital twin

Alkuperäistä teoriaa hyvin paljon muistuttava viisiosainen digital twin koostuu virtuaalisesta- ja fyysisestä versiosta, niiden yhteyksistä, datasta ja palvelusta. Malli nähdään kolmikenttä mallina, jossa reunoilla ovat fyysinen sekä digitaalinen malli, ja kolmantena nähdään palvelu. Jokaisesta reunalla olevasta osasta lähtee dataa digital twininiin mallin keskelle, joka taas välittää informaatiota ja toimintokäskyjä reunaosille. Mallin keskellä oleva digital twin ja siinä oleva data toimii ajurina reunaosille. Jokainen reunaosista on vuorovaikutuksessa keskenään, joka toimii iteratiivisena prosessina. Ajurina toimiva

keskiosa tuottaa korjauksia ja muutoksia reunaosille, jotta niiden välinen yhteistyö olisi tehokkaampaa. Keskiosa rakentaa eri säännösten mukaan digitaalisen osan ja sen päivitykset perustuen ajurissa tapahtuvaan tiedon louhintaan. (Tao & Zhang 2017) Määritelmä jättää paljon aukkoja tiedon siirtoa ja sen hallinnointia koskien. Verrattuna kuitenkin jo esiteltyihin teorioihin ja laskematta mukaan alkuperäistä teoriaa, viisiosainen malli on selkeä ja suoraviivainen esittää. Suurin ero on mallin palveluosa, joka koostuu erilaisista hallintajärjestelmistä, johon puolestaan kuuluu Supply Chain Management (SCM), Enterprise Resource Planning (ERP), Product Lifecycle Management (PLM), Customer Relationship Management (CRM) sekä Plant Design Management System (PDMS) (Tao & Zhang 2017). Palvelun lisääminen osaksi digital twiniä auttaa tuottamaan selkeämpää toimintaa ja mahdollistaa liiketoimintatiedon kuin asiakasdatankin hallinnoimisen.

Fysikaalinen osa tuottaa eri tiloja päivittääkseen virtuaalista osaa ja tarkistaa samalla näiden tarkkuutta. Puolestaan digitaalinen osan tuottamat palautteet hallinnoivat käskyjä, jotta fysikaalinen osa pystyy synkronoitumaan ennalta määrätyn prosessin kanssa. Palvelupuoli tarjoaa palveluita tavallisimpien operaatioiden tukemiseen sekä virtuaalisen osan



**Kuva 4** Digital twinin viisiosainen määritelmä tuotantotiloissa (Tao & Zhang 2017)

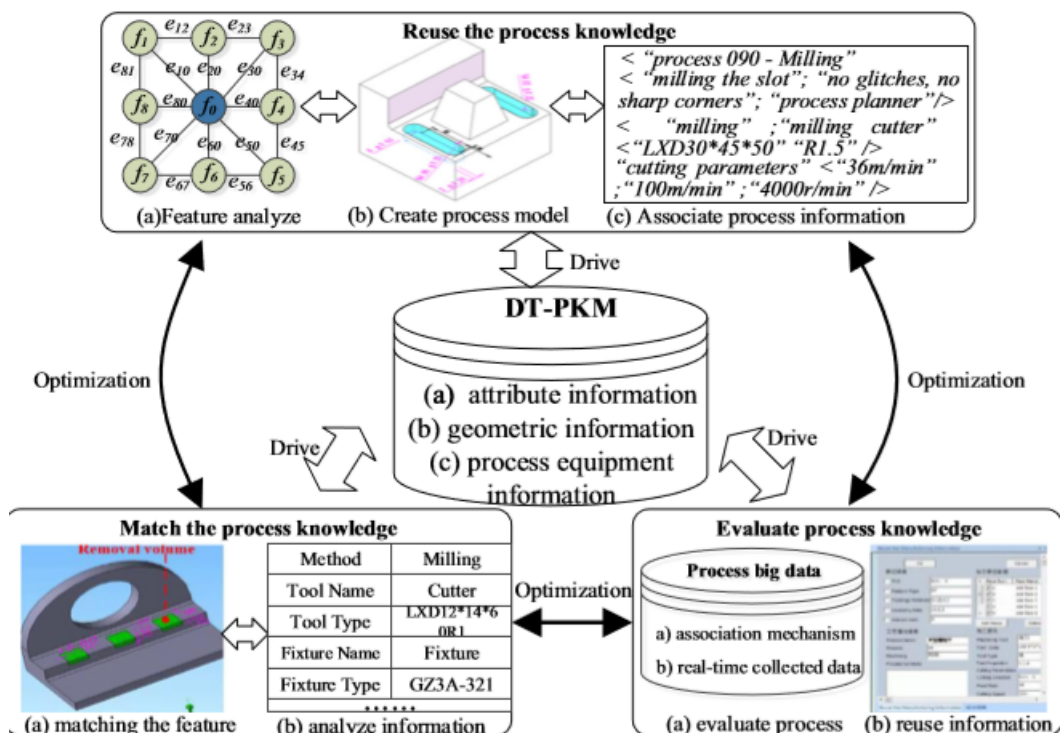
kehittämiseen. Fysikaalisen osan saamat palvelut palvelupuolelta jatkavat fysikaalisesta osasta eteenpäin virtuaaliseen osaan tarkistamista varten, josta tieto liikkuu takaisin palveluosaan korjausehdotusten muodossa. Realistiset statusilat fysikaalisessa osassa lähetetään virtuaalisen osan varmistuksen kautta palautteina ja korjausehdotuksina taas palvelupuolelle. (Tao & Zhang 2017) Tätä mallia on pyritty havainnollistamaan kuvassa neljä, jossa kontekstina on viisiosainen malli tuotantotiloissa.



### 3.2.5 Tiedon ja datan uudelleenkäyttöön perustuva digital twin

Liu et al. (2018) selittävät digital twinin olevan avain käsittelemään suurta dataa luodakseen nopeasti simulaatioita, jotka mahdollistavat arviointeja sekä valmistusprosessien optimointia. Datan ja tiedon lisääntyessä yhteiskunnassa ja teollisuudessa, voidaan nähdä tämä ominaisuus kriittisenä ja tarpeellisenä. ”Big datan”, informaatioteknologian, kyberfysikaalisten järjestelmien sekä pilvilaskennan lisääntymisen takia älykkäät tuotantojärjestelmät ovat saaneet yhä enemmän huomiota (Liu et al. 2018). Teollisuudessa lisääntynyt automaatio ja digitalisoituvat järjestelmät vaativat yhä enemmän dataa teknologian kehittyessä, jota voitaisiin hankkia esimerkiksi jo tiedettyjen asioiden pohjalta. Tätä näkemystä tukee Liu et al. (2018), jotka perustelevat tiedon uudelleenkäyttämisen olevan kilpailukyvyyn pohja nykyisessä liiketoimintaympäristössä.

Kolmiulotteisen suunnittelun (3D) avulla luodaan paljon tietoa sisältäviä prosessisuunnittelujärjestelmiä, joiden prosessimallit sisältävät suuren määrän prosessidataa sekä -tietoa. Yrityksien kannalta on erittäin kriittistä, että tämä prosessidata tulisi tutkituksi sekä uudelleen käytetyksi. (Liu et al. 2018)



**Kuva 6** Digital twiniin perustuva prosessitietämysmalli (Liu et al. 2018)

Kuvassa 6 esitellään digital twiniin perustuvan prosessitietämysmallin rakennetta, jossa voidaan huomata suurta samankaltaisuutta Tao & Zhang (2017) esittelemään viiteen osaan jakautuneeseen digital twin rakenteeseen. Keskellä nähdään digital twin prosessitietämys, joka on jakautunut kolmeen eri osaan. Ominaisuudet-, geometrisuus- ja prosessilaitteiden informaatio ovat kolme eri osaa, jotka kaikki ovat osana prosessitietämys.

Mallin periaate toimii samalla tavalla kuin viiteen osaan jakautuneessa digital twin konseptissa, mutta ulkoreunojen tiloille on asetettu kolme erilaista osaa.

