



Univerza v Mariboru

Fakulteta za logistiko

Digitalni dvojniki

Raziskava o digitalnih dvojnikih

Avtorji:

asist. Nena Orel Šanko, mag.

inž. log.

red. prof. dr. Borut Jereb

Celje, januar 2025

Digitalni dvojniki

Ključne besede: definicija, vrste, življenjski cikel produkta, oskrbovalne verige, logistika

Povzetek

Digitalni dvojnik je virtualna replika fizičnega sistema, ki omogoča simulacijo, analizo in optimizacijo procesov skozi celoten življenjski cikel produkta. Koncept digitalnih dvojnikov se je razvil iz simulacij in modeliranja, danes pa predstavlja ključni element industrije 4.0. Digitalne dvojnike lahko delimo na tri vrste: prototip (DTP), ki se uporablja v fazi načrtovanja, primerek (DTI), ki spremlja dejanske fizične sisteme, in agregat (DTA), ki združuje podatke več dvojnikov. Ti so uporabni v različnih fazah življenjskega cikla produkta, od ustvarjanja in gradnje do delovanja, vzdrževanja in odstranitve. Uporaba digitalnih dvojnikov je razširjena na področjih različnih področjih, tudi v oskrbovalnih verigah in logistiki, kjer omogočajo izboljšanje učinkovitosti, sledljivosti in optimizacijo. Kljub njihovim prednostim obstajajo zmotna prepričanja, kot so prekomerne poenostavitve in nerazumevanje potrebnih tehnoloških zmožnosti. Digitalni dvojniki predstavljajo prelomno tehnologijo z velikim potencialom za izboljšanje poslovnih procesov. V tej raziskavi bo pojasnjena definicija digitalnih dvojnikov, njihovi začetki in razvoj. Predstavljena bo delitev po različnih vrstah in fazah življenjskega cikla produkta, čemur bo sledil pregled uporabe digitalnih dvojnikov v različnih industrijah. Namesto zaključka se bomo dotaknili najpomembnejšega zmotnega prepričanja, ki obstaja o digitalnih dvojnikih ter možnih izzivov in prihodnjih smernic.

KAZALO VSEBINE

KAZALO VSEBINE	III
KAZALO SLIK	V
UPORABLJENI SIMBOLI IN KRATICE	VI
1 UVOD	1
2 OPREDELITEV DIGITALNIH DVOJNIKOV	2
3 ZAČETKI IN RAZVOJ DIGITALNIH DVOJNIKOV	4
3.1 Rojstvo koncepta digitalnih dvojnikov	4
3.2 Konceptualni razvoj: od simulacij do dvojnikov	5
3.3 Digitalni dvojniki danes	7
4 DELITVE DIGITALNIH DVOJNIKOV	10
4.1 Vrste digitalnih dvojnikov	10
4.1.1 Prototip digitalnega dvojnika (DTP)	11
4.1.2 Primerek digitalnega dvojnika (DTI)	12
4.1.3 Agregat digitalnih dvojnikov (DTA)	12
4.2 Vrste digitalnih dvojnikov v celotnem življenjskem ciklu produkta	14
4.2.1 Faza ustvarjanja in DTP	14
4.2.2 Faza gradnje in DTP/DTI	15
4.2.3 Faza delovanja/vzdrževanja in DTI/DTA	15

5	UPORABA DIGITALNIH DVOJNIKOV	17
5.1	Digitalni dvojniki v različnih industrijah.....	19
5.1.1	Vesoljska industrija: pionirske aplikacije	19
5.1.2	Avtomobilska industrija: revolucija oblikovanja vozil.....	20
5.1.3	Zdravstvo: simulacija izidov pacientov	20
5.1.4	Energetika: optimizacija proizvodnje energije	21
5.2	Digitalni dvojnik oskrbovalne verige	21
5.3	Digitalni dvojniki v logistiki	23
6	ZMOTNA PREPRIČANJA O DIGITALNIH DVOJNIKIH.....	25
7	IZZIVI IN PRIHODNJE SMERNICE	27
7.1	Nadgradnja z masovnimi podatki in UI: dinamični modeli.....	28
7.1.1	Vloga masivnih podatkov	28
7.1.2	Dinamični modeli, podprti z UI.....	29
7.1.3	Dinamični modeli v praksi	29
7.2	Integracija z IoT: omrežje sistemov.....	29
7.3	Vloga start-up podjetij: demokratizacija tehnologije.....	31
7.4	Izzivi in premisleki: zasebnost in zanesljivost	32
7.5	Sodobni trendi: prihodnost, ki jo podpira UI.....	34
	VIRI IN LITERATURA	36

KAZALO SLIK

Slika 3.1: Prvotni model digitalnega dvojnika	7
Slika 3.2: Model digitalnega dvojnika danes	8
Slika 4.1: Štiri faze življenjskega cikla produkta.....	10
Slika 4.2: Vrste digitalnih dvojnikov po različnih fazah življenjskega cikla produkta	11
Slika 4.3: Ilustracija razmerja med DTA in DTI.....	13
Slika 4.4: Model digitalnega dvojnika skozi življenjski cikel produkta	14

UPORABLJENI SIMBOLI IN KRATICE

AR – Tehnologija obogatene resničnosti (angl. Augmented reality)

ARPANET – Omrežje agencije za napredne projekte (angl. Advanced Research Projects Agency Network)

BoP – Seznam procesa (angl. Bill of process)

DARPA – Agencija za napredne obrambne analize (angl. Defense Advanced Research Projects Agency)

DSCT – Digitalni dvojnik oskrbovalne verige (angl. The Digital Supply Chain Twins)

DTA – Agregat digitalnih dvojnikov (angl. Digital Twin Aggregate)

DTI – Primerki digitalnih dvojnikov (angl. Digital Twin Instances)

DTP – Prototip digitalnega dvojnika (angl. Digital Twin Prototype)

IoT – Internet stvari (angl. Internet of Things)

NASA – Nacionalna uprava za letalstvo in vesolje (angl. National Aeronautics and Space Administration)

PLM – Upravljanje življenjskega cikla produkta (angl. Product Lifecycle Management)

PLM DC – Konzorcija za razvoj upravljanja življenjskega cikla produkta (angl. Product Lifecycle Management Development Consortium)

SaaS – Programska oprema kot storitev (angl. Software as Service)

UI – Umetna inteligenca (angl. Artificial Intelligence)

VR – Tehnologija virtualne resničnosti (angl. Virtual Reality)

1 UVOD

Digitalni dvojnik je virtualni model izdelka, storitve ¹ ali procesa, ki predstavlja eno izmed tehnologij, ki ima velik potencial uporabe (Iliučič idr., 2024) na različnih področjih. Tehnologija digitalnih dvojnikov je znana že več kot dve desetletji. Kljub temu je njihova implementacija na področju logistike (Moshood idr., 2021) in sistemov oskrbovalnih verig (Kajba, Jereb, idr., 2023) relativno nova.

Njihova uporaba prinaša bistvene koristi, ki vplivajo tudi na trajnostni vidik logističnih operacij in doseganje trajnostnih ciljev, ki vključujejo okoljske, socialne in ekonomske vidike. Zato je nadaljnje raziskovanje te teme ključnega pomena za doseganje razvoja in inovacij v trajnostnem logističnem delovanju. (Kajba, Obrecht, idr., 2023) Vendar moramo pred tem poznati ozadje in idejo samih digitalnih dvojnikov.

V tej raziskavi želimo prikazati in pojasniti ozadje digitalnih dvojnikov – njihovo definicijo, začetke in razvoj pojma, delitev po različnih vrstah in fazah življenjskega cikla produkta, ter kratek pregled uporabnosti digitalnih dvojnikov v različnih industrijah. Namesto zaključka pa se bomo dotaknili najpomembnejšega zmotnega prepričanja, ki obstaja o digitalnih dvojnikih ter možnih izzivov in prihodnjih smernic.

¹ V nadaljevanju bomo izdelke in storitve imenovali produkt.

2 OPREDELITEV DIGITALNIH DVOJNIKOV

V literaturi je mogoče zaznati veliko različnih definicij digitalnih dvojnikov. V tem poglavju bodo predstavljene različne definicije avtorjev, pri katerih je vsem skupno, da so digitalni dvojniki na podatkih temelječi digitalni modeli fizičnih objektov (Minerva idr., 2020), procesov (Tao & Qi, 2019) ali sistemov (Hartmann & Van der Auweraer, 2021; Stark idr., 2019), ki omogočajo simulacije (Barykin idr., 2020) v virtualnem okolju (Defraeye idr., 2021).

Digitalni dvojniki so virtualna predstavitev nekega primerka iz resničnega sveta (Defraeye idr., 2021; Huang idr., 2022) – to je lahko produkt, sistem (Hartmann & Van der Auweraer, 2021; Schleich idr., 2017; Stark idr., 2019) ali proces (Tao & Qi, 2019).

Druga definicija digitalnega dvojnika je »nabor realističnih modelov, ki lahko simulirajo vedenje predmeta v virtualnem okolju. Digitalni dvojniki predstavljajo in odražajo svojega fizičnega dvojnika in ostaja njegov virtualni dvojniki skozi celotnem življenjski cikel tega predmeta« (Minerva idr., 2020).

Najbolj jedrnat, a podroben opis zmožnosti digitalnih dvojnikov je: »niz virtualnih informacijskih konstruktorjev, ki v celoti opisujejo potencialni ali dejanski fizično izdelan produkt, od mikro atomske ravni do makro geometrijske ravni« (Grieves & Vickers, 2017).

Digitalni dvojniki so po navadi predstavljeni kot tridimenzionalne replike fizičnih objektov ali sistemov, kjer uporabljajo podatke v realnem času, pridobljene s senzorji, ki spremljajo delovanje proučevanih objektov ali sistemov, njihovo okolje ali celo podobne digitalne dvojnike (Barata idr., 2020). Preprosto povedano, digitalni dvojniki delujejo na podlagi zrcaljenja življenja njegovega ustreznega fizičnega dvojnika prek integrirane večfizične verjetnostne simulacije fizičnega dvojnika na več stopnjah (Glaessgen & Stargel, 2012). Vendar je digitalni dvojniki več kot le digitalna predstavitev ali replika fizičnega predmeta (Belfadel idr., 2021) – je celovita fizična in funkcionalna predstavitev proučevanega predmeta, kjer so zagotovljene vse potrebne informacije v življenjskem ciklu za pravilno obdelavo (Boschert & Rosen, 2016). Dinamična korespondenca

povezuje platformo digitalnega dvojnika z modeli in podatki, kar omogoča spremljanje ter sinhronizacijo trenutnega stanja in obnašanja digitalnega dvojnika z zrcaljenim fizičnim okoljem. Vendar je ta povezava praviloma enosmerna – od fizičnega sveta do digitalnih replik, ki veljajo za digitalno senco (angl. digital shadow) (Kritzinger idr., 2018).

Tehnološki dejavniki, ki omogočajo gradnjo digitalnih dvojnikov, vključujejo modeliranje, napovedno analitiko in metode odločanja, povezane s podatki o življenjskem ciklu, ter ciljno znanje z zgodovinskimi in operativnimi podatki v realnem času (Belfadel idr., 2021). Kibernetiski fizični sistem združuje fizične naprave, povezane v virtualnem kibernetiskem prostoru, z uporabo omrežja za prenos podatkov. Vsaka fizična naprava ima svojo kibernetično komponento, ki predstavlja digitalno podobo obravnavane naprave – slednja definira digitalne modele dvojnikov. Digitalni dvojniki lahko tako pregledujejo in nadzorujejo zadevni fizični objekt ter prenašajo podatke za optimizacijo ter integracijo virtualnega modela (Andronie idr., 2021)

Opozoriti je treba, da digitalni dvojniki niso »enojajčni dvojčki« – zamisel o natančni repliki je le idealizacija in težnja, ki morda nikoli ne bo dosežena (Batty, 2018). Poleg tega je treba preučevani objekt karakterizirati z razvijajočimi se podatki, saj se fizični pogoji spreminjajo vzporedno s časom. Zato morajo odločitve temeljiti na razvijajočih se zbirkah podatkov in ne na zbirkah podatkov v časovnem intervalu, ki zagotavlja le posnetek stanja v nekem danem trenutku. Tako je mogoče bolje razumeti sistemske spremembe v daljših časovnih intervalih in vzorcih. Enako kot nabori podatkov, so digitalni dvojniki odvisni od dinamičnih posodobitev, povezanih s simulacijskimi modeli, ki se razvijajo na podlagi fizičnih pogojev. (Kaur idr., 2020)

Digitalnega dvojnika se lahko predstavi tudi kot obliko kibernetiske fizične naprave, ki uporablja senzorje interneta stvari (angl. Internet of Things, v nadaljevanju: IoT) in zagotavlja visoko stopnjo vizualizacije fizičnega objekta (Moshood idr., 2021), ki jo omogoča sinhronizacija med kibernetiskim in fizičnim prostorom v skoraj realnem času (Lu idr., 2019). Digitalni dvojniki združujejo in analizirajo pridobljene podatke z algoritmi strojnega učenja za spodbujanje strateškega ter organizacijskega odločanja (Negri idr., 2017).

