

Digitaalinen kaksonen -teknologian inhimillinen ja kestävä käyttöönotto työturvallisuuden kehittämisessä (HumanDT)



Työsuojelurahasto
Arbetarskyddsfonden
The Finnish Work Environment Fund



Ilkka Asikainen
Marika Lehtola
Tuula Liukkonen

Työterveyslaitos

PL 40

00251 Helsinki

www.ttl.fi

© 2026 Työterveyslaitos ja kirjoittajat

Hanke on toteutettu Työsuojelurahaston tuella.

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman asianmukaista lupaa.

ISBN 978-952-391-249-6

Tiivistelmä

HumanDT-hankkeessa tutkittiin, miten teollisuuden digitaaliset kaksoset (Digital Twins, DT) voidaan suunnitella ja ottaa käyttöön tavalla, joka tukee työturvallisuutta ja käyttäjien hyvinvointia, huomioiden eettiset seikat ja inhimillisiä tekijöitä. Hankkeen erityinen painopiste oli ihmiskeskeisyydessä, mikä on keskeistä myös EU:n Industry 5.0 -visiossa.

Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksella sekä DT-kehittäjiä ja tutkimuslaitoksia haastatteleamalla. Kirjallisuuskatsaus tarkasteli kolmea näkökulmaa: 1. Inhimilliset tekijät DT-ratkaisuissa 2. Organisatoriset tekijät DT-tekniikan käyttöönotossa ja 3. Eettiset kysymykset erityisesti tietosuojan ja työntekijöiden valvontaan liittyen.

Haastattelujen tulosten perusteella DT-tekniikkaa hyödynnetään laajalti eri toimialoilla, kuten vesihuollossa, energia-alalla, autoteollisuudessa ja valmistavassa teollisuudessa. DT-ratkaisut tarjoavat merkittäviä hyötyjä: parempaa tilannekuvaa, päätöksentekoa, ennakoivaa kunnossapitoa, turvallisuutta, ergonomiaa sekä mahdollisuuden testata uusia ratkaisuja nopeasti ja vähäisillä kustannuksilla.

Tulokset korostavat, että onnistunut DT-suunnittelu edellyttää tiivistä yhteistyötä loppukäyttäjien kanssa. Käyttäjien osallistaminen jo varhaisessa vaiheessa varmistaa sovellusten käytettävyyden, vähentää epäluuloja ja parantaa tekniikan hyväksyttävyyttä. Käyttöliittymien suunnittelussa on otettava huomioon erilaisten käyttäjäryhmien – operaattorien, asiantuntijoiden ja johdon – erilaiset tarpeet.

Hankkeen päätuotos on ohjeistus (guideline), joka tukee teollisuuden toimijoita DT-ratkaisujen ihmiskeskeisessä suunnittelussa. Ohjeistus sisältää työkaluja suunnittelun tueksi: 1. HF tool - DT suunnittelun taustatietojen keruuseen 2. Inhimillisten tekijöiden tarkistuslista DT-sovellusten riskien arviointiin 3. Teknisiä strategioita inhimillisten tekijöiden huomioimiseksi suunnittelussa sekä 4. Käyttökuvauksia teollisuuden DT-sovelluksista.

DT-tekniikan potentiaali teollisuudessa on suuri etenkin, jos tekniikka suunnitellaan ihmislähtöisesti, eettisesti ja yhteistyössä käyttäjien kanssa. Näin DT-ratkaisut tukevat turvallista, kestävä ja tuottavaa teollista työtä Industry 5.0:n hengessä.

Alkusanat ja kiitokset

Digitaalinen kaksonen (Digital Twin, DT) on reaaliaikaisesti päivittyvä ja kohteeseensa vaikuttava virtuaalinen malli fyysisestä kohteesta, kuten tuotantolaitteesta. Digitaalisten kaksosten teknologia on yleistymässä teollisuudessa. Sitä sovelletaan muun muassa prosessien optimoinnissa, tuotannonsuunnittelussa ja kunnossapidossa. DT-sovellukset vaativat runsaasti sekä laitteiden, prosessien että työntekijöiden mittarointia, jolloin inhimilliset tekijät ja tietosuojasiat nousevat tärkeiksi. Tässä tutkimuksessa laadittiin ohjeistus, miten digitaaliset kaksoset suunnitellaan käyttäjälähtöisesti ottaen huomioon työturvallisuus, inhimilliset tekijät ja eettiset kysymykset.

Tutkimus oli Safëra-hanke, joka toteutettiin yhteistyössä espanjalaisen Tecnalian kanssa. Kiitämme antoisasta yhteistyöstä Jesús M. López de Ipiñaa ja Paula Morellaa Tecnaliasta. Lämmin kiitos myös Työterveyslaitoksen tutkimusprofessori Anna-Maria Teperille tutkimuksen tukemisesta inhimillisten tekijöiden osalta. Kiitämme myös VTT:n Tomi Kanervaa arvokkaasta panoksesta hankkeen suunnittelussa ja toteutuksessa. Kiitokset tutkimuksen viestinnästä vastanneelle Talvikki Susiluomalle ja talousasiat hoitaneelle Suvi Niemiselle.

Kiitämme Työsuojelurahastoa, joka rahoitti tutkimusta Työterveyslaitoksen ohella.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Alkusanat ja kiitokset	4
Sisällysluettelo	5
1 Johdanto	7
2 Tavoitteet	7
3 Aineisto ja menetelmät	8
3.1 Kirjallisuusselvitys	8
3.2 Haastattelut	9
4 Tulokset	10
4.1 Kirjallisuusselvitys	10
4.1.1 Inhimilliset tekijät teollisuuden DT-ratkaisuissa	10
4.1.2 Organisaation toimintaan liittyvät tekijät teollisuuden DT-ratkaisuissa	15
4.1.3 DT-ratkaisuiden suunnitteluun ja toteutukseen liittyvät eettiset kysymykset	16
4.1.4 Huomiot ja rajoitukset	18
4.2 Haastattelut	18
4.2.1 Millaisia tuotteita ja palveluja DT:n loppukäyttäjäorganisaatiot tuottavat	18
4.2.2 Mihin tarkoituksiin loppukäyttäjät hyödyntävät DT:itä ja mitä hyötyjä niistä saadaan?	19
4.2.3 Millaista yhteistyötä DT-suunnittelijat toteuttavat yhdessä loppukäyttäjien kanssa?	20
4.2.4 Keitä ovat loppukäyttäjäorganisaatioiden DT-ratkaisuja käyttävät tahot?	20
4.2.5 Eettiset näkökulmat	21
4.2.6 Yhteenveto	21
4.3 Ohjeistus	21
5 Johtopäätökset	22
6 Lähteet	23
7 Liitteet	25
7.1 Liite 1: Literature review (unpublished)	25
7.1.1 Human Factors in industrial Digital twin solution design and implementation	25

7.1.2	Organizational factors in industrial DT solutions	30
7.1.3	Ethical issues in DT design and implementation	32
7.1.4	Side remarks and limitations.....	34
7.1.5	Conclusions and outlook	35
7.1.6	References	36
7.2	Liite 2: haastattelurungot	40

1 Johdanto

Digitaalisten kaksosten (DT) teknologian hyödyntäminen on yleistymässä teollisuuden prosesseissa (Kortelainen ym., 2023). Tässä HumanDT-tutkimuksessa tarkasteltiin DT:n käyttöä työturvallisuuden kehittämisessä. Tutkimuksessa selvitettiin inhimillisiä näkökulmia (Human Factors, HF) ja ennakoivaa suunnittelua (Sustainable and Safety by Design, SSbD) DT:n suunnittelussa ja hyödyntämisessä, ja kuinka niitä tulisi huomioida DT-sovelluksissa.

Euroopan komission Industry 5.0 visio painottaa ihmiskeskeisyyttä yhtenä kolmesta Euroopan teollisen kehityksen tulevaisuuden painopisteistä (Breque ym. 2021). HumanDT-hankkeessa ihmiskeskeisyys tarkoittaa käyttäjien huomioimista jo digitaalisten kaksosten suunnitteluvaiheessa. Digitaaliset kaksoset edustavat jo lähtökohdiltaan ihmiskeskeistä teknologiaa. Niissä on suuri potentiaali tukea työntekijöiden tilannekuvaan, kunnossapitotyötä, työturvallisuutta ja matalan kynnyksen innovointia. Oikein sovellettuna digitaaliset kaksoset voivat tukea Industry 5.0 visiota kestävästä ja inhimillisestä teollisesta työstä.

Digitaalisten kaksosten teknologiaan liittyy myös haasteita. Teknologian soveltamiseen liittyy usein työympäristön tarkkaa mittarointia ja seuranta. Seurantaan liittyy eettisiä haasteita, koska suunnittelemana sama mittarointi voi ulottua koskemaan myös inhimillistä työtä. Ongelmatiikkaa lisää myös se, että tekoäly on usein osa digitaalisen kaksosen sovelluksia. Inhimillisiä tekijöitä sekä DT-teknologian kehittäjien ja loppukäyttäjien kokemuksia on tärkeää tutkia, jotta digitaalisiin kaksosiin liittyvissä teknologisissa ratkaisuissa ja implementaatiossa voidaan jo ennalta huomioida inhimillisiä tekijät ja eettiset kysymykset.

Tässä raportissa keskitytään kuvaamaan hankkeen tiedonkeruu Työterveyslaitoksen osalta ja siitä saadut tulokset. Hankkeen päätuotos, ohjeistusdokumentti (guideline) tarjoaa digitaalisten kaksosten teknologian suunnittelijoille ja sitä käyttäville teollisuustoimijoille tukea ihmiskeskeiseen ja inhimillisiin tekijöihin huomioivaan suunnitteluprosessiin.

2 Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli

- tukea digitaalisten kaksosten (DT) teknologian suunnittelun ja implementaation eettistä kestävyyttä, mikä on edellytys teknologian tehokkaalle soveltamiselle
- tuottaa ohjeistus, joka toimii ohjenuorana kehitettäessä teollisuudessa työturvallisuuden DT-sovelluksia.

3 Aineisto ja menetelmät

3.1 Kirjallisuusselvitys

Hankkeessa toteutettiin aluksi kirjallisuusselvitys yhteistyössä Tecnalian kanssa. Työterveyslaitoksen toteuttamassa osuudessa lähdettiin hakemaan vastausta seuraavaan kysymykseen: Mitkä ovat merkittävimmät inhimilliset, eettiset ja organisaation toimintaan liittyvät tekijät, jotka vaikuttavat digitaalisen kaksosen teknologian käyttöönottoon teollisuudessa?

Selvitys toteutettiin systemaattisen kirjallisuuskatsauksen (SLR, Systematic Literature Review) menetelmällä. Se mahdollistaa kaikkien asiaankuuluvien ja saatavilla olevien tietojen tunnistamisen, arvioinnin ja tulkinnan kiinnostuksen kohteena olevasta aiheesta (Denyer & Tranfield, 2009; Page ym., 2021). Lisäksi SLR auttaa tutkimusaukkojen tunnistamisessa ja tulevien tutkimusten suuntaviivojen kartoittamisessa (Kitchenham & Charters, 2007).