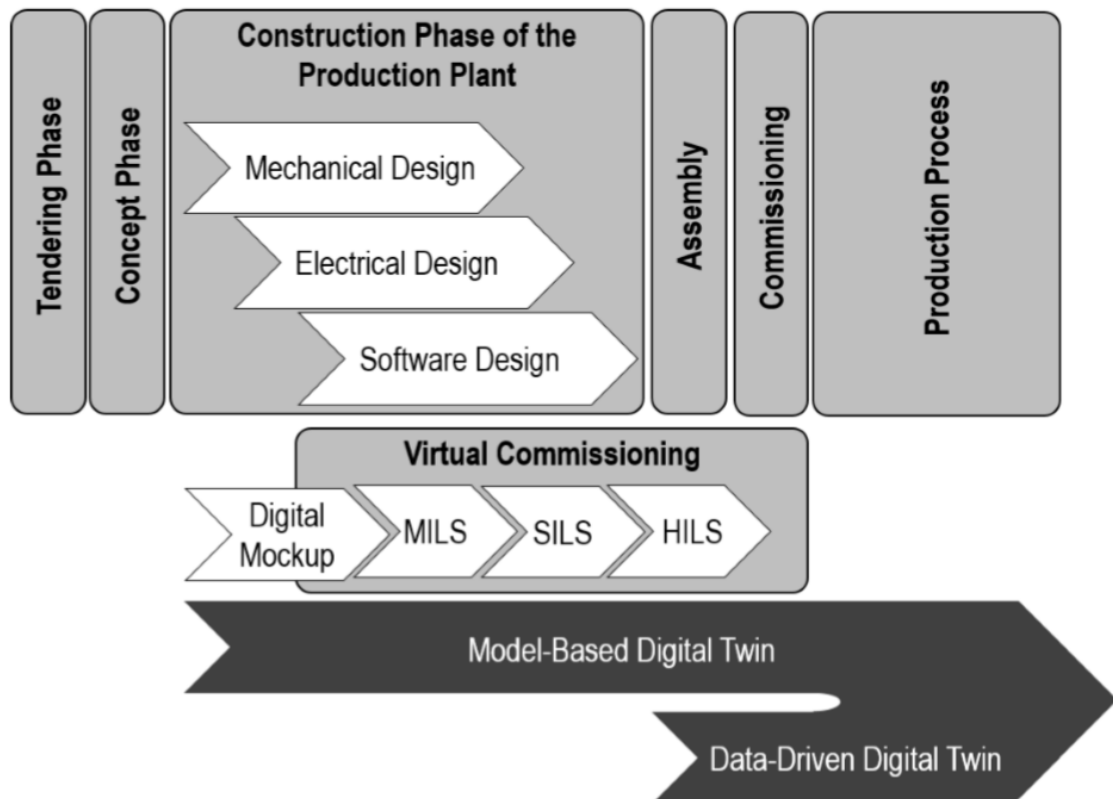
Ylimmässä ulkoreunan osassa, kuvan 3 mukaan, käytetään uudelleen prosessitietoa kolmen eri vaiheen kautta. Ensimmäinen vaihe aloitetaan ominaisuusanalyysillä, josta jatketaan prosessimallin luomiseen ja lopuksi liitetään prosessitieto mukaan. Seuraavassa esitellyssä osassa arvioidaan prosessitietoa ja uudelleen käytetään informaatiota. Tämä osa sisältää myös big dataa, joka koostuu reaaliaikaisesta kerätystä datasta sekä yhdistetystä mekanismista. Viimeisessä osassa taas yhdistetään prosessitieto oikeisiin asioihin. Tässä osassa ominaisuudesta tehdään yhteensopiva sekä analysoidaan informaatiota. (Liu et al. 2018) Tätä konseptia siis kutsutaan yleisesti digital twiniin perustuvaksi prosessitieto malliksi, joka on jalostettu versio viisiosaisesta konseptista.

### **3.2.6 Malliin perustuva digital twin teollisuuden hallintajärjestelmissä**

Digital twiniä pystytään hyödyntämään myös koneoppimisen ympäristönä. Tässä malliin perustuvassa digital twinissä, konsepti perustuu yhdistettyjen hallintajärjestelmien 1:1 mittakaavaan. Malliin perustuva digital twin sallii oikeiden teollisuuden hallintalaitteistojen hyödyntää simulaatio malleja. Tämä mahdollistaa taas laitteiden mallien simuloinnin oikeassa skenaariossa eli oikeiden dynaamisten ominaisuuksien kanssa. Erilaisia testejä ja skenaarioita pystytään digital twiniä hyödyntämällä testaamaan ilman mukautuksia, sillä digital twinissä oleva malli stimuloi digitaalisten ohjauskomponenttien käyttäytymistä. (Jaensch et al. 2018)

Tässä konseptissa kiinnostuksen kohteena on enemmänkin hallintajärjestelmien digitalisoiminen ja yhteen saattaminen konkreettisten hallintajärjestelmien kanssa niin, että sillä voidaan virtuaalisessa ympäristössä simuloida mahdollisimman aidosti sekä tarkasti oikean version kanssa. Lisäksi Jaensch et al. (2018) liittävät konseptiin koneoppimisessa käytetyn vahvistusoppimisen, jota hyödynnetään digital twinissä optimisointiin. Aiemmin esitellyistä konsepteista poiketen, Jaensch et al. (2018) ovat vieneet konsepti ideansa niin pitkälle, että se on suunniteltu koko tuotantolaitoksen elinkaaren ympärille, aina suunnittelusta tuotannon avustamiseen sekä digital twinin saatavuuteen erilaisilla tarkkuuksilla. Jälkimmäisenä mainittuun kohtaan liittyy simulaatiopohjainen suunnittelu, -kehitys, kouluttaminen sekä palvelun luominen. Tähän konseptiin liittyy vahvasti koneoppiminen, jonka Jaensch et al. (2018) toteavatkin olevan vaatimus digital twinille. Verraten aikaisempiin konsepteihin, tässä konseptissa huomioidaan paljon myös teollisuuden laitteistojen ohjelmistopuolta, joka ilmenee Jaensch et al. (2018) tutkimuksesta, jossa he esittelevät yhden käytön digital twinille olevan suunnitteluvaiheessa luotu monia ohjelmistoja ja niiden rajapintoja sisältävä simulaatio, joka sisältää yksittäiset laitteistot, sovellukset sekä muut sähkölaitteet tässä kokoonpanossa. Jaensch et al. (2018) jatkavatkin, että virtuaalinen varmistaminen auttaa pienentämään riskejä. Jaensch et al. (2018) mukaan,

digital twiniä on järkevää hyödyntää myös suunnittelun jälkeen, kuten tuotteiden valmistusvaiheessa tuottamaan tarkempaa visuaalisuutta ja tehostamaan kuvantamista, johon auttaisi datan saaminen tuotantoprosessista.



**Kuva 7** Malliin perustuvan digital twin runko tuotantolaitoksen eri elinkaaren vaiheissa (Jaensch et al. 2018)

Malliin perustuvasta digital twin konseptista on kuitenkin erotettu datapainotteinen osio, johon kuuluu Jaensch et al. (2018) mukaan eri asteiset signaalit ja sensorit, joita digital twin kerää tuotantojärjestelmästä. Kun viimeaikaiseen dataan yhdistetään historiallinen data, saadaan jo aiemmin mainittua big dataa (Jaensch et al. 2018). Kuten kuvassa 7 esitellään, malliin perustuva digital twin toimii yhdessä datapainotteisen digital twinin kanssa, jonka kautta luodaan virtuaalinen toteutus avustamaan mekaanista-, elektronista sekä ohjelmistosuunnittelua. Tätä viedään eteenpäin digitaalisen mallin kautta, josta tehdään mallisilmukka, jota seuraa ohjelmistosilmukka ja viimeisenä laitteistosilmukka. Konseptin mukaan tämän jälkeen pitäisi seurata rakennus-, käyttöönotto sekä lopulta tuotantovaihe.

