



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

Masterthesis

Digital Twins in Supply Chain Management

Hanne Thomassen

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management en logistiek

PROMOTOR :

Prof. dr. An CARIS



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be

Universiteit Hasselt
Campus Hasselt:
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt
Campus Diepenbeek:
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

2024
2025



Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

Masterthesis

Digital Twins in Supply Chain Management

Hanne Thomassen

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management en logistiek

PROMOTOR :

Prof. dr. An CARIS

Woord vooraf

Het onderwerp van deze masterproef is de rol van Digital Twins in Supply Chain Management. Digital Twins zijn een relatief nieuw concept, zeker wanneer ze in de context van Supply Chain Management besproken worden. Het effectief managen van een supply chain brengt veel uitdagingen met zich mee. Digital Twins kunnen Supply Chain Management ondersteunen gezien de holistische aanpak en mogelijkheden van deze technologie.

Als masterstudent Handelsingenieur in Operationeel Management en Logistiek wilde ik mezelf een laatste keer uitdagen. Gezien de nieuwigheid van deze technologie en mijn interesse in globale supply chains, bracht ik op eigen initiatief dit onderwerp als voorstel voor mijn masterproef. Hoewel de keuze van een eigen onderwerp zorgde voor een extra moeilijkheidsgraad, ben ik dankbaar dat ik mijn masterproef met veel trots tot een goed einde heb kunnen brengen. Het omvat een laatste uitdaging in het behalen van mijn masterdiploma, een kers op de taart van een opleiding die mij zoveel kennis en mogelijkheden heeft gegeven.

Via dit voorwoord wil ik iedereen danken die mij doorheen mijn studies hebben gesteund.

Eerst en vooral mijn ouders voor hun steun en het blijven geloven in mijn kunnen tijdens de blok en examens. Al mijn vrienden die ik tijdens mijn studiejaren heb leren kennen binnen en buiten de muren van de campus. Dankzij hen zijn dit onvergetelijke jaren geworden.

Daarnaast ben ik dankbaar voor al de kansen en ervaringen die ik heb gekregen tijdens mijn studies zoals mijn deelname aan Junior Consulting, het winnen van de Vlerick Business Game en mijn stage bij Kuehne+Nagel. Universiteit Hasselt biedt een warme, leerrijke omgeving waar studenten zich kunnen ontplooien en kunnen genieten van een studententijd vol ervaring en plezier. Ik ben dan ook enorm dankbaar dat ik aan deze universiteit mijn opleiding heb mogen voltooien.

Voor mijn masterproef gaat mijn dank uit naar Dr. Prof. An CARIS voor haar kritische reflecties en begeleiding. Als promotor bracht ze waardevolle inzichten die deze masterproef naar een hoger niveau hebben getild. Verder wil ik ook de collega's van mijn stage bij Kuehne+Nagel bedanken voor hun ondersteuning tijdens het schrijven van mijn masterproef.

Ik wens u als lezer genot bij het lezen van mijn masterproef. Ik hoop dat het u waardevolle inzichten geeft en vooral een beter begrip geeft van het Digital Twin concept. Bedankt.

Hanne Thomassen,

Te Alken op 17 januari 2025

Samenvatting

Deze masterproef onderzoekt de rol van Digital Twins (DT) in Supply Chain Management (SCM), een actueel en innovatief technologieconcept binnen het domein van operationeel management en logistiek. Digital Twins zijn cyberfysieke systemen die virtuele modellen van fysieke objecten of processen vormen door gebruik te maken van sensoren en data-analysetechnologieën. Deze technologieën zijn essentieel om in realtime informatie te verzamelen, te analyseren en te optimaliseren, waardoor bedrijven beter voorbereid zijn op uitdagingen in complexe supply chains.

Doelstelling en Onderzoeksvraag

De centrale onderzoeksvraag luidt: "Wat is de rol van Digital Twins in Supply Chain Management?" Om deze vraag te beantwoorden werd een literatuurstudie uitgevoerd, aangevuld met empirisch onderzoek in de vorm van interviews met experts uit de industrie. De doelstelling was om een integraal begrip te krijgen van de technologie, de toepassingen en de uitdagingen die gepaard gaan met de implementatie ervan in SCM.

Methodologie

De studie maakt gebruik van een systematische literatuurreview en een empirische component. Voor de literatuurstudie werden relevante bronnen verzameld en geanalyseerd met zoektermen zoals "Digital Twins", "Digital Twins AND Logistics" en "Supply Chain Management". Daarnaast werden twaalf interviews afgenomen met professionals uit diverse sectoren, gericht op het toetsen van theoretische inzichten aan praktijkervaringen. Deze interviews waren semigestructureerd en gericht op onderwerpen zoals technologische implementatie, operationele voordelen en organisatorische uitdagingen.

Resultaten

1. **Concept en kenmerken van Digital Twins:** Zowel in de literatuur als in de praktijk is er geen eenduidige definitie van Digital Twins, wat aantoont dat de technologie nog niet volledig rijp is. Ondanks dit ontbreken van consensus, wordt erkend dat Digital Twins dynamische en zelflerende digitale modellen zijn die informatie verzamelen, analyseren en terugkoppelen. Ze bieden mogelijkheden zoals voorspellend onderhoud, verbeterde zichtbaarheid en data-gestuurde besluitvorming.
2. **Toepassingen en voordelen:** Digital Twins vinden brede toepassing in Supply Chain Management, waaronder:
 - Efficiëntie: Procesoptimalisatie via real-time monitoring en simulaties.
 - Flexibiliteit: Snelle aanpassingen bij verstoringen, zoals pandemieën of geopolitieke spanningen.
 - Duurzaamheid: Vermindering van CO₂-uitstoot en optimalisatie van hulpbronnen. Daarnaast benadrukken zowel literatuur als praktijk dat Digital Twins waarde creëren door end-to-end zichtbaarheid en verbeterde besluitvorming.

3. **Uitdagingen:** De interviews en literatuur tonen aan dat bedrijven nog kampen met uitdagingen zoals data-integriteit, hoge implementatiekosten, systeemintegratie, interne acceptatie en beveiligingsrisico's. Het effectief benutten van Digital Twins vereist aanzienlijke investeringen in infrastructuur, technologie en veranderingsmanagement. Tegelijkertijd bieden ze unieke voordelen, zoals verbeterde risico-inschatting en een holistische aanpak van supply chain-beheer.

Conclusies en Aanbevelingen

Digital Twins bieden aanzienlijke voordelen voor Supply Chain Management door de zichtbaarheid, flexibiliteit en veerkracht van logistieke netwerken te vergroten. Voor een succesvolle adoptie moeten bedrijven investeren in technologieën zoals Internet of Things (IoT), data-analyse en Artificiële Intelligentie (AI). Verder is het cruciaal om te focussen op datakwaliteit, beveiliging en veranderingsmanagement.

De aanbevelingen omvatten:

- Het opbouwen van een geïntegreerde infrastructuur voor realtime data-uitwisseling.
- Het ontwikkelen van strategieën voor verandermanagement om interne acceptatie te verhogen.
- Samenwerking met technologische partners om implementatiekosten te beperken.

Toekomstperspectieven

Deze studie biedt een solide basis voor verder onderzoek naar de implementatie van Digital Twins in diverse industrieën. Toekomstige studies kunnen zich richten op kwantitatieve analyses van hun impact op operationele prestaties en duurzaamheid.

Met deze masterproef wordt een significante bijdrage geleverd aan het begrijpen van Digital Twins en hun potentieel binnen Supply Chain Management, waarmee bedrijven hun logistieke processen kunnen transformeren en versterken.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Samenvatting	3
Doelstelling en Onderzoeksvraag	3
Methodologie	3
Resultaten	3
Conclusies en Aanbevelingen	4
Toekomstperspectieven	4
Inhoudsopgave	5
1. Introductie	7
2. Methodologie	11
3. Literatuurstudie	13
3.1 De Digital Twin	13
3.1.1 Historiek	13
3.1.2 Context en toepassing	15
3.1.3 Definitie	17
3.1.4 Kenmerken	21
3.1.5 Verwante begrippen	23
3.1.6 Soorten	24
3.1.7 Technologische bouwstenen	25
3.2 Supply Chain Management	27
3.2.1 De Digital Supply Chain Twin	27
3.2.2 Digital Twin in Supply Chain Management	30
3.3 Voordelen en uitdagingen van een Digital Twin	36
3.3.1 Voordelen	36
3.3.2 Uitdagingen van Digital Twins	37
4. Empirische studie	39
4.1 Digital Twin concept	40
4.2 Voordelen van een Digital Twin	45
4.2.1 Efficiëntie en zichtbaarheid	47
4.2.2 Kostreductie en resource-optimalisatie	47
4.2.3 Duurzaamheid en CO2-impact	47
4.2.4 Simulaties en risicomanagement	47

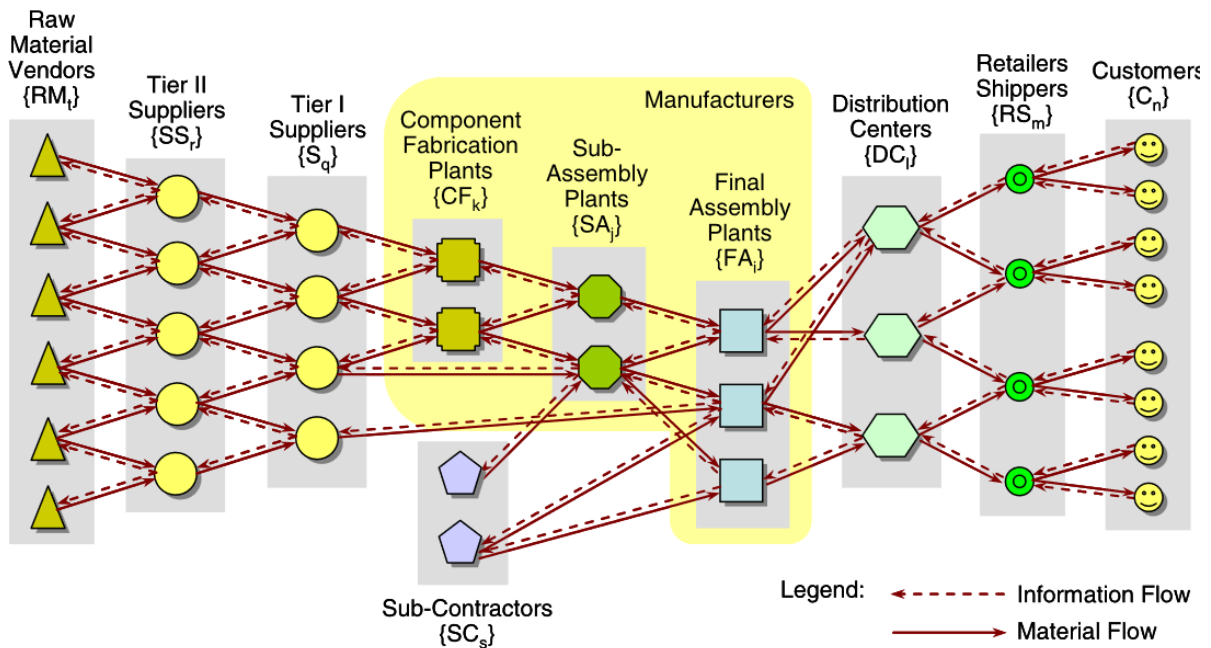
4.2.5 Verbeterde besluitvorming en data-gestuurde keuzes	47
4.3 Uitdagingen van Digital Twins.....	48
4.3.1 Data-integriteit en accuraatheid	49
4.3.2 Kosten en infrastructuur.....	49
4.3.3 Systeemintegratie en cloudtechnologie	49
4.3.4 Interne acceptatie en veranderingsmanagement	50
4.3.5 Beveiliging en privacy	50
4.3.6 Nieuwe inzichten uit de interviews	50
4.4 Het realtime element.....	51
4.5 Ontwikkeling van een Digital Twin.....	52
4.6 Dynamic routing	53
4.7 Toekomstige mogelijkheden van een Digital Twin	54
5. Conclusie en aanbevelingen	57
Bibliografie.....	59
Bijlagen	65
Bijlage 1: Interviewleidraad	65

1. Introductie

Logistieke netwerken worden complexer en opereren steeds meer op globaal niveau. Hierdoor worden de netwerken frequenter onderworpen aan uitdagingen waardoor het managen ervan alsmäär ingewikkelder wordt. Zo moeten bedrijven steeds meer flexibel en dynamisch opereren, omdat ze door hun globaal karakter beïnvloed worden door economische en ecologische veranderingen in de markt. Voorbeelden hiervan zijn de verstoring van het Suez kanaal in 2021 die wereldwijd zorgde voor vertragingen, of COVID-19 waarvan de impact nog steeds gemeten wordt zoveel jaren later, of de verschillende oorlogen, zoals Rusland-Oekraïne, of de oorlog in de Gazastrook (Grzybowska & Stachowiak, 2022). Bijkomend verwachten klanten steeds meer maatwerk en snelle leveringen, wat een enorme druk legt op de dagelijkse bedrijfsactiviteiten en het transportnetwerk (Werbińska-Wojciechowska et al., 2024). Verschillende industriële trends zorgen eveneens voor meer supply chain risico's, zoals outsourcing, Just-In-Time productie en kortere product levenscycli (Fan & Stevenson, 2018). Tenslotte worden supply chains ook gecompliceerder en meer geavanceerd door verschillende technologische ontwikkelingen, zoals Blockchain, Big Data analyses en Augmented en Virtual Reality (Moshood et al., 2021). Al deze uitdagingen dragen bij aan de spanning op logistieke netwerken en zorgen voor verstoringen in de dagelijkse activiteit van bedrijven. De grootste uitdaging is dan ook kunnen omgaan met veranderingen en verstoringen (Kajba et al., 2023).

Hierdoor is er meer nood aan stabiliteit, flexibiliteit en veerkracht. In de literatuur wordt daarom het begrip resilience vaak aangehaald. Supply chain resilience of veerkracht verwijst naar het vermogen van een logistieke keten om effectief om te gaan met de gevolgen van risicovolle, onverwachte gebeurtenissen, om vervolgens terug te keren naar de oorspronkelijke staat of een meer wenselijke staat te bereiken na een verstoring. Hiervoor is er nood aan informatie en flexibele systemen, die vandaag de dag nog ontbreken in de meeste bedrijven. Aan de hand van technologie kan er meer controle verkregen worden in het efficiënt managen van het netwerk en onvoorziene risico's (Grzybowska & Stachowiak, 2022).

Door deze complexiteit in globale logistieke netwerken of supply chains, wordt Supply Chain Management (SCM) moeilijker voor organisaties. Onder SCM wordt een reeks activiteiten verstaan gericht op het transformeren van grondstoffen in eindproducten om deze bij de klanten te leveren. Dit omvat processen zoals inkoop, ontwerp, productie, opslag, transport en distributie. Het doel is om efficiëntie, kwaliteit, productiviteit en klanttevredenheid te optimaliseren (SAP, (z.d.)). In het geval van een productiebedrijf kan een supply chain er uitzien zoals weergegeven in Figuur 1. Zoals te zien op de figuur bestaat een supply chain uit verschillende partners en stakeholders die elk hun functie hebben in de ontwikkeling van een product. Tussen al deze partners lopen materiaal- en informatiestromen. Door de complexiteit en het globaal karakter van zulke supply chains is het belangrijk een goede SCM strategie te hebben ((Roger) Jiao et al., 2006).



Figuur 1: Typische structuur van een globale supply chain van een productiebedrijf ((Roger) Jiao et al., 2006)

Het efficiënt managen van de supply chain is dan ook een van de cruciale bedrijfsactiviteiten in elk bedrijf. Een belangrijk aspect dat hieraan bijdraagt is supply chain visibility. Supply chain visibility houdt in dat er zichtbaarheid wordt gecreëerd binnen de keten om beter onderbouwde, interne beslissingen te nemen en de operationele processen efficiënter te maken. Dit concept vereist dat een organisatie zorgt voor toegankelijke, betrouwbare en actuele informatie over zowel de interne als externe aspecten van haar supply chain. Gezien het globaal karakter van logistieke ketens, bevat het netwerk tal van partners en belanghebbenden die elk hun bijdrage hebben aan het logistieke proces. Hierdoor is het van belang een geïntegreerde, geconnecteerde supply chain uit te bouwen, die ervoor zorgt dat elke speler de nodige informatie beschikbaar heeft en kan delen in het netwerk (Ivanov et al., 2019). Er wordt van alle spelers in de keten verwacht dat ze transparant zijn over hun bedrijfsactiviteiten. Transparantie verwijst naar het delen van duidelijke, volledige en toegankelijke informatie over processen, activiteiten en prestaties binnen de keten, met als doel vertrouwen te bevorderen, risico's te verminderen en samenwerking te verbeteren. Het creëren van transparantie en zichtbaarheid vereist een divisie-overstijgend platform dat helpt bij het proactief beheren van end-to-end supply chains in realtime. Een hoog niveau van zichtbaarheid kan alleen worden bereikt wanneer de kernelementen – mensen, technologie en processen – naadloos samenwerken (Moshood et al., 2021). Om zichtbaarheid te creëren is er nood aan informatie. Hoe meer informatie beschikbaar is, hoe beter de beslissingen die gemaakt worden. Hierdoor kunnen bedrijven beter reageren op veranderingen in de markt en beslissingen maken onderbouwd door data. Het verzamelen van waardevolle informatie en deze informatie omzetten in bruikbare analyses zijn daarom belangrijke aspecten in het creëren van zichtbaarheid (Blomkvist & Ulleamar Loenbom, 2020). Maar door de complexiteit en de dynamische aard van logistieke netwerken, wordt het verzamelen van informatie steeds moeilijker.

De overgang naar zichtbare, flexibele, veerkrachtige en verbonden supply chains is sterk afhankelijk van digitale transformatie. Daarentegen maken diverse informatie- en communicatie-oplossingen het mogelijk om informatie te volgen via digitale modellen. Deze oplossingen moeten echter beter geïntegreerd zijn en volledige zichtbaarheid en interoperabiliteit binnen de supply chain bieden (Kajba et al., 2023). Nieuwe technologische ontwikkelingen in de vierde industriële revolutie, Industry 4.0, zouden hier een antwoord op kunnen bieden. Deze ontwikkelingen zorgen voor een fusie tussen de virtuele en reële wereld. Het initiatief Industry 4.0 werd in 2011 geïntroduceerd door de Duitse regering om uitdagingen in de productie-industrie aan te gaan (Spieske & Birkel, 2021; Birkel & Müller, 2021). Het omvat de ontwikkeling van een globaal netwerk waarin machines met elkaar verbonden zijn, maar ook geïntegreerd zijn met andere systemen en zo een cyberfysiek systeem vormen tussen mensen en machines (Tjahjono et al., 2017). Onder een cyberfysiek systeem wordt een systeem bedoeld dat zowel mechanische als softwarecomponenten bevat. Het omvat de automatisatie van een fysiek systeem waardoor de digitale en fysieke wereld met elkaar in verbinding staan aan de hand van sensoren, software en netwerken. Het Internet of Things (IoT) wordt gezien als een subcategorie van een cyberfysiek systeem en fungeert vaak als infrastructuur voor de toepassingen in het systeem. Het verwijst naar een netwerk van apparaten en alledaagse objecten die via internet verbinding maken, gegevens uitwisselen en zelfstandig kunnen communiceren en beslissingen nemen door de integratie van fysieke en digitale werelden (Ivanov et al., 2019). Realtime data uitwisseling, mogelijk gemaakt door het IoT, is ook een onderdeel van Industry 4.0. Met behulp van IoT sensoren kan data op een efficiënte, (bijna) realtime manier verzameld worden. Een van de nieuwe technologieën ontwikkeld in Industry 4.0, die gebruik maakt van realtime data, is de Digital Twin (DT). Een DT is een cyberfysiek systeem dat aan de hand van IoT sensoren een virtueel model van een fysiek object vormt en hiermee integreert. De DT vormt als het ware het spiegelbeeld van een fysiek object of proces en verzamelt en analyseert data over de fysieke twin (Barricelli et al., 2019; Roumeliotis et al., 2024).

Door de nood aan controle en meer flexibiliteit en weerbaarheid in Supply Chain Management kunnen nieuwe technologieën, zoals de DT, waarde creëren voor bedrijven. Deze masterproef tracht dan ook na te gaan wat het concept Digital Twin inhoudt en hoe het gebruikt kan worden voor Supply Chain Management. De bedoeling is een antwoord te geven op de vraag "Wat is de rol van Digital Twins in Supply Chain Management?". Om een antwoord te kunnen bieden op deze centrale onderzoeksvraag werd de literatuur omtrent Digital Twins onderzocht en werden er interviews afgelegd met personen van verschillende achtergronden. De literatuurstudie wordt beschreven in sectie 3 en tracht een goed beeld te geven van de literatuur over Digital Twins en hun toepassing in Supply Chain Management. Het biedt een antwoord op de volgende deelvragen: Wat is een Digital Twin? Hoe is de technologie tot stand gekomen? Wat zijn de belangrijkste kenmerken van een Digital Twin? Welke soorten Digital Twins worden beschreven in de literatuur? Welke technologische bouwstenen dragen bij aan de ontwikkeling van een Digital Twin? Wat is een Digital Supply Chain Twin? Hoe kan zichtbaarheid gecreëerd worden in de supply chain door middel van Digital Twins? Wat zijn de voordelen van het gebruik van een Digital Twin? Welke uitdagingen worden beschreven omtrent het gebruik en de ontwikkeling van Digital Twins? In sectie 4 wordt vervolgens een empirische studie uitgevoerd die de bevindingen uit de interviews weergeeft. In deze sectie wordt de gevonden literatuur getoetst aan praktische implicaties om zo een algeheel beeld te vormen van

de toepassing van Digital Twins in Supply Chain Management. Op die manier worden niet alleen de mogelijkheden van de DT-technologie besproken uit de literatuur maar wordt een kritisch blik van personen in de bedrijfssector toegevoegd die waardevolle inzichten kan bieden. Tenslotte wordt een conclusie geformuleerd en aanbevelingen gedaan voor management en verder onderzoek. De masterproef is gestructureerd als volgt: Sectie 1. Introductie, Sectie 2. Methodologie, Sectie 3. Literatuurstudie, Sectie 4. Empirische studie, Sectie 5. Conclusie en aanbevelingen. Na de referentielijst worden nog enkele bijlagen toegevoegd.