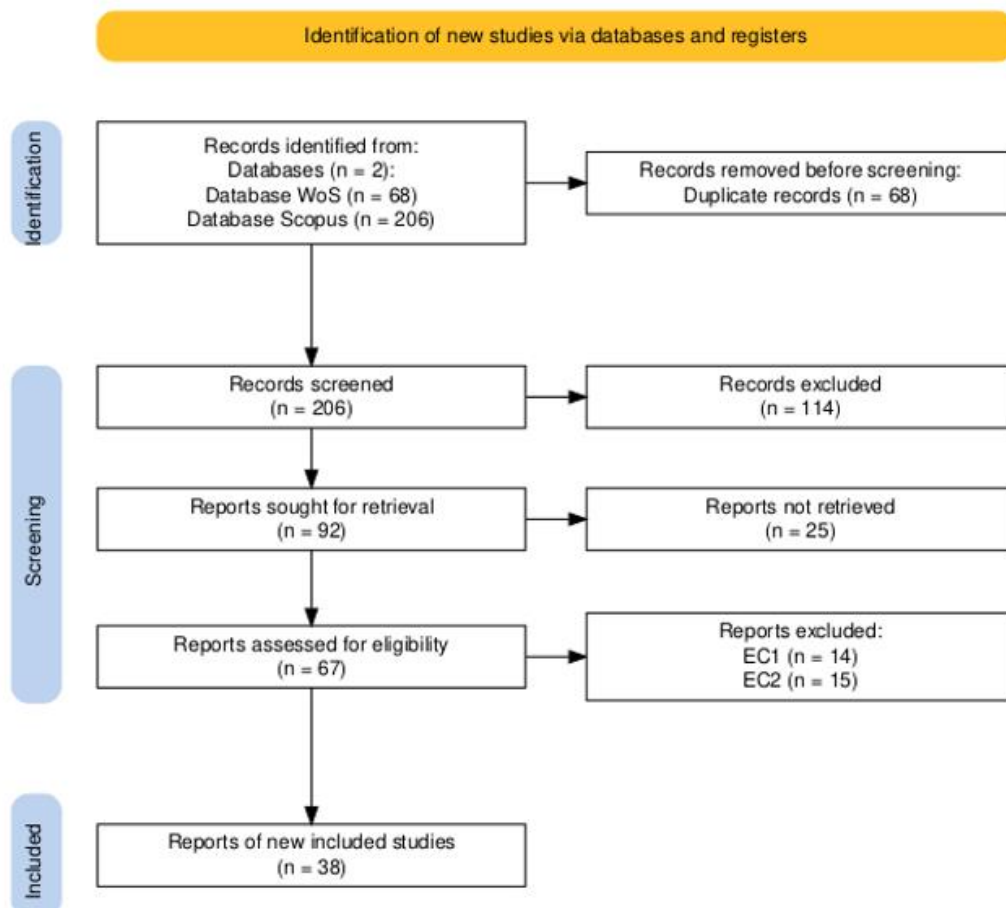
Hakustrategiana käytettiin seuraavaa:

(“Digital Twin” AND (Manufacturing) AND (“Human factor*” OR “Human Centric*” OR “ergonomics”) OR “Ethic*” OR (“Organizational” OR “organizational” OR social OR socio-techn*))

Lähdeviitteitä haettiin viiden vuoden aikajaksolta (2020–2025). Tätä pidettiin riittävänä, kun otetaan huomioon aiheen nopea kehitys, minkä vuoksi vanhempi kirjallisuus on helposti vanhentunutta. Kirjallisuusselvityksessä haettiin muitakin kuin vain vertaisarvioituja tieteellisiä julkaisuja, koska ne eivät ole ainoa arvokkaiden oivallusten lähde. Esimerkiksi Anderson ym. (2020) väittää, että pelkästään vertaisarvioituihin julkaisuihin tukeutuminen ei välttämättä riitä kattamaan aiheen koko laajuutta ja korostaa harmaan kirjallisuuden mukaan ottamisen tärkeyttä.

Kirjallisuusselvityksen haut tehtiin kahdessa viitetietokannassa (Pranckute, 2021), joista löytyi yhteensä 274 viitettä: Scopus 206 ja Web of Science 68 viitettä. Hakutuloksista poistettiin ensin julkaisujen kaksoiskappaleet ja muut kuin englanninkieliset julkaisut, minkä jälkeen seulottavaksi jäi 206 viitettä. Otsikoiden seulonnan jälkeen jäi jäljelle 92 julkaisua tiivistelmien läpikäyntiä varten. Kuvassa 1 esitetyllä PRISMA-kaaviolla kuvataan tutkimusten valinta- ja seulontaprosessia.

Poissulkemiskriteereillä (EC, Exclusion Criteria) varmistettiin, että julkaisut käsittelivät tutkimuksen aiheita ja tavoitteita. EC1 sulki pois julkaisut, jotka keskittyivät pelkästään DT:n teknisiin näkökulmiin. EC2 puolestaan sulki pois julkaisut, joissa ei käsitelty inhimillisiä tekijöitä tai muita prosesseissa työskentelevään ihmiseen liittyviä näkökulmia. Yhdessä näillä kriteereillä tunnistettiin tutkimuksen piiriin kuuluviksi 63 julkaisua. Näistä 25 kappaletta ei saatu haettua maksumuurien vuoksi ja lopulta 38 julkaisua valittiin tarkastelua varten.



Kuva 1. PRISMA-kaavio yhdessä Tecnalian kanssa laaditusta englanninkielisestä julkaisemattomasta raportista. Kaaviolla kuvataan Työterveyslaitoksen osuuden tutkimusten valinta- ja seulontaprosessia.

Haussa löytyneet julkaisut luettiin läpi ja tyypiteltiin niiden aihepiirin mukaisesti siltä osin kuin sisällöt vastasivat hakustrategiaa. Tulosityhteenvedo on kuvattu luvussa 4.1 tarkempi kuvausteksti englannin kielellä löytyy tämän raportin luvusta 7.1

3.2 Haastattelut

Haastattelut pyrittiin kohdistamaan DT-sovellusten suunnittelijoihin, loppukäyttäjiin sekä julkisiin viranomaisiin, jotka vastaavat sääntelystä. Käytännössä suunnittelijat olivat hyvin edustettuina, mutta haastateltavien joukossa ei ollut tahoja, jotka ainoastaan ostaisivat DT-ratkaisuja ilman roolia niiden suunnittelussa. Yhdessä yrityksessä DT-ratkaisuja tuotettiin

sisäisesti palvelemaan muuta organisaatiota. Haastatteluihin pyrittiin määrittämään ja tavoittamaan keskeisiä aihepiirin sääntelystä vastaavia tahoja, mutta tässä ei onnistuttu. Tätä puutetta korjattiin haastatteleamalla aihepiirin tutkijoita suomalaisista tutkimuslaitoksista.

Haastattelukysymykset perustuivat kirjallisuuskatsauksen tuloksiin sekä tavoitteeseen muodostaa ajantasainen ymmärrys DT-ratkaisujen käytöstä teollisuuden tuotantoympäristöissä. Kysymys etiikasta lisättiin, koska kirjallisuuskatsaus osoitti eettisten seikkojen huomioon tärkeyden.

Haastattelut toteutettiin etähaastatteluina Teamsin välityksellä. Haastattelujen kesto oli yksi tunti, ja vaihtelu haastattelujen kestossa oli vähäistä. Haastateltaville lähetettiin ennen haastatteluja kuvaus menettelystä, jossa esiteltiin tausta, sisältö ja haastattelujen eettiset näkökohdat (GDPR), jotta he pystyivät valmistautumaan ja antamaan tietoon perustuvan suostumuksen osallistumiselle.

Osa kysymyksistä osoittautui haastatteluja toteutettaessa temaattisesti päällekkäisiksi tai epärelevantteiksi. Saatua tietoa ei siksi raportoida kysymys kysymykseltä, vaan tämän raportin rakennetta on muokattu vastaamaan paremmin saatujen tietojen rakennetta.

Haastattelut toteutettiin syyskuun 2025 ja tammikuun 2026 välillä ja niiden kokonaismäärä oli yhdeksän. Espanjalaisten haastateltavien rekrytoinnista vastasi Tecnalia ja nämä haastateltavat edustivat DT-teknologiaa joko sisäisesti tai myytävänä palveluna suunnittelevia espanjalaisia yrityksiä. Haastateltaviin kuuluivat myös kahden suomalaisen tutkimuslaitoksen edustajat. Haastattelut toteutti Työterveyslaitos.

Haastattelurungot löytyvät tämän raportin luvusta 7.2.

4 Tulokset

4.1 Kirjallisuusselvitys

Kolmiosaisen tutkimuskysymyksen ensimmäisessä osassa käsiteltiin inhimillisiä tekijöitä ja valmistavan teollisuuden DT-teknologiaa. Toisessa osassa käsiteltiin organisaation toimintaan liittyviä organisatorisia tekijöitä teollisissa DT-ratkaisuissa. Kolmannessa osassa selvitettiin DT:n suunnitteluun ja toteutukseen liittyviä eettisiä kysymyksiä.

4.1.1 Inhimilliset tekijät teollisuuden DT-ratkaisuissa

Aihetta käsiteltiin seuraavissa 29 artikkelissa.

- Alfaro-Viquez ym., 2020;

- Alvarez ym., 2023;
- Battini ym., 2024;
- Berti & Finco, 2022;
- Bécue ym., 2020;
- Berti ym., 2023;
- Bevilacqua ym., 2020;
- Bortolini ym., 2025;
- Bucci ym., 2025;
- Chand ym., 2024;
- Cutrona ym., 2024;
- Domínguez, 2024;
- Feng ym., 2025;
- Greco ym., 2020;
- Grego ym., 2024a;
- Grego ym. 2024b;
- Kovari, 2025;
- Krupas ym., 2024;
- Leirimo, 2024;
- Li ym., 2024;
- Liu ym., 2025;
- Maruyama y., 2021;
- Papacharalampopoulos ym., 2025;
- Sharotry, 2022;
- Shi ym., 2023;
- Wang ym., 2024;
- Wang ym., 2025;
- Yin ym., 2023;
- Zare & Lazarova-Molnar, 2024 ja Zhang ym., 2024.

4.1.1.1 Human Digital Twin

Yhteensä 10 julkaisussa käsiteltiin mahdollisuutta hyödyntää ihmisistä kerättyä reaaliaikaista dataa ihmiskäyttäjiä kuvaavan digitaalisen replikan (HDT, human digital twin) muodossa

- Alfaro-Viquez ym. 2020;
- Battini ym., 2024;
- Berti & Finco, 2022;
- Bortolini ym., 2025;
- Bucci ym., 2025;
- Chand ym., 2024;
- Cutrona ym., 2024;
- Domínguez, 2024;
- Krupas ym., 2024;
- Wang ym., 2024.

Esimerkiksi Battini ym. (2024) esittelevät HDT-arkkitehtuurin, jossa seurataan reaaliaikaisesti huomattavan suurta määrää muuttujia, kuten muun muassa käyttäjien sykettä, ihon sähköjohtavuutta, elektroenkefalografiaa (EEG) ja silmien liikkeitä. Moderni teknologia, kuten puettavat laitteet, mahdollistaa lukuisten reaaliaikaisten tietojen keräämisen käyttäjistä. Tietoja voidaan kerätä käyttäjien liikkeistä tuotantotiloissa sekä heidän psykologisista ja emotionaalisista tiloistaan. Tiedon kerääminen, joka voi auttaa huomioimaan ihmiskäyttäjän yksilölliset ominaisuudet, voisi edistää toimivan ihmisen ja koneen välisen yhteyden luomista (Alfaro-Viquez ym., 2020). Tällaisten sovellusten eettiset huolenaiheet ovat kuitenkin huomattavat (ks. kohta 4.1.3).

4.1.1.2 Päätöksenteko

Kaikki tarkastellut 38 artikkelia viittaavat DT-teknologian hyödyntämiseen päätöksenteon tukena teollisuudessa. Tarkastelluissa julkaisuissa keskeinen teema on reaaliaikainen tieto, jota saadaan DT:n avulla päätöksenteon tueksi. DT-sovellusten keskeinen tavoite on operatiivisten päätösten tukeminen digitaaliseen kaksoseseen sisältyvän tiedon avulla. Tuotantotyöntekijät, huoltohenkilöstö ja liiketoimintajohtajat voivat hyödyntää DT-teknologiaa parempien päätösten tekemiseksi (Bevilacqua ym., 2020).

Kovari (2025) esittelee viitekehyksen moniulotteisen datan analysointiin, jossa operatiiviset ja visuaaliset tietovirrat integroidaan digitaalisiin kaksosiin reaaliaikaista seuranta ja päätöksenteon sovelluksia varten. Heidän viitekehjensä perustuu Vision transformers -teknologiaan, jonka avulla käyttäjät voivat saada tietoa DT:stä visuaalisessa muodossa.

Li ym. (2024) hyödyntävät DT-teknologiaa toimittajien segmentoinnissa. Päätösmalli tunnistaa segmentointitulosten perusteella heikkouksia nykyisten toimittajien joukossa ja ehdottaa mahdollisia kehitysstrategioita toimittajien kehityssimulaation kautta. He kuitenkin toteavat, että objektiivisen datan hankinnan vaikeudet rajoittivat tutkimusta.

4.1.1.3 Tuotantotyöntekijöiden tuottavuus

Tuottavuus on keskeinen tavoite, mitä asetetaan teollisuuden digitaalisten kaksosten käytölle. Tämän tavoitteen jatkeena ihmiskeskeiset DT-ratkaisut lähestyvät ihmiskäyttäjien tuottavuutta. Ihmiskäyttäjien tuottavuutta tarkastellaan 20 artikkelissa yksinkertaisten parametrien, kuten kapasiteetin ja nopeuden, avulla (Wang ym., 2024). Alvarez ym. (2023) esittelevät ratkaisun, jossa hyödynnetään tietoa ihmiskäyttäjien tuottavuudesta tuotantolinjan työkuorman tasapainottamiseen. Hyötyinä mainitaan tuotelaadun parantaminen ja vikojen määrän vähentäminen. Käyttäjien tuottavuus mainitaan ihmistekijänä 8 tarkastellussa artikkelissa (Alvarez ym., 2023; Bucci ym., 2025; Chand ym., 2024; Cutrona ym., 2024; Grego ym., 2024a; Sharotry, 2022; Wang ym., 2024; Zhang ym., 2024).