Samankaltaista konseptia mukaillee myös Dahmen & Rossmann (2018), jotka esittelevät digital twinin yhdessä mallintamisen ja simulaatiopohjaisen suunnittelun kanssa. He esittelevät kolme erilaista näkökulmaa, joista ensimmäinen on samankaltainen Jaensch et al. (2018) esittämän konseptin kanssa. Tämän ”malliin perustuvan järjestelmän suunnittelu näkökulman” tarkoituksena on luoda ideaalisia määrittelyjä järjestelmistä, jotka täyttäisivät käyttäjien vaatimukset. Näkökulmassa huomioidaan vaatimukset, käyttötarkoitukset,

järjestelmien kontekstit sekä käyttäytymiset sekä toiminallinen- ja looginen hajottaminen (Dahmen & Rossmann 2018). Järjestelmämallilla pyritään luomaan tärkeitä suunnitelmia järjestelmien ja simulaatioiden kannalta. Toinen Dahmen & Rossmann (2018) esittelemä näkökulma on järjestelmän suunnitelu näkökulma, jossa kaikki yksityiskohtainen data tuotteen valmistuksen liittyen muodostavat mallin tuotteesta. Kolmannessa näkökulmassa Dahmen & Rossmann (2018) esittelevät mallintamisen ja simuloimisen näkökulman, jossa kiinnostuksen kohteena on koko järjestelmän yhtenäinen testaaminen, jossa huomioidaan erilaiset olosuhteet mahdollisimman realistisesti.

Niin Jaensch et al. (2018) ja Dahmen & Rossmann (2018) edustavat johdannossa esiteltyä toista näkökulmaa, eli simulaatiopohjaista näkökulmaa. Tätä näkökulmaa edustavat esitellyistä konsepteista suurin osa. Nämä kaksi tässä kappaleessa esiteltyä konseptia voidaan osittain kategorisoida samaa näkökulmaa mukailevaksi, jossa suurimpana erona on Jaensch et al. (2018) tukema vahvistusoppiminen. Molemmista voidaan selvästi eritellä kontekstina teollisuus ja tuotanto, sekä kiinnostukseen kohteeksi asettaa järjestelmät ja niiden suunnitteleminen jo malliin, jota digital twinissä käytettäisiin. Samankaltainen konsepti on aiemmin jo luotu, nimeltään synkronoitu simulaatio, jonka Khan et al. (2018) esittelevät. Tässä oikeat kontrollijärjestelmät sekä teollisuuslaitteet syötetään virtuaaliseen muotoon, mutta erona on tämän tekeminen vasta, kun tehdas ja prosessi on käynnissä.

## 4. DIGITAL TWININ HYÖDYT ERILAISISSA KOKONAISSUUKSISSA

### 4.1 Erilaiset testatut ja pidemmälle viedyt kokonaisuudet

Edellisessä luvussa esiteltiin monta erilaista mallia sekä määritelmää digital twinille. Tässä luvussa on tarkoitus erottaa erilaisia digital twin rakenteita sekä tunnistaa niistä saatavia hyötyjä. Kappaleen lopussa esitetään kootusti digital twinistä saatavia hyötyjä näiden esiteltyjen rakenteiden perusteella. Pidemmälle viedyillä rakenteilla tarkoitetaan kokonaisuuksia, joissa digital twin teknologiaa on tutkittu enemmän tai viety käytäntöön asti. Monet näistä ovat edellisen luvun malleista eteenpäin vietyjä toteutuksia, joiden hyötyjä on pystytty jo arvioimaan. Pääosin Scopus -tietokantaa käyttäen tehty kirjallisuusselvitys osoittaa myös sen, että digital twin toteutuksien määrä on vielä suhteellisen vähäinen, joka viittaa taas aiheen uutuusarvoon.

### 4.2 NASA:n suunnittelema digital twin

NASA:n rakentamaan ja visioimaan digital twiniin kuuluu monenlaisia erilaisia osia, joista moni ei ollut vielä vuoteen 2012 mennessä saatavilla. NASA kuitenkin teki päätöksen käyttää parhaita sen hetkisiä teknologioita sekä paikata aukkoja konseptissa hyödyntämällä USA:n ilmavoimien sekä NASA:n omaa jo olemassa olevaa teknologiaa. NASA otti käyttöön F-15 hävittäjien osia testaamiseen, jotta pystyisi etenemään nopeammin kohti digital twinin käyttöönottoa. (Glaessgen & Stargel 2012)

NASA:n suunnittelemassa mallissa digital twiniin luotu malli on luotu materiaalien osalta tarkalleen oikeaa versiota vastaamaan. Materiaalia on mallinnettu mikrorakenteeseen asti, jonka takia heijastaminen sekä jopa poikkeamat valmistuksessa on otettu huomioon. Itse kalustoon asennettu integroitu kuntomittarijärjestelmä tuottaa kriittistä tietoa suoraan digital twiniin, joka toimii tässä tapauksessa yhtenä pääsensorina. Malliin on luotu tarkka versio konkreettisesta versiosta, johon on yhdistetty järjestelmiä ja muita kiinnostuksen kohteena olevia rakenteita, jotta malli täyttää luotettavuuden ehdot. Tähän kuuluu muun muassa lentokoneen runko, työntövoima ja moottorijärjestelmä, energiavarasto sekä koneen kunto. NASA visioi myös digital twinin lukevan sensoridataa niin, että se pystyy tuottamaan reaaliajassa todennäköisyyksiä koneen kunnosta ja sen muutoksista. Tämän lisäksi digital twinin tulisi pystyä laskemaan törmäyksien ja muiden muutosten aiheuttamat seuraukset. Jokainen yksittäinen alus kalustossa saa tässä konseptissa oman digital twininsä, joka voidaan asettaa lentoon tai tehtävälle, ja sille voidaan vapaavalintaisesti asettaa haluttu ympäristö, jonka vaikutuksia voi realistisesti havainnoida digital twinin avulla. Dataa kerätään myös sensorien ympäriltä, kuten koko laivueesta sekä

historiallisesta tiedosta, jotta simulointia saadaan realistisemmaksi. Kokonaiseen konseptiin on tarkoitus tulla myös digitaalinen sertifiointi. (Glaessgen & Stargel 2012)

Erilaisia hyötyjä on paljon, joista suurin osa tulee tarkasta simuloinnista ja todennäköisyyksistä, joita digital twin tuottaa. Tällä NASA pystyy tuottamaan päätöksiä taustalla informaatiota, joka ohjaa tilastollisesti parempiin päätöksiin. Virheiden ja vikatilanteiden havaitseminen ja ennakointi voivat säästää kalustoa, pidentää niiden elinkaarta sekä tässä tapauksessa pelastaa ihmishenkiä. Muita hyötyjä on esimerkiksi kaluston sekä laivueen yleinen hallinnointi, resurssien oikea aikainen kohdistaminen ja lisäksi tiedetään mihin resurssit laitetaan kiinni. Kaikista tärkeimpänä etuna on kuitenkin ennakointi.