2. Methodologie

Om na te gaan wat de rol van een Digital Twin (DT) is of kan zijn binnen Supply Chain Management (SCM) werd eerst literatuur verzameld om een beter beeld te krijgen van het onderwerp. Voor het verzamelen van relevante literatuur werd gebruik gemaakt van een systematische aanpak. In eerste instantie werd de database van de Universiteit Hasselt geraadpleegd en gezocht naar literatuur met de zoektermen "Digital Twins", "Digital Twins AND Logistics" en "Supply Chain Management". Dit resulteerde in een selectie van wetenschappelijke artikelen die beoordeeld werden op relevantie en kwaliteit door ze te lezen en te evalueren. Om dit te doen werd vooral gekeken of de term Digital Twin terug te vinden was in het abstract en de conclusies van het onderzoek. Bijkomend werd gekeken of het artikel een antwoord gaf op de vooropgestelde deelvragen of hieraan kon bijdragen. Artikelen die aansloten bij het onderwerp en waardevolle inzichten boden, werden opgenomen in de referentielijst. Daarnaast werden de referentielijsten van deze geselecteerde bronnen geanalyseerd om aanvullende relevante literatuur te identificeren. Deze methode, ook wel bekend als "snowballing", maakte het mogelijk om gerelateerde en invloedrijke studies binnen het onderzoeksdomein te vinden. In totaal werden er 44 bronnen opgenomen in de referentielijst voor deze masterproef. Door deze twee methoden te combineren, kon een brede en diepgaande verzameling van literatuur samengesteld worden die een stevige basis biedt voor het onderzoek. Deze aanpak is gericht op het waarborgen van zowel relevantie als diversiteit in de verzamelde bronnen, wat essentieel is voor een grondige literatuurstudie. De gevonden literatuur wordt beschreven in de vorm van een literatuurstudie in sectie 3. Deze tracht het concept van de DT te omschrijven en de toepassing ervan in SCM te onderzoeken aan de hand van bestaande literatuur.

Om de theoretische inzichten uit de literatuur te toetsen aan de praktijk, werden interviews afgenomen met relevante personen uit de bedrijfssector. Deze personen werden geselecteerd op basis van de relevantie van hun bedrijf, hun professionele rol en hun toegankelijkheid. De selectie vond plaats door bedrijven en contactpersonen te identificeren die een meerwaarde zouden kunnen bieden aan het onderzoek. De personen werden vervolgens benaderd via LinkedIn of per e-mail met een uitnodiging om deel te nemen aan een interview over DTs. Het betrof hier een zelfselectiesteekproef, waarbij potentiële respondenten zelf konden beslissen of ze aan het onderzoek wilden deelnemen. In enkele gevallen werd er door de gecontacteerde personen doorverwezen naar andere experts binnen hun bedrijf die meer specifieke kennis over het onderwerp hadden. De interviews waren semigestructureerd: er werd vooraf een lijst met vragen opgesteld, maar er was ruimte om de gesprekken flexibel te laten verlopen en dieper in te gaan op relevante onderwerpen die tijdens het interview naar voren kwamen. De interviewleidraad is terug te vinden in Bijlage 1. Tijdens de interviews werd vertrouwelijkheid gewaarborgd. Sommige respondenten vroegen expliciet om anonimiteit en gaven geen toestemming om hun naam of de naam van hun bedrijf te noemen, met het oog op de bescherming van bedrijfsgevoelige informatie. Om deze reden worden in het overzicht van de interviews (Zie Tabel 2 in sectie 4) enkel beknopte beschrijvingen opgenomen van de sector en activiteiten van de bedrijven, zonder specifieke namen te vermelden. Alle deelnemers ontvingen een informed consent, waarin de aard van het onderzoek en de waarborgen rondom vertrouwelijkheid werden toegelicht. Dit document werd door de respondenten ondertekend om hun deelname te bevestigen.

3. Literatuurstudie

Om de rol van Digital Twins (DT) in Supply chain Management (SCM) te onderzoeken wordt het DT concept eerst nader toegelicht en de mogelijke toepassingen ervan beschreven aan de hand van een literatuurstudie. De literatuurstudie wijdt eerst uit over het concept en de historiek van een DT. Hierbij wordt in eerste instantie omschreven hoe de idee tot stand is gekomen, wat verstaan wordt onder een DT en wat de belangrijkste kenmerken zijn. Vervolgens worden verschillende soorten DTs beschreven en de technologische bouwstenen die bijdragen aan de DT-technologie opgesomd. Na het schetsen van een helder beeld van DTs en het verduidelijken van de belangrijkste aspecten, wordt dieper ingegaan op de DT in een logistieke context meer bepaald een Digital Supply Chain Twin. Aan de hand van de gevonden literatuur wordt tenslotte de mogelijke toepassing van DTs besproken in Supply Chain Management.

3.1 De Digital Twin

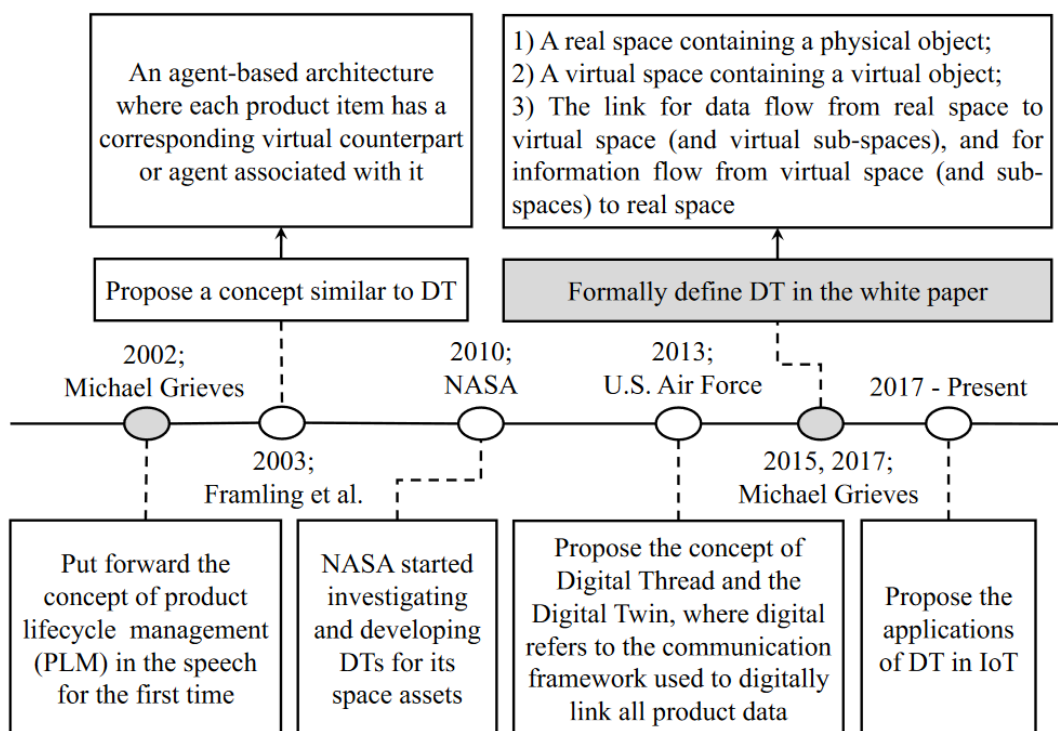
In de introductie werd al een korte beschrijving gegeven van een Digital Twin (DT): Een DT is een cyberfysiek systeem dat aan de hand van Internet of Things (IoT) sensoren een virtueel model van een fysiek object vormt en hiermee integreert. De DT vormt als het ware het spiegelbeeld van een fysiek object of proces en verzamelt en analyseert data over de fysieke twin (Barricelli et al., 2019). Hoewel het op deze manier beknopt beschreven kan worden, bestaat er in de literatuur discussie over welke toepassingen of concepten gerekend mogen worden tot een DT. De reden hiervoor is dat er verschillende modellen bestaan om complexe processen weer te geven, te simuleren of te beschrijven en het hierdoor niet duidelijk is wat het verschil is tussen een model en een DT. Om een beter beeld te geven van wat een DT is, wordt de gevonden literatuur beschreven die tracht een definitie of omschrijving te geven van het concept. Om te beginnen wordt de historiek en evolutie van de DT beschreven, aangezien deze bijdragen aan een beter begrip van de technologie.

3.1.1 Historiek

Een overzicht van de evolutie van DTs in de beginfase van het concept wordt weergegeven in onderstaande figuur (Zie Figuur 2). Het concept van een DT werd informeel geïntroduceerd door Michael Grieves in 2002 en daarna verder beschreven in zijn white paper (M. Grieves, 2014). Een DT was in dit geval een manier om een fysiek product virtueel voor te stellen en kende voornamelijk een toepassing in de productiecontext. Het concept had drie belangrijke elementen: de reële omgeving met een fysiek object, de virtuele omgeving met een virtueel object en de data uitwisseling tussen beide systemen (Barricelli et al., 2019). De DT was dus een virtuele weergave in een digitale omgeving die een fysiek product in de reële omgeving weerspiegelde en beide objecten stonden in verbinding met elkaar. De bedoeling was een virtuele replica te bouwen van een nieuw of bestaand product, om zo meer inzichten te krijgen over het fysiek product of de fysieke twin. De digitale replica kan op die manier de gehele levenscyclus van het product volgen, van ontwikkeling en prototypes tot het simuleren van het product in gebruik. Het kende dus voornamelijk een mogelijke toepassing in Product Lifecycle Management. De technologieën op dat moment belemmerden echter het effectief ontwikkelen van een DT (Singh et al., 2021).

Wanneer Michael Grieves het concept introduceerde was het vooral nog een ideaal om na te streven en kende het nog geen effectieve uitwerking in de realiteit. De term "Digital Twin" werd vervolgens

officieel geïntroduceerd door NASA in 2010. NASA omschreef een DT als volgt: “an integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of a vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its flying twin. The DT is ultra-realistic and may consider one or more important and interdependent vehicle systems, including propulsion/energy storage, avionics, life support, vehicle structure, thermal management/TPS, etc.” (Barricelli et al., 2019). Deze definitie is samen te vatten als volgt: Een DT is een geïntegreerde, realistische digitale simulatie van een voertuig of systeem, dat fysieke modellen, sensorgegevens en historische informatie combineert om het gedrag en de levenscyclus van het echte systeem te spiegelen. Andere noemenswaardige bijdragen aan de ontwikkeling en evolutie van DTs zijn het werk van Framling et al. en de U.S. Air Force. Beiden omschreven een gelijkaardig concept waarbij een virtuele tegenhanger een fysiek product weergeeft. Framling et al. beschrijft een concept waarbij elk productitem een virtuele agent heeft die dit item representeert. Aan de hand van Internet technologie was er een naadloze connectie en continue synchronisatie tussen de agent en zijn fysieke tegenhanger (Barricelli et al., 2019). De U.S. Air Force introduceert het concept van een Digital Thread, wat een digitalisatie is van alle aspecten van de product levenscyclus. De Digital Thread zorgt voor een link en integratie van alle aspecten van een systeem, een enkel referentiepunt waar alle relevante data van een object of systeem gevonden kunnen worden. Het is te omschrijven als een soort digitaal record van de product levenscyclus van een object. Hoewel de U.S. Air Force de concepten Digital Thread en Digital Twin simultaan gebruikte, worden ze in de huidige literatuur van elkaar gescheiden. Aangezien een Digital Thread beperkt wordt tot een virtuele weergave en niet zorgt voor de controle, het onderhoud of optimalisatie van een fysiek systeem, zoals een Digital Twin doet (Barricelli et al., 2019). Meer dan twintig jaar na de introductie van het concept blijft de DT nog steeds actueel en een onderwerp van intensieve studie.

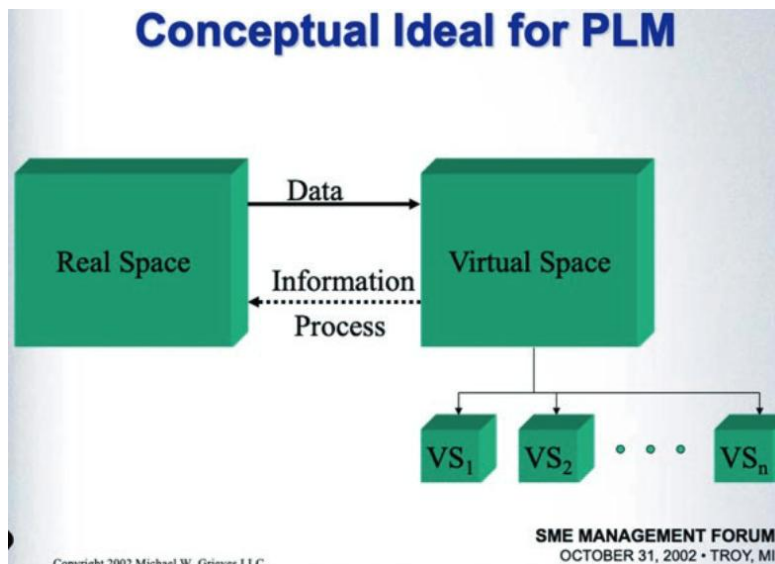


Figuur 2: Evolutie Digital Twins in de beginfase (Zhang, 2024)

De idee van een digitale tweeling fascineert niet alleen door zijn potentieel voor innovatieve toepassingen, maar ook door de impact die het belooft te hebben op uiteenlopende industrieën. Hoewel de DT zijn oorsprong kent in productie wordt het concept in het heden in allerlei industrieën besproken en ontwikkeld. Enkele voorbeelden zijn ruimtevracht, luchtvracht, gezondheidszorg en stadslogistiek. Door de grote hoeveelheid onderzoek over het gebruik en de mogelijkheden van DT bestaat er onenigheid over een algemene definitie van het concept (Singh et al., 2021). Om beter te begrijpen wat een DT inhoudt, wordt in de volgende secties de gevonden literatuur besproken en de voornaamste kenmerken omschreven.

3.1.2 Context en toepassing

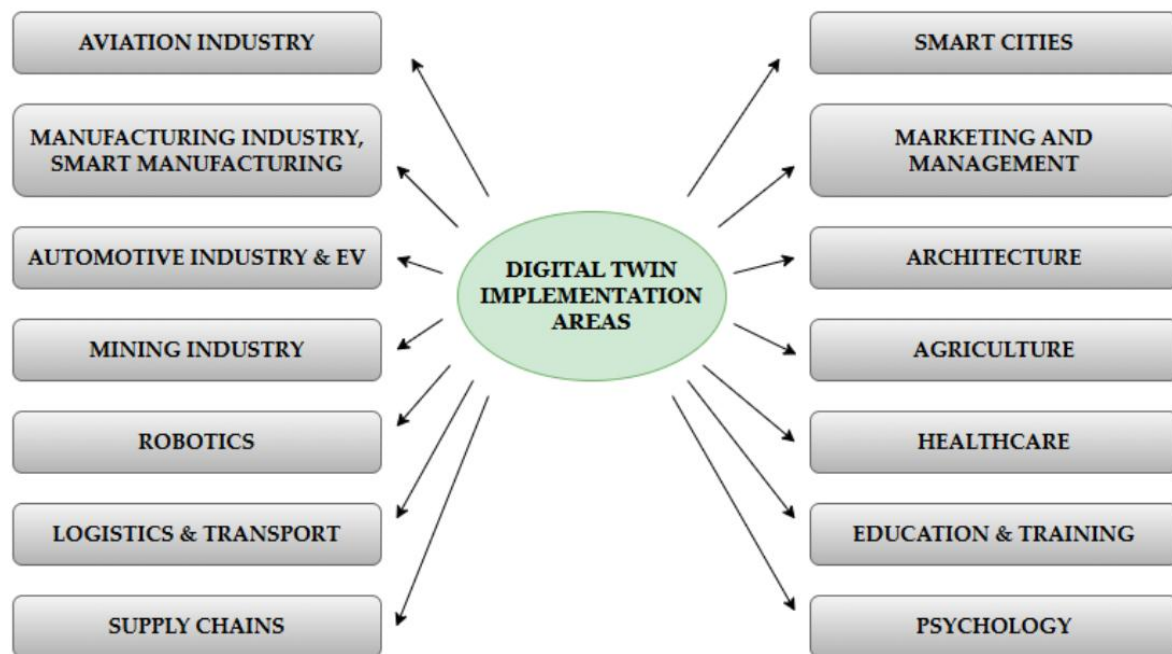
In de white paper van Michael Grieves waren reeds drie elementen duidelijk, zoals weergegeven in Figuur 3: de reële omgeving, de virtuele omgeving, en de interactie of connectie tussen beiden. Grieves definieert een Digital Twin als volgt: "the DT is a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level. At its optimum, any information that could be obtained from inspecting a physical manufactured product can be obtained from its DT". In zijn definitie maakt Grieves duidelijk dat een DT een bron van virtuele informatie weergeeft over een geproduceerd product. Het gaat dus vooral om de visuele weergave en representatie van dit fysiek product. Hieruit is duidelijk dat het concept van een DT voortkomt uit de productie industrie. Uit het perspectief van productie zijn volgens Minerva et al. (2020) twee concepten van belang: de levenscyclus van het product en de software implementatie van de DT. Een DT kan op verschillende momenten in de levenscyclus van een product ontwikkeld worden. Een eerste mogelijkheid is tijdens de productontwikkeling, wanneer het fysieke product nog niet bestaat in realiteit. In deze fase kan een DT gebruikt worden om verschillende opties te simuleren en zo het product beter te ontwikkelen. Een volgende mogelijkheid om een DT te introduceren is in de productiefase. Wanneer het fysiek product geproduceerd wordt, moet het getest worden in verschillende omgevingen zodat de veiligheid en werking van het product gegarandeerd kunnen worden. Een DT kan in deze fase dienen om testen uit te voeren in verschillende virtuele omgevingen en met verschillende parameters. Een experiment uitvoeren in een virtuele omgeving is namelijk efficiënter en kost reducerend, wat een groot voordeel kan zijn in de productontwikkelingsfase. Nadat het fysiek product effectief ontwikkeld is, kan de DT dienen om het gedrag van het product continu op te volgen en eventueel verbeteringen voor te stellen. Een DT kan dus zowel voor dat het fysiek product bestaat, als na de ontwikkeling van het fysiek object ontwikkeld worden (Barricelli et al., 2019; Minerva et al., 2020). De digitalisatie en virtuele weergave, mogelijk gemaakt door de software, zorgen voor verbeteringen en optimalisatie van het product in elke stap (Minerva et al., 2020). Een andere toepassing van DTs in de productie sector is het gebruik van DTs om fabrieken te ontwerpen of simuleren. Bij fabriek ontwerp dient de DT als een simulatie om de best mogelijke lay-out te testen en ontwerpen. Naderhand wordt de fysieke fabriek dan gebouwd. Een Digital Factory (DF) langs de andere kant is een simulatie van een bestaande fabriek waarin alle machines, materialen en lay-out in worden voorgesteld (Barricelli et al., 2019).



Figuur 3: De eerste presentatie van het DT concept door Michael Grieves (M. W. Grieves, 2023)

Hoewel het concept van een DT voortvloeit uit een productiecontext, hoeft de DT geen fysiek object te reflecteren maar kan dit ook een digitaal object zijn, zoals een software systeem of netwerk. Een digitaal-digitaal verhouding zorgt ervoor dat er geen fysieke interactie nodig is bij het testen, optimaliseren en analyseren van het digitaal systeem (Roumeliotis et al., 2024). Naast de productiesector zijn er al verschillende andere domeinen waarin de voordelen van een DT toegepast of onderzocht worden. In de luchtvaartsector wordt het bijvoorbeeld ingezet voor voorspellend onderhoud, waarbij structurele veranderingen in vliegtuigen vroegtijdig worden gedetecteerd om passende maatregelen, zoals zelfherstellende mechanismen, te ondersteunen. Daarnaast worden DTs gebruikt om inzicht te krijgen in materiaalgedrag, zoals scheurgroei in aluminiumlegeringen en staal. In de gezondheidszorg heeft GE Healthcare een "Capacity Command Center" ontwikkeld, waarmee via simulaties en analyses de zorgcapaciteit in ziekenhuizen beter wordt gepland. Dit verhoogt de efficiëntie, veiligheid en patiëntervaring aanzienlijk. Ook is er in de medische wereld groeiende belangstelling voor het ontwikkelen van een menselijke DT, die in staat is om gezondheidsinformatie van een individu te modelleren en toekomstige aandoeningen te voorspellen op basis van persoonlijke en contextuele gegevens zoals locatie en activiteit (Barricelli et al., 2019). Uit andere bronnen blijkt dat de DT-technologie ook wordt ingezet in sectoren zoals landbouw, stedelijke logistiek, cultureel erfgoed, intelligente transportnetwerken, 6G-netwerken, meteorologie, onderwijs, stedenplanning, telecommunicatie en de energiesector. Deze veelzijdigheid onderstreept het potentieel van DTs om in tal van contexten waarde toe te voegen en complexe systemen te optimaliseren (Minerva et al., 2020; Rasheed et al., 2020; Roumeliotis et al., 2024; Zhang, 2024). Een uitgebreid overzicht van de diverse toepassingsmogelijkheden van DT-technologie is te vinden in de publicatie van Liu et al. (2022). Jamil et al., (2022) bespreekt ook verschillende toepassingen van DTs en Federated Learning in het Industrial Internet of Things, het Internet of Vehicles en het Internet of Drones. De meest recente paper opgenomen in deze masterproef is Werbińska-Wojciechowska et al., (2024), waarbij een gedetailleerde beschrijving wordt gegeven van de huidige beschikbare literatuur en toepassingen omtrent Digital Twins, meer bepaald DTs in transportnetwerken. Op Figuur 4 worden de voornaamste toepassingsdomeinen - gevonden in de

paper - visueel weergegeven in een spindigram. De figuur geeft de volgende domeinen weer voor de toepassing van DTs: luchtvaart, productie, automobiellndustrie en elektrische voertuigen, mijnbouw, logistiek en transport, robotica, supply chains, slimme steden, marketing en management, architectuur, landbouw, gezondheidszorg, onderwijs en psychologie (Werbińska-Wojciechowska et al., 2024).