3 ZAČETKI IN RAZVOJ DIGITALNIH DVOJNIKOV

Poglavje opisuje začetek koncepta digitalnih dvojnikov, njihov razvoj ter delovanje danes.

3.1 Rojstvo koncepta digitalnih dvojnikov

Koncept digitalnih dvojnikov predstavlja ključen napredek v tehnološkem razvoju, ki izhaja iz povezovanja zgodnjih računalniških omrežij in simulacij na različnih področjih. Njegove korenine segajo v 60. leta prejšnjega stoletja, ko je Agencija za napredne obrambne analize Združenih držav Amerike (angl. Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) razvila Omrežje agencije za napredne projekte (angl. Advanced Research Projects Agency Network, v nadaljevanju: ARPANET), prelomno omrežje, ki ni le povezovalo sisteme po svetu, temveč je navdihnilo tudi inovativno razmišljanje o virtualnih predstavitev fizičnih entitet. (DeepSeek, 2025)

Obdobje hladne vojne je v Združenih državah Amerike v tem obdobju ustvarilo pogoje, ki so spodbujali tehnološko raziskovanje, predvsem zaradi obrambnih potreb, kar je vodilo do pomembnih znanstvenih, raziskovalnih in tehnoloških prebojev. ARPANET-ova zmožnost povezovanja različnih sistemov je postavila temelje za idejo, da bi te povezave lahko replicirali v virtualni obliki, s čimer se je odprla pot digitalnim dvojnikom. (DeepSeek, 2025)

Začetek razvoja digitalnih dvojnikov je označil Grieves (Grieves, 2015; Grieves & Hua, 2024), ki je želel doseči »digitalni, virtualni model fizičnega produkta«. Pravzaprav je bil začetek digitalnih dvojnikov posledica Nacionalne uprave za letalstvo in vesolje (angl. National Aeronautics and Space Administration, v nadaljevanju: NASA) (Glaessgen & Stargel, 2012) v 60. letih prejšnjega stoletja, ko so za vesoljsko programiranje uporabila osnovne ideje o dvojnikih. To so storili tako, da so na tleh ustvarili fizično podvojene sisteme, ki so ustrezali sistemom v vesolju (Miskinis, 2019).

Do 90. let prejšnjega stoletja se je ta koncept začel oblikovati kot priznana ideja v akademskih in strokovnih krogih. Pionirja, kot sta Bob Simmons in John McCarthy, sta imela ključno vlogo pri oblikovanju tega koncepta (Grieves, 2022). Simmons, zgodnji pionir simulacij omrežij, je verjetno vplival na način, kako je mogoče fizične sisteme predstaviti virtualno (Novak, 1995), medtem ko so McCarthyjevi prispevki na področju UI in modeliranja postavili temeljne osnove za ustvarjanje natančnih virtualnih modelov (The editors of Encyclopaedia Britannica Article History, 2025). To obdobje je zaznamovalo prehod od teoretičnih razprav o simulacijah k praktičnim aplikacijam v industrijah, kot sta vesoljska in avtomobilska industrija ter številne druge. (DeepSeek, 2025)

3.2 Konceptualni razvoj: od simulacij do dvojnikov

Formalizacija digitalnih dvojnikov v 90. letih jih ni le uveljavila kot virtualne dvojnike, temveč je odprla tudi vrata za njihovo uporabo v kompleksnih sistemih, kar je omogočilo stroškovno učinkovito modeliranje in testiranje brez fizičnih prototipov. Tako "rojstvo koncepta" označuje prehod od zgodnjih omrežnih tehnologij k praktični implementaciji digitalnih dvojnikov, kar je postavilo temelje za njihov nadaljnji razvoj z napredki na področju masovnih podatkov in UI. Ta zgodovina poudarja, kako tehnološki napredek, ki ga poganjata zgodovinski kontekst in vizionarsko razmišljanje, vodi do prelomnih inovacij, kot so digitalni dvojnik. (DeepSeek, 2025)

V 90. letih so raziskovalci začeli konceptualizirati digitalne dvojnike kot virtualne predstavitve fizičnih sistemov. Ta ideja je izšla iz potrebe po učinkovitejšem simuliranju in modeliranju realnih sistemov, zlasti pri dragih ali časovno zahtevnih projektih, kot je vesoljsko inženirstvo. NASA je bila med prvimi, ki je uporabljala te simulacije pri načrtovanju raket, saj so programski modeli omogočali testiranje in optimizacijo brez uporabe fizičnih prototipov. (DeepSeek, 2025)

Ker se koncept uporablja že nekaj desetletij, je bil izraz »digitalni dvojnik« prvič omenjen leta 1998 in se je nanašal na digitalno kopijo glasu igralca Alana Alde v »Alan Alda meets Alan Alda 2.0«. (Miskinis, 2019)

Model digitalnih dvojnikov je bil prvič predstavljen na konferenci Društva proizvodnega inženiringa (angl. Society of Manufacturing Engineering) v Troyu v Michiganu oktobra 2002 (Grieves, 2002a). Predstavitev je bila o podporni/operativni fazi življenjskega cikla produkta. Model sploh ni imel imena, predstavitev je bila naslovljena kot »Konceptualni ideal (angl. The Conceptual Ideal) upravljanja življenjskega cikla produkta (angl. Product Lifecycle Management, v nadaljevnaju: PLM)«. Kasneje istega leta je Grieves na organizacijskem sestanku Konzorcija za razvoj upravljanja življenjskega cikla produkta (angl. Product Lifecycle Management Development Consortium, PLM DC), predstavil digitalne dvojnike na bolj splošen način (Grieves, 2002b). Namen je bil zbrati zavezanost novemu konceptu, ki je bil takrat usmerjen v produkte – PLM. (Grieves, 2023)

Ko so digitalni dvojniki postali bolj razširjeni v kasnejših letih, so jih napredki na področju masovnih podatkov in strojnega učenja preoblikovali v sofisticirana orodja, ki so postala nepogrešljiva v različnih industrijah. Inženirji uporabljajo te modele za simulacijo novih zasnov produktov, kot so motorji avtomobilov, s čimer zmanjšujejo tveganja pri proizvodnji z virtualnim testiranjem prototipov, preden pride do njihove fizične izvedbe. (DeepSeek, 2025)

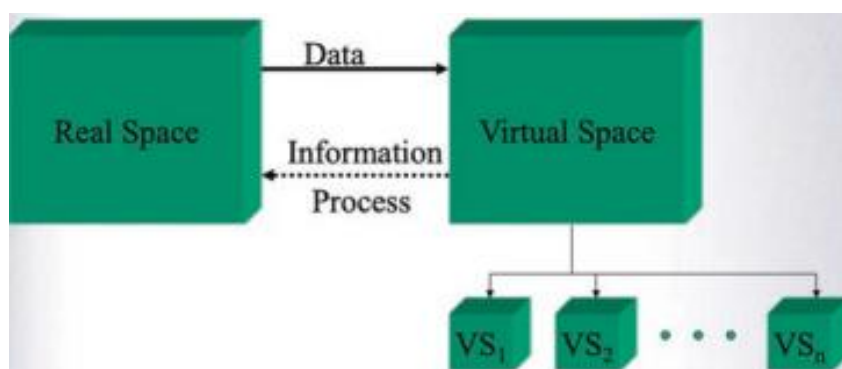
Integracija IoT z digitalnimi dvojniki je še dodatno izboljšala njihove zmogljivosti, saj omogoča napovedno vzdrževanje in dinamične simulacije na podlagi podatkov v realnem času iz fizičnih naprav. Ta razvoj poudarja, kako so digitalni dvojniki prešli od zgolj virtualnih predstavitev do celovitih orodij, ki izboljšujejo operativno učinkovitost in sprejemanje odločitev. (DeepSeek, 2025)

Če povzamemo, konceptualni razvoj digitalnih dvojnikov se je začel z zgodnjimi omrežnimi tehnologijami, kot je ARPANET, in se je preoblikoval v praktične aplikacije s simulacijami v 90. letih. Ključne osebnosti, kot sta Bob Simmons in John McCarthy, so oblikovali ta koncept, premagovali tehnične izzive ter ustvarjali orodja, ki so revolucionirala industrije z omogočanjem virtualnega modeliranja ter testiranja kompleksnih sistemov. (DeepSeek, 2025)

3.3 Digitalni dvojniki danes

Današnji model digitalnih dvojnikov je ostal nespremenjen od modela iz 2002. Prvotni model vsebuje tri glavne komponente, ki veljajo še danes (Slika 3.1 (Grieves, 2023)):

- fizični prostor in njegovi produkti;
- virtualni ali digitalni prostor in njegovi produkti;
- povezava med prostoroma.



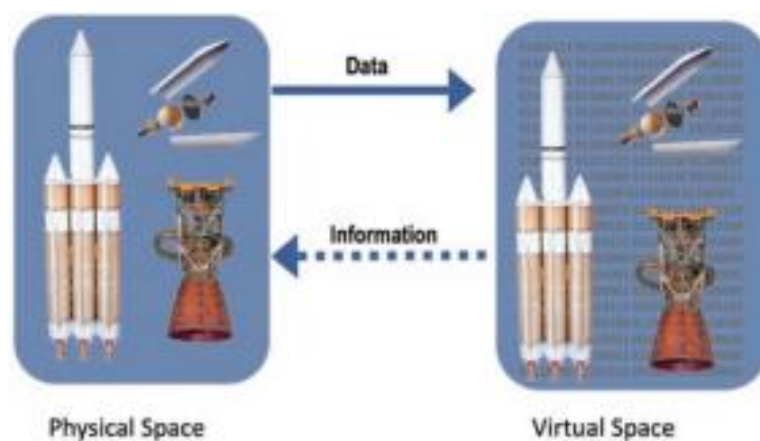
Slika 3.1: Prvotni model digitalnega dvojnika

V originalnem modelu digitalnih dvojnikov je bila še četrta komponenta. Ker je bila zamisel o virtualnih ali digitalnih prostorih takrat razmeroma nova, je bil namen te komponente poudariti, da imajo virtualni ali digitalni prostori neskončno število primerkov, do katerih imamo dostop in jih lahko uporabljamo, za razliko od fizičnega prostora, kjer imamo dostop do enega samega primerka. (Grieves, 2023)

Šele leta 2010 je koncept dobil ime »digitalni dvojnik« s strani Johna Vickersa (Lawton, 2023), ki je deloval pri NASA. Takrat je bil Grieves svetovalec za NASA, modeliranje in simuliranje vesoljskih plovil pa je bilo ključnega pomena pri razmišljanju o digitalnem dvojniku in njegovih posledicah. V svojem načrtu za leto 2010 je Vickers predstavil digitalni dvojnik znotraj NASA. (Grieves, 2023)

Model digitalnega dvojnika, kot ga poznamo danes (Slika 3.2 (Grieves, 2023)), prikazuje korespondenco med virtualnim in fizičnim prostorom. Sam model je skoraj enak originalnemu modelu (Slika 3.1). Obstajajo tri glavne značilnosti ali ključne komponente modela digitalnega dvojnika (Grieves, 2023):

- na levi strani imamo fizični prostor in fizične produkte, ki smo jih vedno imeli že od nekdaj in jih bomo še imeli v resničnem svetu. Za opravljanje dela v fizičnem svetu bomo vedno potrebovali prave, fizične produkte.
- na desni strani je ta ideja virtualni prostor – digitalna predstavitev produktov, ki so na levi strani, informacije o produktih pa so vsebovane v tem virtualnem prostoru.
- povezava med fizičnim in virtualnim prostorom, kjer želimo sporočiti idejo o premikanju podatkov iz fizičnega okolja v virtualni prostor, da bi ustvarili in informirali naš virtualni produkt. Te informacije iz virtualnega prostora želimo uporabiti v fizičnem prostoru. Povezava med prostoroma se običajno imenuje »digitalna nit« (angl. Digital Thread).



Slika 3.2: Model digitalnega dvojnika danes

Razvoj tega koncepta je spremljal tudi niz izzivov, saj sta bila računalniška moč in razumevanje dinamike sistemov omejena, kar je zahtevalo iterativne izboljšave programske opreme in modelirnih tehnik. (DeepSeek, 2025) Pojavile so se tudi omejitve v zvezi z implementacijo in uporabo digitalnih dvojnikov glede zajema podatkov, uporabo algoritmov za napovedovanje in njihovo zmogljivostjo (Iliučič idr., 2024). Po njihovi sanaciji leta 2016, so se pričeli uporabljati v industriji 4.0 v podjetju Siemens (München, Nemčija). Te izzive so premagali z napredkom na področju računalniške tehnologije, kar je omogočilo ustvarjanje podrobnih virtualnih modelov, ki so odražali njihove fizične objekte (DeepSeek, 2025).