4.1.1.4 Hyvinvointi ja turvallisuus

Käyttäjien hyvinvointia käsitellään 11 artikkelissa (Alvarez ym., 2023; Battini ym., 2024; Berti & Finco, 2022; Berti ym., 2023; Bucci ym., 2025; Chand ym., 2024; Cutrona ym., 2024; Domínguez, 2024; Grego ym., 2024a; Wang ym., 2024; Yin ym., 2023). Esimerkiksi 7 julkaisussa päätellään, että ihmisen digitaalisen kaksosen (Human Digital Twin, HDT) teknologioita hyödynnettäessä työntekijöiden fyysistä ja emotionaalista tilaa koskevien tietojen avulla voidaan kohdentaa oikea-aikaisia hyvinvointiin keskittyviä toimenpiteitä. Samoin 3 julkaisussa esitetään, että hyvinvointi ja turvallisuus ovat ihmisen digitaalisen kaksosen sovellusten tutkituimpia alueita teollisuudessa. Hyvinvoinnin myös päätellään lisääntyvän HDT-teknologian ansiosta, koska se mahdollistaa ihmiskäyttäjille paremman hallinnan työhönsä ja parantaa heidän tuottavuuttaan (Alvarez ym., 2023).

Liu ym. (2025) lähestyvät aihetta "ihmisen hyvinvointi". He toteavat, että ihmisen mukavuutta ei ole aiemmin tutkittu ihmisen ja robotin yhteistyön yhteydessä digitaalisten kaksosten hyödyntämisessä. Heidän mallissaan keskityttiin "ihmisen työtilan" seurantaan, mukaan lukien syke, verenpaine, hengitystiheys, pulssi ja kehon lämpötila, joiden avulla voitiin seurata ihmisen fysiologista tilaa ja väsymystä. Lisäksi arvioitiin ihmisen työasentoa.

DT-ratkaisut voivat esimerkiksi mahdollistaa sen, että ihmiskäyttäjät saavat tarkkoja reaaliaikaisia varoituksia äkillisistä vaaroista. Tämä mahdollistaisi parempien turvallisuuspäätösten tekemisen ja nopeamman reagoinnin vaaratilanteisiin (Wang ym., 2024). Kaikki paitsi kolme tarkastelluista artikkeleista (Kovari, 2025; Papacharalampopoulos ym., 2025; Wang ym., 2024) käsittelevät turvallisuutta.

4.1.1.5 Fyysinen ergonomia

Asentoergonomia, kuten nivelkulmat ja muut liialliseen fyysiseen rasitukseen liittyvät tekijät, voidaan helposti seurata visuaalisilla sensoreilla osana digitaalisen kaksosen ratkaisuja. On mahdollista tarkkailla esimerkiksi asennon muutoksia, jotka viittaavat fyysiseen väsymykseen (Battini ym., 2024). DT-ratkaisuilla voidaan antaa palautetta ja varoituksia operaattoreille oikeasta työasennosta. Fyysistä (asento-)ergonomiaa käsitellään 11 artikkelissa (Battini ym., 2024; Berti & Finco, 2022; Bucci ym., 2025; Cutrona ym., 2024; Domínguez, 2024; Greco ym., 2020; Krupas ym., 2024; Sharotry, 2022; Wang ym., 2024; Wang ym., 2025; Yin ym., 2023).

4.1.1.6 Kognitiivinen ergonomia

Kognitiivisen ergonomian osalta useat artikkelit käsittelevät DT-ratkaisuja ihmisen kognition näkökulmasta. Tutkimuksissa esiteltiin esimerkiksi "Kognitiivisista digitaalisia kaksosia", jotka hyödyntävät tekoälyä ja koneoppimista ihmismäisten päätöksentekokykyjen saavuttamiseksi, sekä DT-ratkaisuja, jotka huomioivat ihmisen psykologisen ja kognitiivisen kuormituksen. Esimerkiksi Battini ym. (2024) esittävät kognitiivisen kuormituksen muuttujana, jota DT:t voisivat hyödyntää reaaliaikaisen datan, kuten EEG:n ja EDA:n, avulla. Sensoreihin perustuva tiedon tuottaminen ylittää perinteiset menetelmät, kuten haastattelut, kun haetaan tietoa kognitiivisesta kuormituksesta.

Kognitiivisia näkökulmia käyttäjien osalta DT-ratkaisuissa käsitellään 10 artikkelissa (Alfaro-Viquez ym., 2020; Alvarez ym., 2023; Battini ym., 2024; Berti & Finco, 2022; Bucci ym., 2025; Chand ym., 2024; Grego ym., 2024a; Krupas ym., 2024; Sharotry, 2022; Yin ym., 2023).

4.1.1.7 Käytettävyys ja käyttäjäkokemus

DT-ratkaisujen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon käytettävyys sen potentiaalisten käyttäjien, kuten valmistusteollisuudessa työskentelevien (käyttäjät), insinöörien ja esihenkilöiden näkökulmasta (Leirmo, 2024). Keskeinen käytettävyyteen liittyvä huolenaihe on käyttöliittymä, jonka kautta ihmiset ohjaavat DT-ratkaisua. Erytisesti suunnitteluvaihe korostuu tässä asiassa. Esimerkiksi Yin ym. (2023) painottavat suunnitteluperiaatteiden noudattamisen merkitystä jo suunnitteluvaiheen alussa.

Yin ym. (2023) korostavat tarvetta tehdä yhteistyötä käyttäjien kanssa käyttäjäystävällisten käyttöliittymien suunnittelussa, joiden avulla voidaan vuorovaikuttaa DT-mallin kanssa lisätyn todellisuuden (AR) laajennuksen avulla. AR-tekniikkaa hyödyntävissä DT-ratkaisuissa käsitellään käyttäjien vuorovaikutusta DT:n kanssa sekä käyttäjien saamia palautteita. He toteavat, että ihmisiin liittyvät testit ja tiedot voivat parantaa DT-ratkaisujen suunnittelua. Cutrona ym. (2024) korostavat asianmukaisen koulutuksen merkitystä DT-ratkaisujen käytössä tehokkuuden ja sujuvuuden varmistamiseksi. He myös painottavat ratkaisujen käyttäjäystävällisyyden tärkeyttä. Shi ym. (2023) huomauttavat käyttäjäkeskeisen suunnittelufilosofian merkityksestä DT-ratkaisujen suunnittelussa sekä valmiudesta tehdä muutoksia käyttäjäpalautteen perusteella. He suosittelvat käyttäjäkeskeisen suunnittelumallin koostuvan seuraavista vaiheista: 1) käyttäjävaatimusten ymmärtäminen, 2) ihmiskeskeinen suunnitteluprosessi, 3) käyttäjäpalaute ja 4) jatkuva suunnittelun optimointi. Domínguez (2024) korostaa käyttäjäystävällisten käyttöliittymien ja kattavan koulutuksen tarvetta, jotta käyttäjät voivat käyttää DT-ratkaisuja tehokkaasti ilman kohtuutonta kognitiivista kuormitusta ja stressiä.

4.1.1.8 Ihmisen ja koneen yhteistyö

Erytisesti julkaisuissa, jotka käsittelevät yhteistoimintarobotteja (robotteja, jotka on suunniteltu avustamaan ihmisiä työtehtävissä), tarkastellaan ihmisen ja koneen yhteistyötä.

- Dominguez 2024
- Grego et al. 2024

- Papacharalampopoulos et al. 2025
- Wang et al. 2024
- Wang et al. 2027

4.1.2 Organisaation toimintaan liittyvät tekijät teollisuuden DT-ratkaisuissa

Aihetta käsiteltiin seuraavissa 18 artikkelissa (tulokset löytyvät taulukoituna luvusta 7).

- Alvarez ym., 2023;
- Battini ym., 2024; Berti & Finco, 2022; Bevilacqua ym., 2020;
- Cutrona ym., 2024;
- Domínguez, 2024;
- Kober, Buxbaum, ym. 2024; Conradi, ym., 2024; Kober, Medina, ym., 2024;
- Li ym., 2024;
- Román & Böttjer, 2025;
- Saporiti ym., 2020; Sharotry, 2022;
- Villegas ym., 2024; Wang ym., 2024;
- Yang, Razzaq, ym., 2024; Yang, Yu, ym., 2024;
- ja Zhang ym., 2024.

Julkaisuista 6 käsittelee organisaatiota sosioteknisenä järjestelmänä (Berti & Finco, 2022; Bevilacqua ym., 2020; Domínguez, 2024; Wang ym., 2024, Kober, Buxbaum, ym., 2024; Román & Böttjer, 2025).

4.1.2.1 Organisaation haasteet ja mahdollistajat DT-ratkaisujen hyödyntämisessä

Kober, Buxbaum, ym. (2024) toteavat, että DT voi tuoda lisäarvoa vain, jos se integroidaan huolellisesti olemassa oleviin organisaatorakenteisiin ja yrityksen strategiaan. DT-ratkaisuja on pidettävä välineenä jonkin tavoitteen saavuttamiseksi, ei pelkästään päämääränä itsessään. Kober Buxbaum, ym. (2024) käsittelevät myös keskeisiä organisaation haasteita DT:n hyödyntämisessä: 1) tavoitteiden ymmärtäminen, 2) hyötyjen ymmärtäminen ja 3) asianmukainen ja tehokas mallintaminen.

Saporiti ym. (2020) puolestaan tarkastelevat DT:n käyttöönottoon liittyviä mahdollistavia ja estäviä tekijöitä teollisuudessa, erityisesti pk-yrityksissä. Onnistuneen DT-käyttöönoton kehittäminen edellyttää laajaa kulttuurimuutosta, mukaan lukien hierarkioiden madaltamista koko yrityksessä. Lisäksi teknologisen muutoksen on luotava riittävästi arvoa oikeuttaakseen kaikki siihen tarvittavat resurssit. Saporiti ym. (2020) korostavat esihenkilöiden roolin ja ajattelutapojen merkitystä muutoksessa. Esimerkiksi heidän tulisi pystyä kommunikoimaan ja

tekemään yhteistyötä kaikkien yrityksen yksiköiden kanssa sekä kehittää monipuolisia pehmeitä taitoja, jotka mahdollistavat roolien joustavan vaihtamisen tilanteen mukaan. Näin ollen toimivia mahdollistajia ovat muun muassa muutoksen prosessin strateginen suunnittelu, infrastruktuurin innovointiprosessin suunnittelu (infrastruktuurin tulisi olla kattava, skaalautuva, analytiikkaa tukeva, integroitu ja turvallinen) sekä koko organisaation mobilisointi.

4.1.2.2 Henkilöstöresurssien kohdentaminen

Prosessityöntekijöiden sisällyttäminen DT-järjestelmiin voi auttaa henkilöstöresurssien paremmassa kohdentamisessa. Alvarez ym. (2023) esittelevät DT-järjestelmän, joka keskittyy työkiertosuunnitelmaan ja huomioi myös työntekijöiden suorituskyvyn henkilöstöresurssien allokoinnissa. Myös Sharotry ym. (2022) keskittyvät henkilöstöresurssien kohdentamiseen. Battini ym. (2024) tarkastelevat henkilöstöresurssien allokointia huomioiden "työntekijän tilan" yhtenä allokoinnin peruseriaatteena. Villegas ym. (2024) hyödyntävät työntekijöiden taitoja samankaltaisena periaatteena. Zhang ym. (2024) käyttävät yksinkertaisia nopeuden ja kapasiteetin parametreja avustamaan työtehtävien kohdentamisessa.

4.1.2.3 Resilienssi

Resilienssiä käsitellään kolmessa artikkelissa. Bortolini ym. (2025) esittelevät kokeellisen kyber-sosioteknisen järjestelmän (CSTS) tehtaan, joka voisi mahdollisesti olla kyberhyökkäysten kohteena. Julkaisussa ehdotetaan integroidun DT:n suunnittelua ja kehittämistä teollisuuslaitosten resilienssin arvioimiseksi kyberuhista huolimatta, samalla kuitenkin huomioiden ihmisten toiminnan. Järjestelmässä työntekijöiden liikkeitä seurataan tarkoituksena sulkea ohje-toiminta-tarkistus-reaktio-syklin silmukka. Bécue ym. (2020) lähestyvät resilienssiä selkeästi teknisen, organisatorisen ja kyberturvallisuuteen liittyvän valmistautumiskyvyn näkökulmasta. Berti ym. 2023 lähestyvät resilienssiä tuotantojärjestelmän palautumiskyvyn ja työntekijöiden kuormituksen seurannan kautta.

4.1.3 DT-ratkaisuiden suunnitteluun ja toteutukseen liittyvät eettiset kysymykset

Aihetta käsiteltiin seuraavissa 13 artikkelissa (tulokset löytyvät taulukoituna luvusta 7.1.)

- Battini ym., 2024;
- Cutrona ym., 2024;
- Domínguez, 2024;
- Grego ym., 2024a; Grego ym., 2024b;
- Iliuță ym., 2024;
- Kober, Buxbaum-Conradi, ym., 2024; Kovari, 2025; Krupas ym., 2024;
- Papacharalampopoulos ym., 2025;
- Román & Böttjer, 2025;

- Wang ym., 2025
- ja Zare & Lazarova-Molnar, 2024.

Koska tarkasteluun päätettiin sisällyttää Human Digital Twin -teknologia (HDT, useat artikkelit käsittelivät DT-teknologian eettisiä näkökulmia syvällisesti. Vaikka HDT-ratkaisuissa ihmisoperaattoreista kerätty data on paljon yksityiskohtaisempaa kuin perinteisissä DT-ratkaisuissa, ne voivat herättää laajempia eettisiä huolia, mukaan lukien korostunut työntekijöiden seurannan elementti. Käyttöliittymän asianmukainen suunnittelu sekä kyky noudattaa GDPR-säädöksiä ovat välttämättömiä, jotta ihmisiin liittyvissä DT-ratkaisuissa voidaan saavuttaa korkea eettinen taso.