Figuur 4: Toepassingsdomeinen DT (Werbińska-Wojciechowska et al., 2024)

3.1.3 Definitie

De Digital Twin heeft dus inmiddels brede toepassing gevonden in uiteenlopende sectoren. Ondanks dit groeiende bereik en de vele innovaties die ermee gepaard gaan, bestaat er nog geen consensus over een uniforme definitie van wat een DT precies inhoudt. Dit gebrek aan overeenstemming wordt mede veroorzaakt door de relatieve nieuwheid van het concept en het feit dat de technologie zich nog voortdurend ontwikkelt. Elke nieuwe toepassing of use case brengt specifieke eisen en interpretaties met zich mee, wat bijdraagt aan de variatie in definities. De literatuur weerspiegelt deze diversiteit en laat zien dat onderzoekers nog steeds streven naar een gemeenschappelijke basis om het concept helder te omschrijven. Om dit te illustreren, wordt in de onderstaande tabel een overzicht gegeven van verschillende definities van een DT zoals beschreven in de literatuur (Zie Tabel 1). Deze tabel onderbouwt de stelling dat er momenteel geen universele definitie is en benadrukt de inspanningen binnen de academische gemeenschap om tot een breed geaccepteerde consensus te komen. Na dit overzicht worden de belangrijkste terugkerende componenten in de meest prominente definities geanalyseerd. Het is echter niet de bedoeling van deze masterproef om een eigen definitie te formuleren, gezien de uitgebreide hoeveelheid wetenschappelijke literatuur die al pogingen heeft gedaan om het concept te definiëren. In plaats daarvan richt deze masterproef zich op het vergroten van het begrip rond het concept, door de essentie ervan te verhelderen en het toegankelijker te maken voor een breder publiek. Het doel is niet om een definitieve uitleg te bieden, maar om een solide basis te creëren waarmee de kern van een DT beter begrepen kan worden.

Originele Definitie	Vertaalde Definitie	Bron
A virtual representation that is constructed to accurately mirror an existing physical object	Een virtuele representatie die is geconstrueerd om een bestaand fysiek object nauwkeurig te weerspiegelen.	(Jamil et al., 2022)
DT encompasses three parts: 1) a physical object; 2) its virtual twin; and 3) a mapping between the physical object and its virtual twin that enables the co-evolution of both physical and virtual sides. DT is the accurate digital replica of a real-world object across multiple granularity levels, and this real-world object could be a device, machine, a robot, or an industrial process or a complex physical system.	Een DT omvat drie onderdelen: 1) een fysiek object; 2) de virtuele tweeling; en 3) een koppeling tussen het fysieke object en de virtuele tweeling die de co-evolutie van beide kanten mogelijk maakt. Een DT is de nauwkeurige digitale replica van een object in de echte wereld op verschillende granulariteitsniveaus, waarbij dit object een apparaat, machine, robot, industrieel proces of complex fysiek systeem kan zijn.	(Wu et al., 2021)
A DT is a virtual representation of its real-world counterpart —a product, service, system or process. A DT can also be presented as a form of cyber-physical device which uses Internet of Things (IoT) sensors and produces a high-fidelity visualisation of a physical resource enabled by near real-time synchronisation between cyberspace and physical space.	Een DT is een virtuele representatie van zijn tegenhanger in de echte wereld — een product, dienst, systeem of proces. Een DT kan ook worden voorgesteld als een vorm van cyberfysiek apparaat dat IoT-sensoren gebruikt en een gedetailleerde visualisatie van een fysiek hulpmiddel produceert, mogelijk gemaakt door bijna realtime synchronisatie tussen cyberspace en fysieke ruimte.	(Kajba et al., 2023)
The DT is a virtual model of the physical object with the potential of understanding changes in the status of the physical entity through sensing data, to analyze, predict, estimate and optimize changes. The physical entity should respond to the changes according to the optimized scheme received from the DT, should continuously send real-time data describing novel statuses, and then be ready to respond to novel optimizing “commands” received from the DT. Through such cyber-physical closed-loop optimization, DT technology could	De DT is een virtueel model van het fysieke object met het potentieel om veranderingen in de status van de fysieke entiteit te begrijpen via sensorgegevens, om deze te analyseren, voorspellen, inschatten en optimaliseren. De fysieke entiteit moet reageren op veranderingen volgens het geoptimaliseerde schema dat wordt ontvangen van de DT, continu realtime gegevens sturen over nieuwe statussen en klaar zijn om nieuwe optimalisatie-“commando’s” van de DT te ontvangen. Via deze cyberfysieke closed-loop optimalisatie kan DT-	(Barricelli et al., 2019)

enable the performance improvement of the whole manufacturing process.	technologie de prestaties van het hele productieproces verbeteren.	
A DT is thus not a mere detached virtual representation of a physical twin, but rather a living organism that interacts with its physical twin via sensors and receivers connected through the Internet of things (IoT) or ICT.	Een DT is dus niet slechts een losstaande virtuele representatie van een fysieke tweeling, maar eerder een levend organisme dat via sensoren en ontvangers, verbonden via het Internet of Things (IoT) of ICT, interacteert met zijn fysieke tweeling.	(Ambra & Macharis, 2020)
A DT is a dynamic and self-evolving digital/virtual model or simulation of a real-life subject or object (part, machine, process, human, etc.) representing the exact state of its physical twin at any given point of time via exchanging the real-time data as well as keeping the historical data. It is not just the DT which mimics its physical twin but any changes in the DT are mimicked by the physical twin too.	Een DT is een dynamisch en zelf-evoluerend digitaal/virtueel model of simulatie van een object of subject in het echte leven (onderdeel, machine, proces, mens, enz.) dat de exacte staat van zijn fysieke tweeling op elk moment vertegenwoordigt via het uitwisselen van realtime gegevens en het bewaren van historische gegevens. Het is niet alleen de DT die zijn fysieke tweeling nabootst, maar ook worden veranderingen in de DT nagebootst door de fysieke tweeling.	(Singh et al., 2021)
a DT is a comprehensive software representation of an individual PO. It includes the properties, conditions, and behavior(s) of the real-life object through models and data. A DT is a set of realistic models that can simulate an object's behavior in the deployed environment. The DT represents and reflects its physical twin and remains its virtual counterpart across the object's entire lifecycle.	Een DT is een uitgebreide softwarematige representatie van een individueel fysiek object. Het omvat de eigenschappen, condities en gedrag(en) van het object in het echte leven via modellen en gegevens. Een DT is een set realistische modellen die het gedrag van een object in de operationele omgeving kan simuleren. De DT vertegenwoordigt en weerspiegelt zijn fysieke tweeling en blijft gedurende de gehele levenscyclus van het object zijn virtuele tegenhanger.	(Minerva et al., 2020)
A DT is defined as a virtual representation of a physical asset enabled through data and simulators for real-time prediction, optimization, monitoring, controlling, and improved decision making.	Een DT wordt gedefinieerd als een virtuele representatie van een fysiek hulpmiddel, mogelijk gemaakt door gegevens en simulators voor realtime voorspelling, optimalisatie,	(Rasheed et al., 2020)

	monitoring, controle en verbeterde besluitvorming.	
The DT of any object in its basic version is built from three basic elements: a physical object (resource/asset), a virtual representation of the object (model), and the connection between them [43]. The represented object can be a product, process, or system. A DT is a virtual representation of any real object that encompasses all its features.	De DT van een object in zijn basisversie is opgebouwd uit drie basiselementen: een fysiek object (hulpmiddel/bron), een virtuele representatie van het object (model) en de verbinding daartussen. Het gerepresenteerde object kan een product, proces of systeem zijn. Een DT is een virtuele representatie van elk echt object die al zijn kenmerken omvat.	(Werbińska-Wojciechowska et al., 2024)
DTs are accurate digital replicas of real-world objects across multiple granularity levels, and the real-world object can be devices, machines, robots, industrial processes, or complex physical systems.	DTs zijn nauwkeurige digitale replica's van objecten in de echte wereld op verschillende granulariteitsniveaus, waarbij de objecten apparaten, machines, robots, industriële processen of complexe fysieke systemen kunnen zijn.	(Zhang, 2024)
A DTs is a form of cyber-physical device that uses numerous IoT sensors and produces a high-fidelity visual image of a physical asset. The abundance of data obtained by the DTs is then aggregated and analyzed using machine learning algorithms to promote strategic and organizational decision-making	Een DT is een vorm van cyberfysiek apparaat dat talrijke IoT-sensoren gebruikt en een gedetailleerd visueel beeld van een fysiek hulpmiddel produceert. De overvloed aan gegevens die door de DT wordt verkregen, wordt vervolgens geaggregeerd en geanalyseerd met behulp van machine learning-algoritmen om strategische en organisatorische besluitvorming te bevorderen.	(Moshood et al., 2021)

Tabel 1: Overzicht van de voornaamste definities uit de literatuur

3.1.4 Kenmerken

Na het analyseren van de verschillende definities van een DT worden enkele fundamentele componenten en concepten duidelijk die kenmerkend zijn voor deze technologie. Deze kenmerken worden één voor één beschreven.

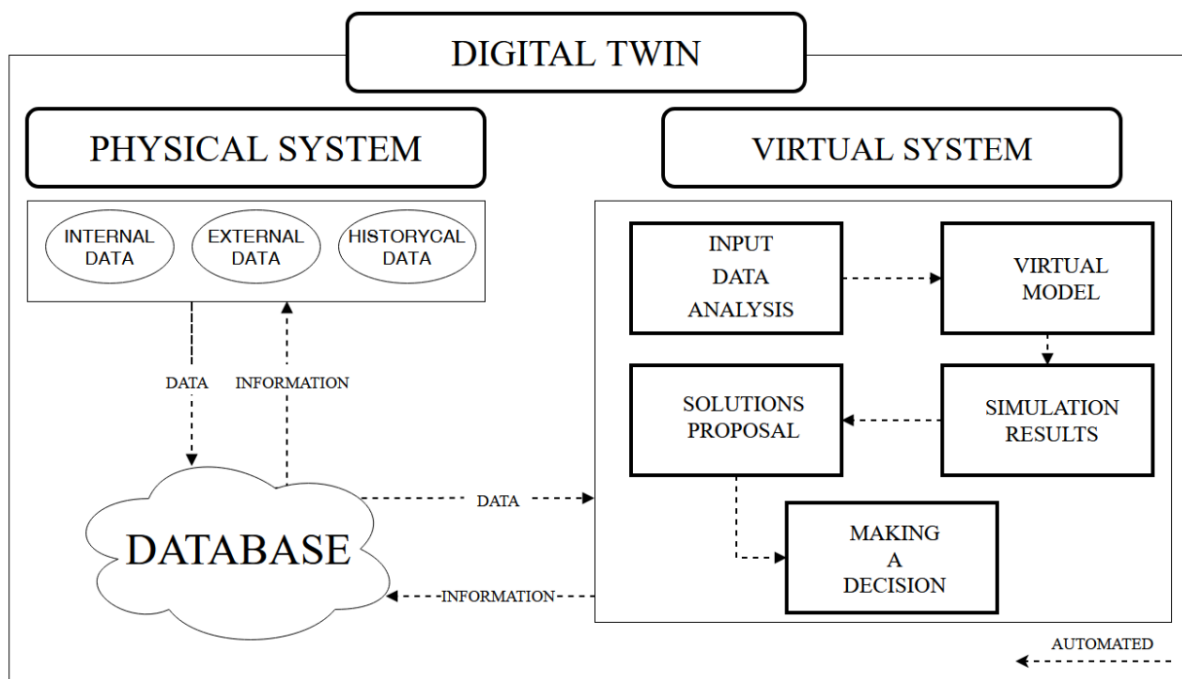
Een DT is in de kern een virtuele representatie van een fysiek object, systeem of proces. Deze representatie wordt gekenmerkt door een **realtime synchronisatie** tussen de fysieke en digitale tegenhanger, mogelijk gemaakt door sensoren en data-uitwisselingstechnologieën zoals het Internet of Things (IoT). Dit stelt de DT in staat om niet alleen passief data te verzamelen, maar ook actief te functioneren binnen een zogenoemde **closed-loop feedbackstructuur** (Jamil et al., 2022). Hierbij genereert de virtuele twin inzichten en optimalisaties die de fysieke tegenhanger kunnen beïnvloeden en verbeteren. Daarnaast is een DT **dynamisch** en **zelf-evoluerend**. Het model past zich continu aan op basis van historische en realtime data, waardoor het steeds nauwkeuriger en bruikbaar wordt. Dit dynamische karakter maakt het mogelijk om gedrag te analyseren en beschrijven, toekomstige scenario's te voorspellen en processen te optimaliseren. Hierdoor is de DT ook **zelflerend** en omvat de technologie een continu verbeterend Artificial Intelligent algoritme. DTs maken het mogelijk om fysieke entiteiten **op afstand te monitoren** en te beheren. Ze bieden een virtuele interface waarmee belanghebbenden het gedrag en de prestaties van een fysieke entiteit vanaf een externe locatie kunnen volgen en aansturen. De DT vormt een **intelligent systeem** en moet daarom ook voorzien zijn van bepaalde analytische technieken en algoritmes. DTs kunnen op **verschillende niveaus van granulariteit** opereren, van eenvoudige apparaten tot complexe systemen, en bieden veelzijdige toepassingen zoals voorspellend onderhoud, monitoring, optimalisatie en strategische besluitvorming. DTs maken onderlinge verbinding en samenwerking tussen belanghebbenden mogelijk. Ze bieden een **gedeeld platform** waar verschillende partijen toegang tot hebben en kunnen interacteren met de DT. Een ander opvallend kenmerk van DTs is dat ze gedurende de **gehele levenscyclus** van het fysieke object actief kunnen blijven. Vanaf de ontwerp- en productiefase tot en met onderhoud en buitengebruikstelling fungeren ze als een constante bron van inzichten en verbetering. De connectie tussen de reële en virtuele wereld is **bi-directioneel**: er is een continue (realtime) datastroom van de fysieke twin naar de digitale twin, en een feedbackstroom van de digitale twin naar de fysieke twin (Zhang, 2024). Op deze manier is er een continue data uitwisseling tussen beide objecten. Om deze naadloze connectie mogelijk te maken moeten beide objecten uitgerust zijn met netwerkapparaten. Beide objecten bevinden zich ook in een interactieve omgeving: de fysieke twin opereert in een fysieke omgeving en wordt beïnvloed door veranderingen in de externe omgeving, de digitale twin is verbonden en communiceert met andere systemen en netwerken in de virtuele omgeving, zoals andere DTs. DTs overbruggen zo de kloof tussen de digitale en fysieke wereld. Ze maken gebruik van technologieën zoals het Internet of Things (IoT), cloud computing en data-analyse om virtuele en fysieke data en processen te integreren. Alle uitgewisselde data moet worden opgeslagen in **data systemen** die toegankelijk zijn voor de DT. Een belangrijke nota bij het opslaan van deze data is dat de DT in staat is om nuttige informatie te onderscheiden van onnuttige informatie en zo op een efficiënte manier **data kan verzamelen en opslaan**.

Bijkomend moet de data op een consistente manier worden opgeslagen zodanig dat de data leesbaar is voor zowel machines als mensen. Door de input data verder te begrijpen, classificeren en analyseren kan de **DT patronen en trends** van de fysieke twin identificeren. De DT kan vervolgens feedback sturen naar de fysieke twin en andere systemen in de omgeving. Tenslotte zorgt de DT ook voor **modellen en simulaties** om zowel de huidige status als verschillende what-if scenario's van de fysieke twin voor te stellen (Barricelli et al., 2019; Roumeliotis et al., 2024).

Samenvattend zijn de belangrijkste componenten van een DT:

1. Het fysieke object, systeem of proces dat wordt gemodelleerd,
2. De virtuele representatie van dit object,
3. De verbinding tussen het fysieke en digitale model, die realtime data-uitwisseling en co-evolutie mogelijk maakt.

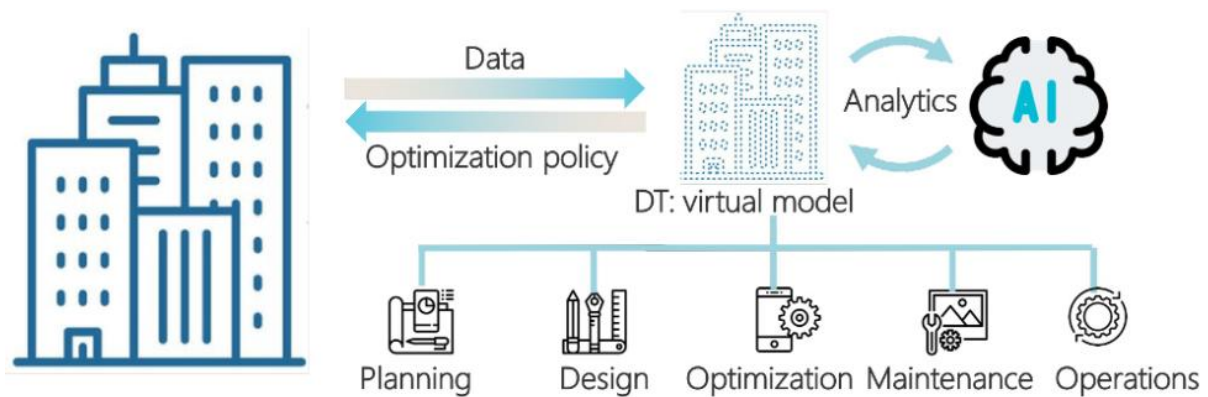
In Figuur 5 worden de belangrijkste kenmerken visueel weergegeven. Het fysieke systeem stuurt dus datastromen naar een database die gelezen wordt door de Digital Twin. De DT analyseert en verwerkt deze data vervolgens en stuurt informatie in een feedbackstroom terug naar de fysieke twin (Werbińska-Wojciechowska et al., 2024).



Figuur 5: DT concept (Werbińska-Wojciechowska et al., 2024)

Een ander voorbeeld van een visuele weergave van een DT is gegeven in Figuur 6. Hierop is weergegeven hoe de DT samenhangt met haar fysieke twin en op die manier samenhangt met het reële systeem. Zhang omschrijft verder drie componenten die een DT model bevat: de data, het model, en de software. Aangezien het nut van DTs verbonden is aan het analyseren van historische en realtime data, is de data zelf de basis voor het ontwikkelen van een DT. Verder vormt het model een kernonderdeel van een DT.

Een DT model omvat verschillende elementen, zoals weergegeven in Figuur 6. De belangrijkste elementen zijn het virtueel model, de data en analytische middelen, zoals Artificiële Intelligentie. Artificiële Intelligentie en data verwerking kunnen gebruikt worden om het model te trainen zodat het leert en verbetert. De software die de connectie tussen de fysieke en digitale wereld representeert, vormt de basis voor de User Interface. Aan de hand van een Interface kan de analyse uit de DT gebruikt en teruggestuurd worden naar het fysiek object (Zhang, 2024).



Figuur 6: Representatie van een DT (Zhang, 2024)

3.1.5 Verwante begrippen

In de literatuur worden Digital Twins vaak verward met andere concepten zoals simulatiemodellen, Product Avatars, digitale schaduwen en digitale modellen. Deze overlap in terminologie leidt regelmatig tot verwarring over wat een DT nu precies is en hoe het zich onderscheidt van vergelijkbare begrippen. Hoewel er overeenkomsten zijn, biedt een DT unieke eigenschappen en een meerwaarde die verder gaan dan standaardmodellen. In deze sectie worden deze verwante begrippen toegelicht en wordt het onderscheid met DTs verduidelijkt.

De componenten van een DT besproken in de vorige sectie vormen duidelijk het verschil met een standaard simulatiemodel. Simulatiemodellen zijn statische modellen die potentiële parameters testen in een bepaalde setting. De toepassing van simulatiemodellen is ook eerder beperkt en wordt meer gebruikt in de design fase van productontwikkeling. Er is in dit geval geen naadloze connectie of realtime data-uitwisseling tussen de digitale en fysieke wereld (Barricelli et al., 2019). Een DT verschilt hiervan omdat het actieve modellen zijn die met reële data aan de slag gaan. Het zijn daarom geen gekozen parameters maar data uit de realiteit die in een model getest wordt. De connectie tussen de twin en de sensoren is ook bi-directioneel, waardoor de fysieke en virtuele wereld in verbinding staan met elkaar. Op deze manier vormt de DT dus een dynamisch model dat in directe verbinding staat met het reële object of proces. In tegenstelling tot het statisch simulatiemodel dat vooral als doel heeft bepaalde parameters te testen in een simulatieomgeving (Jamil et al., 2022).