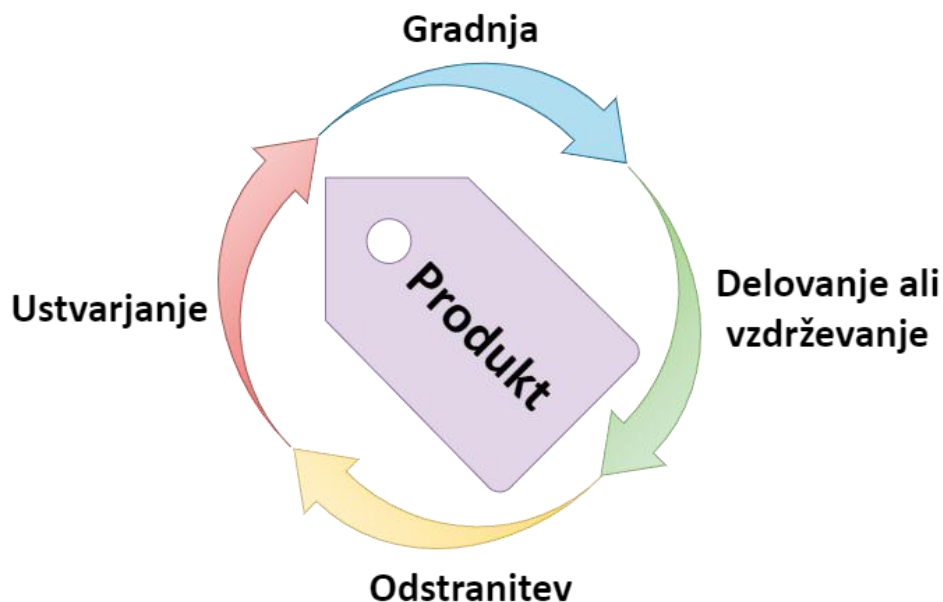
Torej, čeprav so digitalni dvojniki zelo znani že od leta 2002, so šele leta 2017 postali eden glavnih strateških tehnoloških trendov. Internet stvari (IoT) je digitalnim dvojnikom omogočil, da so postali stroškovno učinkoviti, tako da so lahko postali tako nujni za podjetja, kot so danes. (Miskinis, 2019) Nato so Thao idr. (Tao idr., 2017; Tao, Liu, idr., 2019) nadgradili tridimenzionalni model, ki je bil prvotno razvit z integracijo dveh dodatnih dimenzij za storitve in podatke digitalnih dvojnikov.

4 DELITVE DIGITALNIH DVOJNIKOV²

V tem poglavju bodo najprej predstavljene tri različne vrste digitalnih dvojnikov, katerim bo sledil opis vrst digitalnih dvojnikov skozi življenjski cikel produkta ter njihovo razmerje s predhodno opisanimi.

4.1 Vrste digitalnih dvojnikov

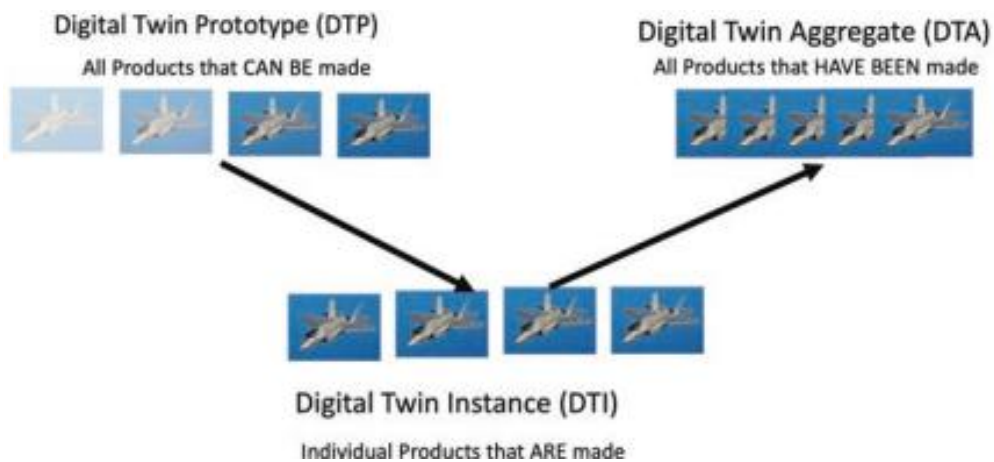
Kot je prikazano na Slika 4.1, je življenjski cikel produkta razdeljen na štiri faze: ustvarjanje, gradnja, delovanje/vzdrževanje in odstranitev. Od samega začetka je bil digitalni dvojniki vedno namenjen obstoju v vseh štirih fazah življenjskega cikla produkta (Grieves, 2005), ki so koristne za razmišljanje o implementaciji digitalnih dvojnikov kot sredstvo podpore za produkte. Slednje se kaže tudi v izreku, da »nihče ne gre v tovarno, tolče po kovini in upa, da bo ven prišlo letalo«. Izjemna vrednost digitalnega dvojnika je ta, da obstaja, preden obstaja njegov fizični produkt. Čeprav meje med fazami niso popolnoma definirane, je to uporaben način pogleda na življenjski cikel produkta.



Slika 4.1: Štiri faze življenjskega cikla produkta

² Celotno poglavje je povzeto po (Grieves, 2023).

Obstajajo tri vrste digitalnih dvojnikov, ki so odvisne od faze življenjskega cikla produkta, prikazane na Slika 4.2 (Grieves, 2023). Vsaka vrsta je podrobneje opisana v podpoglavjih.



Slika 4.2: Vrste digitalnih dvojnikov po različnih fazah življenjskega cikla produkta

4.1.1 Prototip digitalnega dvojnika (DTP)

Najprej začnemo s tako imenovanim prototipom digitalnega dvojnika (angl. Digital Twin Prototype, v nadaljevanju: DTP). To je ideja, da imamo digitalnega dvojnika prej kot imamo fizični produkt, ker želimo čim več dela prenesti v virtualno sfero. Radi bi ustvarili svoj produkt, ga preizkusili, izdelali in virtualno podpirali. Šele, ko dobimo tako popoln produkt, kot ga lahko naredimo, želimo izdelati fizični produkt. Če bomo delali napake, ki so neizogibne, je virtualna sfera kraj za napake, saj se stroški virtualnih napak približujejo ničli.

Zato v DTP spadajo *vsi produkti, ki jih je mogoče izdelati*. Z drugimi besedami, DTP predstavlja produkt in njegove različice. Kot vidimo zgoraj (Slika 4.2), se produkt sčasoma oblikuje, saj izdelava poteka od ideje do prvega produkta. Pri tej vrsti je v veliko pomoč tehnologija virtualne resničnosti (angl. Virtual Reality, VR). Sposobnost, da ljudje uporabljajo svoje oči, omogoča obdelavo večje količine podatkov, kot če bi videli množico števil. Ljudje kot bitja fizičnega sveta moramo videti stvari, da v celoti razumemo, kaj se dogaja.

4.1.2 Primerek digitalnega dvojnika (DTI)

Ko začnemo proizvajati proizvodne produkte, preidemo na ustvarjanje primerkov digitalnih dvojnikov (angl. Digital Twin Instances, v nadaljevnaju: DTI). To so *vsi produkti, ki so narejeni/proizvedeni*. Zdaj želim ustvariti primerek digitalnega dvojnika določenega produkta. Nimamo geometrijskega dimenzioniranja in toleranc za določen izdelan primerek, imamo pa določeno številko meritve za določen del ter serijske številke, in ne le ime posameznega sklopa.

Ker bomo produktu želeli slediti skozi njegov življenjski cikel, potrebujemo izdelavo tega primerka produkta, ko je ustvarjen. Zahteva za DTI izhaja iz primera poslovne uporabe informacij, potreba po DTI pa ustreza kompleksnosti in pomembnosti produkta. Na primer, vojaško večnamensko lovsko letalo F-35 (na Slika 4.2) potrebuje DTI, medtem ko sponka za papir ne.

Veliko informacij za izdelavo DTI bo prihajalo iz prve vrste digitalnega dvojnika – DTP. Teh informacij ni potrebno podvajati, vendar pa se zdaj prehaja od idealnih specifikacij k meram posameznih produktov. Tehnologija obogatene resničnosti (angl. Augmented Reality, v nadaljevanju: AR) je vedno bolj pomembna za izdelavo DTI. Namesto da bi bila fizični in digitalni dvojnik ločena, AR omogoča prekrivanje obeh dvojnikov, sam produkt lahko vidimo, skupaj z njegovim delovanjem, kot so na primer temperaturni gradienti, hitrosti pretoka goriva ali izhodna moč.

4.1.3 Agregat digitalnih dvojnikov (DTA)

Tretja vrsta digitalnega dvojnika je agregat digitalnih dvojnikov (angl. Digital Twin Aggregate, v nadaljevanju: DTA), ki predstavlja *skupek vseh produktov, ki so bili narejeni*. Torej, DTA so agregacija ali sestavljenka vseh DTI.

Zberemo in združimo lahko podatke iz populacije produktov, da zagotovimo vrednost, kot je na primer:

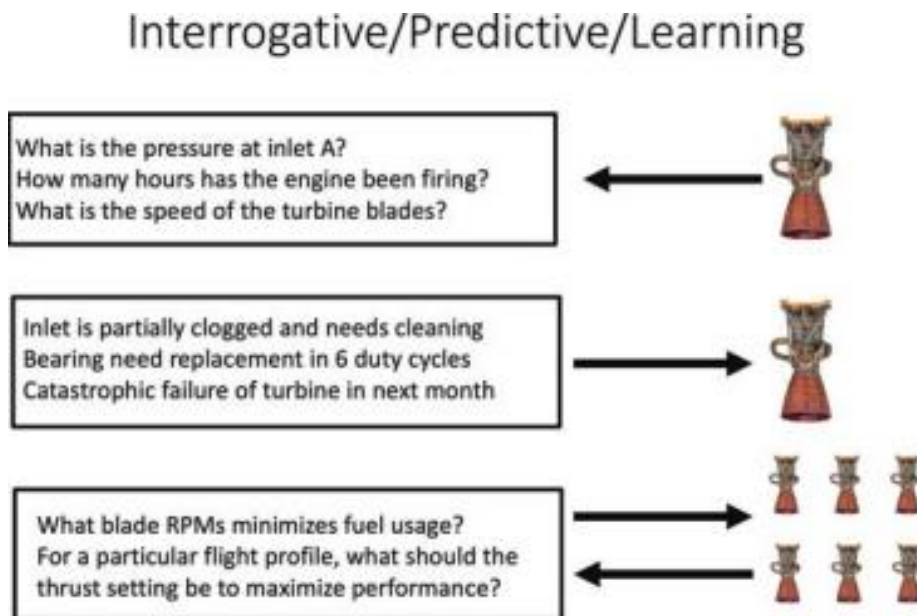
- predvidimo težave ali okvare s produktom, še preden se pojavijo.

- določene odčitke senzorjev želimo povezati s posledičnimi težavami – ko opazimo določene senzorske odčitke v produktih, lahko uporabnika opozorimo, da obstaja velika verjetnost pojavitve težav v prihodnosti. S tem želimo preiti od periodičnega vzdrževanja na vzdrževanje glede na pogoje. Tako lahko preprečimo okvare produkta, četudi na račun prezgodnje zamenjave nekaterih delov.

DTA so vzdolžne in širinske predstavitve vedenja:

- vzdolžna (longitudinalna) vrednost je povezati prejšnje spremembe stanja s kasnejšimi vedenjskimi rezultati, kar omogoča na primer predvidevanje okvare komponente, ko prejmemo določene podatke iz senzorjev;
- širinska (latitudinalna) vrednost se lahko pojavi prek učnega procesa, ko se kasnejša skupina DTI uči iz izkušenj prejšnjih produktov, pri čemer se lahko učenje od takrat naprej prenese na ostale DTI.