Domínguez (2024) esittää, että nykyisessä kirjallisuudessa on puutteita eettisten näkökohtien käsittelyssä. Papacharalampopoulos ym. (2025) korostavat, että lisääntyvän automaation sekä ihmisen ja koneen yhteistyön eettisiä ja sosiaalisia vaikutuksia tulisi tarkastella, jotta voidaan varmistaa vastuullinen ja kestävä kehitys.

Luottamuksen säilyttämistä ja työntekijöiden hyväksynnän saavuttamista uudelle teknologialle käsittelevät esimerkiksi Grego ym. (2024b), jotka toteavat, että "luottamuksen saavuttaminen on keskeistä, kun uusia laitteita integroidaan perinteisiin fyysisiin ja käsin tehtäviin työnkulkuihin". He korostavat, että työntekijöiden kanssa tehtävä yhteistyö DT-järjestelmien suunnitteluprosessin alkuvaiheissa on tärkeää kognitiivisen kuormituksen vähentämiseksi. Käyttäjien yksilöllisten tarpeiden ja mieltymysten huomioiminen on olennainen edellytys luottamuksen ja hyväksynnän saavuttamiselle DT:n käyttöön otossa. Grego ym. (2024b) painottavat myös käyttäjäkokemuksen asiantuntemuksen merkitystä. Kober, Buxbau, ym. (2024) korostavat, että loppukäyttäjäorganisaation erityispiirteiden huolellinen huomioiminen tapahtuu tarjoamalla mahdollisuuksia osallistua suunnitteluprosessiin.

Grego ym. (2024a) toteavat, että DT-ratkaisujen hyväksyttävyyden työntekijöiden keskuudessa teollisuuslaitoksissa liittyy kiinteästi eettisiin näkökohtiin. Battini ym. (2024) tunnistavat, että "jatkuva seurantaprosessi voi aiheuttaa kognitiivista stressiä". Yksityiskohtaisessa eettisessä analyysissään Human Digital Twin -teknologiaan liittyvistä oikeudellisista ja eettisistä näkökulmista Cutrona ym. (2024) huomauttavat, että ihmisten virtuaalisten esitysten käyttö aiheuttaa merkittäviä riskejä yksityisyydelle, tietosuojalle ja muille keskeisille ihmisoikeuksille. He vaativat sääntelyä sekä tietoista huomiota eettisyyteen, läpinäkyvyyteen ja vastuullisuuteen HDT-ratkaisuissa. Työvoimaan liittyvät kysymykset voivat kytkeytyä eettisiin näkökohtiin DT:n hyödyntämisessä. Kovari (2025) näkee, että DT-teknologiaa voitaisiin käyttää korvaamaan työntekijöitä, mikä nostaa esiin eettisiä kysymyksiä työmarkkinoiden muutosten vaikutuksista.

DT-ratkaisut voivat sisältää myös muita teknologioita, joihin liittyy eettisiä kysymyksiä. Esimerkiksi Krupas ym. (2024) käsittelevät eettisiä näkökulmia tekoälyn käyttämisestä DT-järjestelmien mahdollistavana teknologiana.

4.1.4 Huomiot ja rajoitukset

On syytä huomata, että DT-ratkaisuissa hyödynnetään erilaisia mahdollistavia teknologioita, joilla on omat vaikutuksensa inhimillisten tekijöiden, eettisten kysymysten ja organisatoristen tekijöiden huomioimisessa. Tekoäly, virtuaalitodellisuus tai lisätty todellisuus voivat olla keskeisiä käytännön DT-ratkaisuissa, mutta ne eivät välttämättä sisälly kaikkiin DT-ratkaisuihin. Mukana olevien teknologioiden kokonaisuus voi merkittävästi vaikuttaa kuhunkin yksittäiseen ratkaisuun liittyviin inhimillisiin, eettisiin ja organisatorisiin tekijöihin.

Toinen huomionarvoinen seikka on, että kirjallisuushaku keskittyi ihmiskomponentin soveltamiseen DT-ratkaisuissa, mikä korostaa vahvasti Human Digital Twin -ratkaisuja (HDT). HDT:ä ei kuitenkaan valittu poissulkukriteeriksi, sillä sen poissulkeminen olisi heikentänyt eettisiin näkökulmiin liittyvien tulosten laatua. Human Digital Twin -teknologioihin liittyvät tulokset tulisi nähdä ääriesimerkkeinä ihmisten roolista teollisissa DT-ratkaisuissa Euroopassa, sillä monet tarkastelluissa artikkeleissa esitellyt ratkaisut ovat selvässä ristiriidassa Euroopan GDPR-lainsäädännön kanssa.

Organisatorisia tekijöitä ei ollut helppo tunnistaa. Kyseistä termiä käytetään harvoin suoraan, vaikka useita tähän kategoriaan kuuluvia tekijöitä voidaankin tunnistaa artikkeleista.

Yksi ilmeinen rajoitus on sanan "industry" tahaton poisjättäminen hakulausekkeesta. Tämän myötä jäi löytymättä esimerkiksi julkaisu Kuštelega ym., 2024. Jos toiset tutkijat toteuttavat vastaavan haun, kirjoittajat ehdottavat kyseisen käsitteen sisällyttämistä. Tämän poisjätön vaikutukset ovat kuitenkin rajalliset, sillä Tecnalian käyttämissä hakulausekkeissa kyseinen käsite oli mukana. Toinen huomioitava rajoitus erityisesti, jos käytetään samaa tai samanlaista hakulauseketta, on ilmaisun "human centered" puuttuminen "human centric" -ilmaisun lisäksi. Suosittelemme vahvasti sisällyttämään tämän ilmaisun tulevilla tutkimuksissa, jotka käsittelevät ihmisoperaattoreiden roolia DT-ratkaisuissa.

Kaiken kaikkiaan selvitys mahdollisti teemojen yhteenvedon kaikissa kolmessa valitussa näkökulmassa: inhimilliset tekijät, eettiset kysymykset ja organisatoriset tekijät.

4.2 Haastattelut

Seuraavassa kuvataan haastattelujen päätulokset.

4.2.1 Millaisia tuotteita ja palveluja DT:n loppukäyttäjäorganisaatiot tuottavat

Digitaalisia kaksosia hyödynnetään laajasti erilaisten tuotteiden ja palvelujen tuotannossa. Nykyisiä DT-sovelluksia löytyy monilta teollisuudenaloilta. Haastattelujen perusteella DT-

teknologiaa hyödynnetään niin pk-yritysten monipuolisessa tuotannossa kuin myös suurissa yhteiskunnan kannalta keskeisissä infrastruktuurijärjestelmissä, kuten vesihuollossa.

Haastatteluissa mainittuja käyttökohteita olivat:

- autoteollisuus
- energian varastointi
- kuluttajatuotteet
- rakennusautomaatio
- sähköntuotanto
- teolliset prosessit
- terveydenhuolto (diagnostiset palvelut)
- valmistava teollisuus
- vesihuolto
- yhteiskunnan infrastruktuuri

DT-teknologia on laajasti sovellettavissa teollisessa tuotannossa, ja sillä on potentiaalia monenlaisiin käyttötarkoituksiin. Tuotannossa, jossa automaation taso on matala ja työ perustuu käsityöhön, DT:n käyttömahdollisuudet voivat olla rajallisempia.

4.2.2 Mihin tarkoituksiin loppukäyttäjät hyödyntävät DT:itä ja mitä hyötyjä niistä saadaan?

Loppukäyttäjät hyödyntävät digitaalisia kaksosia monenlaisiin tarkoituksiin. Koska DT:t suunnitellaan aina paikalliset tavoitteet ja olosuhteet huomioiden, käyttötarkoitukset vaihtelevat merkittävästi.

DT-kehittäjät kuvaavat monipuolisesti DT-teknologian hyötyjä. Esitetyt hyödyt voidaan jäsentää seuraavasti:

- Parantunut kannattavuus. Kannattavuuden lisääminen esitettiin keskeiseksi motiiviksi DT-teknologian käyttöönotolle sekä tärkeimmäksi myyntiargumentiksi DT-kehittäjien näkökulmasta.
- Parempi päätöksenteko. DT-ratkaisut sisältävät usein päätöksenteon tukijärjestelmiä ja tuottavat tietoa operatiivisen päätöksenteon tueksi. Tämä ominaisuus on kattavasti läsnä kaikissa DT-ratkaisuissa.
- Parempi tilannetietoisuus. DT mahdollistaa kattavan näkymän tuotantolaitokseen ja sen laitteistoihin sekä niiden toiminnan visuaalisen seurannan.

- Paremmat ennakoivan kunnossapidon mahdollisuudet. Varhaiset varoitukset huoltotarpeista tukevat ennakoivaa kunnossapitoa, mikä vähentää odottamattomia seisokkeja ja rajoittaa teknisten vikojen aiheuttamia vahinkoja.
- Paremmat testausmahdollisuudet uusille tuotantoratkaisuille. DT mahdollistaa skenaariotestauksen ja tarjoaa kustannustehokkaan, dataan perustuvan vaihtoehdon fyysiselle testaamiselle. Tämä edistää innovointia ja suunnittelua sekä tukee luovaa ongelmanratkaisua.
- Turvallisuus. Vaikka suoria turvallisuushyötyjä mainittiin vähän, DT:n potentiaalia työturvallisuuden parantamisessa käsiteltiin laajasti. Esimerkiksi DT-järjestelmien mahdollistama parempi työkuorman hallinta, tuotannon joustavuus ja työympäristön riskien tunnistaminen nähtiin tärkeinä. Yhtenä konkreettisenä esimerkkinä mainittiin trukkien ja työntekijöiden liikkeiden analysointi ”kuumakarttojen” avulla mahdollisten törmäysriskialueiden tunnistamiseksi. Uusien DT-ratkaisujen yhteydessä riskien arviointi tehdään usein tiiviissä yhteistyössä asiakkaan kanssa.
- Parempi ergonomia. AI-avusteiset ratkaisut voivat tunnistaa kuormittavia työasentoja ja tarjota vinkkejä asennon korjaamiseen tai vaihtoehtoihin suoritustapoihin.

4.2.3 Millaista yhteistyötä DT-suunnittelijat toteuttavat yhdessä loppukäyttäjien kanssa?

Haastatteluissa korostettiin loppukäyttäjien osallistamisen merkitystä DT-ratkaisujen suunnittelussa. Asiakaslähtöisyys oli selkeä strateginen tavoite, ja ihmiskeskeisen suunnittelun periaatteet olivat vakiintuneessa käytössä.

Suunnitteluprosessi kuvattiin jatkuvaksi yhteistyöksi, joka sisältää useita tapaamisia tarpeiden kartoittamiseen, ensimmäisten versioiden esittelyyn ja ratkaisun iteratiiviseen kehittämiseen. DT-ratkaisujen kyky vastata konkreettisiin ongelmiin nähtiin tärkeänä tekijänä teknologian käyttöönottoon liittyvän mahdollisen vastustuksen vähentämisessä.

Loppukäyttäjien kokemukset olivat yleisesti ottaen hyvin myönteisiä, sillä DT-ratkaisujen koettiin tarjoavan näkyviä hyötyjä, kuten paremman kokonaiskuvan tuotannosta.

4.2.4 Keitä ovat loppukäyttäjääorganisaatioiden DT-ratkaisuja käyttävät tahot?

Haastattelujen perusteella DT-järjestelmillä on useita erityyppisiä käyttäjäryhmiä, joiden tarpeet otetaan huomioon käyttöliittymien suunnittelussa. Pääsy eri tietoihin DT:ssä määritellään käyttäjäryhmittäin.

Keskeiset käyttäjäryhmät ovat:

- Operaattorit, jotka saavat käyttöönsä vain tuotannon kannalta oleellisen tiedon.

- Keskijohto ja asiantuntijat, joilla on pääsy operatiivista johtamista tai asiantuntijatyötä tukevaan tietoon.
- Ylin johto, esimerkiksi tuotannon KPI-mittarit (Key Performance Indicator).

Käyttöliittymät voidaan suunnitella myös toimintoperusteisesti, esimerkiksi kunnossapidon tai tuotannon testauksen tarpeisiin. Käytettävyyden helppoutta korostettiin, ja esille nousi haasteita tilanteissa, joissa käyttöliittymässä on liikaa tietoa.

4.2.5 Eettiset näkökulmat

DT-suunnittelijat tunnistivat eettiset kysymykset selkeästi tärkeänä suunnitteluprosessin osa-alueena, erityisesti yksityisyydensuojan ja GDPR-vaatimusten osalta. Henkilötietojen keruun suunnittelu nähtiin GDPR:n kannalta merkittävänä riskinä, ja kehittäjät kokivat velvollisuudekseen tukea asiakasorganisaatioita tietojen keruun rajaamisessa vain sallittuihin tarkoituksiin. Useissa yrityksissä henkilötietojen tietoturvariskien kartoittaminen on olennainen osa DT-suunnittelun riskinarviointia.