Een gelijkaardig concept aan de DT is een Product Avatar (PA). Een PA fungeert als de digitale weergave van een zogenaamd Smart of Intelligent Product. Dit type product wordt gekarakteriseerd als een fysiek object dat kan worden getransporteerd, gebruikt of verwerkt en dat beschikt over eigenschappen die intelligent gedrag mogelijk maken. Het unieke aan een PA is dat het gebruikers

en andere belanghebbenden in staat stelt om gedurende de gehele levenscyclus van het product toegang te krijgen tot informatie en diensten die eraan zijn gekoppeld. Ondanks de overeenkomsten zijn DTs en PA's afkomstig uit verschillende onderzoeksgebieden en vervullen ze uiteenlopende functies. Een DT onderscheidt zich doordat het niet alleen een digitale weergave is, maar ook zelfstandig acties kan ondernemen die direct invloed hebben op zijn fysieke tegenhanger. Een PA daarentegen is puur gericht op het zo nauwkeurig mogelijk nabootsen van het fysieke object in digitale vorm, zonder dat het zelfstandig beslissingen kan nemen of ingrijpen (Barricelli et al., 2019).

Andere concepten die vaak geassocieerd worden met een DT zijn Digital Models (of digitale modellen) en Digital Shadows (of digitale schaduwen). Digitale modellen zijn digitale simulatie modellen die in tegenstelling tot een DT geen realtime datastromen hebben. Deze modellen worden voornamelijk gebruikt voor scenarioanalyses of voorspellende simulaties, maar zijn statisch en worden niet continu bijgewerkt met actuele gegevens. Digitale schaduwen daarentegen reflecteren wel een fysiek object aan de hand van realtime data, maar hebben geen feedbackstroom naar de fysieke twin. De connectie is uni-directioneel en het digitaal model vormt hierbij vooral een reflectie van de fysieke twin. Het onderscheidende kenmerk van een DT is de bi-directionele connectie: niet alleen ontvangt de DT data van het fysieke object, maar deze kan ook terugkoppelen en actief invloed uitoefenen op het fysieke object. Dit maakt het mogelijk om complexe processen te optimaliseren en onmiddellijk in te grijpen in realtime. DTs fungeren daardoor als een dynamisch systeem, terwijl digitale modellen en schaduwen veel beperktere functionaliteiten hebben. (Ambra & Macharis, 2020).

3.1.6 Soorten

Op basis van hun omvang, functie en mate van geavanceerdheid kunnen Digital Twins worden ingedeeld in verschillende soorten. Inzicht in deze soorten maakt het eenvoudiger om de specifieke functionaliteiten en toepassingsgebieden van elk type te identificeren.

De meest voorkomende soorten DTs, beschreven volgens Roumeliotis et al., (2024) zijn:

- **Product DTs (PdDT):** Deze DTs vertegenwoordigen fysieke producten gedurende hun gehele levenscyclus, van ontwerp en productie tot gebruik en onderhoud. Ze verzamelen gegevens over productspecificaties, prestaties, gebruikspatronen en onderhoudsgeschiedenis. Product DTs stellen fabrikanten in staat om de prestaties van producten te monitoren, ontwerpen te optimaliseren en voorspellend onderhoud aan te bieden.
- **Proces DTs (PcDT):** Proces DTs richten zich op het modelleren en simuleren van specifieke industriële processen. Ze repliceren en volgen het gedrag en de prestaties van een proces in realtime, waarbij gegevens over inputs, outputs en verschillende parameters worden vastgelegd. Deze DTs helpen bij het optimaliseren van productieprocessen, het identificeren van knelpunten en het voorspellen van procesvariaties of storingen.
- **Systeem DTs (SDT):** Systeem DTs simuleren en vertegenwoordigen het gedrag en de interacties van complexe systemen die bestaan uit meerdere componenten en subsystemen, zoals een stad of supply chain. Ze bieden een holistisch beeld van de prestaties van het systeem en ondersteunen bij het identificeren van optimalisatiemogelijkheden, het voorspellen van storingen en het nemen van beslissingen voor systeemverbeteringen.

- **Asset DTs (ADT):** Asset DTs zijn gericht op individuele fysieke middelen, zoals machines, apparatuur of infrastructuur. Ze bieden een gedetailleerde weergave van de eigenschappen van het middel, de onderhoudsgeschiedenis en de realtime conditiebewaking. Asset DTs maken proactief onderhoud mogelijk, optimaliseren de prestaties van middelen en ondersteunen het beheer gedurende de gehele levenscyclus.
- **Faciliteits-DTs (FDT):** Faciliteits-DTs vertegenwoordigen hele fysieke faciliteiten, zoals gebouwen, fabrieken of industriële installaties. Ze verzamelen gegevens over de indeling, plaatsing van apparatuur, energieverbruik en omgevingsomstandigheden. Faciliteits-DTs helpen bij het optimaliseren van energie-efficiëntie, ruimtegebruik en toewijzing van middelen binnen de faciliteit.
- **Human DTs (HDT):** Menselijke DTs zijn digitale representaties van individuen en verzamelen gegevens over fysiologische kenmerken, gezondheidstoestand, gedrag en voorkeuren. Ze worden toegepast in gepersonaliseerde gezondheidszorg, fitnesstracking en virtuele coaching, en maken gepersonaliseerde interventies en verbeterd welzijn mogelijk.

Tao et al., (2019) beschrijven een andere manier om Digital Twins op te delen op basis van grootte. Deze paper beschreef DTs en cyberfysieke systemen voornamelijk in een productiecontext. DTs kunnen volgens hen op een hiërarchische wijze opgedeeld worden:

- **Eenheid niveau:** Een DT op eenheid niveau omvat de virtuele weergave van een klein component of product, zoals een gereedschap of materiaal. Dit vormt het laagste niveau in de hiërarchische piramide.
- **Systeem niveau:** Het tweede niveau is een DT op systeem level. De integratie tussen meerdere unit-level DTs zorgt voor een geïntegreerd systeem, wat omschreven wordt als een systeem-level DT. Voorbeelden zijn een productielijn of een hele fabriek.
- **Systeem van systemen:** Wanneer deze systeem DTs opnieuw met elkaar geïntegreerd worden, wordt een systeem van systemen ontwikkeld. Om dit te bekomen is er nood aan een service platform dat de samenwerking tussen verschillende systeem DTs mogelijk maakt. De systeem van systemen of in het Engels System of Systems (SoS) DT stelt op dit niveau een bedrijf voor of zelfs verschillende bedrijven. Het gaat om de volledige integratie tussen alle fases in de product levenscyclus.

Deze hiërarchische opdeling biedt een stapsgewijze structuur voor de ontwikkeling van de DT-technologie, waarbij de DT uitgebouwd wordt van een component of product tot een systeem en SoS DT (Tao et al., 2019).

3.1.7 Technologische bouwstenen

Om het concept van Digital Twins volledig te begrijpen en de waarde ervan in de praktijk te realiseren, is het essentieel om inzicht te krijgen in de onderliggende technologieën die hun ontwikkeling en toepassing mogelijk maken. DTs functioneren niet op zichzelf; ze zijn gebaseerd op een ecosysteem van innovatieve technologieën die samen een virtueel model van de fysieke werkelijkheid creëren, onderhouden en optimaliseren. In deze sectie wordt een overzicht gegeven van de meest relevante technologieën die bijdragen aan de realisatie van DTs.

- Internet of Things (IoT): IoT omvat een netwerk van slimme apparaten, sensoren en systemen die verbonden zijn met het internet. Deze apparaten verzamelen en delen realtime gegevens over fysieke objecten, zoals temperatuur, druk of trillingen. Voor DTs zijn deze sensoren essentieel, omdat ze de input leveren die nodig is om een nauwkeurige digitale weergave te creëren. Bovendien maken IoT-apparaten het mogelijk om optimalisaties en aanpassingen vanuit de DT terug te sturen naar het fysieke object.
- Data-Analytics en Big Data: Data-Analytics draait om het verwerken, analyseren en interpreteren van grote hoeveelheden gegevens om waardevolle inzichten te verkrijgen. Big Data verwijst specifiek naar technologieën en methodologieën die ontworpen zijn om enorme datavolumes te beheren en analyseren. Bij DTs worden deze technologieën gebruikt om patronen, trends en afwijkingen in realtime gegevens te detecteren, waardoor betere beslissingen kunnen worden genomen.
- Machine Learning (ML) en Artificial Intelligence (AI): ML is een subset van AI die machines leert patronen te herkennen en voorspellingen te doen op basis van data. AI gaat verder en omvat geavanceerdere algoritmen en technieken voor het nemen van autonome beslissingen. Voor DTs zijn ML en AI onmisbaar, omdat ze de digitale representatie zelflerend maken. Dit betekent dat de DT slimmer wordt naarmate hij meer gegevens verwerkt, waardoor hij steeds betere optimalisaties kan voorstellen en implementeren.
- Simulatietechnologieën: Simulatietechnologieën maken het mogelijk om de prestaties en reacties van een fysiek object in een gecontroleerde digitale omgeving te testen. Deze technologieën verminderen risico's en kosten, omdat experimenten niet op het fysieke object hoeven te worden uitgevoerd.
- Cloud, quantum en edge computing: Cloud computing biedt schaalbare opslag en rekenkracht via het internet, waardoor DTs grote hoeveelheden data kunnen opslaan en analyseren. Quantum computing is een opkomende technologie die gebruik maakt van kwantummechanica om complexe berekeningen uit te voeren. Het kan in de toekomst instabiele gebeurtenissen in systemen met hoge onzekerheid, zoals marktdynamieken of weersvoorspellingen, beter simuleren. Edge computing tenslotte, verwerkt data lokaal, in de buurt van het fysieke object, wat belangrijk is voor toepassingen die een lage latentie vereisen, zoals productieprocessen of autonome voertuigen.
- Communicatietechnologieën: Snelle en betrouwbare verbindingen, zoals 5G-netwerken, zijn essentieel voor de realtime synchronisatie tussen de fysieke en digitale tegenhanger.
- Virtuele en Augmented Reality (VR/AR): VR creëert een volledig digitale omgeving waarin gebruikers interactie kunnen hebben met een DT, terwijl AR digitale lagen toevoegt aan de fysieke wereld. VR en AR worden steeds vaker gebruikt om interactieve visualisaties en realistische modellen van een DT te bieden.
- Cybersecurity en Blockchain technologie: Beveiligingstechnologieën zijn noodzakelijk om de gegevensuitwisseling tussen de fysieke en digitale componenten te beschermen tegen bedreigingen. Met Blockchain technologie kan de data bewaard worden in een veilige omgeving door gebruik te maken van een gedistribueerd grootboek en versleutelde transacties. Blockchain waarborgt data integriteit, transparantie, voorkomt inbreuken en

maakt realtime traceerbaarheid mogelijk. Een toepassing van blockchain die ook kan bijdragen aan DTs en Supply Chain Management zijn Smart Contracts of intelligente contracten. Het zijn autonome digitale overeenkomsten waarbij transacties uitgevoerd worden wanneer aan een vooraf ingestelde voorwaarde is voldaan. Dit maakt Smart Contracts efficiënt, veilig en onafhankelijk van de tussenpersonen.

- Multi-Agent systemen: Deze systemen bestaan uit autonome softwareprogramma's, zogenaamde agenten, die onafhankelijk beslissingen kunnen nemen en taken kunnen uitvoeren. Ze opereren namens een externe entiteit in complexe omgevingen en dragen direct bij aan de ontwikkeling en functionaliteit van DTs.
- Drones: Drones worden ingezet als verlengstuk van DTs in logistiek en inspectie. Ze kunnen moeilijk bereikbare locaties monitoren en verstoringen in de transportketen overbruggen door goederen of sensoren snel naar afgelegen gebieden te brengen.
- Application Programming Interface (API): API's zijn softwarekoppelingen die communicatie tussen verschillende systemen en toepassingen mogelijk maken. Ze zorgen ervoor dat IoT-apparaten, databases en cloudplatformen soepel met elkaar samenwerken, wat cruciaal is voor het integreren van verschillende technologieën in een Digital Twin. Door hun herbruikbare karakter besparen ze tijd en kosten, wat ze tot een essentiële technologie maakt voor het ontwikkelen en implementeren van DTs.

(Ivanov et al., 2019; Minerva et al., 2020; Moshood et al., 2021; Rasheed et al., 2020; Roumeliotis et al., 2024)

De besproken technologieën vormen de bouwstenen van het Digital Twin concept en maken het mogelijk om fysieke processen nauwkeurig te repliceren en te verbeteren. Elk van deze technologieën draagt bij aan een cruciaal aspect van het DT-ecosysteem, zoals datacollectie, connectiviteit, simulatie en besluitvorming. Nu de conceptuele en technologische basis van DTs duidelijk zijn, wordt onderzocht hoe deze innovatieve oplossing specifiek kan worden geïmplementeerd en benut binnen het domein van Supply Chain Management.

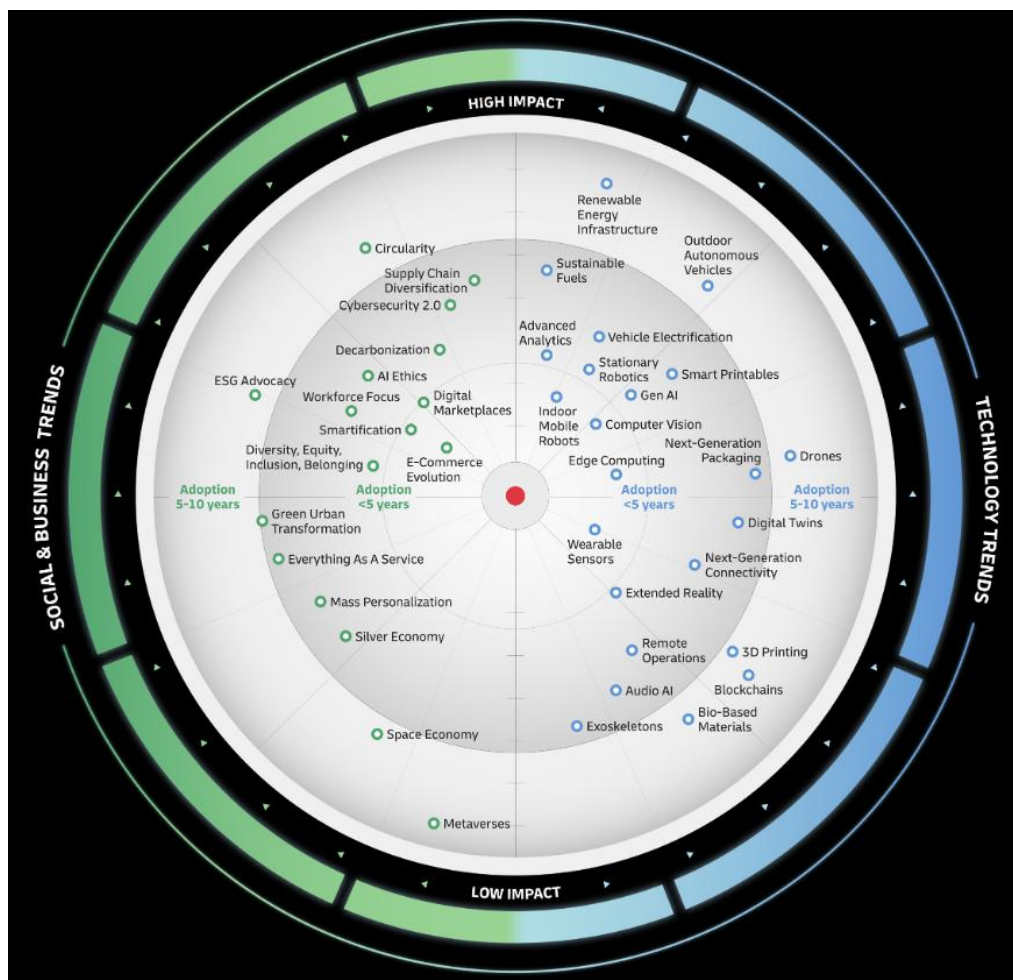
3.2 Supply Chain Management

De vorige secties van deze masterproef hebben getracht bij te dragen aan het algemeen begrip van een Digital Twin en de verschillende componenten en technologieën die ermee gepaard gaan. Door de nood aan controle en meer flexibiliteit en weerbaarheid in Supply Chain Management kunnen nieuwe technologieën, zoals de DT, waarde creëren voor bedrijven. Om de rol van Digital Twins in Supply Chain Management verder te onderzoeken zal het concept van Digital Supply Chain Twins geïntroduceerd worden in deze sectie. Verder worden de toepassingen van Digital Twins in Supply Chain Management toegelicht.

3.2.1 De Digital Supply Chain Twin

DHL voorziet op hun website een openbare Trend Radar die aangeeft wat de impact zal zijn van bepaalde technologische trends op supply chains, weergegeven in Figuur 7 (*DHL Logistics Trend Radar 7.0*, z.d.). DT-technologie is ook te vinden op deze Trend Radar. Volgens Kajba et al., (2023) worden IT-trends in de radar van DHL geclassificeerd op basis van hun impact op supply chains, verdeeld in drie fasen: laag, middelgroot en hoog. Daarnaast worden de trends gekoppeld aan de

sectoren die het meest relevant zijn, op basis van input van logistieke experts. In twee jaar tijd heeft de technologie van Digital Twins zich ontwikkeld van een semi-trend, met een lage impact op supply chains en een lange termijn relevantie, naar een volledige trend met een middelgrote impact, terwijl de lange termijn relevantie behouden blijft. Dit onderstreept de toenemende belangrijke rol en relevantie van DT-technologie in supply chains. In de Trend Radar van DHL wordt vermeld dat de markt voor DTs zal blijven groeien. In 2024 werd de marktwaarde geschat op 12,8 miljard dollar. De samengestelde jaarlijkse voorspelde groei bedraagt meer dan 40% van 2023 tot 2035. DHL voegt toe dat de ontwikkeling van DTs versneld is door recente technologische ontwikkelingen, zoals sensor technologie, cloud computing en Artificial Intelligence. De volledige integratie van DTs in supply chains zou echter nog enkele jaren op zich laten wachten (*DHL Logistics Trend Radar 7.0*, z.d.)



Figuur 7: DHL Trend Radar 7.0 (*DHL Logistics Trend Radar 7.0*, z.d.)

De koppeling van Digital Twins aan supply chains wordt in de literatuur aangeduid als Digital Supply Chain Twins (DSCTs). Deze DSCTs vertegenwoordigen de fysieke supply chain en kunnen worden ingezet voor realtime planning- en controlebeslissingen op basis van gegevens over voorraad, transport, capaciteit en vraag. DSCTs bieden een momentopname van de staat van een netwerk en maken volledige end-to-end zichtbaarheid mogelijk, wat bijdraagt aan een hogere veerkracht en betere noodplannen. De kerntechnologie voor het nauwkeurig ontwikkelen van een DSCT omvat een

combinatie van simulatie, optimalisatie en data-analyse. Het belangrijkste doel van een DT is het verbeteren van risicobeheer binnen supply chains, waardoor deze betrouwbaarder en veerkrachtiger worden bij mogelijke verstoringen (Kajba et al., 2023). In de literatuur wordt gesteld dat een supply chain in de nabije toekomst maar zo goed zal zijn als de digitale technologie die het ondersteunt (Ivanov et al., 2019). Daarom wordt in deze sectie uitgeweid over de Digital Supply Chain Twin en hoe deze kan bijdragen aan Supply Chain Management.

Digital Supply Chain Twins moeten onderscheiden worden van het initiële Digital Twin concept dat een DT een virtuele weergave is van een enkel systeem. Een DSCT is niet gefocust op een asset maar moet in een brede context worden beschouwd (Gerlach et al., 2021). Een definitie wordt gegeven door Gerlach et al., (2021): "A digital logistics twin or digital supply chain twin (DSCT) is a digital dynamic simulation model of a real-world logistics system, which features a long-term, bidirectional and timely data-link to that system. The logistics system in question may take the form of a whole value network or a subsystem thereof.". De paper beschrijft dat een DSCT een dynamisch digitaal model is van een fysiek-logistiek systeem, verbonden via een langdurige en wederkerige datalink. Het model kan een volledig waardenetwerk of een subsysteem omvatten en wordt gebruikt om informatie te verkrijgen, beslissingen te nemen en acties uit te voeren in de echte wereld. Door diagnostische, voorspellende en voorschrijvende methoden toe te passen, helpt de DSCT bij het holistisch verbeteren van de logistieke prestaties in het gehele klant-orderproces. Verder worden drie belangrijke kenmerken van DSCTs beschreven (Busse et al., 2021):

1. Bi-directioneel: Er is sprake van tweerichtingsverkeer in de gegevensuitwisseling. Veranderingen in de toestand van het logistieke systeem zorgen voor aanpassingen in het digitale model. Omgekeerd leiden inzichten uit het digitale model tot beslissingen of acties in het logistieke systeem. Een zekere mate van automatisering bij de gegevensuitwisseling is geen vereiste voor een DSCT.
2. Tijdig: De gegevensuitwisseling vindt tijdig plaats, waarbij de frequentie afhankelijk is van de specifieke toepassing. Continu realtime updates zijn geen vereiste voor een DSCT, tenzij het gebruiksscenario hierom vraagt.
3. Langdurig: De gegevensuitwisseling en de levensduur van een DSCT zijn gericht op continue, langdurige inzet. Digitale simulatiemodellen die voor kortlopende projecten of eenmalig gebruik worden ontwikkeld, worden daarom niet beschouwd als DSCTs.