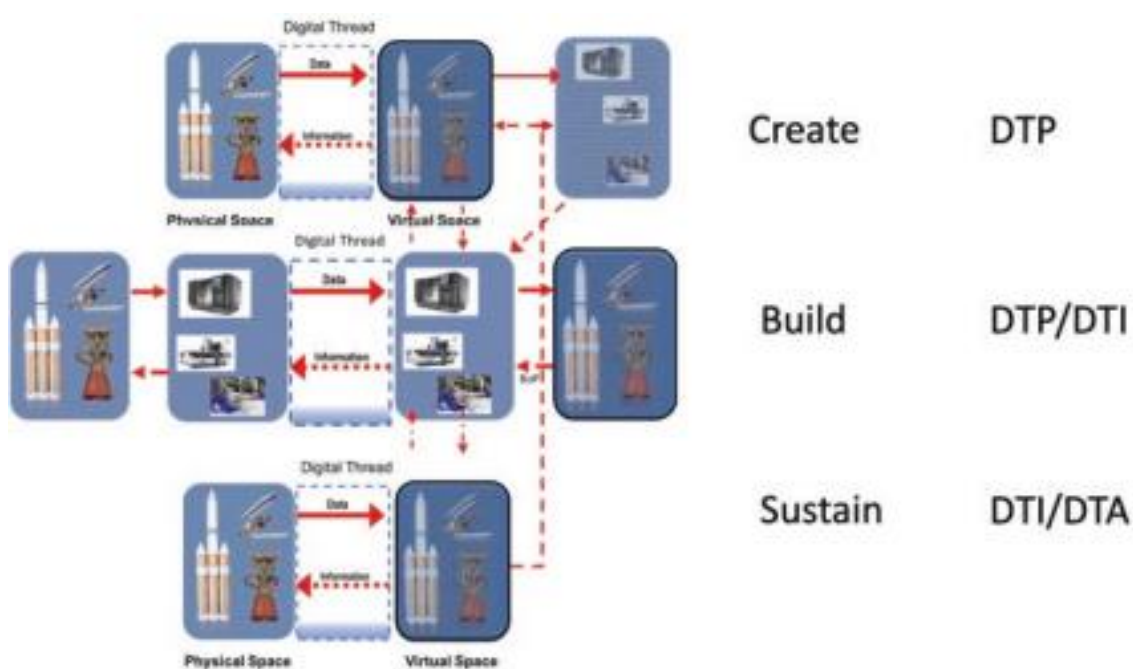
Slika 4.3 (Grieves, 2023) prikazuje razmerja med DTI in DTA ter kako se uporabljajo pri zasliševanju, napovedovanju in učenju.



Slika 4.3: Ilustracija razmerja med DTA in DTI

4.2 Vrste digitalnih dvojnikov v celotnem življenjskem ciklu produkta

Ker se model digitalnega dvojnika uporablja za celoten življenjski cikel ustvarjanja, gradnje in delovanja/vzdrževanja in odstranitve, moramo razumeti, kateri tipi digitalnega dvojnika veljajo za različne faze življenjskega cikla, kar je prikazano na Slika 4.4 (Grieves, 2023). Prikazan je standardni pogled modela digitalnega dvojnika s fizičnim in virtualnim produktom. Vendar pa moramo v tej fazi najprej ustvariti virtualni produkt, kar prikazuje zgornja vrstica slike, ki ponazarja fazo ustvarjanja.



Slika 4.4: Model digitalnega dvojnika skozi življenjski cikel produkta

4.2.1 Faza ustvarjanja in DTP

V skladu s premikom našega dela v virtualni svet bi bilo idealno, da bi produkt oblikovali, preizkusili, izdelali in podpirali, vse virtualno – šele za tem in ko so odpravljene vse težave, želimo ustvariti fizični produkt. Seveda slednje predstavlja idealno zasnovano izdelavo produkta.

V tej fazi lahko izdelamo nekaj fizičnih prototipov, vendar številna podjetja dramatično zmanjšujejo potrebo po teh fizičnih prototipih. Moramo pa narediti fizični produkt in ga

dati v proizvodnjo, saj ni dovolj, da imamo dizajn produkta, ki smo ga izpopolnili, moramo ga tudi fizično proizvesti. To pomeni, da moramo ustvariti seznam procesa (angl. Bill of process, v nadaljevanju: BoP), kar se na sliki odraža na skrajno desni strani.

Obstaja napačno prepričanje, da je proizvodnja funkcija inženiringa. Resničnost je taka, da potrebujemo želene načrte produktov, ki so rezultat funkcije proizvodnje. Na tej stopnji imamo načrt zasnove in načrt proizvodnje produkta, ki vodi do realizacije teh načrtov, kjer uporabljamo DTP.

4.2.2 Faza gradnje in DTP/DTI

Sledi faza gradnje, kjer preidemo v proizvodnjo. Kot kažejo digitalne niti, uporabimo BoP iz digitalnega dvojnika določene proizvodne opreme, da zagotavljamo informacije DTI-jem dejanskih strojev. Ti strojni DTI bodo posredovali zahtevane informacije fizičnim strojem v tovarni, ki nato proizvedejo fizične produkte na levi.

Ker izdelujemo fizične produkte, želimo ustvariti izvedenke njihovih DTI-jem. Zato je potrebno zajeti podatke o dejanskih meritvah tega, kar smo izdelali, ključne procesne meritve o tem, kako smo jih izdelali, serijske številke zahtevanih delov in podatke o kontroli kakovosti, da se prepričamo, da so bili produkti izdelani po specifikacijah.

Torej, v fazi gradnje uporabljamo podatke DTP in ustvarjamo DTI. Slednji potrebujejo veliko informacij, ki jih prejmemo iz DTP. Informacije se ne podvajajo, vendar DTP vsebuje specifikacije s tolerancami. DTI bodo tako imeli natančne meritve, kako so bili ti primerki zgrajeni.

4.2.3 Faza delovanja/vzdrževanja in DTI/DTA

Spodnja raven je faza delovanja/vzdrževanja, kjer želimo, da DTI-ji odražajo vse spremembe ustreznega fizičnega produkta. Tukaj želimo zajeti meritve vedenja in uspešnosti ter da DTI vzdržuje longitudinalne podatke. Za razliko od fizičnega sveta

imamo, ko trenutek mine, le malo dostopa do zgodovine. V DTI lahko zajamemo te podatke, kar omogoči popoln dostop do zgodovine delovanja produkta.

V tej fazi ustvarimo DTA iz DTI-jev. Lahko začnemo povezovati podatke o predhodniku s posledičnimi rezultati, kar bo omogočilo napovedovanje prihodnjega vedenja, kot so napake produktov, saj prejemamo in zbiramo vse več podatkov iz DTI. Vključi se lahko tudi strojno učenje, da ugotovimo, kako produkti na začetku delovanja izgubijo optimalno zmogljivost, kar se nato prenese na kasnejše različice produkta.

Kot kaže digitalna nit, ki gre od faze delovanja/vzdrževanja nazaj do faze ustvarjanja, lahko z uporabo DTA sklenemo zanko med zasnovo produkta in njegovim dejanskim obnašanjem. Prihodnje generacije produktov prepogosto kažejo enake pomanjkljivosti, kar je posledica tega, da oblikovalci produktov ne vedo, da so njihove predpostavke o učinkovitosti produkta napačne. Uporaba DTA lahko odpravi to težavo.

5 UPORABA DIGITALNIH DVOJNIKOV

Kot eden ključnih konceptov, tehnologij in temeljnih dejavnikov digitalne transformacije industrije 4.0 (Orozco-Romero idr., 2020) in 5.0 so digitalni dvojniki (Ho idr., 2021; Hsu idr., 2019; Leng idr., 2021; Rojek idr., 2021; Schluse idr., 2018; Wagner idr., 2019). Digitalni dvojniki, umetna inteligenca (angl. AI), IoT in računalništvo v oblaku predstavljajo le nekaj orodij industrije 4.0, ki podpirajo tehnološko revolucijo v smeri pospešenih prizadevanj za optimizacijo učinkovitosti kiberfizičnih operacij, storitev in sistemov (Akkad idr., 2022). Zaporedni razvoj senzorskih tehnologij, IoT in analitike masovnih podatkov je privedel do neizogibnega napredka digitalnih dvojnikov, ki omogočajo prepletanje fizičnega in digitalnega sveta (Tao, Liu, idr., 2019).

Model digitalnega dvojnika predstavlja natančen in aktualen kibernetiski dvojnik fizičnega produkta, procesa ali sistema, ki ustrezno odraža vse njegove funkcionalnosti, asimilira obsežne kontekstualne delovne podatke in se uporablja kot infrastruktura za načrtovanje, nadgradnjo omrežja in hitro transformacijo. V nasprotju s standardno simulacijsko zasnovo, komponenta digitalnega dvojnika ni le vizualna reprodukcija nepredvidenih dogodkov ali sredstvo za poročanje o rezultatih, temveč tudi orodje za preverjanje veljavnosti za celovito rešitev nadgradnje življenjskega cikla. (Andronie idr., 2021)

Natančneje, digitalni dvojniki (Defraeye idr., 2021):

- vključujejo temeljne elemente kot geometrijske komponente obravnavanega predmeta in njegovih materialnih lastnosti;
- lahko natančno in realistično simulirajo ustrezne procese v celotnem življenjskem ciklu predmetov;
- se lahko povežejo z objektom iz resničnega sveta (Soares idr., 2019) s senzorskimi podatki, ki se nenehno posodablajo v realnem času.

Kor že omenjeno, se lahko digitalni dvojnik uporablja neodvisno od fizičnega sveta – ni nujno povezan s fizičnim, v realnem času obstoječim predmetom, ki ga predstavlja (Orozco-Romero idr., 2020). Razvoj digitalnih dvojnikov sega dlje od teoretičnega raziskovanja, kjer se lahko praktične aplikacije najdejo v različnih industrijah, ki

izkoriščajo virtualne modele za izboljšano odločanje in večjo operativno učinkovitost. Ta del preučuje sprejemanje digitalnih dvojnikov v ključnih sektorjih, kot so vesoljska industrija, avtomobilska industrija, zdravstvo, energetika in proizvodnja. Avtomobilska industrija je kmalu sledila temu zgledu, pri čemer so podjetja, kot sta Ford in BMW, uvedla digitalne dvojnike v svoje oblikovalske procese. Ti virtualni modeli so omogočili učinkovitejše testiranje dizajnov avtomobilov, kar je znižalo stroške in skrajšalo čas razvoja. To obdobje je zaznamovalo začetek uporabe digitalnih dvojnikov kot dragocenega orodja v različnih industrijah. (DeepSeek, 2025)

Zato so digitalni dvojniki bistven pripomoček za podporo inovacijam v vsaki industriji (Chen & Huang, 2021). V zvezi s slednjim, se digitalni dvojniki vse bolj prilagajajo različnim področjem in industrijam, od letalstva (Zhuang idr., 2022), zdravstva (Armeni idr., 2022), biofarmacije (Botton idr., 2022; Helgers idr., 2022), živilske industrije (Krupitzer idr., 2022; Vetter & Strube, 2022), proizvodnje (Psarommatis & May, 2023), kmetijstva (Purcell & Neubauer, 2023), izobraževanja (Dai & Brell-Çokcan, 2022), procesne industrije (Bevilacqua idr., 2020; Perno idr., 2022; Selvarajan idr., 2022), transporta (Kosacka-Olejniki idr., 2021; Kušić idr., 2023), logistike (Moshood idr., 2021), in prav tako oskrbovalne verige (Chen & Huang, 2021; Kalaboukas idr., 2021; Liu idr., 2022; Zhang idr., 2022).

Digitalni dvojniki omogočajo (Lu idr., 2019):

- vpogled v preteklost;
- optimizacijo sedanjosti;
- inovacije uspešnosti v prihodnosti z implementacijo v produkte, stroje, procese, sisteme in celotne poslovne ekosisteme.

Digitalni dvojniki se uporabljajo:

- za izboljšanje obstoječe teorije in znanja pri gradnji virtualnih modelov;
- v tehnologiji simulacije virtualnega modela za raziskovanje in napovedovanje neznanega sveta;
- za iskanje boljših načinov za spodbujanje inovativnih zamisli, za nadaljevanje in doseganje optimalnega napredka.