### 4.3 Viisiosainen digital twin käytännössä

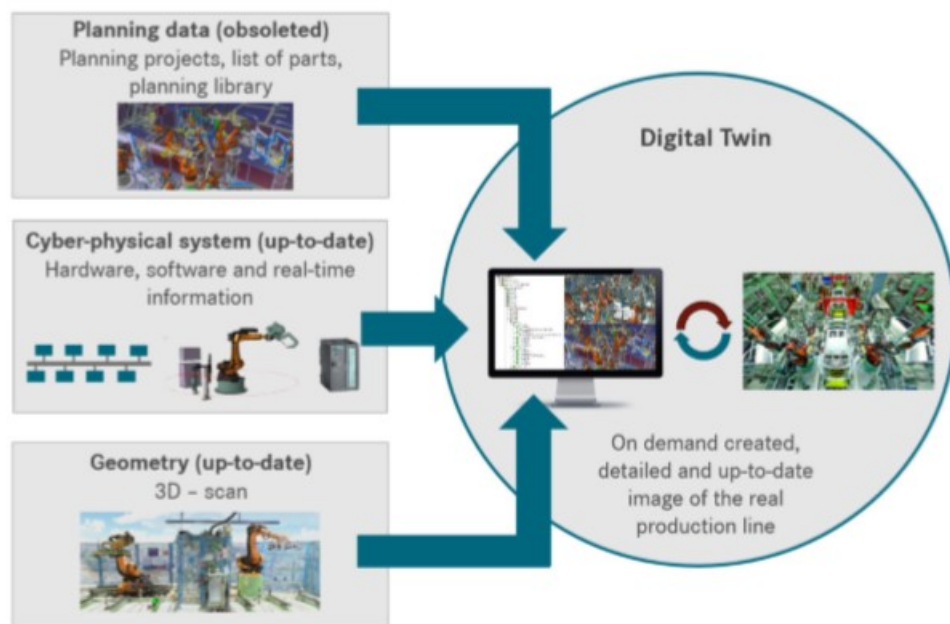
Aiemmin esitellyssä viisiosaisessa digital twinissä on käytössä nimensä mukaisesti viisi eri osaa, jotka ovat palvelu -, digitaalinen -, fyysinen osa sekä itse digital twin ja näiden kaikkien yhteys toisiinsa. Fyysisellä osalla tarkoitetaan ihmisiä, koneita ja järjestelmiä, jotka löytyvät tässä kontekstissa tuotantotiloissa. Digitaalisella taas tarkoitetaan fyysisen virtuaalista muotoa, jossa eri ulottuvuudet sekä geometria huomioidaan. Palveluosaa kuvaa integroitua alustaa, jossa eri järjestelmät ja laitteistot, joita fyysisessä osassa käytetään, käännetään digitaaliseen muotoon. Käytännössä palvelupuoli hakee fyysiseltä osalta dataa virtuaaliseen osaan tämän pyynnöstä ja toisinpäin. Erilaiset algoritmit, mallit ja tietokoneohjelmat sekä työkalut siirretään tällä tavalla. Mallissa keskellä oleva digital twin, kuvan 4 mukaan, sisältää kaikkien edellä mainittujen osien datan, mallintamisen sekä ennakointi ominaisuudet. (Tao & Zhang 2017)

Tuotteiden valmistusprosessista kaikki lähtee liikkeelle tilauksesta, joka tässä konseptissa tapahtuu syötteenä palveluosaan. Valmistusprosessia tukemaan vaaditaan dataa, jota saadaan sensoreilta, jossa syötteenä on resursseja, työntekijöiden työpanos sekä laitteiston kapasiteetti sillä hetkellä, joiden lisäksi simuloinnista saadaan arvio fyysiselle ihmisvoimavaralle, materiaalien suorituskyvyille sekä työkonien riskeille. Lisäksi tuotteen elinkaari data ja prosessidokumentit voidaan siirtää datan mukana. Tässä mainittua dataa voidaan luonnehtia myös fuusioituneeksi dataksi. Kaikki tämä data tuotetaan joko fyysisellä-, digitaalisella- tai palveluosalla itsellään ja ohjataan suoritettujen simulaatioiden jälkeen fyysiseen osaan. Simuloinnin ohella digitaalinen osa tarkistaa mahdolliset virheet ja antaa palautteen vielä palveluosaan. Kun tuotantosuunnitelma on valmis ja resurssit sopivat tuotantoon, fyysinen osa aloittaa valmistuksen, josta lähtee reaaliaikaista dataa simulointiin. Valmistuksen jälkeen, jos tuote hyväksytään, siitä lähtee palaute tuotantoon, että sitä voidaan jatkaa kyseisen tuotteen osalta. Mikäli tuotteessa ilmenee ongelmia valmistuksen jälkeen, sitä arvioidaan verraten fuusioituneeseen dataan, jonka perusteella malli lähetään uudelleen kalibroitavaksi tai laadun tarkkailuun, joista digitaalinen osa ottaa kopin uudelleen simuloinnin tai ennalta määritetyn valmistuksen muodossa. (Tao & Zhang 2017)

Tämän hyötynä voidaan nähdään tuotteen laadun parantaminen, ennakoiminen, ongelmatilanteiden ennaltaehkäiseminen, tasaisuus tuotteen laaduissa sekä erityisesti resurssien huomioiminen. Verrattuna muihin näkökulmiin ja käyttörajoituksiin, tässä Taon & Zhan- gin (2017) kiinnostukseen kohteena olevassa tuotantolaitoksessa kaikki valmistuslait- teista aina työntekijöiden kykyihin sekä teollisuuden järjestelmiin otetaan huomioon niin, että ne pystytään havainnollistamaan sekä ottamaan osaksi laskelmia ennakoiminn ja on- gelmien ehkäisemisen tueksi.

#### 4.4 Mallipohjainen suunnittelu ja teollisuusjärjestelmät integroituna digital twiniin

Jaensch et al. (2018) suorittamien testien mukaan malliin pohjautuva digital twin paransi järjestelmien laatua, kun testausta suoritettiin toivotuissa ja ei toivotuissa ympäristöissä. Toinen testien osoittama hyöty oli riskien pieneneminen projektin hallinnassa. Jaensch et al. (2018) jatkaa myös, että autonominen ongelman ratkaisu käyttäen digital twiniä on mahdollista toteuttaa yhdessä tekoälyn kanssa. Tässä tarkoituksena on hyödyntää aiem- minkin mainittua vahvistusoppimista. Jaensch et al. (2018) prosessi kulkisi niin, että on- gelma vietäisiin manuaalisesti tai automaattisesti digital twiniin, joka puolestaan toteut- taisi ratkaisun simulaatiomallia sekä prosessidataa hyödyntäen.



**Kuva 8** Digital twin mallipohjaisessa toteutuksessa teollisuuslaitoksessa (Biesinger et al. 2018)

Vaativuutena tälle digital twin toteutukselle Jaensch et al. (2018) listaavat kaksi avain- kohtaa: tekoälyä tukeva ympäristö sekä data painotteinen mallintaminen. Tähän Biesin- ger et al. (2018) esittävätkin ratkaisua, joka esitetään kuvassa 8. Kuvassa 8 digital twiniin yhdistetään ajan tasalla oleva CPS, 3D-geometria sekä suunnitteludata. Biesinger et al.

(2018) mukaileekin Jaensch et al. (2018) näkökulmaa, jossa CPS on otettu huomioon, mutta lisäksi tähän 3D-pohjaisen mallin tehtaasta, joka on ajan tasalla. Jaensch et al. (2018) näkökulmassa on tarkempi resurssien mittaaminen ja tietokonepohjainen ongelman ratkaiseminen sekä todennäköisyyslaskenta eli tehokkaampi simulointi verrattuna Biesingerin et al. (2018) näkökulmaan. Suurin haaste, jonka Biesinger et al. (2018) listavat on resurssien ero virtuaalisessa suunnittelussa sekä konkreettisesti rakentamisessa. Toinen suuri haaste, jonka he esittelevät, on konseptisuunnittelun resurssikirjaston ja nykyisten laitteiden informaation yhteen saattaminen sekä hallinnoiminen.

## 4.5 Esiteltyjen kokonaisuuksien tuottamat hyödyt

Kostenko et al. (2018) listaa Industry 4.0:aan viittaavassa tutkimuksessaan erilaisia hyötyjä, joita digital twin tulisi tarjota:

1. Kyvyn laajentaa prosessihierarkiaa
2. Kyvyn luoda erilaisia rajapintoja eri hierarkian tasoille
3. Skaalautuvuutta, jossa voidaan monimutkaistaa jokaista hierarkia tasoa sekä lisätä yksityiskohtaisuutta huomattavasti
4. Joustavuutta, jossa pystytään tuomaan kaikki tarvittavat teollisuusprosessit saman tarkastelu järjestelmän pariin
5. Visuaalisen mukautuvaisuuden, jossa pystytään määrittelemään haluttavat hierarkia tasot sekä tiedon yksityiskohtaisuus
6. Mallin, jossa selviää resurssitiedot ja erilaisten teollisuusjärjestelmien hallinnointilogiikka
7. Viitekehysten, joka yhdistää erilaiset mallinnustavat sekä resurssien ja laitteiden monimutkaiset ominaisuudet
8. Kommunikaatiokerroksen, joka ylläpitää katkeamatonta datan liikkumista fyysisen kerroksen ja digital twin välillä.