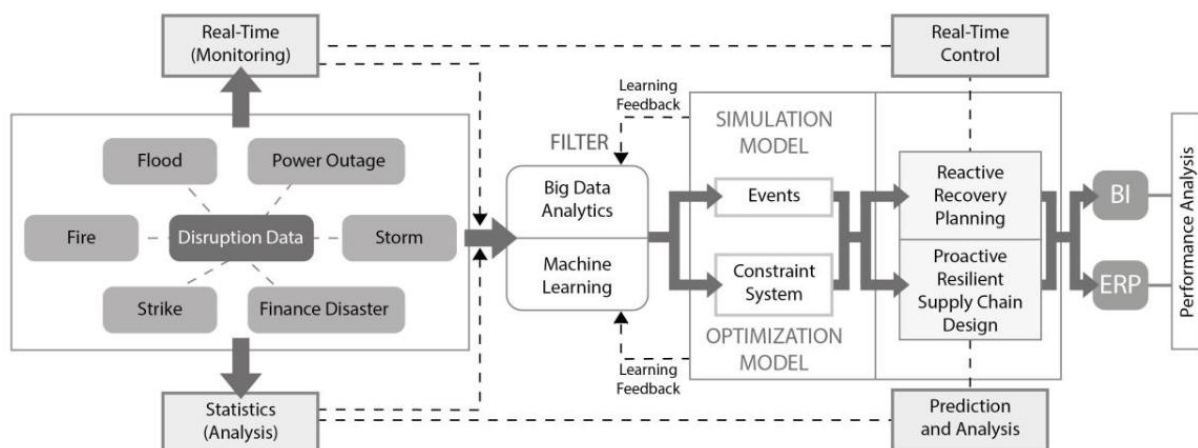
Een DSCT verschilt dus van een DT aangezien de nood van realtime data-uitwisseling geen vereiste is en projectmatige DTs niet gerekend worden tot het begrip DSCTs (Busse et al., 2021; Gerlach et al., 2021).

Ivanov et al., (2019) definieert een Digital Supply Chain Twin (DSCT) als volgt: "A DSCT is a model that represents the network state for any given moment in time and allows for complete end-to-end supply chain visibility to improve resilience and test contingency plans." Een DSCT is een digitaal model dat de toestand van een netwerk in realtime weergeeft. Het biedt volledige end-to-end zichtbaarheid van de supply chain en ondersteunt bedrijven bij het verbeteren van hun veerkracht en het testen van noodplannen. Dit model maakt gebruik van actuele transport-, voorraad-, vraag-

en capaciteitsdata, waardoor zowel planning als realtime controlebeslissingen mogelijk worden. De paper van Ivanov et al., (2019) beschrijft vervolgens vier belangrijke principes die ten grondslag liggen aan de ontwikkeling van een DSCT:

1. Stadiummodel: Het beheren van risico's in drie stadia: voorbereiding, reactie en herstel.
2. Integratie van data: Het combineren van fysieke en digitale data om SC-modellen te verbeteren.
3. Cyberfysieke netwerken: Het samenbrengen van fysieke en digitale netwerken om verstoringsrisico's beter te beheren.
4. Leren van data: Data-analyse biedt mogelijkheden voor proactieve en reactieve aanpassingen op basis van historische en realtime data.

Een visuele weergave van de nodige elementen en implementatiestappen voor DSCTs worden gegeven in Figuur 8. De eerste stap omvat het verzamelen van historische risicodata uit externe en interne bronnen. Vervolgens wordt de impact van verstoringen op supply chain prestaties gesimuleerd. Dit gebeurt aan de hand van Big Data Analytics en Machine Learning modellen. In de derde stap worden herstelstrategieën getest en modelparameters op basis van realtime data aangepast. Tenslotte wordt de impact op prestaties en KPI's geanalyseerd aan de hand van systemen zoals Business Intelligence (BI) of Enterprise Resource Planning (ERP) (Ivanov et al., 2019).



Figuur 8: Een Digital Supply Chain Twin Model (Ivanov et al., 2019)

3.2.2 Digital Twin in Supply Chain Management

In deze sectie worden de toepassingen van de Digital Twin (DT) binnen Supply Chain Management (SCM) besproken. Na het uiteenzetten van het concept en de componenten van de DSCT in de voorgaande sectie, richten de masterproef zich hier op hoe deze technologie kan bijdragen aan verschillende aspecten van SCM, zoals risicomanagement, transportoptimalisatie en productiebeheer.

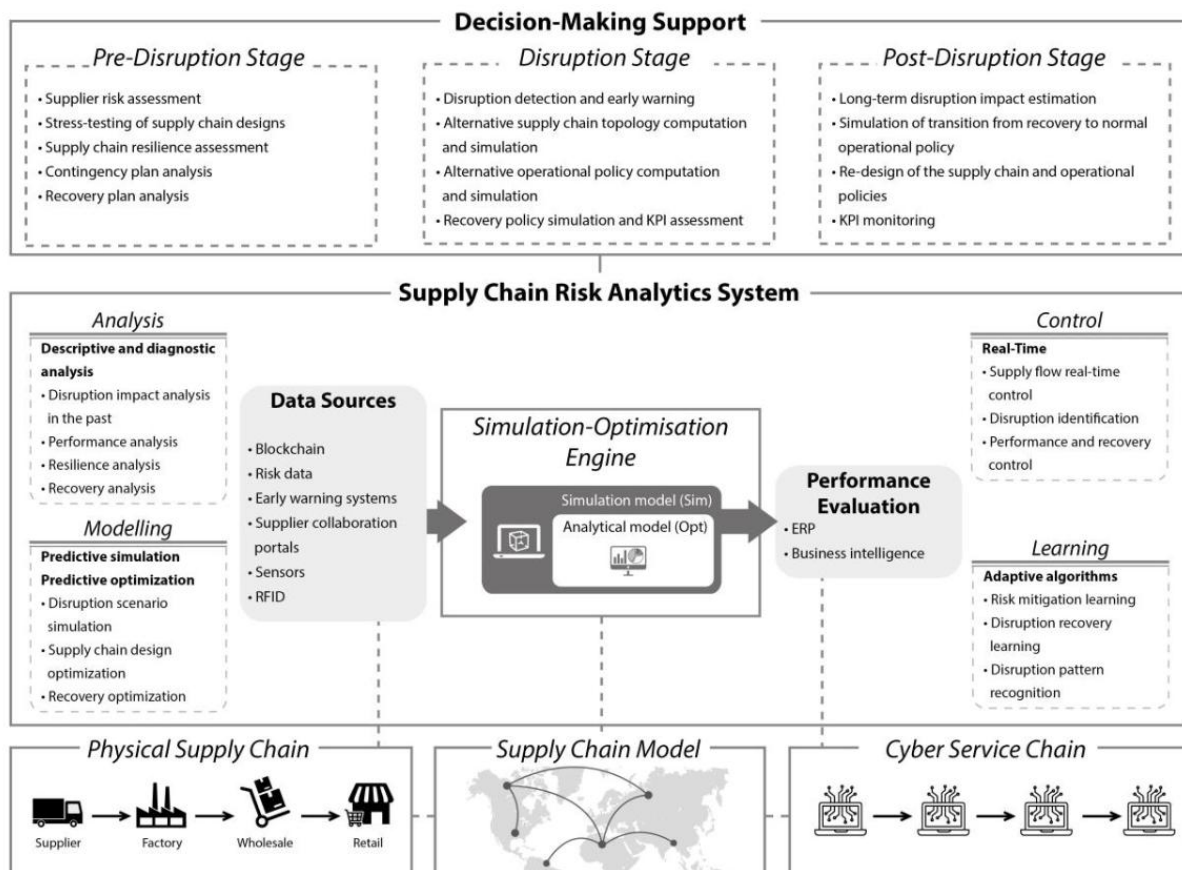
Om een DSCT efficiënt in te zetten voor Supply Chain Management bespreken verschillende bronnen de toepassing in Supply Chain Risk Management (SCRM). SCRM wordt door Fan & Stevenson, (2018) gedefinieerd als volgt: "The identification, assessment, treatment, and monitoring of supply chain risks, with the aid of the internal implementation of tools, techniques and strategies and of external coordination and collaboration with supply chain members so as to reduce vulnerability and ensure

continuity coupled with profitability, leading to competitive advantage.”. De definitie beschrijft dat SCRM het proces betreft van het herkennen, evalueren en aanpakken van risico's in de supply chain. Het doel is om risico's te minimaliseren, de bedrijfscontinuïteit te waarborgen en tegelijkertijd winstgevendheid te behouden, wat uiteindelijk bijdraagt aan een concurrentievoordeel. Fan & Stevenson, (2018) beschrijven vervolgens de nodige stappen voor Supply Chain Risk Management. De vier omschreven stappen zijn risico identificatie, risico onderzoek (schatting), risico behandeling en risico controle. Risicobeheer gaat dus vooral om het creëren van veerkrachtige supply chains, die effectief om kunnen gaan met de gevolgen van risicovolle, onverwachte gebeurtenissen, om vervolgens terug te keren naar de oorspronkelijke staat of een meer wenselijke staat te bereiken na een verstoring. Zoals al aangehaald in de introductie, is er daarom nood aan informatie en flexibele systemen, die vandaag de dag nog ontbreken in de meeste bedrijven. Het versterken van de veerkracht van de supply chain vereist twee belangrijke stappen: eerst het analyseren en identificeren van zwakke punten die de keten vatbaar maken voor verstoringen, en vervolgens het ontwikkelen van de nodige capaciteiten binnen de supply chain om verstoringen te voorspellen en ermee om te gaan (Grzybowska & Stachowiak, 2022).

In het kader van Industry 4.0 en digitale technologieën, biedt data-analyse nieuwe mogelijkheden om beslissingen te ondersteunen bij het voorspellen en beheren van verstoringen. Deze technologieën maken het mogelijk om simulatie, optimalisatie en data-analyse te combineren in een Digital Twin. Zoals al aangehaald hangt de kwaliteit van deze data-analyse af van de beschikbaarheid van realtime data, waaronder informatie over leveranciersbetrouwbaarheid, transportverbindingen en potentiële verstoringen. Deze gegevens worden door de DSCT gebruikt in verschillende stadia voor Supply Chain Risk Management. Dit verwijst opnieuw naar het eerdergenoemde stadiummodel, met de stadia voorbereiding, verstoring en herstel (Ivanov & Dolgui, 2020):

1. Pre-verstoringsfase: In deze fase worden risico's geëvalueerd en worden alternatieve supply chain-ontwerpen overwogen op basis van historische data en risicoblootstellingen.
2. Verstoringsfase: Gegevens over getroffen SC-elementen, beschikbare capaciteit en inventaris worden verzameld om verstoringen te modelleren.
3. Herstelfase: Monitoringdata worden gebruikt om herstelstrategieën te ontwerpen en implementeren.

De digitale tweeling fungeert als een cyberfysiek raamwerk dat simulatie, optimalisatie en data-analyse integreert, zoals weergegeven in Figuur 9. Dit biedt bedrijven de mogelijkheid om scenario's te testen, de impact van veranderingen te kwantificeren en veerkrachtige supply chain-strategieën te ontwikkelen. Dankzij deze technologie kunnen verstoringen sneller worden gedetecteerd en aangepakt, wat leidt tot een robuustere en efficiëntere supply chain (Ivanov & Dolgui, 2020).



Figuur 9: DSCT als cyberfysiek systeem voor SCRM (Ivanov & Dolgui, 2020)

Digital Twins worden steeds belangrijker door hun vermogen om realtime zichtbaarheid en controle te bieden. Technologieën zoals RFID, blockchain, en sensoren dragen bij aan een efficiëntere en veerkrachtigere supply chain. Door gebruik te maken van simulatiemodellen kunnen bedrijven de impact van verstoringen voorspellen, herstelstrategieën testen en adaptieve maatregelen nemen (Ivanov & Dolgui, 2020).

Ook Ambra & Macharis, (2020) benadrukken het belang van een meer dynamisch en flexibel transportnetwerk, gecreëerd door nieuwe simulatie technologieën, verhoogde rekenkrachten, IoT en Geografisch Informatie Systeem platformen. De noodzaak is te wijten aan de Europese doelstelling om in 2030 30% van het wegtransport om te zetten naar meer milieuvriendelijke transportmodi. Tegen het jaar 2050 zou deze doelstelling al 50% van het wegtransport willen omschakelen. Ambra en Macharis duiden daarom op een shift van intermodaal transport naar synchromodaliteit. Synchromodaal transport is te begrijpen als een verlenging of toevoeging aan intermodaal transport waarbij realtime rerouting mogelijk is. Hierdoor wordt het transportnetwerk meer flexibel en dynamisch. Synchromodaal transport wordt daarom ook realtime geoptimaliseerd intermodaal transport genoemd. Om een synchromodaal netwerk te ondersteunen wordt er beroep gedaan op een Digital Twin. De DT vormt de verbinding tussen het fysieke transportnetwerk en de virtuele systemen en data nodig om de netwerken te verbinden. Ambra & Macharis, (2020) tonen aan dat er nog veel onderzoek nodig is om de effectieve impact en toepassing van DTs in synchromodaal transport te meten maar dat een DT kan zorgen voor meer duurzame operaties door de fill rates of vullingsgraad van ladingen te verhogen en te switchen van wegtransport naar andere modi (Ambra

& Macharis, 2020). Een belangrijk project dat de mogelijkheden van dit idee onderzoekt is het DISpATch project. Dit is een project van drie universiteiten, KU Leuven, UHasselt en VUB, om een DT te ontwikkelen voor synchroonaal transport. Voor meer info over dit project wordt de lezer verwezen naar de website (*DISPATCH Project | MOBI VUB*, z.d.).

Een andere toepassing van DTs in SCM wordt gegeven door Werbińska-Wojciechowska et al., (2024). Zij definiëren een Transport Digital Twin (TDT) die ingezet kan worden in een transportnetwerk en beschrijven het als volgt: "a TDT can be defined as a digital representation of a transport system's physical elements that react to real-time changes. Both transport assets and connected services, even those that are not transport-related, are digitally mapped. The term TDT is not yet widely used, and it is most common in the literature to find a description of DT for specific applications of this technology in selected transport systems. The main goal of using DT in transportation is to enhance the safety and mobility of transportation systems.". Een Transport Digital Twin (TDT) is zoals omschreven een digitale weergave van de fysieke elementen en diensten van een transportsysteem, die realtime veranderingen weerspiegelt. Hoewel de term nog niet alom gebruikt is in de literatuur, richt het gebruik van DTs in transport zich vooral op het verbeteren van veiligheid en mobiliteit (Werbińska-Wojciechowska et al., 2024).

Park et al., (2021) presenteren de voordelen die bedrijven kunnen behalen door DTs te implementeren in hun supply chain. De bevindingen uit het artikel toonden aan dat de implementatie van DTs de zichtbaarheid binnen hun logistieke keten zou verbeteren. Alle vier de factoren van organisatorische zichtbaarheid zouden verbeteren door het ontwikkelen van voorspellende indicatoren, voorspellingen, diagnostiek en beschrijvingen van fysieke middelen voor de logistiek van het bedrijf (Park et al., 2021). Zoals al beschreven in de introductie houdt supply chain visibility of zichtbaarheid in dat er zichtbaarheid wordt gecreëerd binnen de keten om beter onderbouwde, interne beslissingen te nemen en de operationele processen efficiënter te maken. Zichtbaarheid vereist een divisie-overstijgend platform dat helpt bij het proactief beheren van end-to-end supply chains in realtime. Moshood et al., (2021) beschrijven in hun paper vier processen om zichtbaarheid te creëren in een supply chain:

- **Visibility for learning:** Dit proces omvat het in staat stellen van een bedrijf om nieuwe kennis op te nemen. Dit kan kennis zijn uit zowel interne als externe bronnen. Bedrijven moeten blijven bijleren, van experts en werknemers in hun bedrijf maar ook van partners en klanten in hun externe omgeving. Kennis creëert nieuwe inzichten en mogelijkheden dus bedrijven moeten een actieve leeromgeving creëren binnen het bedrijf.
- **Visibility for sensing:** Het tweede proces benadrukt het belang van het kunnen aanpassen naar een continu veranderende markt. Indien er nieuwe ontwikkelingen in de sector zijn of een trend op de markt voor een bepaald product, moeten bedrijven hier snel op kunnen reageren om competitief voordeel te creëren.
- **Visibility for integrating:** De integratie tussen alle verschillende spelers in de supply chain vormt het derde proces. Moshood et al., (2021) beschrijven dat het belangrijk is dat er een overkoepelende cultuur heerst in de gehele supply chain en dat er informatiestromen zijn tussen verschillende partners. Het delen van informatie en kennis vormen een geïntegreerd

netwerk waardoor nieuwe technologieën efficiënter geïmplementeerd kunnen worden in de hele keten.

- Visibility for coordinating: Tenslotte wordt het proces van coördinatie beschreven. Dit proces omvat de samenwerking tussen de verschillende spelers. Actoren in de supply chain moeten op elkaar afgestemd zijn en samenwerken op een open manier zodat er zichtbaarheid wordt gecreëerd over alle processen in de keten.

Deze vier processen omvatten hoe zichtbaarheid gecreëerd kan worden in de gehele supply chain wat zal bijdragen aan beter Supply Chain Management. Zoals al beschreven is er nood aan een overkoepelend platform dat deze zichtbaarheid mogelijk maakt. Digital Twin-technologie kan hier een oplossing voor bieden. De manier waarop Digital Twins bijdragen aan elk proces om zichtbaarheid te creëren werd ook besproken door Moshood et al., (2021):

- Visibility for learning: Een DT kan enerzijds bijdragen aan het opnemen van waardevolle informatie door de informatie die het verzamelt. Data van IoT sensoren voor transport bijvoorbeeld bevatten een rijkdom aan informatie en kunnen zorgen voor waardevolle inzichten. Anderzijds zorgt een DT ook voor de analyse van de input data en bevat het leermodellen waarmee het voorspellingen, simulaties en aanbevelingen kan doen. Deze analyses zorgen opnieuw voor waardevolle informatie in de keten. Hierdoor moet de DT goed beveiligd worden zodat de informatie niet verloren gaat of gestolen kan worden. Verder is het ook van belang dat de input data bruikbaar is voor de DT, zodat de output ook nuttig is voor het bedrijf. De DT moet daarom de aanbevelingen op een duidelijke manier kunnen coderen en overbrengen
- Visibility for sensing: Ten tweede kan een DT ervoor zorgen dat een bedrijf zich efficiënt kan aanpassen aan veranderingen in de markt. DTs vormen een up-to-date weerspiegeling van verschillende componenten in de supply chain waardoor informatie snel verzameld en weergegeven wordt. In geval van veranderingen zal de DT dit snel detecteren, zodat het bedrijf kan reageren.
- Visibility for integrating: Om integratie tussen alle verschillende spelers in de supply chain te bekomen kan een DT belangrijke processen identificeren en voor de gehele supply chain zichtbaar maken. Op deze manier kan informatie makkelijker gedeeld worden met verschillende partners in de keten.
- Visibility for coordinating: Tenslotte draagt een DT ook bij aan coördinatie en samenwerking in supply chains. DT kan voorspellingen en noden opvolgen zodat voorraden bijvoorbeeld efficiënt beheerd kunnen worden, wat de samenwerking tussen partners bevordert. Verder kan een DT ondersteuning bieden bij beslissingen die een impact hebben op verschillende spelers in de keten.

Na de vier processen te analyseren en de impact van Digital Twins te beschrijven, concluderen Moshood et al., (2021) dat DTs kunnen bijdragen op alle vier niveaus. DTs bevorderen daarom zichtbaarheid in supply chains wat bijdraagt aan efficiënter Supply Chain Management.

Andere toepassingen van Digital Twins in Supply Chain Management worden gegeven door Gerlach et al., (2021):

- Netwerkbeheer richt zich op het beheren en superviseren van waardeketens. Dit omvat taken zoals risicomanagement, meerledig voorraadbeheer en duurzaamheidsevaluaties. Dit vakgebied is breed en benadert logistieke en SCM vraagstukken op een holistische manier. Een geschikte DSCT vertegenwoordigt het gehele waardesysteem, inclusief alle relevante belanghebbenden.
- Binnen het gebied van transport richt men zich op toepassingen die verband houden met het vervoer van goederen en materialen op netwerkniveau. Hier modelleert een DSCT niet het volledige waardesysteem, maar slechts een deel ervan: een (synchromodaal) transportnetwerk.
- Op locatie- of site-specifiek niveau zijn drie toepassingsgebieden geïdentificeerd: productie, opslag en goederenafhandeling. Productie is veruit het meest voorkomende toepassingsgebied. Het omvat taken die te maken hebben met de vervaardiging van goederen, zoals productieplanning, -controle en werkvloerbeheer. Een DSCT in dit domein representeert een productiefaciliteit, zoals een fabriek, bouwplaats of scheepswerf.
- Opslag omvat toepassingen die betrekking hebben op het opslaan, verplaatsen en ophalen van goederen en materialen. Binnen dit domein zijn twee specifieke toepassingen geïdentificeerd: magazijnbeheer en materiaalbehandeling. De bijbehorende DSCT geeft een magazijn of distributiecentrum (DC) weer.

Samenvattend kan worden gesteld dat DTs aanzienlijke voordelen bieden voor het beheer van supply chains door hun vermogen om realtime data te integreren, verstoringen te simuleren en flexibele herstelstrategieën te ontwikkelen. Zoals aangetoond in verschillende toepassingen, kunnen DTs de veerkracht van supply chains versterken, of het nu gaat om risicomanagement, synchromodaal transport of productiebeheer. Door simulatie, optimalisatie en data-analyse te combineren, maken DTs het mogelijk om sneller te reageren op verstoringen en deze te voorkomen, waardoor de continuïteit en winstgevendheid gewaarborgd blijven. Deze technologie biedt niet alleen een dynamisch en robuust raamwerk voor het beheren van verstoringen, maar draagt ook bij aan de duurzaamheid en efficiëntie van supply chain-operaties. Bovendien versterken DTs de zichtbaarheid binnen de supply chain door voorspellende analyses en realtime monitoring, wat zorgt voor betere coördinatie en integratie van de logistieke netwerken. Het vermogen om fysiek en digitaal te verbinden verhoogt de transparantie en stelt bedrijven in staat sneller te reageren op veranderingen en verstoringen. Het potentieel van DTs in Supply Chain Management is dus enorm en biedt bedrijven de mogelijkheid om hun concurrentiepositie te versterken door hun toeleveringsketens beter te beheren en aan te passen aan onverwachte veranderingen.