Digitalni dvojniki olajšujejo komunikacijo med sredstvi, objekti, procesi in različnimi sistemi (Belfadel idr., 2021), medtem ko njihova arhitektura olajša analizo ter obdelavo obsežnih zbirk podatkov v realnem času (Haße idr., 2019). Poleg upravljanja s podatki omogočajo simulacije vedenja proučevanega objekta ali dopolnjujejo fizični objekt z digitalnimi storitvami. Odvisno od gradbenih zahtev digitalnih dvojnikov, slednji vključuje tridimenzionalni model gradnje produkta, informacije o strukturnih lastnostih, informacije o proizvajalcu komponent, informacije o intervalih vzdrževanja in druge ključne ali potrebne informacije. (Gehring & Rüppel, 2023)

5.1 Digitalni dvojniki v različnih industrijah

Ena izmed največjih prednosti digitalnih dvojnikov je njihova sposobnost olajšanja sodelovanja med različnimi ekipami in disciplinami. Inženirji, oblikovalci in projektni vodje lahko na virtualnih modelih delajo v realnem času, delijo povratne informacije in opravljajo prilagoditve po potrebi. Ta stopnja preglednosti in dostopnosti pospeši inovacije in zmanjšuje čas do trga za nove produkte. (DeepSeek, 2025)

V industrijah, kot so vesoljska industrija, avtomobilska industrija, zdravstvo, energetika in proizvodnja, je sprejemanje digitalnih dvojnikov ne le izboljšalo procese oblikovanja in proizvodnje, ampak tudi podprlo razvoj pametnejših, bolj učinkovitih sistemov. Kot tehnologija, ki se nenehno razvija, bo uporaba digitalnih dvojnikov verjetno še naprej naraščala, kar bo spodbudilo inovacije v širokem spektru sektorjev. (DeepSeek, 2025)

5.1.1 Vesoljska industrija: pionirske aplikacije

Vesoljska industrija je bila ena prvih, ki je prepoznala potencial digitalnih dvojnikov. Inženirji uporabljajo virtualne modele za simulacijo oblikovanja letal, kar omogoča testiranje različnih konfiguracij v različnih pogojih brez fizičnih prototipov. Ta pristop zmanjšuje stroške in čas, povezane s tradicionalnimi metodami prototipiranja. Poleg tega

digitalni dvojniki omogočajo sodelovanje v realnem času med inženirji in oblikovalci, kar omogoča iterativna izboljšanja oblikovanja in optimizacijo. (DeepSeek, 2025)

Razvoj naprednih simulacijskih orodij je še dodatno izboljšal te zmožnosti, kar omogoča podrobno analizo dejavnikov, kot so aerodinamika, strukturna integriteta in zmanjšanje hrupa. Z simulacijo zapletenih pogojev letenja lahko inženirji prepoznajo morebitne težave, preden povzročijo drage napake v dejanskih letalih. Ta proaktiven pristop je bistveno pospešil razvoj novih modelov letal in izboljšal obstoječe zasnove. (DeepSeek, 2025)

5.1.2 Avtomobilska industrija: revolucija oblikovanja vozil

Avtomobilska industrija je prav tako z enakim navdušenjem sprejela digitalne dvojne modele, ki jih uporablja za širok spekter aplikacij. Inženirji simulirajo delovanje motorjev, testirajo različne konfiguracije za optimizacijo moči in učinkovitosti porabe goriva. Digitalni dvojniki imajo tudi ključno vlogo pri izboljšanju varnosti vozil, saj simulirajo trke in ocenjujejo učinkovitost varnostnih funkcij. (DeepSeek, 2025)

Poleg tega avtomobilski proizvajalci uporabljajo te modele za oblikovanje notranjosti, ki zagotavljajo optimalno udobje in ergonomijo za voznike in potnike. Integracija digitalnih dvojnikov v proizvodne procese je omogočila natančen nadzor nad proizvodnimi linijami, zmanjšanje odpadkov in izboljšanje kakovosti. Z simulacijo delovanja proizvodnih linij lahko podjetja prepoznajo ozka grla in poenostavijo delovne procese, s čimer zagotavljajo učinkovito in dosledno proizvodnjo. (DeepSeek, 2025)

5.1.3 Zdravstvo: simulacija izidov pacientov

V zdravstvu se digitalni dvojniki uporabljajo za simulacijo izidov pacientov, kar pripomore k razvoju medicinskih naprav in personaliziranih zdravljenj. Virtualni modeli človeške anatomije omogočajo raziskovalcem testiranje možnih rešitev za implantate, proteze ali

sisteme za dostavo zdravil, preden se preide na klinična testiranja. Ta pristop zmanjša stroške preizkušanja in pospeši tempo inovacij. (DeepSeek, 2025)

Poleg tega se digitalni dvojniki uporabljajo v simulacijah usposabljanja, ki pomagajo zdravstvenim delavcem pri pripravi na različne scenarije, kot so nujne situacije ali kompleksni kirurški postopki. Ti modeli zagotavljajo brezskrbno okolje za izvajalce, da vadijo in izpopolnjujejo svoje spretnosti, s čimer zmanjšajo napake med dejanskim oskrbovanjem pacientov. (DeepSeek, 2025)

5.1.4 Energetika: optimizacija proizvodnje energije

Tudi energetski sektor je imel koristi od uporabe digitalnih dvojnikov, zlasti pri načrtovanju in delovanju elektrarn in vetrnih turbin. Inženirji uporabljajo virtualne modele za simulacijo delovanja energetskih sistemov v različnih obremenitvenih pogojih, kar optimizira njihovo učinkovitost in zanesljivost. Ta pristop podpira odločanje v zvezi z urniki vzdrževanja in nadgradnjami, s čimer zagotavlja stalno in učinkovito proizvodnjo energije. (DeepSeek, 2025)

Pri vetrnih parkih digitalni dvojniki pomagajo določiti optimalne postavitve in usmeritve turbin za maksimiranje proizvodnje energije ob hkratnem zmanjšanju vpliva na okolje. Ti modeli se uporabljajo tudi za oceno učinkov obrabe posameznih komponent, kar omogoča proaktivno vzdrževanje in zmanjšanje izpadov. (DeepSeek, 2025)

5.2 Digitalni dvojnik oskrbovalne verige

Poleg oblikovanja produktov se digitalni dvojniki uporabljajo v proizvodnji za optimizacijo proizvodnih procesov. Virtualni modeli proizvodnih linij ali oskrbovalnih verig omogočajo podjetjem simulacijo različnih scenarijev in prepoznavanje neučinkovitosti, preden vplivajo na delovanje. Ta pristop omogoča proizvajalcem, da izvedejo spremembe, ki povečajo produktivnost in zmanjšajo časovne zamude. (DeepSeek, 2025)

Na primer, ustvarjanje virtualnega modela proizvodne linije lahko pomaga podjetjem prepoznati točke, kjer nastajajo ozka grla, kar jim omogoči, da preoblikujejo delovne procese ali bolj učinkovito dodelijo vire. Podobno digitalni dvojniki oskrbovalnih verig pomagajo optimizirati logistične poti, izboljšati čase dostave in zmanjšati stroške, povezane s prevozom. (DeepSeek, 2025)

Kombinacijo digitalni dvojnikov z oskrbovalnimi verigami mnogi avtorji imenujejo Digitalni dvojnik oskrbovalne verige (angl. The Digital Supply Chain Twins, v nadaljevanju: DSCT) (Binsfeld & Gerlach, 2022; Gerlach idr., 2021; Ivanov idr., 2019; Srαι idr., 2019). DSCT predstavlja fizično oskrbovalno verigo in ga je mogoče uporabiti za načrtovanje ter nadzor v realnem času na podlagi zalog, transporta, zmogljivosti in povpraševanja (Ivanov & Dolgui, 2021). DSCT predstavlja stanje omrežja v katerem koli trenutku in omogoča popolno preglednost oskrbovalne verige, kar lahko pomaga povečati odpornost in načrte za ukrepanje ob nepredvidljivih dogodkih. Osnovna tehnologija, ki omogoča razmeroma natančen razvoj DSCT, je kombinacija simulacije, optimizacije in analitike podatkov. (Edlund, 2022) Cilj razvoja katerega koli digitalnega dvojnika je povečati obvladovanje tveganj v oskrbovalnih verigah, s čimer se doseže večja zanesljivost in odpornost v morebitnem primeru motenj (Barykin idr., 2020).

Prilagoditev digitalnih rešitev obstoječim poslovnim modelom omogoča dvig kakovosti produktov, zmanjšanje odpadkov, zmanjšanje stroškov, izboljšanje učinkovitosti in tržnega deleža (Atalay idr., 2022). Skrajšani življenjski cikli produktov (Kalaboukas idr., 2021), tehnološke spremembe in medsebojno povezana gospodarstva predstavljajo hude poslovne tekmece, kjer mora biti njihovo upravljanje oskrbovalnih verig podprto s tehnološkimi inovacijami, kot so digitalni dvojniki (Orozco-Romero idr., 2020). Slednji predstavljajo rešitev za izzive, kot so:

- pridobivanje dinamičnih informacij v realnem času (Chen & Huang, 2021; Marmolejo-Saucedo idr., 2020);
- omogočanje digitalnega spremljanja v realnem času (Liu idr., 2022; Soares idr., 2019);
- razvoj produktov (Orozco-Romero idr., 2020), procesov ali sistemov (Liu idr., 2022);
- izvajanje obvladovanja tveganj (Edlund, 2022);

- omogočanje avtomatskega odločanja z večjo učinkovitostjo in natančnostjo ter ustvarjanje sinhronizacije v realnem času (Orozco-Romero idr., 2020) skozi celotno oskrbovalno verigo (Lheureux idr., 2018; Payne, 2018; Ren idr., 2019);
- ustvarjanje stalnega cikla izboljšav, prilagajanje celotne oskrbovalne verige v skoraj realnem času ter zniževanja stroškov (Marmolejo-Saucedo idr., 2020);
- sestavljanje virtualnih modelov (Chen & Huang, 2021; Leng idr., 2021), simulacij (Ivanov & Dolgui, 2019; Orozco-Romero idr., 2020; Schluse idr., 2018) in ocen virtualnih ali fizičnih produktov (Wagner idr., 2019);
- omogočanje virtualnega oblikovanja produktov in proizvodnje (Wagner idr., 2019);
- omogočanje na simulacijah temelječega inženiringa, optimizacije in nadzora (Schluse idr., 2018).

Vsestranske simulacije z analitičnimi optimizacijami predstavljajo dve najbolj dominantni tehnologiji za obvladovanje tveganj v oskrbovalni verigi, ki omogočata stabilnost in zanesljivost, če pride do motenj (Barykin idr., 2020). Koncept DSCT omogoča ustvarjanje zrcalno-simulacijskega modela vseh procesov znotraj oskrbovalnih verig (Marmolejo-Saucedo idr., 2020), kar omogoča mreženje in avtomatizacijo kompleksnih verig dodane vrednosti (Schluse idr., 2018). Vključujejo zmožnost reševanja problemov optimizacije, povečanje odpornosti oskrbovalne verige in ublažitev njenih motenj na kateri koli točki sistema (Orozco-Romero idr., 2020).

5.3 Digitalni dvojniki v logistiki

Digitalni dvojniki so bili nedavno priznani za podporo pri naprednem eksperimentiranju, simulaciji in odločanju za logistične operacije na zahtevo (Belfadel idr., 2023). Kljub temu se okviri digitalnih dvojnikov še vedno večinoma izvajajo v kontekstu izdelovanja, proizvodnje in upravljanja proizvodnih prostorov (Haße idr., 2019; Zhuang idr., 2018), vendar je jasno, da so obstoječe arhitekture preveč univerzalne, da bi jih lahko uporabili dolgoročno (Haße idr., 2019).

Konkretni primeri uporabe za implementacijo takšnih arhitektur v logistiki so še vedno redki, čeprav implementacija digitalnih dvojnikov ponuja pomembno dodano vrednost (Hopkins & Hawking, 2018). Logistične objekte je mogoče opremiti s celovitimi senzorskimi sistemi, na podlagi katerih se ustvari digitalna podoba posameznega logističnega subjekta, ki predstavlja digitalnega dvojnika. (Wohlfeld, 2019). Logistični subjekt lahko pri tem predstavlja eno izmed štirih konstantnih množic oskrbovalnih verig (Kajba, Jereb, idr., 2023): produkt, storitev, proces, in/ali sistem .

Izziv pri ustvarjanju digitalnih dvojnikov je v ustrezni zasnovi strukture podatkov, zahtevanem zbiranju in integraciji podatkov ter ustvarjanju ustreznega vmesnika za uporabo teh podatkov (Tao, Zhang, idr., 2019). Zbiranje podatkov ni glavni izziv v logistiki – odločilen dejavnik je, kako se ti podatki obdelujejo naprej, da se omogoči največja dodana vrednost (Belfadel idr., 2021).

6 ZMOTNA PREPRIČANJA O DIGITALNIH DVOJNIKIH³

Splošno razširjeno zmotno prepričanje je, da digitalni dvojniki ne obstajajo, dokler ne obstaja njegov fizični produkt. Ne obstaja nobena zahteva, da dvojniki obstajajo samo, če hkrati obstaja njegov dvojniki. Z drugimi besedami: ne obstaja zahteva, da mora obstajati ena vrsta dvojnika (fizični dvojniki), preden lahko obstaja tudi druga vrsta dvojnika (digitalni dvojniki). Edina zahteva je, da na neki točki v življenjskem ciklu dvojnika obstaja dvojniki. To pomeni, da digitalni dvojniki lahko obstajajo pred ustvarjanjem fizičnega dvojnika in lahko obstajajo tudi po tem, ko fizični dvojniki preneha obstajati ali se umakne/odstrani. Zahteva, da mora obstajati dejanska fizična stvar, preden lahko obstaja digitalni dvojniki, je preprosto napačna perspektiva. Ključna razlika med tem, ali so digitalni modeli in z njimi povezane informacije digitalni dvojniki, je ta, da je načrtovano, da ta modeli postane fizični produkt in da je realiziran njegov fizični dvojniki. Ta namen in delo, ki je vloženo v uresničitev tega namena, je tisto, kar razlikuje digitalni modeli od digitalnega dvojnika – če fizični dvojniki ni nikoli realiziran, potem digitalni modeli nikoli ni bil digitalni dvojniki. Če povemo povsem poljudno: digitalni modeli leteče preproge ne bo nikoli postal digitalni dvojniki, ker ni namena, kaj šele sposobnosti, da bi tak fizični produkt izdelali.