Tässä luvussa esitetyt kolme erilaista kokonaisuutta vastaavat jokainen osittain näihin hyötyihin, joita digital twinin tulisi tarkoituksenmukaisesti tuottaa. NASA:n tuottama digital twin pystyy tuottamaan näistä suurimman osan, mutta ei itsessään ole teollisuuskontekstiin luotu, jolloin teollisuudenhallintajärjestelmät sekä näiden esittäminen visuaalisesti eivät luonnollisesti ole mukana. NASA:n digital twin laajentaa prosessihierarkiaa monelle eri tasolle hajottamalla perinteiset fyysiset toimet laivueiden kunnossapitoon liittyen sekä lentokaluston hallinnointiin liittyvät tehtävät. Tässä tapauksessa digital twin tuottaa visuaalisesti tietoa jatkuvalla syötöllä koneiden tilasta, joka tässä tapauksessa käsitellään resurssina. Heidän tuottama kokonaisuus kattaa näistä kaikki kohdat paitsi kohdan kuusi, mikä johtuu teollisuuskontekstin puuttumisesta. Samasta syystä NASA:n luoma kokonaisuus ei voida vertailla teollisuuden tarpeisiin, minkä voi perustella myös lentokaluston ja hallintajärjestelmien välimatkojen perusteella, sillä lähiverkkotekniikka on hyödytöntä tässä tapauksessa ja toisaalta se on erittäin olennaista teollisuudessa.



Viisiosainen digital twin kokonaisuus taas keskittyy enemmän teollisuuden valmistamiin tuotteisiin sekä niiden hallinnoimiseen. Lisäksi kokonaisuudessa otetaan huomioon resurssillisesti asiat huomioon tarkemmin, kuin missään muussa esitellyssä mallissa. Ver-raten Taon & Zhangin (2017) esittelemään mallia Kostenko et al. (2018) esittelemään hyötylistaan, voidaan todeta niiden osuvan hyvin lähelle toisiaan. Mielenkiintoisin asia tässä mallissa on painopiste digital twinin kokonaisuuden hallinnassa ja hierarkia tasojen laajentamisessa, johon malli on pääosin luotu. Tässä kokonaisuudessa Tao & Zhang (2017) esittelevätkin järjestelmän toimivan syyseuraus periaatteen mukaisesti luoden rik-koutumattoman ketjun, joka toisaalta tarjoaa dataa digital twiniin sekä lopulta käyttäjälle hallinointiin sekä visualisointiin. Tämä kokonaisuus pystyy täyttämään esitetystä listasta kaikki, mutta se ei toisaalta ota kantaa 5:een tai 6:een kohtaan, johon kuuluu teollisuus-järjestelmien hallinointia ja loppukäyttäjälle visualisointia, jotka jää tutkimuksessa hie-man kysymysmerkiksi.

Viimeisessä esitetyssä kokonaisuudessa, jonka Jaensch et al. (2018) esittelivät, oli pää-painona nimenomaan teollisuusjärjestelmien integrointi osaksi digital twiniä, jotta digital twin toimi laitoksen järjestelmien yhdyskohtana. Tässä kokonaisuudessa on osaltaan suu-rimmat vaatimukset tekoälypohjaisen ympäristön takia, mutta toisaalta toimiessaan Jaensch et al. (2018) esittelevät sen pystyvän suorittamaan ongelmanratkaisua automaatisesti. Kokonaisuus perustuu 1:1 mittakaavaan, jossa malliin on integroitu aitoa käyttäy-tymistä vastaavat teollisuuslaitteet sekä niiden hallinointijärjestelmät, jotka tuottaisivat ympäristöltään autenttisen heijastuksen fyysisestä versiosta. Tämä kokonaisuus pystyy tuottamaan esitetystä listasta kaikki kohdat, mutta pääpainonaan kohta neljä. Tämän li-säksi se ei ota kantaa edellä esitettyjen kokonaisuuksien tavalla kohtaan kahdeksan, muuta kuin toteamalla sen olevan tarpeellista.

Esitetystä listasta voidaan todeta sen olevan erittäin osuva hyötyjen arvioimiseen. Listaa voisi toisaalta pitää lähtökohtana hyötyjen määrittelemiselle digital twiniä tutkiessa ja suunniteltaessa, sillä käyttötarkoituksesta ja kontekstista riippuen se valjastetaan usein hyödyttämään muillakin tavoilla. Nämä esiteltyt kokonaisuudet tuovat esimerkkinä seu-raavanlaisia hyötyjä, jotka esitetään alla olevassa kuvassa 9.

NASA:n luoma digital twin kokonaisuus	Viisiosainen digital twin kokonaisuus	Mallipohjainen digital twin
<ul style="list-style-type: none"><li>• Reaaliaikainen todennäköisyyslaskenta perustuen laivueen sensoreihin ja historialliseen dataan</li><li>• Tuotteen elinkaaren tarkastelu ja ongelmien ennakointi</li><li>• Eriolaisten skenaarioiden testaaminen realistisessa digitaalisessa ympäristössä</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tuotteiden ominaisuuksien reaaliaikainen tarkastelu</li><li>• Resurssien reaaliaikainen tarkastelu, jossa huomioitu myös työntekijöiden tehokkuus</li><li>• Tuotantokapasiteetin laskeminen tarkasti</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Riskien pienentämien laadun parantamisella</li><li>• Autonominen ongelmanratkaisu tekoälyä ja erityisesti vahvistusoppimista hyödyntäen</li><li>• Reaaliaikaisen tilanteen tarkastelu 3D-mallin avulla</li></ul>

*Kuva 9* Esiteltyjen kokonaisuuksien tuottamia hyötyjä

## 5. DIGITAL TWININ LUOMINEN TEOLLISUUDEN TUEKSI

### 5.1 Digital twin osana teollisuutta

Tässä kappaleessa tarkastellaan digital twiniä teollisuuskontekstissa, jossa pääpainona on teknologian käyttöönottoaminen sekä hyödyntäminen. Edellisten kappaleiden mukaan, digital twiniä voidaan käyttää erilaisissa konteksteissa eri tavoin, mutta pääpaino digital twinillä on tällä hetkellä teollisuudessa, josta kertoo tietokannasta löytyvien lähteiden painottuminen pääosin teollisuuden ympärille. Toisaalta tämä selittyy myös sillä, että teollisuuden näkökulmasta haasteina tulevat lähivuosina olemaan lisääntynyt tiedon tarve ja tuotannon parempi hallinnointi, jotka perustuvat yleisen digitalisaatioon ja sen kehitykseen teollisuudessa. Yrityksille tulisi tarjota ratkaisuja, jotka ottavat nämä haasteet huomioon. Digital twinin tuoreuden ja teknologian ennakoinnin perusteella voidaan sanoa, että digital twin ei ole saavuttanut vielä standardoitua asemaa tai konseptia, joten on odotettavissa vielä suuriakin muutoksia ja läpimurtoja tulevina vuosina, joka osittain selittyy myös teknologian kehityksellä. Tämän takia suurien investointien tekeminen on ongelmallista, mutta ovat kuitenkin tarpeellisia, jotta teknologiaa saadaan eteenpäin. Tämän takia tehtyjen ratkaisujen tulisi olla avoimia muutoksille sekä päivityksille, jotta konsepti pysyy kilpailukykyisenä. Tarpeellisuudesta on vaikea argumentoida, sillä Biersinger et al. (2018) osoittivat, että digitaalinen heijastuma fyysisestä versiosta pystyy vähentämään tehtyjen tutkimuksien mukaan jopa 75 % virheistä.