3.3 Voordelen en uitdagingen van een Digital Twin

Uit de analyse van de literatuur blijkt dat Digital Twins (DTs) een breed scala aan voordelen bieden in Supply Chain Management (SCM), maar dat er ook aanzienlijke uitdagingen zijn die de toepassing en implementatie bemoeilijken. In deze sectie worden de belangrijkste voordelen en uitdagingen in kaart gebracht, met daarbij aandacht voor oplossingen die in de literatuur worden voorgesteld.

3.3.1 Voordelen

Hoewel doorheen de masterproef verschillende voordelen reeds impliciet zijn behandeld, biedt de huidige sectie een aanvullende focus op enkele specifieke voordelen van Digital Twins. Deze voordelen hebben een brede impact op strategische, operationele en mensgerichte aspecten van Supply Chain Management, en laten zien hoe deze technologie bedrijven in staat stelt om beter te presteren in een dynamische, complexe omgeving.

Strategische voordelen

Verder kunnen DTs bijdragen aan een geïntegreerd "Design-Build-Operate-Maintain" levenscyclusbeheer, wat bedrijven in staat stelt om productontwerpen te optimaliseren, productieprocessen te monitoren en prestaties van systemen gedurende hun hele levensduur te analyseren (Roumeliotis et al., 2024). Deze holistische benadering maakt het mogelijk om flexibeler, sneller en betrouwbaarder te reageren, wat cruciaal is voor het verbeteren van de transparantie in transport- en logistieke processen. Het verbeteren van de synchro-modale modellen en planningsinstrumenten kan meer flexibiliteit, snelheid en transparantie bieden, wat essentieel is voor de optimalisatie van de supply chain. Dit is vaak een aspect dat de meeste vervoerders tegenhoudt in het gebruik van intermodale diensten (Ambra & Macharis, 2020).

Operationele voordelen

Digital Twins bieden ongekennde mogelijkheden om fysieke objecten en processen in de supply chain te simuleren, monitoren en optimaliseren. Eén van de grootste voordelen van DTs is dat zij bedrijven in staat stellen verschillende scenario's en mogelijkheden te testen zonder dat hiervoor fysieke middelen nodig zijn. Dit resulteert niet alleen in een versnelde product- of procesontwikkeling, maar ook in een vermindering van afval en kosten, doordat inefficiënties vroegtijdig worden opgespoord en geëlimineerd. Door deze simulatiemogelijkheden kunnen bedrijven niet alleen bestaande processen optimaliseren, maar ook proactief problemen voorspellen en strategische plannen opstellen (Singh et al., 2021).

Een recent onderzoek ontwikkelde een model om de voordelen van DTs in supply chains te kwantificeren en testte dit met RFID-technologie in een casestudy. De resultaten toonden aan dat DTs bijdragen aan kostenbesparingen door verbeterde zichtbaarheid en automatisering, zoals het verlagen van voorraadniveaus en het minimaliseren van verzendfouten. Hoewel kostenreductie het grootste voordeel leek, toonde het onderzoek aan dat zelfs een kleine toename in beschikbaarheid een significante omzetstijging kan veroorzaken, wat de winstgevendheid verder vergroot. Dit benadrukt dat de voordelen van DTs breder reiken dan alleen kostenbesparingen. Het onderzoek levert een gevalideerd model dat kan bijdragen aan verdere discussie en verbeteringen in het gebruik van DTs in supply chains (Voipio et al., 2022).

Mensgerichte voordelen

Een ander cruciaal voordeel van DTs is de mogelijkheid om fysieke objecten vanop afstand te monitoren. Dit zorgt niet alleen voor een betere controle en toezicht, maar verhoogt ook de veiligheid, bijvoorbeeld door werknemers uit gevaarlijke omgevingen te houden. Bovendien kan het gedrag van fysieke objecten worden vastgelegd en geanalyseerd, wat bijdraagt aan de betrouwbaarheid en prestaties van deze objecten. Zo kunnen DTs bijdragen aan een betere onderhoudsplanning, lagere kosten en een langere levensduur van assets (Zhang, 2024).

DTs spelen ook een belangrijke rol in training en opleiding. Door virtuele omgevingen te gebruiken, kunnen werknemers veilig en effectief worden getraind in het gebruik van complexe systemen, zonder dat er fysieke risico's aan verbonden zijn. Daarnaast bieden DTs mogelijkheden voor realtime monitoring en besluitvorming, wat leidt tot een snellere reactietijd en meer transparantie in supply chain processen (Ambra & Macharis, 2020). Realtime monitoring is alleen nuttig wanneer dit noodzakelijk is, aangezien het alleen waarde heeft wanneer het daadwerkelijk bijdraagt aan het verbeteren van de operationele efficiëntie. Dit stelt managers in staat om potentiële problemen vroegtijdig te identificeren en preventieve maatregelen te nemen, wat de operationele efficiëntie en betrouwbaarheid van de keten aanzienlijk verbetert (Lechler et al., 2019).

3.3.2 Uitdagingen van Digital Twins

Hoewel de voordelen van Digital Twins veelbelovend zijn, brengen ze ook diverse uitdagingen met zich mee. De voornaamste uitdagingen die naar voren kwamen uit de literatuur worden besproken.

Eén van de meest prominente barrières is de complexiteit en hoge kosten van de technologie. DTs vereisen aanzienlijke investeringen in infrastructuur, zoals sensoren, dataplatforms en connectiviteit, wat vooral voor kleinere bedrijven een drempel kan vormen. Een mogelijke oplossing hiervoor is het gebruik van gedeelde cloudplatforms, waarin kleinere bedrijven kunnen bijdragen aan de ontwikkeling en vervolgens tegen lagere kosten toegang kunnen krijgen tot de technologie (Barricelli et al., 2019).

Een ander veelbesproken probleem is de behoefte aan standaardisatie. Omdat DTs vaak functioneren in een netwerk van verschillende fysieke en digitale systemen, is het cruciaal dat deze systemen met elkaar kunnen communiceren. Het ontbreken van uniforme standaarden op het gebied van datacompressie, gegevensopslag en gegevensbescherming vormt een uitdaging, vooral wanneer DTs worden ingezet in verschillende geografische regio's met uiteenlopende wet- en regelgeving. De literatuur benadrukt de noodzaak van cross-domein standaarden om de interoperabiliteit van DTs te waarborgen (Singh et al., 2021).

Daarnaast zijn er zorgen over de beveiliging en privacy van data. De grote hoeveelheden gegevens die DTs genereren, maken deze systemen kwetsbaar voor cyberaanvallen. Vooral in gevoelige sectoren, zoals de gezondheidszorg, is het essentieel om gegevens te beschermen tegen hacking en virussen. Blockchaintechnologie wordt in de literatuur genoemd als een mogelijke oplossing, aangezien deze technologie zorgt voor een transparante en onveranderlijke registratie van gegevens, wat vertrouwen en integriteit in DT-omgevingen versterkt (Roumeliotis et al., 2024). Door blockchain te integreren met DTs ontstaat een betrouwbare, gedistribueerde, efficiënte en beveiligde methode om virtuele modellen te creëren en beheren (Kajba et al., 2023).

De afhankelijkheid van menselijke interactie vormt eveneens een uitdaging. Hoewel DTs geavanceerde analyses en voorspellingen kunnen bieden, zijn ze niet altijd volledig autonoom. In bepaalde situaties, zoals in de geneeskunde, kan het menselijk oordeel effectiever zijn dan de analyses van een DT. Dit illustreert dat DTs in sommige gevallen vooral een ondersteunende rol spelen, waarbij ze de productiviteit verhogen door menselijke besluitvorming te versterken en niet zozeer te sturen (Barricelli et al., 2019).

Een laatste uitdaging betreft de visuele representatie van de grote hoeveelheden data die DTs genereren. Het creëren van een overzichtelijke en begrijpelijke interface is essentieel om eindgebruikers te ondersteunen. Daarnaast benadrukken onderzoekers de noodzaak van samenwerking tussen verschillende disciplines om de kloof in kennis tussen experts te overbruggen en gebruiksvriendelijke oplossingen te ontwikkelen (Roumeliotis et al., 2024).

Hoewel verstoringen in supply chains altijd zullen blijven bestaan, is het van essentieel belang dat bedrijven zich proactief voorbereiden en hun vermogen om snel te reageren op deze verstoringen verbeteren. Dit zou het belangrijkste doel moeten zijn om de negatieve gevolgen van verstoringen te minimaliseren (Grzybowska & Stachowiak, 2022; Ivanov & Dolgui, 2020).

Hoewel Digital Twins aanzienlijke voordelen bieden in supply chain management, blijven er belangrijke uitdagingen bestaan die aandacht vereisen. Door oplossingen zoals standaardisatie, blockchaintechnologie en gedeelde platforms te implementeren, kan de implementatie van DTs in de praktijk worden vergemakkelijkt. Het is echter essentieel dat bedrijven een evenwicht vinden tussen de technische mogelijkheden van DTs en de beperkingen die ze met zich meebrengen, om zo hun volledige potentieel te benutten. Alle geïdentificeerde use cases van network DSCT lijken een soortgelijke potentie te hebben, waarbij transparantie in de supply chain en verbeterde prestaties door snellere reacties en grotere flexibiliteit een belangrijk voordeel zijn. (Gerlach et al., 2021)

4. Empirische studie

Nadat de aspecten en mogelijkheden van een Digital Twin volgens de geraadpleegde literatuur beschreven werden, zal de theorie getoetst worden aan de praktijk. Aan de hand van twaalf interviews met respondenten uit verschillende sectoren en bedrijven, tracht de masterproef een beter beeld te geven van de kennis en attitude ten opzichte van DTs. De bedoeling is een kritische blik te werpen op de gevonden literatuur en gelijkenissen of verschillen te identificeren. Zoals al aangegeven in de methodologie werden er op voorhand vragen opgesteld, waardoor de interviews van semigestructureerd aard waren. Voor de lijst met vragen wordt de lezer verwezen naar de interviewleidraad in Bijlage 1. Wat betreft de interviews wordt een overzicht gegeven in onderstaande tabel (Zie Tabel 2).

	Datum	Bedrijf	Professionele rol	Online/ Fysiek
1	18/10/2024	Bedrijf A, logistieke dienstverlener	Product Group Lead Realtime and Geo-Systems	Online
2	25/10/2024	Bedrijf A, logistieke dienstverlener	SVP Global Innovation Road Logistics	Online
3	28/10/2024	Dematic, geautomatiseerde oplossingen	Carl De Schutter, Teamlead Software Application Engineering	Fysiek
4	15/11/2024	Inlecom, innovatieve groene oplossingen	Tomas Ambra, Technical Director	Online
5	22/11/2024	H.Essers, logistieke dienstverlener	Carlo Theunissen, COO Warehousing	Fysiek
6	4/12/2024	H.Essers, logistieke dienstverlener	Kristof Piette, Business Unit Manager & Hanno Reeser, Director Strategic Development	Fysiek
7	17/12/2024	Imec, onafhankelijke onderzoeksinstituting innovatie & technologie	Philippe Michiels, Chief Information Security Officer	Online
8	20/12/2024	Bedrijf B, retailer	Supply Chain Director	Online
9	23/12/2024	Bedrijf C, retailer	Facilities Manager	Online
10	31/12/2024	DHL, logistieke dienstverlener	Jonathan Rodriguez, Director Global Innovation & Product Development	Online
11	2/1/2025	Siemens, elektrificatie, automatisering en digitalisering	Cedric D'Haeyer, Project ingenieur	Fysiek
12	6/1/2025	Element Logic, geautomatiseerde oplossingen	Bryan Beutels, Managing Director	Online

Tabel 2: Overzicht interviews

In totaal werden twaalf interviews afgenomen in tien verschillende bedrijven. De reden voor slechts tien bedrijven is dat voor interviews 1 en 2 twee personen uit hetzelfde bedrijf apart geïnterviewd werden. Hetzelfde geldt voor interviews 5 en 6, die beiden bij H.Essers plaatsvonden. Om saturatie te garanderen en een zo goed mogelijk beeld te kunnen vormen van de realiteit, werd geprobeerd zowel bedrijven in de logistieke dienstverlening, als de retail sector, als software bedrijven op te nemen in de empirische studie. Interviews 1, 2, 5, 6 en 10 zijn drie logistieke dienstverleners, waaronder H.Essers en DHL. Dematic, Siemens en Element Logic van interviews 3, 11 en 12 respectievelijk, behoren tot de software zijde en ontwikkelen verschillende technologieën voor andere bedrijven. Twee van de twaalf interviews waren met bedrijven in de retail, dit waren interviews 8 en 9. Tomas Ambra werd bewust gekozen voor een interview gezien zijn expertise en onderzoek naar DTs in de logistieke sector. Tenslotte werd er nog een interview afgelegd met Imec, namelijk interview 7, wat een onafhankelijke onderzoeksinstituting is in België die onderzoek doen naar verschillende innovaties en technologieën, waaronder Digital Twins.

Door dit breed scala aan bedrijven en expertise kon een goed beeld gevormd worden van hoe ver de DT-technologie staat in de realiteit. De inzichten verworven uit deze gesprekken zullen besproken worden en vergeleken worden met de gevonden literatuur. De bespreking is gestructureerd als volgt: Om te beginnen wordt het begrip rond het DT concept van de verschillende respondenten besproken. Vervolgens wordt uitgebreid over de verschillende voordelen en uitdagingen die naar voren kwamen tijdens de interviews. Gezien de vooropgestelde vragen, kwamen enkele concepten meermaals naar boven; realtime gegevens, DT ontwikkeling en dynamic routing. Deze worden dan ook in een afzonderlijk deel besproken. Tenslotte werden tijdens de interviews de mogelijkheden voor de toekomst besproken betreffende de DT-technologie. Alle inzichten en bevindingen uit de interviews werden vergeleken met de gevonden literatuur.

4.1 Digital Twin concept

Een eerste conclusie die duidelijk getrokken kon worden na het afnemen van alle interviews was dat er ook in de praktijk geen consensus bestaat over het concept van een Digital Twin. Dit werd duidelijk door de eerste vooropgestelde vraag: "Wat is een DT en hoe wordt deze ingezet in uw bedrijf?". Er waren verschillende respondenten die aangaven dat hun bedrijf een soort DT ontwikkeld had en gebruikte in de dagelijkse operaties. Het was echter moeilijk in te schatten in welke mate de DT-technologie al toegepast werd en hoe dit verschilt van normale simulatiemodellen. Verschillende respondenten waren het eens dat er nog geen bedrijf is dat er in geslaagd was een DT te ontwikkelen van hun hele supply chain. De inzichten verworven uit de interviews over het concept van een DT worden besproken.

De respondent in interview 2 gaf aan dat de mening van individuen over DTs zal verschillen naargelang hun definitie en begrip van het concept. Om deze reden is het moeilijk een algemeen oordeel te vellen of de technologie al dan niet potentieel heeft en een brede toepassing zal kennen in de toekomst. Zolang er in de literatuur en praktijk geen consensus bestaat over het begrip en de mogelijkheden zal de mogelijke impact van DTs moeilijk te meten zijn.

De technologie omschreven door bedrijf A (logistieke dienstverlener) in interview 1 en 2 omvat een visualisatie van de truck fleet aan de hand van IoT sensoren. De IoT sensoren kunnen bijvoorbeeld

automatisch de aankomst of vertrektijden van leveringen bevestigen en een Estimated Arrival Time doorgeven aan klanten. De data gegenereerd door de sensoren wordt verzameld door partners die gespecialiseerd zijn in de technologie nodig voor deze sensoren. Deze partners verwerken de data waarna deze doorgestuurd wordt voor gebruik bij bedrijf A. De verkregen verkeers- en routedata fungeert als een historische data-input voor de DT. Door het gebruik van deze sensor data kan het bedrijf overzicht bewaren over het logistiek netwerk, wat belangrijk is als logistieke partner. Bijkomend heeft het bedrijf een Warehouse Management Systeem dat gezien wordt als een DT. In deze setting worden voornamelijk manuele handelingen geautomatiseerd. Bedrijf A heeft met een DT vooral het doel om met historische data voorspellingen te doen voor de toekomst en de efficiëntie van hun netwerk te verhogen. De respondent uit interview 2 gaf aan dat het bedrijf binnen de vijf jaar een DT zou hebben van hun gehele netwerk.

Uit de interviews met de automatiseringsbedrijven werd het gebruik van een Programmable Logic Controller (PLC) meermaals aangehaald om een site DT te ondersteunen. De PLC vormt de integratie tussen de geautomatiseerde machines in het magazijn en de software systemen, zoals het Warehouse Management Systeem. Aan de hand van deze technologie heeft Dematic bijvoorbeeld de Dematic Virtual Factor ontwikkeld, wat een digitale visualisatie is van een magazijn om de operaties binnen een magazijn te optimaliseren. Uit interview 3 met Carl De Schutter werd duidelijk dat er al verschillende oplossingen in de vorm van een DT mogelijk zijn wanneer het gaat om magazijnen maar dat Dematic nog op zoek is naar klanten die deze ontwikkeling willen implementeren.

Tomas Ambra deed zelf verschillende jaren onderzoek en werkt mee aan tal van projecten omtrent Digital Twins. Tijdens het interview had hij dan ook een duidelijk beeld over wat het concept van een DT voor hem betekent. Hij omschreef een DT als de combinatie van realtime data, visualisaties en een feedback loop. Hij benadrukt hierbij het belang van de actualisatie van de info, omdat dit een DT onderscheidt van een simulatiemodel. Een DT is dus niet louter een visualisatie van een reëel systeem maar actualiseert de verkregen info van de fysieke twin en geeft feedback. Er is dus een bi-directionele verbinding tussen de digitale en virtuele twin. In het interview haalt hij ook enkele voorbeelden aan. Een van de voorbeelden is een huidig project van Inlecom, DT4GS, waarbij een platform wordt gecreëerd voor de maritieme sector om DTs in te zetten om de CO² emissies van scheepvaart in Europa te reduceren. Een van de toepassingen zijn IoT sensoren op de motoren van de schepen die data doorsturen naar een DT. Hierdoor kan de DT aanbevelingen doen aan de kapitein over de vaarsnelheid om zo op het juiste moment aan te meren op het vastgelegde tijdslot aan het dock. Het remmen of versnellen in de Last Mile zorgen namelijk voor extra CO² uitstoot die op deze manier gereduceerd kan worden. Dit voorbeeld bevestigt het voordeel van een DT in de Last Mile van de levering. Het is niet van belang dat de IoT sensoren continu de snelheid meten wanneer het schip zich in het midden van een oceaan bevindt, enkel wanneer het schip moet aanmeren moet het zo efficiënt mogelijk varen. De DT zorgt niet alleen op het moment zelf voor bruikbare info maar kan achteraf ook ingezet worden om verbeteringen door te voeren bij de bouw van nieuwe schepen. Op die manier kunnen de analyses uit dagelijkse operaties gebruikt worden om operaties in de toekomst te verbeteren.

Uit de interviews met H.Essers werd duidelijk dat het bedrijf heel hard inzet op synchromodaal transport en realtime zichtbaarheid in hun logistiek netwerk. Voor hun magazijnen hebben ze op dit

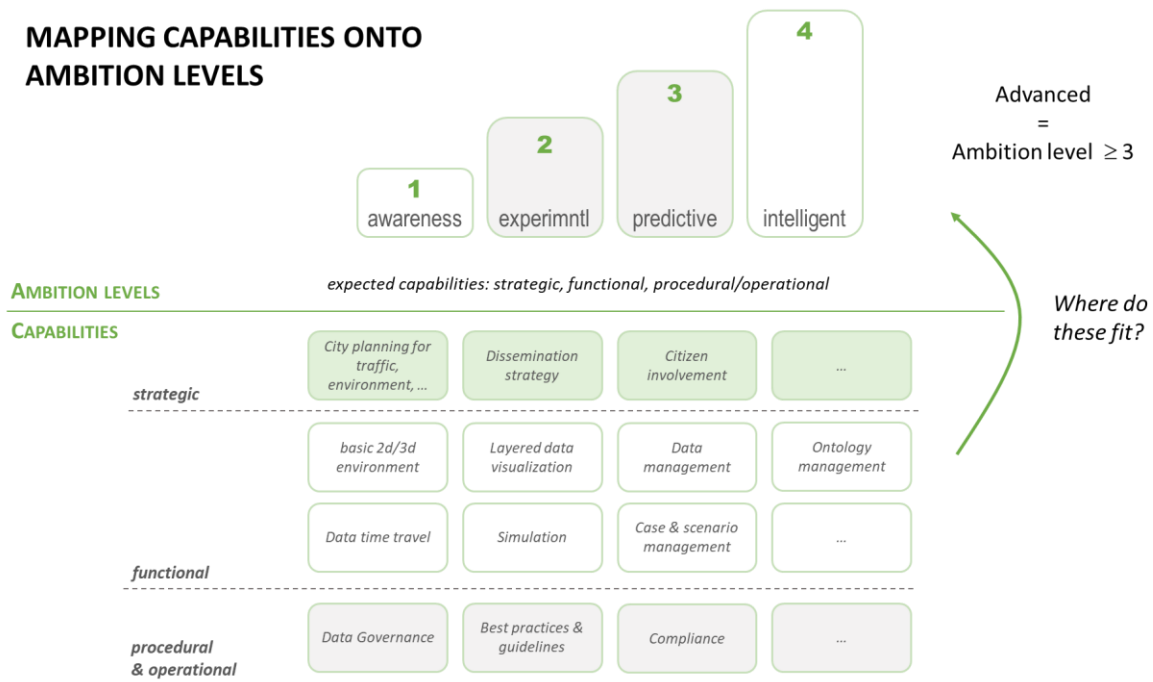
moment geen DT of gelijkaardig model. Carlo Theunissen geeft dan ook aan dat hun operaties niet op dat schaalniveau zijn dat dit nodig wordt geacht. Voor hun logistieke operaties maakt H.Essers wel gebruik van simulatie tools. Hierbij worden de dagelijkse operaties gevisualiseerd om eventuele verstoringen te identificeren en mitigeren. Aan de hand van trackers en sensoren op hun eigen laadeenheden kan H.Essers voor 50% van hun leveringen de locatie en temperatuur accuraat tracken.