4.2.6 Yhteenveto

Haastattelut tarjosivat kattavan kuvan digitaalisilla kaksosilla tuotettavista palveluista ja tuotteista, niiden käyttötarkoituksista, suunnittelijoiden ja loppukäyttäjien välisestä yhteistyöstä sekä suunnittelussa huomioitavista eettisistä näkökohdista. Tulokset viittaavat DT-ratkaisujen kasvavaan merkitykseen erilaisissa loppukäyttäjäorganisaatioissa. Haastattelut korostivat käyttäjäkeskeisen lähestymistavan tärkeyttä ja tiivistä yhteistyötä asiakkaiden kanssa. DT-ratkaisuilla on useita erilaisia käyttäjäryhmiä, mikä korostaa käyttöliittymien huolellista suunnittelua. Eettiset näkökulmat, erityisesti tietoturva ja tietosuoja, otetaan vakavasti DT-suunnittelun eri vaiheissa.

4.3 Ohjeistus

Hankkeen päätuotos on ohjeistusdokumentti (guideline), jossa hahmotellaan ihmiskeskeistä ja inhimilliset tekijät huomioivaa tapaa suunnitella digitaalisia kaksosia. Dokumentin on tarkoitus toimia johdantomaisena esityksenä aiheeseen. Ohjeistusdokumentissa:

- 1) Kuvataan digitaalisten kaksosten teknologian perusteet.
- 2) Esitellään inhimillisten tekijöiden lähestymistapa ja ihmiskeskeinen suunnittelu (human-centric design) sekä hahmotellaan näiden roolia digitaalisten kaksosten suunnittelussa Euroopan komission Industry 5.0 vision mukaisesti.
- 3) Kuvataan hankkeessa sovelletut ja kehitetyt digitaalisten kaksosten ihmiskeskeistä suunnittelua tukevat työkalut
 - a. HF tool sovellussuunnittelun taustatietojen keruun tukena.
 - b. Inhimillisten tekijöiden tarkistuslista suunnittelun loppuvaiheen riskiarviointiin.

- c. Inhimillisten tekijöiden huomioimista suunnittelussa tukeva teknisten strategioiden kooste.
- 4) Käyttökuvaukset (use-caset) hankkeeseen osallistuneiden yritysten digitaalisten kaksosten käytöstä.

Tässä raportissa kuvattujen kirjallisuuskatsauksen ja haastattelujen tuloksia hyödynnettiin ohjeistuksen sisällön laadinnassa.

Ohjeistus auttaa digitaalisia kaksosia suunnittelevia ja käyttäviä teollisuuden alan yrityksiä toteuttamaan teknologian suunnittelu ja käyttöönotto huomioiden niitä käyttävät työntekijät.

Ohjeet ihmiskeskeisten digitaalisten kaksosten suunnitteluun ja toteutukseen

<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-391-256-4>.

5 Johtopäätökset

HumanDT -hankkeessa toteutettujen haastattelujen perusteella voidaan todeta, että digitaaliset kaksoset ovat kovaa vauhtia yleistymässä eurooppalaisessa teollisuudessa. Niillä on monipuolisesti mahdollisuuksia tukea esimerkiksi tuottavuutta, energiaa säästäviä tuotantoratkaisuja sekä turvallista ja oikea-aikaista kunnossapitoa.

Digitaaliset kaksoset edustavat lähtökohtaisesti teknologiaa, joka on linjassa Euroopan komission Industry 5.0 vision kanssa, sillä niillä on suuri potentiaali tukea työntekijöitä monipuolisesti erilaisissa tuotannon ja kunnossapidon tehtävissä.

Digitaalisten kaksosten suunnittelu on useissa tapauksissa järkevää toteuttaa yhteistyössä tuotannon työntekijöiden kanssa. Käyttäjien näkökulman ottaminen mukaan suunnitteluprosessin alusta alkaen auttaa varmistamaan, että sovellukset ovat myös käytettäviä. Myös niiden käyttöönoton aiheuttamia riskejä voidaan näin hallita parhaiten. Erityisesti käyttöliittymien näkymät tulisi sovittaa niitä käyttävien ihmisten tarpeisiin. DT-sovellusten käyttökohteiden löytämisessä operatiivisen näkökulman huomioiminen voi auttaa; sovelluskohteita kannattaakin kartoittaa yhdessä työntekijöiden kanssa.

Kirjallisuushaussa korostuvat eettiset seikat on myös tärkeää huomioida, jotta teknologian käyttöönotto ei aiheuta ristiriitoja työntekijöiden ja työnantajien välillä. Mikäli teknologiaa sovellettaessa ei kiinnitetä riittävästi huomiota sovellusten hyödyntämisen datan tarkoituksenmukaiseen käyttöön, työntekijät voivat joutua tekemään työtään kohtuuttoman valvonnan alla. Yleisen eurooppalaisen tietoturva-asetuksen (GDPR) huomioiminen on syytä tehdä tarkoin.

6 Lähteet

- Alfaro-Viquez, D., Zamora-Hernandez, M., Fernandez-Vega, M., Garcia-Rodriguez, J., & Azorin-Lopez, J. 2025. A Comprehensive Review of AI-Based Digital Twin Applications in Manufacturing: Integration Across Operator, Product, and Process Dimensions. *Electronics*, 14(4), 646. <https://doi.org/10.3390/electronics14040646>
- Alvarez, A. L., Mohammed, W. M., Vu T., Ahmadi, S., & Lastra, J. L. M. 2023. Enhancing Digital Twins of Semi-Automatic Production Lines by Digitizing Operator Skills. *Applied Sciences* 13(3), 1637. <https://doi.org/10.3390/app13031637>
- Anderson, JK, Howarth, E, Vainre, M, Humphrey, A, Jones, PB, & Ford, TJ. 2020. Advancing methodology for scoping reviews: recommendations arising from a scoping literature review (SLR) to inform transformation of Children and Adolescent Mental Health Services. *BMC Medical Research Methodology*, 20(1):242. <https://doi.org/10.1186/s12874-020-01127-3>
- Battini, D., Berti, N., Cella, C., Faroni, M., Garza, P., Guidolin, M., Moos, S., Olivetti, E. C., Reggiani, M., Sardani, E., & Tonello, S. 2024. Designing the Operator of the Future: The Architecture of Human Digital Twin Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 58(19), 355-360. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.237>
- Bécue, A., Maia, E., Feeken, L., Borchers, P., & Praça, I. 2020. A New Concept of Digital Twin Supporting Optimization and Resilience of Factories of the Future. *Applied Sciences*, 10(13), 4482. <https://doi.org/10.3390/app10134482>
- Berti, N., & Finco, S. 2022. Digital Twin and Human Factors in Manufacturing and Logistics Systems: State of the Art and Future Research Directions. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1893-1989. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.675>
- Berti, N., Finco, S., Guidolin, M., & Battini, D. 2023. Towards Human Digital Twins to enhance workers' safety and production system resilience. *IFAC-PapersOnline*, 56(2), 11062-11067. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.809>
- Bevilacqua, M., Bottani, E., Ciarapica, F. E., Costantino, F., Di Donato, L., Ferraro, A., Mazzuto, G., Monteriù, A., Nardini, G., Orteni, M., Paroncini, M., Pirozzi, M., Prist, M., Quatrini, E., Tronci, M., & Vignali, G. 2020. Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators' Risk in Process Plants. *Sustainability*, 12(3), 1088. <https://doi.org/10.3390/su12031088>
- Bortolini, M., Ferrari, E., Gamberi, M., Galizia, F. G., & Giannone, E. 2025. A Human-Digital Twin model to track human motion in an experimental Cyber-Socio-Technical System. *Procedia Computer Science*, 253, 1373-81. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.199>
- Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. European Commission. Bucci, I., Fani, V., & Bandinelli, R. Towards Human-Centric Manufacturing: Exploring the Role of Human Digital Twins in Industry 5.0. *Sustainability*, 17(1), 129. <https://doi.org/10.3390/su17010129>
- Chand, S., Zheng, H., & Lu, Y. 2024. A vision-enabled fatigue-sensitive human digital twin towards human-centric human-robot collaboration. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 432-445. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.10.002>
- Cutrona, V., Bonomi, N., Montini, E., Ruppert, T., Delinavelli, G., & Pedrazzoli, P. 2024. Extending factory digital Twins through human characterisation in Asset Administration Shell. *Internal Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 37(10-11), 1214-1231. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2278108>
- Denyer, D. & Tranfield, D. 2009. Producing a Systematic Review. In D.A., Buchanan & A., Bryman (Eds.), *The Sage Handbook of Organizational Research Methods* (pp. 671-689). Sage. <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/the-sage-handbook-of-organizational-research-methods/book230566#contents>
- Domínguez, L. G. I. 2024. Digital Twins in Industry 5.0 – a systematic literatura review. *European Public & Social Innovation Review*, 9. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-641>
- Feng, B., Wang, Z., Yuan, L., Zhou, Q., Chen, Y., & Bi, Y. 2025. Towards safe motion planning for industrial human-robot interaction: A co-evolution approach based on human digital twin and mixed reality. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 95, 103012. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103012>
- Greco, A., Caterino, M., Fera, M., & Gerbino, S. 2020. Digital Twin for Monitoring Ergonomics during Manufacturing Production. *Applied Sciences*, 10(21), 7758. <https://doi.org/10.3390/app10217758>
- Grego, G., Nenna, F., & Gamberini, L. 2024a. Enhancing Human-Machine Interactions: A Novel Framework for AR-Based Digital Twin Systems in Industrial Environments. In: *PETRA 24: Proceedings of the 17th International Conference on*

- PErvasive Technologies Related to Assistive Environments (pp. 456-462), Crete, Greece.
<https://doi.org/10.1145/3652037.3663946>
- Grego, G., Nenna, F., Gamberini, L. 2024b. XR-Based Digital Twin for Industry 5.0: A Usability and User Experience Evaluation. In: De Paolis, L.T., Arpaia, P., Sacco, M. (eds) Extended Reality. XR Salento 2024. Lecture Notes in Computer Science, 15027. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71707-9_33
- Iiuță, M.-E., Moiescu, M.-A., Pop, E., Ionita, A.-D., Caramihai, S.-I., & Mitulescu, T.-C. 2024. Digital Twin—A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields. Applied Sciences, 14(13), 5454. <https://doi.org/10.3390/app14135454>
- Kitchenham, B. & Charters, S. 2007. Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. Technical Report EBSE 2007-001. Keele University and Durham University. Joint Report, UK.
https://legacyfileshare.elsevier.com/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf
- Kober, C., Buxbaum-Conradi, S., Fette, M., Wulfsberg, J. P. 2024. Digital Twins: A Critical Perspective and Research Trends. In: IEEE 2024: International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (pp. 749-754), Bangkok, Thailand. <https://doi.org/10.1109/IEEM62345.2024.10857032>
- Kober, C., Medina, F. G., Benfer, M., Wulfsberg, J. P., Martinez, V., & Lanza, G. 2024. Digital Twin Stakeholder Communication: Characteristics, Challenges, and Best Practices. Computers in Industry, 161, 104135.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104135>
- Kortelainen, J., Minav, T., & Tammi, K. 2023. Digital twin—The dream and the reality. Frontiers in the Internet of Things, 2, 1108777. <https://doi.org/10.3389/friot.2023.1108777>
- Kovari, A. 2025. A Framework for Integrating Vision Transformers with Digital Twins in Industry 5.0 Context. Machines, 13(1), 36. <https://doi.org/10.3390/machines13010036>
- Krupas, M., Kajati, E., Liu, C., & Zolotova, I. 2024. Towards a Human-Centric Digital Twin for Human–Machine Collaboration: A Review on Enabling Technologies and Methods. Sensors, 24(7), 2232.
<https://doi.org/10.3390/s24072232>
- Kuštelega, M., Mekovec, R., & Shareef, A. 2024. Privacy and security challenges of the digital twin: systematic literature review. Journal of Universal Computer Science, 30(13), 1782-1806. <https://doi.org/10.3897/jucs.114607>
- Leirmo, T. L. 2024. Digital Twins for Industry 5.0: Unlocking the Human Potential. Procedia CIRP. 130, 761-766.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.161>
- Li, Y. L., Tsang, Y. P., Wu, C. H., & Lee, C. K. M. A multi-agent digital twin-enabled decision support system for sustainable and resilient supplier management. Computers & Industrial Engineering, 187, 109838.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109838>
- Liu X, Li G, Xiang F, Tao B, Jiang G. 2025. A digital twin-driven method for improving human comfort in human–robot collaboration. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 137, 339–359.
<https://doi.org/10.1007/s00170-025-15191-w>
- Maruyama, T., Ueshiba, T., Tada, M., Toda, H., Endo, Y., Domae, Y., Nakabo, Y., Mori, T., & Suita, K. 2021. Digital Twin-Driven Human Robot Collaboration Using a Digital Human. Sensors, 21(24), 8266.
<https://doi.org/10.3390/s21248266>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ..., Moher, D. 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372:n71.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Papacharalampopoulos, A., Sabatakakis, K., Karagianni, O.M., & Stavropoulos, P. 2025. Digital Twins of Manufacturing Processes Under Industry 5.0. In: Alexopoulos, K., Makris, S., Stavropoulos, P. (eds), Advances in Artificial Intelligence in Manufacturing II (pp. 3-11). ESAIM 2024, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-86489-6_1
- Pranckute, R. 2021. Web of Science (WoS) and Scopus: The Titans of Bibliographic Information in Today's Academic World. Publications, 9(1), 12. <https://doi.org/10.3390/publications9010012>
- Román, S. B., & Böttjer, T. 2025. A Methodological Approach to Prioritize Digital Twin Development in Manufacturing. Applied Stochastic Models in Business Industry, 41(3), e2889. <https://doi.org/10.1002/asmb.2889>