Teollisuustarkoituksissa digital twinin hyödyllisyys on tämän tutkimuksen ja lähteiden mukaan suurta. Digital twiniä pystytään käyttämään melkein missä tahansa alalla tehostamaan koko prosessia tai vaihtoehtoisesti vain osia siitä. Tehtyjen havaintojen perusteella, digital twin tulee yleistymään teollisuudessa seuraavien vuosien aikana yhä isompien teknologiayhtiöiden panostaessa tähän. Suurimpia hyötyjä digital twinistä teollisuuteen tulee olemaan riskien minimointi, teollisuusjärjestelmien hallinta, laadunvarmistaminen sekä resurssien – ja tuotannon hallinnointi. Näiden lisäksi ennakointimahdollisuudet simuloinnilla sekä ennaltaehkäisevä suunnittelu sekä -toiminta ovat digital twin vetäviä tekijöitä lähivuosien aikana, sillä ongelmanratkaisu ja tekoälypohjaiset ympäristöt ovat vielä pois listalta teknologian kehittymättömyyden vuoksi.

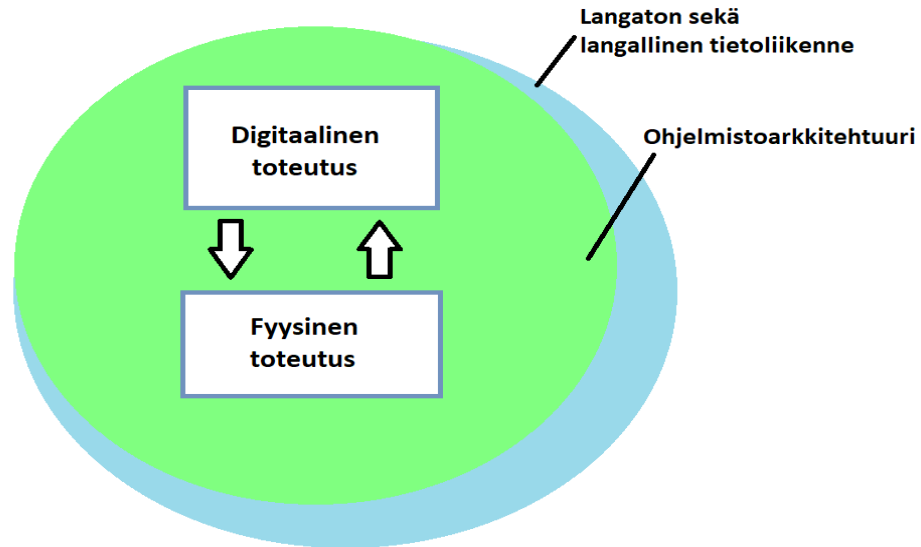
#### 5.1.1 Digital twinin luominen

Digital twinin luominen tapahtuu tämän kirjallisuusselvityksen tuottamien havaintojen perusteella seuraavaksi kuvatulla ja ehdotetulla tavalla. Aluksi on tärkeintä tietää, mikä on konseptin tavoite, konteksti sekä mitä haastetta sillä halutaan ratkaista. Kuten Haag & Anderl (2017) esittelevätkin, digital twin luodaan yksinomaisesti ratkaisemaan sille

tarkoitettua haastetta ja tuottamaan arvokasta tietoa yritykselle. Tämän takia on kriittistä saada aluksi laaja selvitys siitä, mihin tarkoitukseen digital twin tulee ja kuinka se sopii yrityksen tämän hetkiseen teknilliseen ratkaisuun. Digital twin voidaan ottaa käyttöön prosessin ja tehtaan ollessa käynnissä tai jo suunnitteluvaiheessa, missä molemmissa digital twin täyttää erilaisia tarpeita. Suunnitteluvaiheessa digital twinin hyödyt kohdistuvat rakennuskonsultoinnin tarkkuuteen sekä ongelmien välttämiseen, tehden samalla digital twinin integroimisesta itse valmiiseen tehtaaseen helpompaa. Lisäksi suurta tietomäärää on kriittistä arvioida heti aluksi, sillä tiedon määrä voi helposti ylittää useiden terabittien määrän, jolloin koko prosessin tulisi olla mukautuva suureen datamäärään ja sen säilömiseen (Xu et al. 2018).

Jos digital twiniä lähdetään toteuttamaan vasta suunnitteilla olevaan tehtaaseen, on digital twinin tehtävänä lähteä tukemaan suunnittelua ja tiedonhallintaa. Esimerkiksi fyysisen ympäristön virtuaalisen simuloinnin avulla pystytään koetestaamaan mahdollisesti koko yrityksen ydintoiminta läpi (Jaensch et al. 2018). Tässä vaiheessa digitaalinen osa tuottaa esimerkiksi simulointia, johon integroidaan suunnitellut laitteet sekä niiden järjestelmät havainnollistamaan mahdollisimman oikealla tavalla kyseisen vaihtoehdon toimivuutta. Tässä tapauksessa kaikki käytettävä data tulee pääosin digitaalisesta ympäristöstä itsestään, mutta laitteiston ominaisuuksia voidaan tuoda myös jo olemassa olevista laitoksista. Vaikka fyysistä osaa ei vielä ole olemassa, digitaalinen osuus vaatii silti suuret investoinnit ohjelmistojen vaativuuden vuoksi.

Jos digital twiniä lähdetään toteuttamaan olemassa olevaan laitokseen, tärkeintä on pyrkiä mallintamaan nykyinen toiminta mahdollisimman tarkasti, jotta suunnitelmat ja todennäköisyyslaskemat sekä ennakoimiset, joita digital twin tuottaa, ovat täysin luotettavia. Lisäksi on otettava huomioon toteutuksen laajuus, tarkkuus sekä nykyisten laitteiden yhteistyökyvykkyys tässä isossa integroimisessa. 3D skannaus voidaan asettaa pohjaksi tehtävälle 3D mallille, jossa jokainen yksittäinen komponentti saa omat ominaisuutensa. Tehtävän mallin tarkkuus riippuu täysin käyttötarkoituksesta; laajaan toteutukseen voidaan ottaa mukaan erillisten laitteiden järjestelmien yksityiskohtainen simulointi, kun taas pienemmässä toteutuksessa näiden laitteiden tekemän prosessin tulos voi olla ainoa tarvittava osa. Näiden lisäksi tulee huomioida yleinen yhteensopivuus järjestelmien, laitteiden sekä yhteyksien osalta. Sensorien ja muiden datalähteiden selvittäminen on kriittistä, jotta digital twiniä voidaan ylläpitää ja sen tarkkuuteen luottaa, kun siihen tuleva data on monipuolista ja useammasta lähteestä. Verkkoyhteyksien selvittäminen sekä mahdollisen lähiverkkotekniikan mahdollisuus on myös kriittistä selvittää, sillä Zakol-daev et al. (2018) perustelevat IoT:n olevan yksi tärkeimmistä osista digital twinissä, jos sitä käytetään ympäristössä, jossa laitteiden välimatka on suhteellisesti lyhyt. Vaikka jokainen näkökulma digital twinin rakenteesta eroaakin toisistaan tarkoituksen mukaisuu-den ja kontekstin perusteella, samankaltaisuuksia voidaan silti nostaa esille.



*Kuva 10 Digital twinin olennaiset osat ja niiden yhteydet toisiinsa*

Kuvassa 10 digital twinin olennaisimmat osat on esitelty sekä suhteet toisiinsa. Digital twinin rakenne on helpointa jakaa näihin osiin esiteltäessä, jolloin sen toimintaperiaate sekä vaaditut ominaisuudet voidaan esitellä sekä jakaa ne tiettyjen yläkäsitteiden alle. Kuvaa 10 mukailten, voidaan digital twinin rakennetta jakaa tarkempiin osiin yhdessä niihin kuuluvien ominaisuuksien ja vaatimuksien kanssa.