Een innovatieve kijk op het concept van DTs kwam naar boven bij het interview met Philippe Michiels, Chief Information Security Officer bij Imec. Imec staat voor Interuniversitair Micro-Electronica Centrum. Het is een onafhankelijk onderzoekscentrum in België dat onderzoek doet op het gebied van micro-elektronica, nanotechnologie, kunstmatige intelligentie, ontwerpmethodes en technologieën voor ICT-systemen. Een van de lopende projecten van Imec is het Physical Internet Living Lab (PILL). Het doel van het project is om bestaand onderzoek naar een fysiek internet voor de logistiek en de onderliggende principes daarvan om te zetten naar de praktijk, om zo de basis te leggen voor een algemeen implementatiekader voor het fysieke internet binnen en buiten Europa. DTs behoren dan ook tot een van hun onderzoeksgebieden. Samen met de Europese Commissie heeft het bedrijf een Digital Twin Toolbox ontwikkeld die bedoeld was om Europese steden te overtuigen hun DT beleid uit te bouwen. De idee die zij volgen omschrijft Michiels als volgt: "Ons standpunt is dat er geen goede of foute interpretatie is van wat een Digital Twin is. Het hangt af van wat jij nodig hebt op dat moment, als zijnde die Digital Twin. Als jij zegt van ik heb hier een track and trace van vrachtwagens via mijn on board units op een kaart, dat is mijn Digital Twin. Dan is dat je Digital Twin. We gaan geen semantische oorlog voeren over wat wel of geen Digital Twin is. De vraag is, wat is je ambitie? Wat wil je ermee doen?" Het standpunt van Imec is dat DTs op verschillende ambitieniveaus ontwikkeld kunnen worden. Dit werd ook omschreven in hun Digital Twin Toolbox, alhoewel er in dit project gesproken werd van maturiteitslevels en Imec dit heeft aangepast naar ambitielevels. Hoewel de toolbox ontwikkeld werd met het oog op het ontwikkelen van City Digital Twins, zijn de inzichten toepasbaar op andere complexe systemen. Er zijn vier niveaus, zoals te zien op onderstaande figuur: Awareness, Experimental, Predictive en Intelligent Twins (Zie Figuur 10).

- Het eerste niveau is de Awareness Twin. Deze heeft voornamelijk als doel om de realiteit te capteren en zichtbaar te maken. Een voorbeeld van zo een DT is het APICA project in Antwerpen. De Advanced Port Information en Control Assistant (APICA) is een virtuele kopie van de haven van Antwerpen-Brugge. De DT analyseert de situatie en helpt om snellere en betere beslissingen te nemen op het terrein.
- De Experimental Twin gaat een stap verder dan de Awareness Twin en doet verschillende simulaties om op die manier beslissingen te kunnen maken over de realiteit. Deze twin kan bijvoorbeeld ingezet worden in beleidsvorming door na te gaan wat de effecten zijn van bepaalde ingrepen en op welke aspecten ze een invloed hebben. Een voorbeeld van een Experimental Twin is de Digital Urban European Twin (DUET). Een toepassing van deze twin is nagaan wat de effecten zijn van een nieuw circulatieplan op de verkeersdoorstroom of de luchtkwaliteit.

- Een realtime karakter is vervolgens een component eigen aan de Predictive Twin. Aan de hand van realtime data kan de twin voorspellingen doen voor de toekomst. Een voorbeeld dat werd gegeven door Michiels is wanneer je de trein neemt op een bepaald uur in Gent de twin bijvoorbeeld kan voorspellen of er bij aankomst nog Blue-bikes beschikbaar zullen zijn.
- Het laatste niveau is de Intelligent Twin. Deze twin gaat niet alleen voorspellingen doen op basis van realtime data maar gaat ook reageren en zo de realiteit manipuleren. De bedoeling is vaak om zo risico's of ongewenste uitkomsten te vermijden. Digital Twins van dit niveau zijn ook zelflerend.

De genoemde ambitielevels worden op hun beurt verder opgesplitst in verschillende capabilities en bouwstenen, zodat de te ondernemen stappen heel duidelijk werden beschreven voor bedrijven of steden. Voor meer informatie over deze toolbox wordt de lezer verwezen naar de publicaties van Imec zelf. Volgens Imec is het dus niet nodig om DTs als de meeste geavanceerde vorm van een simulatiemodel te zien, maar de verschillende modellen te onderscheiden aan de hand van deze vier ambitieniveaus en zo alle ontwikkelingen te rekenen tot een DT. Op deze manier kunnen bedrijven op het eerste niveau, awareness, beginnen en hun DT stap voor stap verder uitbouwen. Afhankelijk van welke ambitie een bedrijf heeft met haar DT, zal het model er anders uitzien en andere capaciteiten en mogelijkheden bieden. Op die manier wilt Imec bedrijven aansporen om op kleine schaal te beginnen en stapsgewijs verder te bouwen tot een geavanceerd model, of Digital Twin, ontwikkeld kan worden.



Figuur 10: Ambitielevels Digital Twins Imec

Het eerste retailbedrijf uit interview 8 is een globale speler en verkoopt goederen over drie kanalen, rechtstreeks aan klanten, via een online webshop en app en indirect via groothandel. De respondent van dit bedrijf geeft aan dat het DT concept voor hen heel breed is en zij voornamelijk inzetten op de simulatie mogelijkheden. "Wanneer noem je het een Digital Twin en wanneer draai je een

simulatie? Dat is een heel dunne lijn volgens mij. Het woord Digital Twin is ook een breed concept en soms bijna een buzzword. We geloven wel in de simulatie capability, daar gaat het eigenlijk meer om. Het is dus ook meer een simulatiemodel.”, aldus de supply chain director van bedrijf B. Bedrijf B heeft daarom een globaal team dat als doel heeft de gehele supply chain te modelleren door steeds meer nodes aan te sluiten op modellen en zo deel per deel een simulatiemodel op te bouwen. De retailer gebruikt simulaties voornamelijk voor de volgende toepassingen: strategische investeringen, operationele aanbevelingen en het creëren van een counterfactual. Onder strategische investeringen wordt bijvoorbeeld de bouw en indeling van een nieuw distributiecentrum gesimuleerd. Dit om de goederenstroom en indeling van een nieuw magazijn op voorhand te analyseren en eventuele verbeteringen door te voeren. De operationele simulaties gaan meer over bijvoorbeeld het opvolgen van voorraden en het beheer ervan optimaliseren. Tenslotte gebruikt het bedrijf ook simulaties om bij beslissingen een counterfactual te genereren die weergeeft wat de effecten zouden zijn moest de beslissing anders geweest zijn.

In interview 9 werd ook gesproken met een retailbedrijf, bedrijf C. Ook deze retailer is een globale speler. De respondent van dit bedrijf geeft aan dat hij de kern van een DT ziet als de virtuele weergave van objecten, wat het bedrijf in het heden niet heeft. Zoals bedrijf B zet bedrijf C ook in op simulaties. Bedrijf C zet voornamelijk in op het verwerken van data en werken nauw samen met hun logistieke partners om zo end-to-end zichtbaarheid van hun supply chain te creëren. Met zichtbaarheid wordt het delen van data bedoeld en hiermee aan de slag gaan. Momenteel wordt hun data aangeleverd door partners in de vorm van ruwe data. Het bedrijf doet vervolgens zelf de interpretatie en analyse van de data. Deze verrijking van de data houden ze graag intern omdat dit waarde creëert voor het bedrijf.

De derde logistieke dienstverlener die geïnterviewd werd was DHL, via Jonathan Rodriguez de Global innovation & Product development Director. Volgens Rodriguez zou DHL binnen de vijf jaar een DT hebben van hun hele netwerk, net zoals bedrijf A had aangegeven. De respondent van DHL geeft aan dat ondanks het bedrijf nog geen DT heeft van het hele netwerk ze wel al verschillende toepassingen implementeren. Het bedrijf haalt nu dus al voordelen uit de technologie. Rodriguez omschrijft een DT als volgt: “It’s a digital replica of the actual physical process, in real time.” en verwijst hiermee naar de definitie van Gartner. DHL zet DTs op dit moment op drie manieren in, namelijk voor hun gebouwen of sites, voor hun transportnetwerk en om een end-to-end overzicht te creëren van hun netwerk. Indien het gaat om een DT van een gebouw wordt gebruikt gemaakt van IoT sensoren om data te winnen van de operaties. In hun transportnetwerk wordt ook gewerkt met sensoren maar ook met apps en geofences om data te verzamelen. Rodriguez benadrukt in het interview het belang om met een DT oftewel waarde voor de klant te creëren, of operationele voordelen te hebben door de technologie. Om waarde te creëren voor de klant besteed DHL ook aandacht aan een gebruiksvriendelijke interface voor klanten. Al het modelleren gebeurt op voorhand door te voorspellen wat de klant zou willen kunnen met de toepassing.

Interview 11 werd afgenomen met een project ingenieur van Siemens, Cedric D’Haeyer. Siemens is een technologiebedrijf dat op vier activiteitsdomeinen actief is, namelijk Digital Industries, Smart Infrastructure, Mobility en Healthineers. Hoewel de respondent zich niet kon uitspreken in naam van heel Siemens NV, waren de inzichten uit het interview nuttig voor de bespreking van deze

masterproef. D'Haeyer beschreef dat Siemens een Digital Shadow Plant ontwikkeld op vier macrolevels. Deze zijn een twin op niveau van een site of plant, een proces, een machine, of een component van een machine. Elk level gaat dus meer in detail. Net zoals Dematic maakt Siemens ook gebruik van Programmable Logic Controller om een geïntegreerd systeem te ontwikkelen in het magazijn.

Tenslotte werd in interview 12 gesproken met Bryan Beutels van Element Logic. Element Logic is een technologiebedrijf dat geautomatiseerde oplossingen bouwt. In hun huidige project, E-Logic, tracht Element Logic DTs aan te bieden aan klanten als een Software as a Service (SaaS). Dit is een standaardoplossing gecreëerd op basis van best practices en heeft als doel om planningen en capaciteiten van magazijnen te simuleren en preventief onderhoud te doen. Bryan Beutels beschrijft een DT als een digitale kopie van een operatie in de ideale wereld. Met het project E-Logic tracht het bedrijf een visualisatie te ontwikkelen voor midsize bedrijven om het geautomatiseerde deel van hun magazijn te simuleren.

Uit de interviews kwam naar voren dat hoewel het concept van DTs bekend is bij veel bedrijven, er vaak onduidelijkheid bestaat over de precieze definitie en mogelijkheden van deze technologie. Het niet volledig bevatten wat vanuit de literatuur de definitie en dus de mogelijkheden zijn in de toepassing van DTs, leidt tot mogelijks opportuniteitsverlies voor de bedrijven die ermee aan de slag willen gaan. Deze discrepantie onderstreept dat er binnen de markt en academische wereld nog ruimte is voor verdere dialoog en uniformiteit over wat een Digital Twin nu precies inhoudt.

4.2 Voordelen van een Digital Twin

Tijdens de interviews werden ook de huidige en mogelijke voordelen van de technologie of gelijkaardige concepten besproken. De meeste bedrijven zijn er zich van bewust dat technologische ontwikkelingen zullen bijdragen aan betere bedrijfsoperaties. Zo verwoorde de respondent uit interview 1 het Digital Twin verhaal als volgt: "This whole digital twin for making data accessible that is so obvious that you need it because if you want to automate you need access to the data. If you want to use AI, you need to have access to the data. If you want to use blockchain or whatever funny technology, everything, you always need this data access. Yeah. And that's a 200% no regret investment to make.". Hij duidt op het feit dat er nood is aan meer data om meer automatisering mogelijk te maken. Een DT maakt data beschikbaar en daarom is het ongetwijfeld een goede investering, aldus de respondent. Jonathan Rodriguez voegt het volgende toe: : "How can we build resilience in our network and be preparing for some cases or any sort of natural disaster or unforeseen circumstances? And Digital Twins are an excellent way of doing that.". DTs zijn volgens hem de ideale manier om te zorgen dat supply chains beter om kunnen met veranderingen en verstoringen. De genoemde voordelen in elk interview worden vermeld in Tabel 3. Vervolgens worden de voornaamste voordelen die in verschillende interviews naar voren kwamen besproken en vergeleken met de literatuur.

Interview	Voordelen
1	Intern meer efficiëntie, extern meer zichtbaarheid voor klanten
2	Verbeterde operaties, kost-efficiënter werken
3	/*
4	Nieuwe technologieën testen, kost reductie, planning, sustainability want resources kunnen beter ingezet worden, what-if scenario's testen, analyse en output
5	/*
6	/*
7	DT in de logistiek: wat goedkoper is, is vaak ook duurzamer, DT kan zorgen voor synchromodaliteit maar er zijn ook nog veel verbeteringen mogelijk in de modaliteiten zelf
8	Succes metrics die berekend kunnen worden, service, kosten, sustainability, last mile optimalisatie door meer zichtbaarheid, trade off tussen service en kost, DT maakt dit zichtbaar "Iedereen begrijpt dat als je alles met een vliegtuig transporteert het er sneller zal zijn. Maar hoeveel kost dit dan echt meer? En hoeveel CO ² impact heeft dit dan precies? Daar heb je zeker in de complexe omgevingen een simulatiemodel voor nodig."
9	Gebruiken voor dagelijks bestuur, simulaties, directe impact op klant berekenen, what-if scenario's, risk management (mitigeren van mogelijke risico's), beslissingen cross checken, huidig systeem uitdagen op zoek naar verbeteringen of innovatie, oplossing voor het tekort aan werkracht dus meer automatisatie nodig, competitieve voordelen doordat er gereageerd kan worden op veranderingen in de markt, data nodig om beslissingen te kunnen maken, om belofte aan de klant te blijven waarmaken, duurzaamheid: ladingen optimaliseren, leveringen combineren, goede communicatie met partners, resources beter inzetten en waste tegengaan
10	Hoeveelheid inzichten die je uit je DT kan halen, de simulatie capaciteit zonder hoge kosten, zichtbaarheid voor klanten van hun performantie zoals inzicht in duurzaamheid, gebruik van data space specifiek voor analytics, met API connecties data van klanten toevoegen, transport optimaliseren omdat je veel meer data beschikbaar hebt zoals carbon emissions, nu synchromodale transport, DT zou extra zichtbaarheid geven, ook simulaties doen om verschillende scenario's op voorhand te testen om een learning model te creëren
11	Lay-out simuleren om beslissingen te maken, mensen opleiden, inzicht krijgen in processen, optimalisatie van processen, what-if scenario's simuleren
12	/*

Tabel 3: Overzicht genoemde voordelen per interview

*: Er werden niet expliciet of geen specifieke voordelen genoemd tijdens het interview

4.2.1 Efficiëntie en zichtbaarheid

- Literatuur: Er wordt in de literatuur vaak gesproken over de efficiëntie die DTs kunnen opleveren door de optimalisatie van processen, de vermindering van kosten en het verbeteren van de reactietijd.
- Interview 1 en 8: De voordelen van efficiëntie binnen de interne processen worden duidelijk benoemd, maar ook het belang van meer zichtbaarheid voor klanten wordt benadrukt, vooral in termen van duurzaamheid en de mogelijkheid om kosten- en servicetransparantie te bieden. Dit sluit goed aan bij de literatuur, waar transparantie en monitoring van prestaties ook als voordelen worden genoemd.

4.2.2 Kostreductie en resource-optimalisatie

- Literatuur: De toepassing van DTs kan leiden tot kostenbesparingen door het minimaliseren van inefficiënties en het optimaliseren van productieprocessen en resources.
- Interview 4 en 9: De voordelen van kostreductie door het optimaliseren van de inzet van middelen komen sterk naar voren, evenals de focus op duurzaamheid, zoals het verbeteren van de inzet van resources. Dit wordt vaak gekoppeld aan what-if scenario's, wat het model in staat stelt om voor verschillende mogelijke uitkomsten een analyse te doen, precies zoals in de literatuur beschreven.

4.2.3 Duurzaamheid en CO2-impact

- Literatuur: De literatuur benadrukt het vermogen van DTs om niet alleen de operationele efficiëntie te verbeteren, maar ook de duurzaamheid van processen door bijvoorbeeld transportoptimalisatie.
- Interview 8 en 10: Deze interviews geven aan dat DTs kunnen helpen bij het optimaliseren van last-mile levering en het reduceren van CO2-uitstoot, wat dus overeenkomt met de literatuur. De nadruk ligt op het vergelijken van verschillende scenario's (bijvoorbeeld lucht- versus vrachtvervoer) en de daarbij behorende kosten en CO2-impact, wat een belangrijk punt is dat de interviews toevoegen aan de theorie.

4.2.4 Simulaties en risicomanagement

- Literatuur: Er wordt in de literatuur veel gesproken over de rol van DTs in simulaties en what-if scenario's, die bedrijven in staat stellen risico's te identificeren en proactief te handelen.
- Interview 9 en 10: Deze voordelen worden in de interviews ook benadrukt, waar simulaties voor dagelijks bestuur en risicomanagement expliciet worden genoemd. Dit is in lijn met de literatuur die de voorspelling van mislukkingen en risico's als een van de grootste voordelen van DTs ziet.

4.2.5 Verbeterde besluitvorming en data-gestuurde keuzes

- Literatuur: Het gebruik van data voor besluitvorming en het ondersteunen van operationele beslissingen wordt als een belangrijk voordeel gezien.
- Interview 9 en 10: Er wordt sterk ingezoomd op het belang van data om sneller te reageren op veranderingen en op het meesturen van beslissingen op basis van realtime data-analyse.

Dit komt overeen met wat de literatuur stelt over het gebruik van data om strategische keuzes te maken.

De voordelen die in de literatuur worden beschreven, komen grotendeels overeen met de inzichten die in de interviews naar voren komen, met name op het gebied van efficiëntie, kostreductie, duurzaamheid en simulatiemogelijkheden. Er is echter meer nadruk op de praktische toepassingen zoals scenario-analyse, supply chain resilience en klanttransparantie in de interviews.

4.3 Uitdagingen van Digital Twins

Hoewel de respondenten duidelijk overtuigd waren van de voordelen die Digital Twins bieden, werd tijdens de interviews ook duidelijk dat er onzekerheden of uitdagingen bestonden omtrent de technologie. Dit is in lijn met de gevonden literatuur en te wijten aan de nieuwheid en complexiteit van DTs. De genoemde uitdagingen werden opnieuw samengevoegd in een tabel (Zie Tabel 4). Vervolgens worden de voornaamste uitdagingen besproken en vergeleken met de bevindingen uit de literatuur. Opvallend is dat in de vorige sectie het verzamelen van data en deze beschikbaar stellen als een van de voornaamste voordelen werd beschreven van DTs. Wanneer de respondenten bevroegd werden over de mogelijke uitdagingen werd het verzamelen en verwerken van die data net als grootste uitdaging gezien. Een quote uit interview 7 beschrijft dit probleem als volgt: "Het zijn niet de modellen, de algoritmes of de visualisaties, het is vooral de data die de grootste uitdaging vormt. En de goede, relevante, betekenisvolle en betrouwbare data vinden op schaal is niet gemakkelijk.", aldus Philippe Michiels.

Interview	Uitdagingen
1	Data verwerken zodat het waarde heeft, IoT devices moeten gelinkt worden aan de juiste lading en klant, moeten terug geraken, indien er een probleem is moeten mensen op locatie het oplossen die het vaak niet kennen, bij temperatuurmetingen is het belangrijk dat sensoren juist geplaatst worden
2	Data accurateit, use cases vinden, een digitale mindset creëren, technologische infrastructuur, job zekerheid, opleiden van mensen
3	Nood aan meer intelligentie in toestellen, integratie van systemen, cloud enabled software, belang van alles in de cloud te steken = omdat het systeem zo niet belast wordt, betere integratie, veiliger voor cyber attacks, belasting van systemen wordt vaak als uitdaging gezien → oplossing Dematic = productsystemen worden gekopieerd
4	Data moet bruikbaar & nuttig zijn (input van DT), cyber security en hierbij authorization & authentication, vertrouwen in de output van de DT → er bestaan nu ook bedrijven die een verzekering aanbieden voor de output van de DT, dat moest het mislopen de bedrijven gedekt zijn
5	/
6	Zal altijd de keuze van de klant blijven, klant moet veranderen als we nieuwe technologie of strategie willen toepassen, data interpreteren, trackers zijn duurder en moeten terug geraken
7	/

8	Data verzamelen is moeilijk, DT is geen plug and play, er is veel denk en ontwikkelingswerk voor nodig, accuraatheid van de output van je model, meer computing power nodig, snellere ontwikkeling van modellen, meer end-to-end koppeling
9	Belangrijk om overzicht te kunnen houden, data moet nuttig gebruikt worden en interpretatie belangrijk, AI nog niet voldoende in staat om betrouwbare output te geven, mensen kunnen hoofdzaken onderscheiden van bijzaken maar een model misschien niet, overvloed aan data
10	Hoeveelheid middelen nodig om een eerste model te ontwikkelen, bouwen en ontwikkelen kost veel tijd en geld, data integriteit en accuraatheid, processing power, DHL handelt intern volgens strenge protocollen dus DT moet even hard beveiligd worden, kunnen vaak niet werken met off the shelf oplossingen omdat hun operaties soms zo complex zijn dat de standaard oplossing hier niet op voorzien is, bv wanneer DHL de enige transporteur is in een land, op dit moment een niche omdat het niet makkelijk is om te ontwikkelen
11	Hoge instapkosten, omgaan met data, tijd om een DT te ontwikkelen, hoge verwachtingen van klanten maar op voorhand moet duidelijk zijn wat je eruit wilt kunnen halen, niet nuttig voor iedereen
12	Data is makkelijker te krijgen dan het is om inzicht over de data te krijgen, data accuraatheid, daarom kritisch zijn over de gegenereerde output

Tabel 4: Overzicht genoemde uitdagingen per interview

4.3.1 Data-integriteit en accuraatheid

- Literatuur: Er wordt in de literatuur uitgebreid gesproken over de uitdaging van betrouwbare data en de noodzaak voor gestandaardiseerde en veilige dataverwerking.
- Interview 1, 4, 7, 9, 10: De meeste interviews benadrukken expliciet dat data-integriteit en accuraatheid de grootste obstakels zijn. De moeilijkheid om de juiste data op schaal te verkrijgen en te verwerken wordt genoemd als een van de belangrijkste uitdagingen, wat overeenkomt met de literatuur. Het belang van betrouwbare output van modellen en cyberbeveiliging worden ook als essentieel gezien.