- Saporiti, N., Cannas, V. G., Pozzi, R., & Rossi, T. 202. Barriers and enablers to the implementation of digital twins in manufacturing companies: A literature review. In: XXV Summer School “Francesco Turco” – Industrial Systems Engineering. https://summerschool-aidi.it/images/papers/session_5_2020/ID-7.pdf
- Sharotry, A. J., Jimenez, J. A., Mediavilla, F. A. M., Wierschem, D., Koldenhoven, R. M., & Valles, D. 2022. Manufacturing Operator Ergonomics: A Conceptual Digital Twin Approach to Detect Biomechanical Fatigue. IEEE Access, 10, 12774-12791. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3145984>
- Shi, Y., Sheng, B., Zhu, J., Chen, G., Zhang, T., & Luo, R. 2024. A Human-Centric Design Method for Industrial Centrifugal Pump Based on Digital Twin. Processes, 12(1), 42. <https://doi.org/10.3390/pr12010042>
- Villegas, L. F., Macchi, M., & Polenghi, A. 2024. Digital Twins in Manufacturing: A Three-layer Heat-map Analysis. IFAC-PapersOnLine, 58(19), 646-651. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.227>
- Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., Yuan, Y., Wuest, T., Yang, H. & Wang, L. 2024. Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 85, 102626. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102626>
- Wang, T., Liu, Z., Wang, L., Li, M., Wang, X. V. 2025. A design framework for high-fidelity human-centric digital twin of collaborative work cell in Industry 5.0. Journal of Manufacturing Systems, 80, 140-156. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.02.018>
- Yang, T., Razzaq, L., Fayaz, H., & Qazi, A. 2024. Redefining fan manufacturing: Unveiling industry 5.0’s human-centric evolution and digital twin revolution. Heliyon, 10(13), e33551. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33551>
- Yang, C., Yu, H., Zheng, Y., Ala-Laurinaho, R., Feng, L., & Tammi, K. 2024. Towards Human-Centric Manufacturing: Leveraging Digital Twin for Enhanced Industrial Processes. In: IECON 2024: Proceedings of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 1-7), Chicago, USA. <https://doi.org/10.1109/IECON55916.2024.10905474>
- Yin, Y., Zheng, P., Li, C., & Wang, L. A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 81, 102515. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102515>
- Zare, A., & Lazarova-Molnar, S. 2024. Validation of Digital Twins in Labor-intensive Manufacturing: Significance and Challenges. Procedia Computer Science, 238:623–630. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.070>
- Zhang, X., Yang, Y., Zhang, X., Hu, Y., Wu, H., Li, M., Handroos, H., & Wu, B. 2024. A multi-level digital twin construction method of assembly line based on hybrid worker digital twin models. Advanced Engineering Informatics, 62, 102597. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102597>

7 Liitteet

7.1 Liite 1: Literature review (unpublished)

7.1.1 Human Factors in industrial Digital twin solution design and implementation

One part of the three-part research questions addressed the human factors in manufacturing DT solutions. Although the phrase was always not directly used, several topics that represent the idea were identified. When used explicitly, the term appears to be used in a descriptive manner. The table below describes the articles in which human factors were coined with digital twin solutions. After the table, the topics are described.

Table 1. Papers addressing human factors in manufacturing DT solutions.

Author	Year	Title
Alfaro-Viquez et al. (1)	2025	A Comprehensive Review of AI-Based Digital Twin Applications in Manufacturing: Integration Across Operator, Product, and Process Dimensions
Alvarez et al. (2)	2023	Enhancing Digital Twins of Semi-Automatic Production Lines by Digitizing Operator Skills
Battini et al. (3)	2024	Designing the Operator of the Future: The Architecture of Human Digital Twin Systems
Berti & Finco (4)	2022	Digital Twin and Human Factors in Manufacturing and Logistics Systems: State of the Art and Future Research Directions
Bécue et al. (5)	2020	A New Concept of Digital Twin Supporting
Berti et al. (6)	2023	Optimization and Resilience of Factories of the Future
Bevilacqua et al. (7)	2020	Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators' Risk in Process Plants.
Bortolini et al. (8)	2025	A Human-Digital Twin model to track human motion in an experimental Cyber-Socio-Technical System
Bucci et al. (9)	2025	Towards Human-Centric Manufacturing: Exploring the Role of Human Digital Twins in Industry 5.0
Chand et al. (10)	2024	A vision-enabled fatigue-sensitive human digital twin towards human-centric human-robot collaboration
Cutrona et al. (11)	2024	Extending factory digital Twins through human characterisation in Asset Administration Shell
Domínguez (12)	2024	Digital Twins in Industry 5.0 – a systematic literatura review
Feng et al. (13)	2025	Towards safe motion planning for industrial human-robot interaction: A co-evolution approach based on human digital twin and mixed reality
Greco et al. (14)	2020	Digital Twin for Monitoring Ergonomics during Manufacturing Production
Grego et al. (15)	2024	Enhancing Human-Machine Interactions: A Novel Framework for AR-Based Digital Twin Systems in Industrial Environments
Grego et al. (16)	2024	XR-Based Digital Twin for Industry 5.0: A Usability and User Experience Evaluation
Kovari & Kovari (17)	2025	A Framework for Integrating Vision Transformers with Digital Twins in Industry 5.0 Context
Krupas et al. (18)	2024	Towards a Human-Centric Digital Twin for Human–Machine Collaboration: A Review on Enabling Technologies and Methods
Leirimo (19)	2024	Digital Twins for Industry 5.0: Unlocking the Human Potential

Author	Year	Title
Li et al. (20)	2024	A multi-agent digital twin-enabled decision support system for sustainable and resilient supplier management
Liu et al. (21)	2025	A digital twin driven method for improving human comfort in human-robot collaboration
Maruyama et al. (22)	2021	Digital Twin-Driven Human Robot Collaboration Using a Digital Human
Papacharalampopoulos et al. (23)	2025	Digital Twins of Manufacturing Processes Under Industry 5.0
Sharotry (24)	2022	Manufacturing Operator Ergonomics: A Conceptual Digital Twin Approach to Detect Biomechanical Fatigue
Shi et al. (25)	2023	A Human-Centric Design Method for Industrial Centrifugal Pump Based on Digital Twin
Wang et al. (26)	2024	Human Digital Twin in the context of Industry 5.0.
Wang et al. (27)	2025	A design framework for high-fidelity human-centric digital twin of collaborative work cell in Industry 5.0
Yin et al. (28)	2023	A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation
Zare & Lazarova-Molnar (29)	2024	Validation of Digital Twins in Labor-Intensive Manufacturing: Significance and Challenges
Zhang et al. (30)	2024	A multi-level digital twin construction method of assembly line based on hybrid worker digital twin models

Of the papers presented in the table , 6 are literature reviews (1,4,9,12,18,28), 18 have reviewed literature (2,3,5-7,10,21,24-26) or related works (13,15,16,20,22,27,29,30), and 6 remain as basic research studies (8,11,14,17,19,23)

7.1.1.1 Human digital twins

Human Digital Twins (HDTs), digital replicas of human operators, are envisioned to be included in industrial DT solutions. They utilize data collected from the operators and model the human asset in much the same the technical production assets related to manufacturing.

Modern technology, such as wearable devices, allows for numerous live data collected from operators. From operator movement in the production facilities to operator's psychological and emotional states, wide possibilities for data collection are technically possible with existing technology. E.g. Battini et al. (3) present a HDT architecture in which a notably high number of variables, including but not limited to heartrate, skin conductivity, electroencephalography (EEG) and eye movement of the operators, are monitored in real time. Collecting data that can help address the individual characteristics of a human operator, could help create a functional human-machine connection (1). Ethical concerns of such approach, however, are notably many (see section 4.3).

10 articles address the prospect of having live data of operators included in the form of a human digital twin (1,3,4,8–12,18,26).

7.1.1.2 Decision-making

Real-time information acquired from the DT to assist decision-making is a grand theme among the reviewed articles. Supporting operative decisions through information included in the digital twin is a central target for DT applications. Production workers, maintenance personnel and business leaders can utilize DT technology in reaching better decisions (7).

Kovari (17) presents a framework for analysing multidimensional data, integrating operational and visual streams into DTs for real-time tracking and application in decision-making. Their framework relies on Vision transformers, a technology that makes it possible for operators to gain information from the DT in visual form.

Li et al (20) utilize DT-technology in supplier segmentation. the decision model identifies weak points among established suppliers from the segmentation outcomes and proposes potential development strategies via supplier development simulation (Strategic supplier, Leverage supplier, Non-critical supplier & Bottlenecksupplier). They state, however, that difficulties in obtaining objective data became a limitation of the study.

All of the reviewed articles refer to utilizing DT technologies to support decision-making in manufacturing.

7.1.1.3 Human operator productivity

Productivity is a central goal issued to manufacturing DTs. As an extension to this goal, human operator productivity is approached in human-oriented DT solutions. Human operator productivity is approached by 20 articles through simple parameters such as capacity and speed (26). Alvarez et al. (2) present a solution for utilizing information about human operator productivity in balancing operators' workload within a production line. Benefits include increasing product quality while reducing the number of defects. Operator productivity is a human factor considered in 9 of the reviewed articles (2,9–11,15,24,26,30).

7.1.1.4 Well-being and safety

Operator well-being is addressed in 11 articles (2–4,6,9–12,15,26,28). E.g. 7 deduce that in utilizing Human Digital Twin technologies, the data concerning human physical and emotional states of workers could help focus timely well-being focused interventions. Similarly, 3 present well-being and safety as the most researched area of Human Digital Twin applications in manufacturing. Well-being is also deduced to increase as a result of HDT technology, because it allows human operators to gain better control of their work and be more productive (2).

Liu et al. (21) approach the topic of "human comfort". They state that the topic of human comfort has not been previously studied in relation to human-robot collaboration in utilizing digital twins. In their model, focus was on monitoring "human work status" including heart rate, blood pressure,

respiratory rate, pulse, and body temperature, through which human physiological status and fatigue could be monitored. Additional assessments were made regarding human posture.

DT solutions could e.g. enable human operators to accurately receive real-time warnings regarding sudden dangers in. This would enable them to make better safety-decisions and react to dangers (26). Benefits include increasing product quality while reducing then number of defects, in addition to reducing work safety risks (monotony, fatigue) and their consequences (absenteeism, long-term muscular disorder). All but 3 of the reviewed articles (17, 23, 24) address safety.

7.1.1.5 Physical ergonomics

Postural ergonomics, such as joint angles and other aspects related to excessive physical strain, can easily be monitored using vision sensors as a part of DT solutions. It is possible to monitor e.g. postural changes indicative of physical fatigue (3). Feedback and warnings regarding proper working posture can be issued to operators in DT solutions. 11 articles address physical (postural) ergonomics (3,4,9,11,12,14,18,24,26–28).

7.1.1.6 Cognitive ergonomics

In line with cognitive ergonomics, several articles discussed DT solutions with regard to human cognition. From “cognitive digital twins” that utilize AI and machine learning to gain human-like qualities in decision-making, to DTs sensitive to human psychological and cognitive strain, cognitive aspects are often targeted in DTs addressing human qualities. E.g. Battini et al. (3) present cognitive strain as a variable that DTs could potentially utilize through real-time data, such as EEG and EDA. Relying on sensors to produce data goes beyond the traditional methods, such as interviews, in acquiring information on cognitive strain. 10 articles focus on cognitive aspects of operators in DT-solutions (1–4,9,10,15,18,24,28).

7.1.1.7 Usability and user experience

The topic of usability from the perspective of potential users, such as people working in manufacturing (operators), engineers and managers should be considered in designing DT solutions (19). A central concern with regard to usability is the interface through which people access and use the DT solution. Especially the design phase stands out as important regarding this aspect. E.g. Yin et al. (28) emphasize the importance of following design principles early on in the design phase.