Izjemna vrednost digitalnega dvojnika je, da obstaja, predno obstaja njegov fizični produkt. Če odpravimo te napačne predstave o metafori »dvojnika«, obstaja pet glavnih razlogov, zakaj digitalni dvojniki ne potrebuje fizičnega produkta:

- okvir digitalnega dvojnika bi moral zajemati celoten življenjski cikel produkta;
- digitalni dvojniki je še posebej dragocen med fazo ustvarjanja;
- digitalni dvojniki obstaja pred fizičnim produktom, vendar ima drugačno ime;
- digitalni dvojniki nazaduje v funkcionalno izoliranost, če pred fizičnim produktom ni digitalnega dvojnika;
- digitalni dvojniki, ki obstaja šele potem, ko obstaja fizični produkt, je konceptualno neeleganten in razdrobljen.

³ Poglavlje je povzeto po (Grieves, 2023).

Praktična resničnost za tiste, ki trdijo, da digitalni dvojnik ne obstaja pred fizičnim produktom je ta, da dejansko obstaja digitalni dvojnik v njihovem podjetju preden obstaja fizični produkt. Te informacije o produktu še naprej obstajajo skozi celoten življenjski cikel produkta, le da ima v vseh teh situacijah drugačno ime, bodisi digitalni model, digitalni dizajn, model digitalnih sistemov ali kakšna druga različica. Vendar pa ima večino, če ne vse značilnosti DTP.

Medtem ko ima digitalni dvojnik vrednost v celotnem življenjskem ciklu produkta, je DTP še posebej dragocen v fazi ustvarjanja, kjer je delo mogoče premakniti iz fizičnega v virtualni svet. Če je virtualne produkte mogoče modelirati in testirati v virtualnem okolju, z nadomeščanjem fizičnih prototipov in preskušanjem, je potencial za zmanjšanje izgubljenih fizičnih virov precejšen. Fizični viri v tem primeru lahko vključujejo material, energijo, delovni in razvojni čas ter druge. Čeprav je faza ustvarjanja kratka v primerjavi s celotnim življenjskim ciklom produkta (ki lahko traja desetletja), imajo odločitve v tej fazi velik vpliv na določanje prihodnjih stroškov produkta. Vedno več je zmožnosti izvajanja virtualnega testiranja po nižji ceni in v krajšem času za nadomestitev fizičnega testiranja. To lahko zmanjša stroške, izboljša kakovost in skrajša čas, ki ga produkt potrebuje od ideje do prodaje na trgu.

Močan vidik digitalnega dvojnika je osredotočenost na produkt skozi celoten življenjski cikel produkta. Informacije se zbirajo, združujejo in porabijo ne glede na funkcionalno področje. Obstoj digitalnega dvojnika šele po prehodu v proizvodnjo močno zmanjša njegov učinek, saj je znatna količina informacij za določen DTI je vsebovana v DTP.

Nazadnje je neelegantno in razdrobljeno, da digitalni dvojnik ne zajema celotnega življenjskega cikla produkta, saj je njegov namen imeti okvir, ki traja skozi celoten življenjski cikel. Zahteva, da digitalni dvojnik obstaja šele, ko obstaja fizični produkt, tako ni v skladu s tem pristopom. Različne vrste digitalni dvojnikov (DTP, DTI in DTA) omogočajo dosleden okvir, hkrati pa razlikujemo, kako se digitalni dvojnik kaže v različnih fazah življenjskega cikla produkta.

7 IZZIVI IN PRIHODNJE SMERNICE

Kljub njihovemu ogromnemu potencialu se pojavijo tudi izzivi, povezani z uporabo digitalnih dvojnikov. Zelo pomembna vprašanja so (DeepSeek, 2025):

- kakovost in integriteta podatkov – zagotavljanje natančnosti in zanesljivosti podatkov, zbranih iz fizičnih sistemov, je ključnega pomena;
- kompleksnost in natančnost modelov – ko modeli postanejo bolj kompleksni, postane upravljanje računalniških virov pomemben izziv, še posebej v okoljih z omejenimi viri;
- integracija z obstoječimi fizičnimi sistemi, ki jih je treba rešiti, da bi v celoti uresničili njihove prednosti.
- napredni računalniške viri – zapletenost modelov zahteva napredne računalniške vire, kar lahko predstavlja omejitve za nekatere industrije.

V prihodnosti bodo napredki na področju UI in strojnega učenja verjetno še povečali zmoglosti digitalnih dvojnikov, kar bo omogočilo še bolj sofisticirane simulacije in odločanje v realnem času. Ko se te tehnologije še naprej razvijajo, bodo igrale vse pomembnejšo vlogo pri oblikovanju prihodnosti industrij, spodbudile inovacije in povečale učinkovitost v vseh sektorjih. Ko tehnologija napreduje, bodo dinamični digitalni dvojniki verjetno vključili še naprednejše tehnike UI, kot so (DeepSeek, 2025) :

- generativna UI – ustvarjanje sintetičnih podatkov za usposabljanje ali testne scenarije;
- avtonomno odločanje – omogočanje digitalnim dvojnikom, da sprejemajo odločitve brez človeškega posredovanja.

Te novosti bodo omogočile, da digitalni dvojniki postanejo še močnejša orodja, ki bodo spodbujala inovacije in učinkovitost v industrijah. Zlitje masovnih podatkov in UI ne izboljšuje le digitalnih dvojnikov, temveč tlakuje pot za novo obdobje inteligentnih virtualnih predstavitev, ki lahko dinamično reagirajo na in se prilagajajo svojim fizičnim prototipom.

7.1 Nadgradnja z masovnimi podatki in UI: dinamični modeli

V vzponu masovnih podatkov in strojnega učenja v 2000-ih so digitalni dvojniki postali dinamični in delovali v realnem času. Ti modeli so vključevali žive podatke iz fizičnih sistemov, kar je omogočilo natančnejše simulacije in napovedi. Ta nadgradnja je naredila digitalne dvojnike nepogrešljive za industrije, ki upravljajo kompleksne povezane sisteme. (DeepSeek, 2025)

Digitalni dvojniki niso več statične replike fizičnih entitet; razvili so se v dinamične modele, ki se nenehno prilagajajo in razvijajo skozi čas. To izboljšanje omogoča integracija masovnih podatkov in UI, ki tem virtualnim predstavitev omogočajo, da odražajo dinamiko in kompleksnost svojih fizičnih prototipov v skoraj realnem času. (DeepSeek, 2025)

7.1.1 Vloga masivnih podatkov

Masovni podatki igrajo ključno vlogo pri izboljšanju digitalnih dvojnikov, saj zagotavljajo potrebne podatke v realnem času iz povezanih senzorjev, naprav IoT in drugih virov. Ti natančni podatki se zbirajo natančno in natančno, kar omogoča, da digitalni dvojniki prejmejo točne in ažurne informacije o stanju in delovanju fizičnih sistemov. Na primer (DeepSeek, 2025):

- Podatki senzorjev – od strojev v tovarnah do temperaturnih meritev v energetskih obratih, masovni podatki zagotavljajo, da digitalni dvojniki prejemajo točne in ažurne informacije o njihovih fizičnih prototipih.
- Spremljanje zdravja sistema – z analizo podatkov iz zapisov vzdrževanja, operativnih nadzornih plošč in drugih virov lahko digitalni dvojniki spremljajo zdravje sistemov in prepoznavajo potencialne okvare, preden se zgodijo.

7.1.2 Dinamični modeli, podprti z UI

UI gre še korak dlje, saj digitalnim dvojnikom omogoča, da v realnem času obdelujejo in interpretirajo velike podatke. Napredne tehnike UI, kot so (DeepSeek, 2025):

- strojno učenje – omogoča, da se digitalni dvojniki samodejno naučijo vzorcev, trendov in odstopanj iz zgodovinskih podatkov, kar omogoča napovedno analitiko;
- okrepljeno učenje – omogoča digitalnim dvojnikom, da sprejemajo odločitve na podlagi kompleksnih sistemov in optimizirajo delovanje dinamično;
- globoko učenje – omogoča uporabo nevronske mreže za analizo zapletenih odnosov med spremenljivkami, kar izboljša natančnost in prilagodljivost.

7.1.3 Dinamični modeli v praksi

Dinamični modeli v praksi se kažejo skozi (DeepSeek, 2025):

- napovedno vzdrževanje – digitalni dvojniki, podprti z UI, lahko napovedo, kdaj bodo komponente verjetno odpovedale, kar omogoča vzdrževalnim ekipam, da se proaktivno lotijo težav;
- prilagodljivo oblikovanje – z simulacijo scenarijev »kaj če« lahko digitalni dvojniki optimizirajo parametre oblikovanja v realnem času, na primer prilagajanje specifikacij motorja ali optimizacija poti oskrbovalne verige glede na trenutne pogoje;
- simulacija v realnem času – dinamični modeli, podprti z UI, omogočajo zapletene simulacije, ki se prilagajajo spreminjajočim se pogojem, kar omogoča hitrejše in natančnejše testiranje hipotez.

7.2 Integracija z IoT: omrežje sistemov

S proliferacijo IoT naprav so digitalni dvojniki postali ključni pri upravljanju in optimizaciji povezanih ekosistemov. Aplikacije v proizvodnji in pametnih mestih so pridobile koristi

od teh modelov, saj so lahko simulirali vzorce prometa, porabo energije in vplive politik, ter tako ponudili celosten vpogled v urbano okolje. (DeepSeek, 2025)

Integracija digitalnih dvojnikov z internetom stvari (IoT) predstavlja pomemben napredek v tehnologiji, ki omogoča ustvarjanje mreže sistemov, ki povečuje učinkovitost, odločanje in inovativnost. Sledi strukturiran pregled tega koncepta (DeepSeek, 2025):

1. Razumevanje digitalnih dvojnikov in IoT:

- Digitalni dvojniki so virtualni predstavitvi fizičnega objekta ali sistema, ki se uporabljajo za simulacije, testiranje in optimizacijo.
- IoT vključuje povezovanje naprav in predmetov prek interneta za zbiranje podatkov in izvajanje dejanj na daljavo.

2. Povezovanje digitalnih dvojnikov z IoT:

- S povezovanjem digitalnih dvojnikov z napravami IoT se lahko podatki v realnem času iz fizičnih sistemov prenašajo v njihove virtualne dvojnike.
- To omogoča stalno spremljanje, analizo in napovedovanje obnašanja sistema, kar zmanjšuje potrebo po fizičnih prototipih in pospešuje procese testiranja.

3. Prednosti integracije:

- Napovedovalno/predvideno vzdrževanje (angl. predictive maintenance): analiza podatkov iz naprav IoT omogoča zgodnje odkrivanje morebitnih okvar, s čimer se zmanjšajo izpadi.
- Simulacija v realnem času: Simulacija različnih scenarijev v realnem času z uporabo digitalnih dvojnikov lahko optimizira delovanje in izboljša sprejemanje odločitev.
- Omrežje sistemov: povezovanje večjega števila digitalnih dvojnikov tvori omrežje, ki lahko optimizira kompleksne sisteme (npr. oskrbovalne verige) z integracijo podatkov iz vseh komponent.

4. Izboljšano sodelovanje:

- Spodbuja se sodelovanje v ekipah, ki dostopajo in posodablajo skupne digitalne dvojnike v realnem času ter zmanjšujejo napake z doslednimi in ažurnimi modeli.

5. Obravnavani izzivi:

- Potrebno je skrbeti za varnost podatkov, saj so potrebni robustni protokoli za zaščito naprav IoT in njihovih podatkov.

- Zagotavljanje doslednosti in točnosti podatkov v različnih virih je ključnega pomena za zanesljivo delovanje sistema.
6. Razširljivost in infrastruktura:
- Integracija mora podpirati vedno večje število povezanih naprav in podatkovnih točk, kar zahteva razširljivo infrastrukturo in robustno upravljanje omrežja.
7. Študije primerov in dobre prakse:
- Implementacije v resničnem svetu, na primer v proizvodnji, prikazujejo, kako lahko digitalni dvojniki, integrirani z internetom stvari, optimizirajo proizvodne linije in predvidijo potrebe po vzdrževanju.

Skratka, integracija digitalnih dvojnikov z IoT ustvari mrežo sistemov, ki nudi večjo učinkovitost in zmožnosti odločanja. Premagovanje izzivov, povezanih z upravljanjem podatkov, varnostjo in razširljivostjo, bo ključno za povečanje potenciala te tehnologije.