#### Digitaalinen toteutus

- 3D-malli
- Integroidut teollisuusjärjestelmät sekä laitteistoinformaatio

#### Fyysinen toteutus

- Sensorit
- Laitteiden ja järjestelmien sopivuus tiedon välitykseen keskenään sekä rajapintojen mahdollisuudet välittää reaaliaikaista järjestelmä- ja prosessitietoa digital twiniin
- Palvelimet tiedon varastointiin ja prosessointiin

#### Langaton sekä langallinen tietoliikenne

- Sopiva lähiverkkotekniikka laitteistojen välille
- IoT-tuki; monen laitteen yhtäaikaisten tiedonvälitys minimaalisella viivellä
- Internet yhteys myös sisäisen verkon ulkopuolelle, jotta informaatio on myös eri päätelaitteilla saatavilla

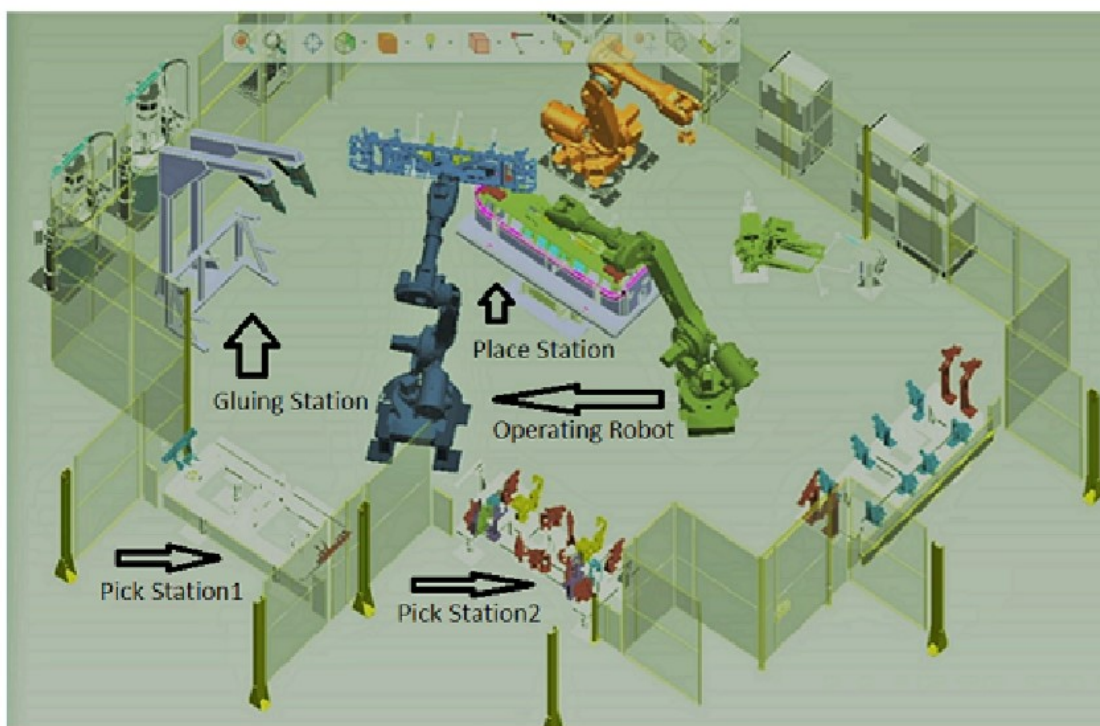
#### Ohjelmistoarkkitehtuuri

- Digital twin ympäristö, jossa mahdollisuus todennäköisyysslaskentaan suuren datan avulla sekä mahdollisuudet simulointiin sekä mallintamiseen -> yksi ohjelmisto tai ohjelmistoperhe, jossa rajapinnat sallivat tiedon esteettömän kulun
- Ohjelmistot fyysisen datan prosessointiin sekä muokkaamiseen eteenpäin lähetettäväksi
- Tietokirjastot, jotka vastaanottavat tietoa digital twin ympäristöstä sekä teollisuuslaitteistoilta suoraan ja lähettävät tietoa ulospäin molempiin suuntiin

*Kuva 11 Digital twinin olennainen rakenne avattuna*

## 5.2 Virtuaalinen malli tehtaasta osana digital twiniä

Digital twin tarvitsee kuitenkin lisää keinoja visuaalisuuden korostamiseen, sillä eniten teknologia pystyy tarjoamaan, kun hyödynnetään sitä myös kolmiulotteisesti, jolloin hahmottaminen sekä ymmärtäminen ovat paljon sujuvampaa. Teollisuuskontekstissa tämä tarkoittaisi tuotantopuolen havainnollistamista esimerkiksi 3D-mallin luomisen avulla (Biesinger et al. 2018).



*Kuva 12 Havainnointikuva fyysisen tuotantopuolen digitalisoinnista (Khan et al. 2018)*

Kuten kuvassa 12 huomataan, 3D malli voidaan toteuttaa esimerkiksi vain yhdestä tuotannon solusta. Näitä 3D malleja voidaan luoda monilla tapaa, mutta yleisin tapa on esimerkiksi 3D-skannaus jo toteutusta tehtaasta tai mallin rakentaminen CAD-ohjelmistoilla tai näitten yhdistelmä (Biesinger et al. 2018). Biesinger et al. (2018) jatkaakin, että tilan hallinnoin ja asetteluun muuttuessa, päivittäminen on tehokasta ja nopeaa. Zipper et al. (2018) jatkaakin, että virtuaalista mallia voidaan hyödyntää yhdessä simuloinnin kanssa niin, että digital twin havaitsee laitteistojen välisen kommunikoinnin ja tarkkailee laitteiden tekemää työtä, joka voidaan animoida 3D-mallissa digital twinin avulla. Esimerkiksi ajoneuvojen kanssa virtuaalista mallia ja animointia 3D ympäristössä voidaan hyödyntää mallintamaan niiden käyttäytymistä realistisessa virtuaaliympäristössä jo ennen fyysisten versioiden rakentamista (Atorf & Roßmann 2018). Tässä tapauksessa Atorf & Roßmann (2018) esittelevätkin hyödyiksi virtuaalisessa maailmassa sen, että autojen ominaisuuksia pystytään testaamaan eri olosuhteissa ja arvioimaan esimerkiksi hätäjarrutuksen ja törmäyksen vaikutusta.

Lisättyä todellisuutta voidaan myös vahvasti hyödyntää tämän 3D-mallintamisen kanssa. Kritzler et al. (2017) esittelee lisätyn todellisuuden olevan vahva työkalu tuotantopuolen hallintaan, vaikka se onkin herkkä virheille sekä vaatii paljon informaation välittämistä laitteiden, järjestelmien sekä itse lisätyn todellisuuden sovelluksen välillä. Lisätyn todellisuuden avulla pystytäänkin lisäämään uusia pintoja fyysisten kerrosten päälle, joissa informaatiota esitetään (Kritzler et al. 2017). Tämä informaatio voi olla automaattisesti päivittyvää tai reaaliaikaista, mutta hyödyllistä ilman reaaliaikaisuuttakin laitteistojen ominaisuuksien sekä kapasiteettien esittämisen kannalta. Blaga & Tamas (2018) kritisoivat tätä menettelyä siksi, että laitteistot voivat saada helposti väärää dataa käyttäjän paikasta, jonka lisäksi itse AR sovellus voi saada myös väärää paikkatietoa laitteistosta, jolloin lopullinen hyöty jää minimaaliseksi. Tästä menetelmästä poiketen Kritzler et al. (2017) toteaa yhden tärkeimmän hyödyn lisäystä todellisuudesta olevan mahdollisuus siirtää myös fyysinen tuotantotila digitaalisessa muodossa minne tahansa, ja olla vuorovaikutuksessa tämän kanssa, jolloin laitteiston fyysisellä sijainnilla ei ole väliä. Molemmat lähteistä perustelevat parhaimman kokemuksen tulevan HoloLens -teknologialla, jossa interaktio tapahtuu käsin, joita kamera tulkitsee eri operaatioiksi.

Lisätyn todellisuuden hallinnointi ei ole kuitenkaan helpointa, sillä vuorovaikutus tapahtuu esimerkiksi sormien liikkeillä. Tätä tukee Blaga & Tamas (2018) näkemys, joiden mukaan AR pystyy tuottamaan kriittisiä ongelmia ihmisten tekemien virheiden takia, jonka lisäksi myös koulutus käyttämiseen voi olla puutteellista ja näin aiheuttaa ongelmia. Tämän takia vuorovaikuttamista voitaisiin helpommin tehdä virtuaalisen todellisuuden kautta, jossa myös ympäristö voidaan havainnollistaa paremmin kuin lisätyssä todellisuudessa.