Yin et al. (28) highlight the need for collaboration with users in the design of user-friendly interfaces to interact with the DT model with an Augmented Reality (AR) extension. Focusing on XR-mediated DT-solution, user interaction with the DT and the feedback users receive are addressed. They state that human-related tests and data can enhance designing DT-solutions. Cutrona et al. (11) emphasize the importance of proper training to the DT solutions to ensure efficiency and fluency of use. They also highlight the importance of user-friendliness in the solutions. Shi et al. (25) note the importance of user-centered design philosophy in designing DT solutions, as well as preparedness for adjustments based on user feedback. They suggest a user-centred design pattern should consist of 1) understanding user requirements 2) Human centric design process 3) User

feedback and 4) continuous design optimization. Domínguez (12) emphasizes the need for user-friendly interfaces and comprehensive training to ensure that operators can effectively use DTs with reasonable cognitive strain and stress.

7.1.1.8 Human-Machine collaboration

Especially in articles addressing co-bots (robots designed to assist human operators in work-tasks), human-machine collaboration is approached (12,15,23,26,27).

7.1.2 Organizational factors in industrial DT solutions

The research strategy relied heavily on the assumption that the phrase “organizational factors” would be commonly used. This assumption was not correct, which reduced the quality of the results. Many papers, however, addressed the organizational aspects especially regarding implementation. Two grand themes were identified. The table below describes all the articles that focused on the topic. After the table, the themes identified are presented.

Table 2. Papers addressing organizational factors in manufacturing DT solutions.

Author	Year	Title
Alvarez et al. (2)	2023	Enhancing Digital Twins of Semi-Automatic Production Lines by Digitizing Operator Skills
Battini et al. (3)	2024	Designing the Operator of the Future: The Architecture of Human Digital Twin Systems
Berti & Finco (4)	2022	Digital Twin and Human Factors in Manufacturing and Logistics Systems: State of the Art and Future Research Directions
Bevilacqua et al. (7)	2020	Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators’ Risk in Process Plants.
Cutrona et al. (11)	2024	Extending factory digital Twins through human characterisation in Asset Administration Shell
Domínguez (12)	2024	Digital Twins in Industry 5.0 – a systematic literatura review
Kober et al. (31)	2024	Digital Twins: A Critical Perspective and Research Trends
Kober et al. (32)	2024	Digital Twin Stakeholder Communication: Characteristics, Challenges, and Best Practices
Li et al. (20)	2024	A multi-agent digital twin-enabled decision support system for sustainable and resilient supplier management
Román & Böttjer (33)	2025	A Methodological Approach to Prioritize Digital Twin Development in Manufacturing
Saporiti et al. (34)	2020	Barriers and enablers to the implementation of Digital Twins in manufacturing companies: a literature review
Sharotry (24)	2022	Manufacturing Operator Ergonomics: A Conceptual Digital Twin Approach to Detect Biomechanical Fatigue
Villegas et al. (35)	2024	Digital Twins in Manufacturing: A Three-layer Heat-map Analysis

Author	Year	Title
Wang et al. (26)	2024	Human Digital Twin in the context of Industry 5.0.
Yang et al. (36)	2024	Redefining fan manufacturing: Unveiling industry 5.0's human-centric evolution and digital twin revolution
Yang et al. (37)	2024	Towards Human-Centric Manufacturing: Leveraging Digital Twin for Enhanced Industrial Processes
Zhang et al. (30)	2024	A multi-level digital twin construction method of assembly line based on hybrid worker digital twin models

Of these papers, in addition to result presented in section 4.1., 2 (34,35) are literature reviews, 2 have reviewed related works (33,37) and 3 remain as basic research studies (31,32,36).

Six articles were found address the idea of an organization as a socio-technical system. (4,7,12,26,31,33).

7.1.2.1 Organizational challenges and enablers of utilizing DT solutions

Altogether seven articles refer to organizational challenges and enablers of utilizing DT solutions (9,12,18-19,31,34-35)

Kober et al. (31) state that only if integrated carefully in existing organizational structures and the company strategy, a DT can bring added value. DT solutions need to be considered a means to an end, not an end in it itself. Kober et al. (31) also discusses the main organizational challenges in regard to DT utilization: 1) understanding the objectives, 2) understanding the benefits and (3) appropriate and effective modeling.

Similarly, Saporiti et al. (34) address the enabling and hindering factors related to DT implementation in industries, especially for SMEs. To develop a successful DT implementation process, a general cultural change is needed, including flattening the hierarchies in the entire company. Also, technological transformation must create enough value to justify all the needed resources. Saporiti et al. (34) pinpoint the importance of the managers' roles and mindsets for the change, e.g. they should be able to communicate and collaborate with all the company units and train sophisticated soft-skills allowing them to effectively switch roles with the situations. Thus, working/functioning enablers include strategizing the transformation process, planning an innovation process of infrastructure (infrastructure should be comprehensive, scalable, analytics-enabled, integrated and secure) and mobilising the entire organisation.

7.1.2.2 Human Resource Allocation

Altogether 5 articles refer to human resource allocation as a function of DT technologies (2,3,24,30,35)

Including process workers in DTs can help better allocate the human resource. Alvarez et al. (2) present a DT focused on a job rotation scheme, which also takes into account worker performance in human resource allocation. Also Sharotry et al. (24) concentrate on human resource allocation.

Battini et al. (3) approach the human resource allocation, including “worker state” as one of the principles to which allocation is based. Villegas et al. (35) utilize worker skills as similar principle. Zhang et al. (30) utilize simple parameters of speed and capacity to assist job allocation.

7.1.2.3 Resilience

Resilience is also addressed in several articles at least as through descriptive mentions. E.g. Bortolini et al. (8) present an experimental cyber socio-technical system (CSTS) plant, which could potentially be targeted by cyber-attacks. The article proposes the design and development of an integrated DT to assess industrial plants’ resilience in spite of cyber threats, still acknowledging human actions. In the system, human operators’ movement are tracked with the intent to close the loop of an instruction-action-check-reaction -cycle. Bécue et al. (2020) approached resilience from the perspective of technical, organizational, and cybersecurity-related preparedness. Berti et al. (2023) approach resilience through the recovery capability of the production system and the continuous monitoring of workers’ workload.

7.1.3 Ethical issues in DT design and implementation

One part of the three-part research question addressed the ethical aspects of Digital Twin solutions regarding human inclusion in the DT solution. Articles addressing the ethical aspects of DT solutions are presented in the table below. Essential ethical considerations are presented in the text after the table.

Table 3. Papers addressing ethical aspects of DT solutions.

Author	Year	Title
Battini et al. (3)	2024	Designing the Operator of the Future: The Architecture of Human Digital Twin Systems
Cutrona et al. (11)	2024	Extending factory digital Twins through human characterisation in Asset Administration Shell
Domínguez (12)	2024	Digital Twins in Industry 5.0 – a systematic literaturra review
Grego et al. (15)	2024	Enhancing Human-Machine Interactions: A Novel Framework for AR-Based Digital Twin Systems in Industrial Environments
Grego et al. (16)	2024	XR-Based Digital Twin for Industry 5.0: A Usability and User Experience Evaluation

Author	Year	Title
Iliuță et al. (38)	2024	Digital Twin—A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields
Kober et al. (31)	2024	Digital Twins: A Critical Perspective and Research Trends
Kovari (17)	2025	A Framework for Integrating Vision Transformers with Digital Twins in Industry 5.0 Context
Krupas et al. (18)	2024	Towards a Human-Centric Digital Twin for Human–Machine Collaboration: A Review on Enabling Technologies and Methods
Papacharalampopoulos et al. (23)	2025	Digital Twins of Manufacturing Processes Under Industry 5.0
Román & Böttjer (33)	2025	A Methodological Approach to Prioritize Digital Twin Development in Manufacturing
Wang et al. (27)	2025	A design framework for high-fidelity human-centric digital twin of collaborative work cell in Industry 5.0
Zare & Lazarova-Molnar (29)	2024	Validation of Digital Twins in Labor-Intensive Manufacturing: Significance and Challenges

Of these papers, in addition to result presented in section 4.1. and 4.2, (38) is a literature review.

Due to the research choice made to include Human Digital Twin-technology, and the many ethical considerations regarding them, there were several articles addressing the ethical aspects of DT technology in depth. Although the level and focus of data collected from human operators in HDT-solutions is much more detailed than in conventional DT solutions, they may capture ethical concerns more widely, including an amplified element of employee monitoring. Proper design of the user interface as well as the ability to follow GDPR are essential for meeting high ethical standard in DT solutions sensitive to humans.

The main ethical considerations include

1. data security and privacy,

2. worker monitoring (surveillance)

Domínguez (12) suggest there is a lack of ethical considerations in current literature and Papacharalampopoulos et al. (23) suggests addressing ethical and social implications of increased automation and human-machine collaboration to ensure responsible, sustainable advancements.

Maintaining trust and gaining acceptance for the new technology with workers is addressed by e.g. Grego et al. 2024 (15), who state that “gaining dispositional trust is central integrating novel devices into traditionally physical and hand-based workflows”. They state design collaboration with workers in the early phases of DT design process to minimize cognitive strain caused by DT solutions and considering the unique needs and preferences of users are important prerequisites for gaining trust and acceptance in DT implementation. User experience expertise is also emphasized by Grego et al. 2026 (16). Kober et al. (31) point to deep consideration of the end-user organization particularities by ensuring opportunities for participation in the design process. Maintaining trust and gaining acceptance for the new technology with workers is addressed by e.g. Grago et al. (15), who state that “gaining dispositional trust is central integrating novel devices into traditionally physical and hand-based workflows”. They state design collaboration with workers in the early phases of DT design process to minimize cognitive strain caused by DT solutions and considering the unique needs and preferences of users are important prerequisites for gaining trust and acceptance in DT implementation. User experience expertise is also emphasized by Grego et al. (16) Kober et al. (31) point to deep consideration of the end-user organization particularities by ensuring opportunities for participation in the design process.

Grego et al. (15) state that the acceptability of DT solutions among workers in industrial facilities is addressed with regard to ethical considerations. Battini et al. (3) recognize the possibility that “continuous monitoring process may lead to the generation of cognitive stress”

In their detailed ethical account on the legal and ethical perspectives regarding Human Digital Twins, Cutrona et al. (11) note that the use of virtual representations of humans present a significant risks to privacy, data security, and other fundamental human rights. They call for regulation and conscious attention to ethicality, transparency and responsibility in HDT solutions. Labour issues can relate to the ethical considerations in utilizing DTs. Kovari (17) sees that DT technology could be utilized to replace workers, leading ethical considerations to the role of the changes to labour markets.

DTs may also include other technologies carrying ethical issues. E.g. Krupas et al. (18) issue their ethical considerations to using AI as an enabling technology to DTs.

7.1.4 Side remarks and limitations

It should be noted that DT-solutions utilize various enabling technologies with their own implications for including the human factors, ethical issues and organizational factors. Artificial intelligence, Virtual or Augmented reality can be essential in practical DT solutions, but they are

not necessarily included in all DT solutions. The set of technologies included can greatly influence to the human, ethical and organizational factors of each specific solution.

Another thing to notice is that the search focuses on applying the human component in DT solutions, leading to a strong emphasis on a Human Digital Twins (HDT, also operator DT and worker DT). HDT was, however, not chosen as an exclusion criteria, as this exclusion would have reduced the quality of results regarding the ethical considerations. Results related to Human Digital Twin -technologies should be considered an extreme example of the role of humans in industrial DT-solutions in Europe, as many solutions presented in reviewed articles are in clear contradiction with European GDPR legislation.

Organizational factors were not easy to identify. The phrase is rarely used explicitly, although several factors falling into the category can be identified from the articles.

One obvious limitation is the unintended exclusion of “industry” in the search phrase. If this review was to be limited, the writers suggest including the concept. The consequences of this exclusion are, however, limited as the other search-phrases used included the concept. Another thing to consider as a limitation, especially if using the same or similar search string, is the lack of the phrase “human centered” in addition to “human centric”. We highly recommend including this phrase in future research addressing the role of human operators in DTs.

All in all, the search allows summing up themes in all three chosen aspects, namely Human Factors, Ethical issues and Organizational factors.

7.1.5 Conclusions and outlook

This review focused on the Human Factors, Organizational factors and Ethical concerns in utilizing DT technology. Propelled by the centrality of Human-centricity in Industry 5.0, the Human Factor is addressed in many research articles that focus on the future possibilities of industrial DT-solutions. In the current body of literature, human factors are often approached through by new technologies that enable real-time data gathering from human operators.

A wide range of Human Factors are considered in relation to DT solutions. Supporting decision-making through improved situational awareness is an integral element in almost all articles reviewed here. Controlling the physical and cognitive strain by utilizing live data is a prominent theme. From another viewpoint, user-centricity and user experience are addressed, highlighting the importance of collaboration between the end-users and design teams. A very relevant point here is to ensure that the design solutions genuinely support users in meeting their goals and that new technologies themselves do not cause additional strain. Human-technology interaction, especially regarding technologies such as co-bots requiring thorough planning of human robot - interaction, is a central theme in the reviewed literature.

The organizational factors were difficult to address. The review, however, captured articles focusing on the hindrances and enablers regarding the adoption of DT technologies in manufacturing. As the technological solutions are relatively new, companies should strive to gain understanding of the potential of such technologies in their operations. This is a prerequisite for understanding just what kinds of problems can be solved with the technology and planning effective solutions.