7.3 Vloga start-up podjetij: demokratizacija tehnologije

Sredi 2000-ih so start-up podjetja začela razvijati dostopne platforme za digitalne dvojnike, kar je tehnologijo približalo širši javnosti. Ta demokratizacija je spodbudila široko sprejetje tehnologije v različnih sektorjih ter omogočila inovacije in raznolikost v aplikacijah. (DeepSeek, 2025)

Start-up podjetja igrajo ključno vlogo pri demokratizaciji tehnologije, zlasti v kontekstu digitalnih dvojnikov, saj naredijo inovativne rešitve dostopnejše in cenovno dostopnejše širšemu občinstvu. Tukaj je strukturiran pregled njihovega doprinosa (DeepSeek, 2025):

1. Cenovno dostopne rešitve – start-up podjetja pogosto ustvarjajo stroškovno učinkovite produkte, ki podjetjem in posameznikom omogočajo, da sprejmejo tehnologije digitalnih dvojnikov brez velikih finančnih naložb. Ta dostopnost je ključnega pomena za spodbujanje vsesplošne uporabe.
2. Odprtokodne platforme – z uporabo odprtokodnih orodij se prispeva k procesu demokratizacije tako, da se vsakomur omogoči dostop do digitalnih dvojnikov, katere lahko spreminjajo, kar spodbuja sodelovanje in inovacije iz različnih perspektiv.

3. Izobraževalni viri – start-up podjetja lahko zagotovijo primere vaj ali poenostavljene vmesnike, ki naredijo zapletene sisteme bolj razumljive za netehnične uporabnike, s čimer zmanjšajo začetne izzive in spodbujajo vsesplošno uporabo.
4. Inovativni poslovni modeli – start-up podjetja ponujajo prilagodljive strukture plačil (na primer plačilo po uporabi) preko modelov programskih oprem kot storitev (angl. Software as Service, Saas), zaradi česar so digitalni dvojniki dostopni podjetjem vseh velikosti brez dragih licenc.
5. Sodelovanje med različnimi industrijami – start-up podjetja pogosto povezujejo različne industrije in uporabljajo digitalne dvojnike za ustvarjanje pametnejših rešitev, s čimer spodbujajo interdisciplinarne inovacije.
6. Etični vidiki – zagotavljanje varne in uporabniku prijazne tehnologije je prednostna naloga start-up podjetij, poleg preprečevanja zlorab ob hkratnem varovanju uporabniških podatkov in zasebnosti.
7. Omejitve virov in izzivi – čeprav lahko uvedba tehnologije zahteva veliko virov, se start-up podjetja soočajo z izzivi, kot so pretirana poenostavitev, napačna uporaba in stroški infrastrukture, da zagotovijo učinkovite rešitve, ki so vredne zaupanja.

Torej, start-up podjetja spodbujajo dostopnost in uporabnost digitalnih dvojnikov, zaradi česar so bolj dostopni in uporabni za različne aplikacije. Vendar bo obravnavanje povezanih izzivov ključnega pomena za povečanje potenciala te tehnologije za demokratiziran učinek. (DeepSeek, 2025)

7.4 Izzivi in premisleki: zasebnost in zanesljivost

Kljub napredku ostajajo izzivi. Vprašanja, kot so varnost podatkov, zasebnost in natančnost modelov, so ključnega pomena, saj digitalni dvojniki obdelujejo občutljive informacije in morajo zanesljivo simulirati realne pogoje. (DeepSeek, 2025)

Digitalni dvojniki so virtualne predstavitve fizičnih sistemov ali produktov, ki se uporabljajo za simulacije, testiranje in optimizacijo. Čeprav ponujajo pomembne prednosti pri učinkovitosti in odločanju, je treba obravnavati več izzivov, povezanih z zasebnostjo in zanesljivostjo (DeepSeek, 2025):

1. Zaskrbljenost glede zasebnosti:

- Zbiranje podatkov in soglasja – zagotavljanje, da so prakse zbiranja podatkov skladne s predpisi, kot je HIPAA v zdravstvu ali GDPR v EU, je ključnega pomena. Privolitev in zavedanje o uporabi podatkov sta bistvena.
- Varnostni ukrepi – zaščita digitalnih dvojnikov pred nepooblaščenim dostopom in morebitnimi vdori je ključnega pomena. To vključuje izvajanje zanesljivih varnostnih protokolov za preprečevanje zlorabe ali manipulacije.
- Minimizacija podatkov – zbiranje le potrebnih podatkov in zagotavljanje njihove anonimnosti, kjer je to mogoče, za zaščito zasebnosti posameznika.

2. Premisleki glede zanesljivosti:

- Kakovost podatkov – uporaba visokokakovostnih, ustreznih in neprekinjenih podatkov za ustvarjanje in posodabljanje modela je ključnega pomena za zagotavljanje točnosti in zanesljivosti.
- Preglednost modela – gradi zaupanje in zagotavlja ustrezno uporabo skozi jasne in razumljive razlag o tem, kako modeli delujejo ter sprejemajo odločitve.
- Nenehne posodobitve – digitalna dvojnika je treba redno posodabljati z novimi podatki, da ostanejo zanesljivi. Zastareli modeli lahko povzročijo napake ali nevarne rezultate v aplikacijah v resničnem svetu.
- Potrjevanje in preverjanje – izvajanje strogih postopkov testiranja, podobnih preverjanju programske opreme, zagotavlja, da se modeli v različnih scenarijih obnašajo po pričakovanjih.

3. Dodatni premisleki:

- Standardi, specifični za posamezne industrije – različne industrije imajo lahko edinstvene predpise, kot so finance ali zdravstvo, ki dodatno vplivajo na razvoj in uvajanje digitalnih dvojnikov.
- Zahteve po virih – majhna podjetja se lahko soočajo z izzivi pri izvajanju robustnih ukrepov za zasebnost in zanesljivost zaradi omejitev virov.
- Usposabljanje uporabnikov – ustrezno usposabljanje za tiste, ki komunicirajo z digitalnimi dvojniki, je bistveno za zmanjšanje tveganja zlorabe ali napak.

4. Strategije za reševanje izzivov:

- Skladnost in sodelovanje – upoštevanje predpisov, specifičnih za industrijo, in sodelovanje s strokovnjaki lahko pomaga pri krmarjenju pri kompleksnih zahtevah glede skladnosti.
- Naložbe v tehnologijo – dodeljevanje virov za napredne varnostne ukrepe, stalno spremljanje podatkov in validacijo modela je potrebno.
- Izobraževanje in ozaveščanje – programi usposabljanja zagotavljajo razumevanje uporabnikov glede pravilne uporabe in omejitve digitalnih dvojnikov.

Skratka, medtem ko imajo digitalni dvojniki ogromen potencial, je njihova uspešna implementacija odvisna od uravnoteženja tehničnih, organizacijskih in operativnih vidikov. Reševanje izzivov glede zasebnosti in zanesljivosti zahteva skrbno načrtovanje, naložbe in upoštevanje splošnih standardov in standardov, specifičnih za industrijo. (DeepSeek, 2025)

7.5 Sodobni trendi: prihodnost, ki jo podpira UI

Danes so digitalni dvojniki vse bolj podprti z UI, kar jim omogoča napovedovanje okvar, optimizacijo delovanja in predvidevanje težav. Ta trend jih postavlja v ospredje kot ključna orodja za industrije, ki si prizadevajo za večjo učinkovitost in trajnost. (DeepSeek, 2025)

Integracija UI z digitalnimi dvojniki je v ospredju tehnološkega napredka, saj ponuja inteligentne in prilagodljive sisteme, ki so sposobni obvladati dinamična okolja. Tu so ključni trendi, ki izhajajo iz te konvergence (DeepSeek, 2025):

1. Inteligentno odločanje in napovedovalno/predvideno vzdrževanje – digitalni dvojniki, podprti z UI, omogočajo sprejemanje odločitev v realnem času z analizo obsežnih naborov podatkov, kar omogoča proaktivno vzdrževanje in optimizacijo v industrijah, kot je proizvodnja. Napovedovanje okvar strojev prek virtualnih simulacij lahko na primer poveča učinkovitost delovanja.
2. Integracija IoT – združitev naprav IoT z digitalnimi dvojniki ustvarja povratno zanko med fizičnim in virtualnim svetom, kar omogoča neprekinjeno spremljanje, analizo podatkov, natančnejše simulacije ter odzivne sisteme.

3. Generativna UI – omogoča usposabljanje modelov iz omejenih podatkovnih točk in izboljša zmožnost ekstrapolacije vedenja, kar spremeni način ustvarjanja in uporabe digitalnih dvojnikov na različnih področjih.
4. Računalništvo na robu – podpira lokalizirano odločanje prek digitalnih dvojnikov, čeprav predstavlja tudi izzive, povezane z doslednostjo podatkov med sistemi.
5. Aplikacije za posamezno industrijo – digitalni dvojniki se uporabljajo v industrijah, kot je zdravstvo za prilagojeno zdravljenje bolnikov, avtomobilizem za optimizacijo oskrbovalnih verig in urbanistično načrtovanje za izboljšanje infrastrukture. Vsaka industrija uporablja UI za izboljšanje simulacij in napovedi.
6. Napredek v algoritmih strojnega učenja – omogoča učinkovito obdelavo kompleksnih podatkovnih nizov, kar nudi visoko natančnost modelov v okviru digitalnih dvojnikov.
7. Infrastruktura računalništva v oblaku – podpira računalniške potrebe digitalnih dvojnikov, podprtimi z UI, kar olajša njihovo razširljivost in dostopnost v industrijah.
8. Sodelovalna okolja – razvoj platform za sodelovanje spodbuja interdisciplinarno sodelovanje, pri čemer se uporabljajo orodja UI za inovacije in reševanje problemov.
9. Etični vidiki – medtem ko digitalni dvojniki, podprti z UI, ponujajo znatne prednosti, je treba obravnavati izzive, kot sta pristranskost v modelih in pretirano zanašanje na sisteme UI brez človeškega nadzora, da se zagotovita etična uporaba in zanesljivost.

Prihodnost digitalnih dvojnikov, podprtimi z UI, zaznamujejo izboljšana inteligenca, prilagodljivost in medpanožne aplikacije. Ta integracija spodbuja inovativnost in učinkovitost, vendar zahteva uravnotežen pristop, ki upošteva tehnične, etične in operativne razsežnosti. Prihodnost digitalnih dvojnikov tako zaznamujejo pomembni napredki v različnih industrijah, pri čemer imajo start-up podjetja potencialno ključno vlogo pri inovacijah. Vendar pa so obravnavanje etičnih vprašanj, zagotavljanje varnosti podatkov in reševanje izzivov, kot je pretirano zanašanje, bistvenega pomena za uresničitev celotnega potenciala teh tehnologij. Poglobljanje v specifične študije primerov bo zagotovilo globlji vpogled v aplikacije v resničnem svetu in nadalje oblikovalo pot digitalnih dvojnikov, podprtimi z UI. (DeepSeek, 2025)

VIRI IN LITERATURA

- Akkad, M. Z., Haidar, S., & Bányai, T. (2022). Design of Cyber-Physical Waste Management Systems Focusing on Energy Efficiency and Sustainability. *Designs*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/designs6020039>
- Andronie, M., Lăzăroiu, G., Ștefănescu, R., Uță, C., & Dijmărescu, I. (2021). Sustainable, smart, and sensing technologies for cyber-physical manufacturing systems: A systematic literature review. V *Sustainability (Switzerland)* (Let. 13, Številka 10). <https://doi.org/10.3390/su13105495>
- Armeni, P., Polat, I., Rossi, L., Diaferia, L., Meregalli, S., & Gatti, A. (2022). Digital Twins in Healthcare: Is It the Beginning of a New Era of Evidence-Based Medicine? A Critical Review. *Journal of Personalized Medicine*, 12, 1255. <https://doi.org/10.3390/jpm12081255>
- Atalay, M., Murat, U., Oksuz, B., Parlaktuna, A., Pisirir, E., & Testik, M. (2022). Digital twins in manufacturing: Systematic literature review for physical–digital layer categorization and future research directions. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 35(11), 1–27. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.2022762>
- Barata, J., Pereira, V., & Coelho, M. (2020). Product Biography Information System: A Lifecycle Approach to Digital Twins. V *Conference Proceedings—IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (Let. 2020-October, str. 899–904). <https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9283061>
- Barykin, S. Y., Bochkarev, A. A., Kalinina, O. V., & Yadykin, V. K. (2020). Concept for a Supply Chain Digital Twin. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 5(6), 1498–1515. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2020.5.6.111>
- Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817–820. <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>
- Belfadel, A., Hörl, S., Tapia, R. J., Politaki, D., Kureshi, I., Tavasszy, L., & Puchinger, J. (2023). A conceptual digital twin framework for city logistics. V *Computers, Environment and Urban Systems* (Let. 103). <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.101989>
- Belfadel, A., Horl, S., Tapia, R. J., & Puchinger, J. (2021). Towards a digital twin framework for adaptive last mile city logistics. V *2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech 2021*. <https://doi.org/10.23919/SpliTech52315.2021.9566324>