## 6. YHTEENVETO

Digital twin tarkoittaa erilaisissa konteksteissa eri asioita. Alkuperäisen teorian mukaan digital twin koostuu fyysisestä- ja digitaalisesta osasta sekä niiden yhteydestä. Tällä konseptilla pystyy selittämään teorian parhaiten ja yksinkertaisimmin. Tässä tutkimuksessa käytiin läpi digital twiniä määritelmänä, konseptina sekä lopuksi toteutuksena. Digital twin on edelleen kuitenkin vielä standardoimaton teknologia, joka ei ole yleistynyt millään alalla. Digital twinin jakaminen osiin helpottaa sen kokonaisuuden ymmärtämistä ja tässä tutkimuksessa siitä pystyttiin osoittamaan oleellimmat asiat. Kuitenkaan digital twin ei ole helpoimmasta päästä oleva teknologia käyttöönottoa ajatellen ja vaatii suuren määrän esiselvitystä sekä konsultointia. Koska kyseessä on niin monipuolinen ja vaativa teknologia, sen suunnittelu täytyy tehdä huolellisesti. Digital twin on kuitenkin jo käyttövalmis teknologia, joka toteutuksesta riippuen pystyy tarjoamaan yritykselle mahdollisuuden hypätä Industry 4.0:n mukaan sekä edistää tehokkuutta prosesseissaan. Haasteena digital twinin kehitykselle tulee olemaan suurten datamäärien hallinnointi sekä tekoälypohjaisten ratkaisuiden puuttuminen.

Tästä tutkimuksesta saadut tulokset olivat osittain odotettavissa, eikä ainakaan tämän tutkimuksen myötä paljastunut vielä avainta parhaan mahdollisen digital twinin rakentamiseen. Toisaalta tämän tutkimuksen tulokset ovat erittäin positiivisia jatkon suhteen. Tässä tutkimuksessa onnistuttiin hyvin erittelemään ja tunnistamaan digital twinin piirteitä eri konteksteissa sekä erittelemään digital twinin rakennetta pienempiin osiin. Digital twin on merkittävä osa tulevaa teollisuuden digitalisoitumista, joka tulee vauhdittumaan tulevien vuosien aikana, kun yleistyvä kiertotalous painottaa parempaan suunnitteluun sekä resurssien käyttöön ja liiketoimintaympäristö muuttuu yhä enemmän digitalisoituneeksi. Tämän tutkimuksen osoittamat rakenteelliset asiat sekä digital twinin vaatimukset ovat kuitenkin tärkeää selvitystä. Tutkimuksessa onnistuttiin lopulta saamaan selvät ja suorat vastaukset tutkimuskysymyksiin, jolloin kandidaatintyöstä tuli kokonaisempi paketti. Yleisesti ajateltuna tutkimus onnistui tavoitteissaan, mutta aiheen laajuus ja teknillisuus vaatisi vielä enemmän aikaa, jotta pystyisi täydellisesti ymmärtämään teknologian monipuolisuutta ja sen kokonaisuutta.

Tutkimusta tullaan jatkamaan eteenpäin itsenäisenä työskentelynä vielä Swecon kanssa, jonka tarkoituksena on lähteä pohtimaan konkreettisia ratkaisuja tämän konseptin mahdolliselle käyttöönottamiselle. Lisäksi jatkotutkimustyö on mahdollisesti esiselvityksen jatkamista myöhempää diplomityötä varten, jossa olisi tarkoituksena toteuttaa käytännön ratkaisu ja tutkia siitä saatavia tietoja.



## LÄHTEET

Atorf, L., Rossmann, J., 2018. Interactive Analysis and Visualization of Digital Twins in High-Dimensional State Spaces. Presented at the 2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2018, pp. 241–246. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2018.8581126>

Biesinger, F., Meike, D., Kras, B., Weyrich, M., 2018. A Case Study for a Digital Twin of Body-in-White Production Systems General Concept for Automated Updating of Planning Projects in the Digital Factory. Presented at the IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, pp. 19–26. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/ETFA.2018.8502467>

Blaga, A., Tamas, L., 2018. Augmented Reality for Digital Manufacturing. Presented at the MED 2018 - 26th Mediterranean Conference on Control and Automation, pp. 173–178. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/MED.2018.8443028>

Dahmen, U., Rossmann, J., 2018. Experimentable Digital Twins for a Modeling and Simulation-based Engineering Approach. Presented at the 4th IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2018 - Proceedings. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/SysEng.2018.8544383>

Gabor, T., Belzner, L., Kiermeier, M., Beck M. T., Neitz, A., 2016. A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems. IEEE International Conference on Autonomous Computing (ICAC), Wurzburg, 2016, pp. 374-379. doi: 10.1109/ICAC.2016.29 Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7573168>

Glaessgen, E., Stargel, D., 2012. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/268478543\\_The\\_digital\\_twin\\_paradigm\\_for\\_future\\_NASA\\_and\\_US\\_air\\_force\\_vehicles](https://www.researchgate.net/publication/268478543_The_digital_twin_paradigm_for_future_NASA_and_US_air_force_vehicles)

Dahmen, U., Rossmann, J., 2018. Experimentable Digital Twins for a Modeling and Simulation-based Engineering Approach. Presented at the 4th IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2018 - Proceedings. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/SysEng.2018.8544383>

Haag, S., Anderl, R., 2018. Digital twin – Proof of concept. Manufacturing Letters 15, 64–66. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.006>

Jaensch, F., Csiszar, A., Scheifele, C., Verl, A., 2019. Digital Twins of Manufacturing Systems as a Base for Machine Learning. Presented at the Proceedings of the 2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, M2VIP 2018. Saatavilla <https://doi.org/10.1109/M2VIP.2018.8600844>

Khan, A., Dahl, M., Falkman, P., Fabian, M., 2018. Digital Twin for Legacy Systems: Simulation Model Testing and Validation. Presented at the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, pp. 421–426. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/COASE.2018.8560338>

Kostenko, D., Kudryashov, N., Maystrishin, M., Onufriev, V., Potekhin, V., Vasiliev, A., 2018. Digital twin applications: Diagnostics, optimisation and prediction. Presented at the Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, pp. 0574–0581. Saatavilla: <https://doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.083>

Koulamas, C., Kalogeras, A., 2018. Cyber-physical systems and digital twins in the industrial internet of things. *Computer* 51, pp. 95–98. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/MC.2018.2876181>

Kritzler, M., Funk, M., Michahelles, F., Rohde, W., 2017. The virtual twin: Controlling smart factories using a spatially-correct augmented reality representation. Presented at the ACM International Conference Proceeding Series. Saatavilla: <https://doi.org/10.1145/3131542.3140274>

Liu, J., Zhou, H., Tian, G., Liu, X., Jing, X., 2019. Digital twin-based process reuse and evaluation approach for smart process planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 100, pp.1619–1634. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2748-5>

Maurer, T., 2017. What is A Digital Twin? Saatavilla: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Digital-TwinKnowledge-Base/What-is-a-digital-twin/ta-p/432960>.

Panetta, K., 2018. 5 Trends Emerge In Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018. Saatavilla: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>

Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K.D., 2015. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing 48, pp. 567–572. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315003808>

Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S.C., Nee, A.Y.C., 2018. Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*. pp. 1-19. Saatavilla: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2018.1443229>

Tao, F., Zhang, M., 2017. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8049520>

Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A.Y.C., 2018. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 1–1. Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8477101>

Xu, Y., Bondaletova, N.F., Kovalev, V.I., Komrakov, A.V., 2018. Digital Twin Concept in Managing Industrial Capital Construction Projects Life Cycle. Presented at the Proceedings of 2018 11th International Conference “Management of Large-Scale System Development”, MLSD 2018. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/MLSD.2018.8551867>

Zakoldaev, D.A., Gurjanov, A.V., Kochubey, D.R., Zharinov, I.O., 2018. Application of imitation modelling means to create digital twins of the Industry 4.0 company technological equipment. Presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Saatavilla: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/450/3/032006>

Zipper, H., Auris, F., Strahilov, A., Paul, M., 2018. Keeping the digital twin up-to-date - Process monitoring to identify changes in a plant. Presented at the Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 1592–1597. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2018.8352419>