A very central concern with many DT solutions for European markets, especially including the Human Digital Twin, is complying with GDPR and ensuring data security and privacy. Especially when collecting live data of workers, thorough consideration is needed to ensure compatibility with legislation. HDT-solutions elaborated in several articles would result in a state of active surveillance of the operators, and the writers of this section strongly advice against it. The need for thorough ethical considerations is not limited to Human Digital twins, but also conventional industrial DT solutions will be confronted with similar challenges regarding operator data (29).

From the viewpoint of designing new industrial DT-solutions, another possible approach to considering humans should be noted. Instead of using highly detailed data collected real-time from human operators, Human-Centered design approach can be taken to ensure considering the human factor early on and through the design process (e.g. Yin (28)). This should ensure good handling of the human factors, while also avoiding the obvious juridical problems related to approaches that rely on real-time data collected from human operators. Special caution is needed, as there is a vast body on scientific research focused on Human Digital Twins pointed towards solutions that are clearly against European legislation.

7.1.6 References

1. Alfaro-Viquez D, Zamora-Hernandez M, Fernandez-Vega M, Garcia-Rodriguez J, Azorin-Lopez J. A Comprehensive Review of AI-Based Digital Twin Applications in Manufacturing: Integration Across Operator, Product, and Process Dimensions. *Electron* 2025 Vol 14 Page 646 [Internet]. 2025 Feb 7;14(4). Available from: <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/4/646>
2. Alvarez AL, Mohammed WM, Vu T, Ahmadi S, Lastra JLM. Enhancing Digital Twins of Semi-Automatic Production Lines by Digitizing Operator Skills. *Appl Sci* 2023 Vol 13 Page 1637 [Internet]. 2023 Jan 27;13(3). Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/3/1637>
3. Battini D, Berti N, Cella C, Faroni M, Garza P, Guidolin M. Designing the Operator of the Future: The Architecture of Human Digital Twin Systems. *IFAC-Pap* [Internet]. 2024 Jan 1;58(19). Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896324016665>
4. Berti N, Finco S. Digital Twin and Human Factors in Manufacturing and Logistics Systems: State of the Art and Future Research Directions. *IFAC-Pap* [Internet]. 2022 Jan 1;55(10). Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322019930>

5. Bécue A, Maia E, Feeken L, Borchers P, Praça I. A New Concept of Digital Twin Supporting Optimization and Resilience of Factories of the Future. *Appl Sci*. 2020 Jan;10(13):4482.
6. Berti N, Finco S, Guidolin M, Battini D. Towards Human Digital Twins to enhance workers' safety and production system resilience. *IFAC-Pap* [Internet]. 2023 Jan 1;56(2). Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896323011862>
7. Bevilacqua M, Bottani E, Ciarapica FE, Costantino F, Donato LD, Ferraro A. Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators' Risk in Process Plants. *Sustain* 2020 Vol 12 Page 1088 [Internet]. 2020 Feb 4;12(3). Available from: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/3/1088>
8. Bortolini M, Ferrari E, Gamberi M, Galizia FG, Giannone E. A Human-Digital Twin model to track human motion in an experimental Cyber-Socio-Technical System. *Procedia Comput Sci*. 2025 Jan 1;253:1373–81.
9. Bucci I, Fani V, Bandinelli R, Bucci I, Fani V, Bandinelli R. Towards Human-Centric Manufacturing: Exploring the Role of Human Digital Twins in Industry 5.0. *Sustain* 2025 Vol 17 Page 129 [Internet]. 2024 Dec 27;17(1). Available from: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/1/129>
10. Chand S, Zheng H, Lu Y. A vision-enabled fatigue-sensitive human digital twin towards human-centric human-robot collaboration. *J Manuf Syst* [Internet]. 2024 Dec 1;77. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612524002309>
11. Cutrona V, Bonomi N, Montini E, Ruppert T, Delinavelli G, Pedrazzoli P. Extending factory digital Twins through human characterisation in Asset Administration Shell. *Int J Comput Integr Manuf* [Internet]. 2024 Nov 1;37(10–11). Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0951192X.2023.2278108>
12. Domínguez LGI. Digital Twins in Industry 5.0 – a systematic literatura review. *Eur Public Soc Innov Rev* [Internet]. 2024 Aug 30;9. Available from: <https://epsir.net/index.php/epsir/article/view/641>
13. Feng B, Wang Z, Yuan L, Zhou Q, Chen Y, Bi Y. Towards safe motion planning for industrial human-robot interaction: A co-evolution approach based on human digital twin and mixed reality. *Robot Comput-Integr Manuf*. 2025 Oct;95:103012.
14. Greco A, Caterino M, Fera M, Gerbino S, Greco A, Caterino M. Digital Twin for Monitoring Ergonomics during Manufacturing Production. *Appl Sci* 2020 Vol 10 Page 7758 [Internet]. 2020 Nov 2;10(21). Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/21/7758>
15. Grego G, Nenna F, Gamberini L. Enhancing Human-Machine Interactions: A Novel Framework for AR-Based Digital Twin Systems in Industrial Environments | Proceedings of the 17th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments. *Proc 17th*

Int Conf PErvasive Technol Relat Assist Environ [Internet]. 2024; Available from: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3652037.3663946>

16. Grego G, Nenna F, Gamberini L. XR-Based Digital Twin for Industry 5.0: A Usability and. Lect Notes Comput Sci [Internet]. 2024; Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-71707-9_33

17. Kovari A. Framework for Integrating Vision Transformers with Digital Twins in Industry 5.0 Context. Mach 2025 Vol 13 Page 36 [Internet]. 2025 Jan 7;13(1). Available from: <https://www.mdpi.com/2075-1702/13/1/36>

18. Krupas M, Kajati E, Liu C, Zolotova I. Towards a Human-Centric Digital Twin for Human–Machine Collaboration: A Review on Enabling Technologies and Methods. Sens 2024 Vol 24 Page 2232 [Internet]. 2024 Mar 30;24(7). Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/7/2232>

19. Leirimo TL. Digital Twins for Industry 5.0: Unlocking the Human Potential. Procedia CIRP [Internet]. 2024 Jan 1;130. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827124013180>

20. Li YL, Tsang YP, Wu CH, Lee CKM. A multi-agent digital twin-enabled decision support system for sustainable and resilient supplier management. Comput Ind Eng. 2024 Jan 1;187:109838.

21. Liu X, Li G, Xiang F, Tao B, Jiang G. A digital twin-driven method for improving human comfort in human–robot collaboration. Int J Adv Manuf Technol. 2025 Feb 15;137:339–59.

22. Maruyama T, Ueshiba T, Tada M, Toda H, Endo Y, Domae Y, et al. Digital Twin-Driven Human Robot Collaboration Using a Digital Human. Sensors. 2021 Jan;21(24):8266.

23. Papacharalampopoulos A, Sabatakakis K, Karagianni OM, Stavropoulos P. Digital Twins of Manufacturing Processes Under Industry 5.0. Lect Notes Mech Eng [Internet]. 2025; Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-86489-6_1

24. Sharotry AJ, Mediavilla FAM, Wierschem D, Koldenhoven RM, Valles D. Manufacturing Operator Ergonomics: A Conceptual Digital Twin Approach to Detect Biomechanical Fatigue. IEEE Access [Internet]. 2022;10. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9690874>

25. Shi Y, Sheng B, Zhu J, Chen G, Zhang T, Luo R. A Human-Centric Design Method for Industrial Centrifugal Pump Based on Digital Twin. Process 2024 Vol 12 Page 42 [Internet]. 2023 Dec 23;12(1). Available from: <https://www.mdpi.com/2227-9717/12/1/42>

26. Wang B, Zhou H, Li X, Yang G, Zheng P, Song C. Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. *Robot Comput-Integr Manuf* [Internet]. 2024 Feb 1;85. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584523001011>
27. Wang T, Liu Z, Wang L, Li M, Wang XV. A design framework for high-fidelity human-centric digital twin of collaborative work cell in Industry 5.0. *J Manuf Syst* [Internet]. 2025 June 1;80. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612525000561?via%3Dihub>
28. Yin Y, Zheng P, Li C, Wang L. A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation. *Robot Comput-Integr Manuf* [Internet]. 2023 June 1;81. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584522001971>
29. Zare A, Lazarova-Molnar S. Validation of Digital Twins in Labor-intensive Manufacturing: Significance and Challenges. *Procedia Comput Sci*. 2024;238:623–30.
30. Zhang X, Yang Y, Zhang X, Hu Y, Wu H, Li M. A multi-level digital twin construction method of assembly line based on hybrid worker digital twin models. *Adv Eng Inform* [Internet]. 2024 Oct 1;62. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034624002453>
31. Kober C, Buxbaum-Conradi S, Fette M, Wulfsberg JP. Digital Twins: A Critical Perspective and Research Trends. 2024 IEEE Int Conf Ind Eng Eng Manag IEEM [Internet]. 2024; Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10857032>
32. Kober C, Medina FG, Benfer M, Wulfsberg JP, Martinez V, Lanza G. Digital Twin Stakeholder Communication: Characteristics, Challenges, and Best Practices. *Comput Ind*. 2024 Oct 1;161:104135.
33. Román SB, Böttjer T. A Methodological Approach to Prioritize Digital Twin Development in Manufacturing. *Appl Stoch Models Bus Ind* [Internet]. 2025 May 1;41(3). Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/asmb.2889>
34. Saporiti N, Cannas VG, Pozzi R, Rossi T. Barriers and enablers to the implementation of digital twins in manufacturing companies: A literature review. 2020.
35. Villegas LF, Macchi M, Polenghi A. Digital Twins in Manufacturing: A Three-layer Heat-map Analysis. *IFAC-Pap* [Internet]. 2024 Jan 1;58(19). Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896324016550>
36. Yang T, Razzaq L, Fayaz H, Qazi A. Redefining fan manufacturing: Unveiling industry 5.0's human-centric evolution and digital twin revolution - PubMed. *Heliyon* [Internet]. 2024 June 26;10(13). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39050440/>

37. Yang C, Yu H, Zheng Y, Ala-Laurinaho R, Feng L, Tammi K. Towards Human-Centric Manufacturing: Leveraging Digital Twin for Enhanced Industrial Processes. 2024; Available from: <https://research.aalto.fi/en/publications/towards-human-centric-manufacturing-leveraging-digital-twin-for-e>

38. Iliuță ME, Moiescu MA, Pop E, Ionita AD, Caramihai SI, Mitulescu TC. Digital Twin—A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields. Appl Sci 2024 Vol 14 Page 5454 [Internet]. 2024 June 24;14(13). Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/13/5454>

7.2 Liite 2: haastattelurungot

A1. Interview questions to DT-end-users

1. How do you use Digital Twins in your company? (What kinds of machinery is involved? What are the DT-supported production processes like?)
2. What advantages do Digital Twin-solutions bring to your company? (What do you achieve by using DT solutions?)
3. How has the DT-technology been implemented in your company? (What personnel groups were involved in implementation? How was the implementation prepared and communicated? What were the main challenges of the implementation?)
4. Who in your company operates the Digital Twin(s)? What actions does using the Digital Twin require?
5. Are the DT-solutions easy to use? (What makes using the DT easy/difficult?)
6. What kind of collaboration has there been between DT designers and your company in the design, implementation and use-phases?
7. How have the DT solutions been received among the staff?

A2. Interview questions for DT developers

1. What kinds of products and services do your clients produce?
2. For what purposes do your clients use DTs
3. What benefits do your clients get by using the DT solutions you produce?

4. What kind of collaboration have you engaged with your customers regarding the design and implementation of DT solutions?
5. Who in your clients' company operate the Digital Twins? How are they considered in the design-process?
6. Do the DT solutions you produce support the following aspects, how?
 - a. Decision-making
 - b. Productivity
 - c. Well-Being

A3. Interview questions to public authorities

1. Are there regulatory measures planned for the use of Digital Twin solutions in the industry?
2. What issues regarding the use of Digital Twins in industry should be addressed by regulators?
3. Are personal data rights and data security relevant aspects regarding the industrial DT solutions?
4. Is overly active surveillance of staff by employers a relevant aspect regarding the industrial DT solutions?



tecnal:a

MEMBER OF BASQUE RESEARCH
& TECHNOLOGY ALLIANCE



Työsuojelurahasto
Arbetskyddsfonden
The Finnish Work Environment Fund



OSALAN

HumanDT-hankkeessa selvitettiin, miten teollisuuden digitaaliset kaksoset (Digital Twins, DT) voidaan suunnitella ja ottaa käyttöön tavalla, joka tukee työturvallisuutta ja käyttäjien hyvinvointia sekä ottaa huomioon eettiset seikat ja inhimilliset tekijät. Hankkeen lopputuotoksena laadittiin ohjeistus digitaalisten kaksosten suunnittelijoille ja käyttönottajille.

Työterveyslaitos

PL 40

00251 Helsinki

www.ttl.fi

ISBN 978-952-391-249-6

Työterveyslaitos

Arbetshälsoinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health