- Bevilacqua, M., Bottani, E., Ciarapica, F. E., Costantino, F., Di Donato, L., Ferraro, A., Mazzuto, G., Monteriù, A., Nardini, G., Ortenzi, 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), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su12031088>
- Binsfeld, T., & Gerlach, B. (2022). Quantifying the Benefits of Digital Supply Chain Twins—A Simulation Study in Organic Food Supply Chains. *Logistics*, 6(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/logistics6030046>
- Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital Twin—The Simulation Aspect. V P. Hehenberger & D. Bradley (Ur.), *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers* (str. 59–74). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- Botton, A., Barberi, G., & Facco, P. (2022). Data Augmentation to Support Biopharmaceutical Process Development through Digital Models—A Proof of Concept. *Processes*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/pr10091796>
- Chen, Z., & Huang, L. (2021). Digital twins for information-sharing in remanufacturing supply chain: A review. *Energy*, 220, 119712. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119712>
- Dai, R., & Brell-Çokcan, S. (2022). Digital twins as education support in construction: A first development framework based on the Reference Construction Site Aachen West. *Construction Robotics*, 6(1), 75–83. <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00070-7>
- DeepSeek. (2025). *Digital Twins with AI Support: Key Figures and Milestones* [Software]. <https://deepseek.com/>
- Defraeye, T., Shrivastava, C., Berry, T., Verboven, P., Onwude, D., Schudel, S., Bühlmann, A., Cronje, P., & Rossi, R. M. (2021). Digital twins are coming: Will we need them in supply chains of fresh horticultural produce? *Trends in Food Science & Technology*, 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.025>
- Edlund, R. P. B. (2022). *Usage of digital twins in supply chain risk management* [Bachelor's Thesis, Aalto University School of Business Information and Service Management]. <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/115137>
- Gehring, M., & Rüppel, U. (2023). Data fusion approach for a digital construction logistics twin. V *Frontiers in Built Environment* (Let. 9). <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1145250>
- Gerlach, B., Zarnitz, S., Nitsche, B., & Straube, F. (2021). Digital Supply Chain Twins—Conceptual Clarification, Use Cases and Benefits. *Logistics*, 5(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/logistics5040086>

- Glaessgen, E. H., & Stargel, D. S. (2012, april 16). *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles—NASA Technical Reports Server (NTRS)*. 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin, Honolulu, HI. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120008178>
- Grieves, M. (2002a, oktober 31). *SME Management Forum Completing the Cycle: Using PLM Information in the Sales and Service Functions*. SME Management Forum, Troy, Michigan.
- Grieves, M. (2002b, december 3). *PLM Initiatives* [Powerpoint Slides]. Product Lifecycle Management Special Meeting, University of Michigan Lurie Engineering Center.
- Grieves, M. (2005). *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking*. McGraw Hill. <https://www.amazon.com/Product-Lifecycle-Management-Generation-Thinking/dp/0071452303>
- Grieves, M. (2015). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>
- Grieves, M. (2022). Intelligent digital twins and the development and management of complex systems. *Digital Twin*, 8. <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17574.1>
- Grieves, M. (2023). Digital Twins: Past, Present, and Future. V N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Ur.), *The Digital Twin* (str. 97–121). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4>
- Grieves, M., & Hua, E. (2024). *Digital Twins, Simulation, and the Metaverse*. Springer Nature Switzerland.
- Hartmann, D., & Van der Auweraer, H. (2021). Digital Twins. V M. Cruz, C. Parés, & P. Quintela (Ur.), *Progress in Industrial Mathematics: Success Stories* (str. 3–17). Springer International Publishing.
- Haße, H., Li, B., Weißenberg, N., Cirullies, J., & Otto, B. (2019). *Digital twin for real-time data processing in logistics*. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/405534>
- Helgers, H., Hengelbrock, A., Schmidt, A., Rosengarten, J., Stitz, J., & Strube, J. (2022). Process Design and Optimization towards Digital Twins for HIV-Gag VLP Production in HEK293 Cells, including Purification. *Processes*, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/pr10020419>
- Ho, G. T. S., Tang, Y. M., Tsang, K. Y., Tang, V., & Chau, K. Y. (2021). A blockchain-based system to enhance aircraft parts traceability and trackability for inventory management. *Expert Systems with Applications*, 179, 115101.

- Hopkins, J., & Hawking, P. (2018). Big Data Analytics and IoT in logistics: A case study. *The International Journal of Logistics Management*, 29, 00–00. <https://doi.org/10.1108/IJLM-05-2017-0109>
- Hsu, Y., Chiu, J.-M., & Liu, J. S. (2019). Digital Twins for Industry 4.0 and Beyond. *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 526–530. <https://doi.org/10.1109/IEEM44572.2019.8978614>
- Huang, Y., Yuan, B., Xu, S., & Han, T. (2022). Fault Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motor of Coal Mine Belt Conveyor Based on Digital Twin and ISSA-RF. *Processes*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/pr10091679>
- Iliuță, M.-E., Moisescu, 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), Article 13. <https://doi.org/10.3390/app14135454>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). New disruption risk management perspectives in supply chains: Digital twins, the ripple effect, and resilience. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 337–342. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.138>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 32(9), 775–788. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
- Ivanov, D., Dolgui, A., Das, A., & Sokolov, B. (2019). Digital Supply Chain Twins: Managing the Ripple Effect, Resilience, and Disruption Risks by Data-Driven Optimization, Simulation, and Visibility. V D. Ivanov, A. Dolgui, & B. Sokolov (Ur.), *Handbook of Ripple Effects in the Supply Chain* (str. 309–332). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14302-2_15
- Kajba, M., Jereb, B., & Obrecht, M. (2023). Considering IT Trends for Modelling Investments in Supply Chains by Prioritising Digital Twins. *Processes*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/pr11010262>
- Kajba, M., Obrecht, M., & Ojsteršek, T. C. (2023). Digital twins for sustainability purposes in logistics industry: A literature review. *Logforum*, 19(4), 611–625. <https://doi.org/10.17270/J.LOG.2023.927>
- Kalaboukas, K., Rožanec, J., Košmerlj, A., Kiritsis, D., & Arampatzis, G. (2021). Implementation of Cognitive Digital Twins in Connected and Agile Supply Networks—An Operational Model. *Applied Sciences*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/app11094103>
- Kaur, M. J., Mishra, V. P., & Maheshwari, P. (2020). The Convergence of Digital Twin, IoT, and Machine Learning: Transforming Data into Action. V M. Farsi, A. Daneshkhah, A. Hosseinian-Far, & H. Jahankhani (Ur.), *Digital Twin Technologies*

and Smart Cities (str. 3–17). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-18732-3_1

Kosacka-Olejnik, M., Kostrzewski, M., Marczevska, M., Mrówczyńska, B., & Pawlewski, P. (2021). How Digital Twin Concept Supports Internal Transport Systems?—Literature Review. *Energies*, 14(16), Article 16.
<https://doi.org/10.3390/en14164919>

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>

Krupitzer, C., Noack, T., & Borsum, C. (2022). Digital Food Twins Combining Data Science and Food Science: System Model, Applications, and Challenges. *Processes*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/pr10091781>

Kušić, K., Schumann, R., & Ivanjko, E. (2023). A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics. *Advanced Engineering Informatics*, 55, 101858.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101858>

Lawton, G. (2023, september 13). *Grieves and Vickers—The history of digital twins*. Diginomica. <https://diginomica.com/grieves-and-vickers-history-digital-twins>

Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., & Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>

Lheureux, B., Schulte, W. R., & Velosa, A. (2018, september 4). *Why and How to Design Digital Twins*. Gartner. <https://www.gartner.com/en/documents/3888980>

Liu, J., Yeoh, W., Qu, Y., & Gao, L. (2022). *Blockchain-based Digital Twin for Supply Chain Management: State-of-the-Art Review and Future Research Directions* (arXiv:2202.03966). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.03966>

Lu, Y., Liu, C., Wang, K., Huang, H., & Xu, X. (2019). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>

Marmolejo-Saucedo, J. A., Hurtado-Hernandez, M., & Suarez-Valdes, R. (2020). Digital Twins in Supply Chain Management: A Brief Literature Review. V P. Vasant, I. Zelinka, & G.-W. Weber (Ur.), *Digital Twins in Supply Chain Management: A Brief Literature Review*. Springer International Publishing.

Minerva, R., Lee, G. M., & Crespi, N. (2020). Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models. *Proceedings of the IEEE*,

108(10), 1785–1824. Proceedings of the IEEE.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2998530>

- Miskinis, C. (2019, marec). *The Mysterious History of Digital Twin Technology and Who Created It*. Challenge Advisory. <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>
- Moshood, T., Nawanir, G., Sorooshian, S., & Okfalisa, O. (2021). Digital Twins Driven Supply Chain Visibility within Logistics: A New Paradigm for Future Logistics. *Applied System Innovation*, 4, 29. <https://doi.org/10.3390/asi4020029>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Novak, G. S., Jr. (1995). Robert F. Simmons In Memoriam. *American Association for Artificial Intelligence*, 16(3), 2.
- Orozco-Romero, A., Arias-Portela, C. Y., & Saucedo, J. A. M.-. (2020). The Use of Agent-Based Models Boosted by Digital Twins in the Supply Chain: A Literature Review. V P. Vasant, I. Zelinka, & G.-W. Weber (Ur.), *Intelligent Computing and Optimization* (Let. 1072, str. 642–652). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_62
- Payne, T. (2018). *Supply Chain Brief: Digital Planning Requires a Digital Supply Chain Twin*. Gartner. <https://www.gartner.com/en/documents/3892678>
- Perno, M., Hvam, L., & Haug, A. (2022). Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Computers in Industry*, 134, 103558. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558>
- Psarommatis, F., & May, G. (2023). A literature review and design methodology for digital twins in the era of zero defect manufacturing. *International Journal of Production Research*, 61(16), 5723–5743. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2101960>
- Purcell, W., & Neubauer, T. (2023). Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>
- Ren, S., Zhao, X., Huang, B., Wang, Z., & Song, X. (2019). A framework for shopfloor material delivery based on real-time manufacturing big data. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-1017-7>
- Rojek, I., Mikołajewski, D., & Dostatni, E. (2021). Digital Twins in Product Lifecycle for Sustainability in Manufacturing and Maintenance. *Applied Sciences*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/app11010031>

- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66, 141–144. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- Schluse, M., Priggemeyer, M., Atorf, L., & Romann, J. (2018). Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4), 1722–1731. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2804917>
- Selvarajan, S., Tappe, A. A., Heiduk, C., Scholl, S., & Schenkendorf, R. (2022). Process Model Inversion in the Data-Driven Engineering Context for Improved Parameter Sensitivities. *Processes*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/pr10091764>
- Soares, R. M., Câmara, M. M., Feital, T., & Pinto, J. C. (2019). Digital Twin for Monitoring of Industrial Multi-Effect Evaporation. *Processes*, 7(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/pr7080537>
- Srai, J., Settanni, E., Tsolakis, N., & Aulakh, P. (2019). *Supply Chain Digital Twins: Opportunities and Challenges Beyond the Hype*. 2019. <https://doi.org/10.17863/CAM.45897>
- Stark, R., Fresemann, C., & Lindow, K. (2019). Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. *CIRP Annals*, 68(1), 129–132. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.024>
- Tao, F., Liu, W., Zhang, M., Hu, T., Qi, Q., Zhang, H., Sui, F., Wang, T., Xu, H., Huang, Z., Ma, X., Zhang, L., Cheng, J., Yao, N., Yi, W., Zhu, K., Zhang, X., Meng, F., Jin, X., & Luo, Y. (2019). Five-dimension digital twin model and its ten applications. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS*, 25(1), 1–18. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2019.01.001>
- Tao, F., & Qi, Q. (2019). Make more digital twins. *Nature*, 573(7775), 490–491. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Tao, F., Zhang, M., Cheng, J., & Qi, Q. (2017). Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 23(1), 1–9. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2017.01.001>
- The editors of Encyclopaedia Britannica Article History. (2025, januar 2). *John McCarthy / Biography & Facts | Britannica*. Britannica. <https://www.britannica.com/biography/John-McCarthy>

- Vetter, F. L., & Strube, J. (2022). Enabling Total Process Digital Twin in Sugar Refining through the Integration of Secondary Crystallization Influences. *Processes*, *10*(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/pr10020373>
- Wagner, R., Schleich, B., Haefner, B., Kuhnle, A., Wartzack, S., & Lanza, G. (2019). Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products. *Procedia CIRP*, *84*, 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.219>
- Wohlfeld, D. (2019). Digitaler Zwilling für die Produktion von Übermorgen: Große Fortschritte auf dem Forschungscampus ARENA2036. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, *114*(1–2), 65–67. <https://doi.org/10.3139/104.112008>
- Zhang, G., MacCarthy, B. L., & Ivanov, D. (2022). Chapter 5—The cloud, platforms, and digital twins—Enablers of the digital supply chain. V B. L. MacCarthy & D. Ivanov (Ur.), *The Digital Supply Chain* (str. 77–91). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91614-1.00005-8>
- Zhuang, C., Liu, J., & Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *96*(1), 1149–1163. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1617-6>
- Zhuang, C., Liu, Z., Liu, J., Ma, H., Zhai, S., & Wu, Y. (2022). Digital Twin-based Quality Management Method for the Assembly Process of Aerospace Products with the Grey-Markov Model and Apriori Algorithm. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, *35*(1), 105. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00763-8>