4.3.2 Kosten en infrastructuur

- Literatuur: De hoge aanvangskosten en de noodzakelijke infrastructuur voor het implementeren van een DT worden als barrières genoemd.
- Interview 10, 11, 12: De kosten die gepaard gaan met het ontwikkelen van de eerste modellen en het integreren van de benodigde systemen worden door de interviews benadrukt. De complexiteit van de initiële opzet en de resource-intensiteit hiervan komt goed overeen met de literatuur.

4.3.3 Systeemintegratie en cloudtechnologie

- Literatuur: De literatuur benoemt de complexiteit van systeemintegratie als een van de uitdagingen, vooral wanneer DTs verschillende systemen moeten verbinden.

- Interview 3 en 7: Deze interviews benoemen de noodzaak van betere systeemintegratie, vooral op het gebied van cloudgebaseerde software en het verbinden van IoT-apparaten met de juiste systemen. Er is sprake van een probleem bij de synchronisatie van systemen, wat vaak als een uitdaging wordt gezien.

4.3.4 Interne acceptatie en veranderingsmanagement

- Literatuur: De literatuur benoemt organisatorische barrières en het veranderingsmanagement als belangrijke uitdagingen voor het succesvol implementeren van een DT.
- Interview 6: Er wordt in de interviews aangegeven dat de klant en het management vaak weerstand bieden tegen nieuwe technologieën, vooral als er een cultuur van digitale acceptatie moet worden gecreëerd.

4.3.5 Beveiliging en privacy

- Literatuur: De literatuur spreekt over de noodzaak van sterke cyberbeveiliging en de bescherming van gevoelige gegevens.
- Interview 4 en 7: Dit wordt ook in de interviews benadrukt, waarbij cyberbeveiliging en authenticatie als cruciale punten worden genoemd, vooral omdat data in een digitale omgeving snel kan worden gekopieerd of gemanipuleerd.

4.3.6 Nieuwe inzichten uit de interviews

- Data Spaces en decentrale data-oplossingen: In de interviews wordt sterk de nadruk gelegd op de decentralisatie van data en het gebruik van data spaces wordt geïntroduceerd door Philippe Michiels van Imec. Data spaces zouden als oplossing worden gezien voor het probleem van data-integriteit en het delen van betrouwbare informatie tussen verschillende partijen in een supply chain. Data spaces zijn decentraal, georganiseerde ecosystemen om data te delen. Het doel is om data te publiceren en vindbaar maken volgens bepaalde standaarden. De respondenten geven aan dat het publiceren en verzamelen van data moeilijk is. Data spaces zouden voor deze uitdagingen dus een oplossing kunnen bieden.
- Opleiding en ontwikkeling van de medewerkers: Er wordt expliciet genoemd dat opleidingen en de digitale mindset bij medewerkers essentieel zijn voor de succesvolle implementatie van Digital Twins. Dit wordt als een uitdaging gezien, die niet in de literatuur is uitgelicht, maar wel als fundamenteel wordt beschouwd voor de praktijk.

Wat betreft de uitdagingen, benadrukken de interviews vooral de problemen met data-integriteit, systeemintegratie en de benodigde infrastructuur. De interviews voegen een bredere discussie over veranderingsmanagement, opleidingen en data spaces toe, die de literatuur niet in dezelfde mate behandelt.

Naast het vergelijken van de interviews met de literatuur over het concept, de voordelen en de uitdagingen van Digital Twins, waren er specifieke onderwerpen die tijdens de gesprekken besproken werden en verdere verdieping verdienen. Onderwerpen zoals het gebruik van realtime data, dynamic routing en de ontwikkeling van DTs werden aan de hand van de vooropgestelde vragen behandeld. Deze aspecten worden verder beschreven in deze masterproef om hun rol en impact binnen de context van DTs te verduidelijken.

4.4 Het realtime element

Over het concept van realtime data bestonden ook heel wat verschillende visies tussen de verschillende respondenten. Dit kon ook weer teruggekoppeld worden aan wat men verstaat onder een Digital Twin. Indien de persoon zijn definitie heel strikt en duidelijk was, vond hij dat realtime data een hoofdcomponent was van de DT en trachtte het bedrijf dit ook na te streven. Anderen zagen simulatiemodellen bijvoorbeeld ook als DTs en gebruikten historische data als input. Realtime data was in de meeste gevallen niet data die elke minuut of seconde opgehaald of geanalyseerd werd. In sommige gevallen werd wel beweerd dat er op elk moment in de tijd een actuele weergave gegeven kon worden van hun operaties of productstroom.

Realtime data is voor bedrijf A (logistieke dienstverlener) te begrijpen als alles dat verwerkt wordt binnen een uur. De data komt binnen enkele minuten binnen in het systeem maar mensen moeten er op dat moment op reageren, wat gemiddeld twintig minuten duurt. De respondent in interview 1 geeft ook aan dat de kost om dit te versnellen op dit moment geen meerwaarde biedt. Hij geeft daarentegen wel aan dat realtime data in de toekomst een belangrijk aspect zal worden in logistiek. De respondent uit interview 2 voegt hieraan toe dat de nood voor realtime data afhankelijk is van de use case. Hij ziet het nut van realtime data vooral in de Last Mile van de levering, aangezien de Estimated Arrival Time zo accuraat mogelijk moet zijn.

Ook in interview 7, met Philippe Michiels, wordt aangegeven dat het realtime karakter een uitdaging is. Enerzijds is het mogelijk om realtime data te ontvangen van bepaalde systemen, zoals ook aangegeven werd door bedrijf A. Anderzijds moet deze ruwe data nog verwerkt worden. Zodra deze data verwerkt en bruikbaar is, zal er een vertraging op de data zitten. Een responsive design ontwikkelen waarbij een model realtime data efficiënt kan verwerken, is moeilijk volgens Michiels.

Het retailbedrijf in interview 9 bevestigt de visie van de andere respondenten en geeft aan dat het niet altijd nodig is om realtime data te hebben. Onder realtime verstaan ze dat data elke minuut of frequenter verzameld wordt, wat volgens hen zorgt voor een overvloed aan data. Aangezien de data ook geïnterpreteerd en verwerkt moet worden, is het daarom niet nodig om realtime data te genereren volgens hem.

In interview 10, met DHL, wordt aangehaald dat het creëren van het realtime karakter van een DT zal zorgen voor de grootste toegevoegde waarde, maar dat dit ook het moeilijkste is om te verwezenlijken. Jonathan Rodriguez noemt enkele obstakels, zoals het IT landschap en al de communicatie die ervoor nodig is om de realtime data te creëren. Hij stelt dat effectief realtime visualisatie wel het einddoel is voor DHL maar dat het ook afhangt van de use case of dit nuttig is. Verder voegt hij ook toe dat DHL niet wacht tot dit doel bereikt is maar nu al waarde creëert voor klanten aan de hand van de simulaties.

De tijdcomponent die gepaard gaat met een DT kan volgens Siemens op drie manieren verlopen: vertraagd, realtime of versneld. Elke snelheid heeft zijn toepassing. Zo werd in het met Cedric D'Haeyer duidelijk dat wanneer kleine componenten van machines gesimuleerd worden het vaak een vertraagde versnelling is, omdat het gaat om details te simuleren en hierbij de performantie te optimaliseren. Wanneer anderzijds een DT ontwikkeld wordt van een heel magazijn zal het eerder gaan om de hoeveelheden die dagelijks verwerkt kunnen worden en zal er gekozen worden voor een

versnelde weergave. Omdat het bijvoorbeeld minder nuttig is om effectief even lang als de doorlooptijd een simulatie te doen van de output, omdat je net enkel geïnteresseerd bent in het eindresultaat. De nood voor realtime data hangt dus opnieuw af van de use case.

4.5 Ontwikkeling van een Digital Twin

Enkele belangrijke aspecten kwamen naar boven tijdens de bespreking van de ontwikkeling van een Digital Twin.

Een eerste belangrijk aspect dat door verschillende interviews benoemd werd, is het belang van een use case. De respondent uit interview 2 had hierover de volgende mening: "Nobody should use technology and sell technology for the sake of it. You should use technology to solve a real customer pain point.". Technologie zou dus gebruikt moeten worden om waarde te creëren voor klanten. De respondent uit interview 1 voegt hier aan toe: "If you have a customer that wants a Digital Twin, first you need to ask why they need it and then build it for that purpose.". Hiermee bedoelt de respondent dat klanten zelf vaak ook niet weten wat het doel is voor hun DT. Het is daarom belangrijk om op voorhand duidelijk te weten wat je wilt bereiken met de technologie.

Schaalbaarheid is een tweede belangrijk aspect volgens de respondenten. In interview 1 werd aangegeven dat men best kan beginnen met een kleine oplossing voor een bepaald probleem en deze achteraf op te schalen. Interview 2 bevestigde de visie van zijn collega en raadde eveneens aan om klein te beginnen en de technologie geleidelijk aan uit te bouwen. De schaalbaarheid van DTs komt meermaals terug in de interviews. Zo bevestigen Imec en DHL ook dat bedrijven beter beginnen met een kleine standaard oplossing en stap voor stap hierop verder bouwen. Tenslotte haalt Ambra ook het aspect van schaalbaarheid aan. Kleine oplossingen hebben volgens hem de mogelijkheid om makkelijk uitgebreid te worden op grote schaal.

In interview 7 werd het werken met open standaarden ook benadrukt door Philippe Michiels. Deze nood wordt ook bevestigd door de retailer uit interview 9 en Bryan Beutels van Element Logic. Met open standaarden wordt bedoeld dat een DT ontwikkeld zou moeten worden volgens een soort basis anatomie die op voorhand vastgelegd wordt. Hierdoor zou de technologie volgens Michiels makkelijker te connecteren zijn met andere systemen, omdat op deze manier modellen en systemen met dezelfde standaarden beter gelinkt kunnen worden. Bedrijven proberen oplossingen te bouwen op basis van een bepaalde use case. Hierdoor wordt elk probleem van start tot eind opnieuw uitgedacht en is de oplossing ook eigen aan het probleem zelf. Michiels spoort daarom aan om op een wetenschappelijke manier om te gaan met de input en output van mogelijke oplossingen. Zodat de manier van ontwikkelen ook in andere settingen toegepast kan worden. Dit zou de ontwikkeling van DTs goedkoper maken en democratiseren. Er is ook een werkgroep van de Europese Commissie die zich bezighoudt met het ontwikkelen van zulke standaarden. Dit is het Digital Transportation and Logistics Forum (DTLF). Er wordt getracht de digitale transformatie in transport te ondersteunen door een beveiligde, gedeelde data space te bouwen waarin data vertrouwd gedeeld kan worden. Het ultieme doel van de Europese Commissie is een gestroomlijnd Europees transportnetwerk te ontwikkelen.

Tomas Ambra benadrukt tenslotte het belang van een DT verder te bouwen op de huidige systemen van bedrijven. Dit om te voorkomen dat de DT een apart systeem vormt binnen het netwerk van

een bedrijf en hierdoor niet in alle capaciteiten volledig benut kan worden. Wanneer de DT aangesloten wordt op bestaande systemen zullen beide systemen beter geïntegreerd worden en op die manier een grotere bijdrage leveren. Deze visie wordt gevolgd door Cedric D'Haeyer, project ingenieur bij Siemens. Verder duidt Tomas Ambra het belang van decentralisatie in de ontwikkeling van DTs. Elk bedrijf heeft zijn eigen processen en vormt een complex systeem. Ambra moedigt dan ook aan om de DT enkel te ontwikkelen in functie van het bedrijf, zodat het bedrijf de DT kan bouwen naar haar wensen en op die manier de meeste voordelen eruit kan halen. Bedrijven kunnen zo een geïntegreerd systeem vormen met hun partners aan de hand van Application Programming Interface (API) connecties. Hierdoor zou een DT echter enkel haalbaar zijn voor grote spelers en zullen kleinere bedrijven zich moeten koppelen aan systemen van andere, grotere bedrijven.

4.6 Dynamic routing

Dynamic routing is een concept dat terugkomt in synchromodale transport strategieën. Het omvat de idee dat routes dynamisch bepaald kunnen worden en er tijdens het afleggen van de route gewisseld kan worden van transportmodus. Tijdens de interviews en voornamelijk aan de logistieke partners, werd gevraagd of dit in de realiteit mogelijk is.

Volgens de respondent van interview 1 is het niet mogelijk om last minute efficiënt te veranderen van modaliteit. De transportmodus ligt op voorhand vast en gebeurt vaak met laadeenheden specifiek aan het type transport. Wanneer ervoor gekozen zou worden om op het laatste moment te wisselen van transportmodus zou dit volgens de respondent niet efficiënt kunnen en daarom geen voordeel bieden. In geval van een verstoring zal het bedrijf genoodzaakt zijn dit te doen, maar dan gaat het om het oplossen van een probleem en is dit eerder een uitzondering.

Tomas Ambra geeft aan dat een DT zeker ingezet kan worden voor dynamic routing, maar ging er niet verder op in.

H.Essers is asset heavy, wat wilt zeggen dat ze veel eigen middelen hebben, waaronder vrachtwagens en magazijnen. H.Essers bezit ook een deel eigen laadeenheden die transporteerbaar zijn op verschillende modi. Dit brengt verschillende voordelen voor synchromodaal transport en dynamic routing. Dankzij deze eigen laadeenheden kan H.Essers hun ladingen efficiënt tracken en kan een route gepland worden met verschillende transportmodi. Dit brengt ook extra flexibiliteit met zich mee omdat er last minute gewisseld kan worden van transport modus. Hoewel H.Essers al stappen gezet heeft richting synchromodaliteit wordt in interview 6 aangegeven dat er nog enkele ontwikkelingen moeten gebeuren. Hanno Reeser omschrijft drie stappen om te komen tot synchromodaal transport. Stap 1 is het mogelijk maken om verschillende modaliteiten te gebruiken. Deze stap heeft H.Essers al voltooid aangezien ze door hun eigen laadeenheden gebruik kunnen maken van transport over spoor, weg en zee. Bijkomend heeft H.Essers ook een eigen railport in Genk dat aansluit op het spoornetwerk en terminals in aanbouw heeft waar schepen kunnen aanmeren. De volgende stap, stap 2, wordt omschreven als de interne mindshift naar synchromodaal transport. Interne werknemers kunnen moeite hebben met de verandering naar meerdere transportmodi indien ze enkel unimodaal transport gewoon zijn. Deze stap heeft H.Essers ook voltooid volgens Reeser. Tenslotte is er nog een derde stap die het aanpassen van de IT-systemen omvat en er meer automatisatie wordt geïmplementeerd. Hierdoor zou het mogelijk worden om

automatisch op basis van de noden van de klant een route samen te stellen, gebruik makende van meerdere transportmodi. Deze laatste stap moet H.Essers nog maken. Hun keuze voor een synchromodale strategie zou te maken hebben met duurzaamheid en het tekort aan werkkracht. "Je moet schakelen op meerdere modaliteiten om de capaciteiten te kunnen blijven aanleveren aan klanten.", aldus Reeser.

Een van de vragen ging ook over duurzaamheid, meer specifiek over hoe een DT kon bijdragen aan duurzamere operaties of processen. De logistieke dienstverleners gaven alle drie aan dat optimalisatie van hun operaties automatisch zou leiden tot meer duurzaamheid. De reden hiervoor is dat wanneer transport efficiënter verloopt, er vaak minder onnodige routes worden afgelegd waardoor de CO2 uitstoot en de kosten dalen.

4.7 Toekomstige mogelijkheden van een Digital Twin

Tenslotte werd aan de respondenten gevraagd wat zij zagen als de mogelijke ontwikkelingen rond het concept van Digital Twins. De verschillende inzichten worden kort beschreven.

Tijdens interview 2 wordt het gebruik van Artificiële Intelligentie (AI) en Machine Learning (ML) aangehaald om de DT te ondersteunen en zo de mogelijkheid om toekomstige verstoringen te voorspellen te creëren. In het interview met Cedric D'Haeyer van Siemens wordt de mogelijkheid om AI te koppelen met een DT ook besproken. AI kan een DT helpen leermodellen te ontwikkelen om zo nog betere aanbevelingen te kunnen doen aan het fysieke systeem. Dit werd ook bevestigd door de literatuur.

Een andere mogelijke toepassing van DTs in de toekomst wordt aangehaald door Tomas Ambra. Hij ziet potentieel in DTs voor elektrische voertuigen waarbij de DT ervoor zorgt dat de batterijduur zo efficiënt mogelijk gebruikt wordt en dat routes gepland kunnen worden volgens oplaadpunten.

In interview 6 beschreven Kristof Piette en Hanno Reeser het doel van H.Essers als volgt: "In de ultieme droom kan een klant straks kiezen wanneer die een order plaatst wat voor oplossing hij wil. Gaat het om een lange looptijd of een korte, een carbon neutral of een carbon friendly oplossing, over het spoor of over de weg,... aan elke oplossing zal dan een prijskaartje vasthangen. Dit zou dan verder getrokken worden in onze systemen, zodat ook de juiste planning gebeurt. Dat zou het ideale scenario zijn, dat we kunnen schakelen op vraag van de klant order per order.". Het hoofddoel van H.Essers is dus het bereiken van een synchromodaal transportnetwerk aan de hand van innovatieve technologieën.

Philippe Michiels had het volgende standpunt over de mogelijke technologische ontwikkelingen in de logistieke sector: "Nu is er vooral een focus op data delen, maar ons doel is eigenlijk proces delen. Supply chains bestaan eigenlijk niet. Een supply chain is op dit moment een grote hoeveelheid van allemaal onafhankelijke, parallel lopende processen en daartussen zitten mensen die vandaag mails en telefoontjes doen. Die mails en telefoontjes zijn vandaag de enige verbinding tussen al die verschillende processen, die samen een zogenaamde supply chain vormen. Wat wij willen doen is effectief die link tussen de verschillende processen gaan automatiseren. Zodat een supply chain effectief een groot systeem vormt.". Deze omschrijving is in de literatuur te linken met een Digital Supply Chain Twin.

Bedrijf B heeft op dit moment al verschillende simulaties die dienen als input voor strategische beslissingen en dagelijks bestuur. In de toekomst willen ze het echter mogelijk maken hun aparte modellen te combineren en zo een geïntegreerd systeem te vormen. Dit systeem zou op die manier de directe impact van de inbound op de klant kunnen berekenen. De supply chain director van het bedrijf geeft aan dat dit hun service level zou kunnen vergroten en hun meer veerkrachtig zou maken tegen verstoringen in de markt. Zo willen ze bijvoorbeeld de last mile van leveringen optimaliseren door meer zichtbaarheid te vragen van hun logistieke partners. Dit concept wordt ook uitgebreid besproken in de literatuur, om supply chain resilience te vergroten en meer end-to-end zichtbaarheid te creëren over de hele keten.

DHL gaat in de toekomst op zoek naar hoe ze een Digital Twin toegankelijker kunnen maken en sneller om te implementeren. Rodriguez geeft aan dat de technologie op dit moment nog een niche is in de markt, weinig bedrijven hebben de mogelijkheid om het te bouwen. Het doel van DHL is dan ook Digital Twins binnen DHL te democratiseren in termen van kosten, tijd en middelen nodig om het te ontwikkelen.

Indien de bevindingen uit de literatuur vergeleken worden met de inzichten uit de interviews kan algemeen gesteld worden dat Digital Twins een waardevolle bijdrage kunnen leveren in Supply Chain Management. Hoewel de respondenten soms sceptisch tegenover innovatieve termen, zoals Digital Twin, staan, zagen ze elk de waarde die nieuwe technologieën en ontwikkelingen kunnen creëren in de hedendaagse complexiteit van operaties.

5. Conclusie en aanbevelingen

De resultaten van deze masterproef benadrukken dat Digital Twins (DT) een veelbelovend technologieconcept zijn dat significant kan bijdragen aan de optimalisatie van Supply Chain Management (SCM). Door de integratie van realtime data, geavanceerde analyses en bi-directionele feedback, bieden Digital Twins mogelijkheden om complexe logistieke netwerken efficiënter, flexibeler en duurzamer te maken. Tegelijkertijd blijkt uit zowel literatuur als praktijk dat de technologie nog in ontwikkeling is, wat zich uit in een gebrek aan consensus over definities en de noodzaak van verdere ontwikkeling.

Zowel de literatuurstudie als de interviews tonen aan dat Digital Twins een relatief nieuw concept zijn. De diversiteit aan definities en toepassingen maakt duidelijk dat de technologie zich nog in een ontwikkelingsfase bevindt. Dit biedt kansen voor verdere onderzoek en standaardisatie, maar vraagt ook om een kritische houding bij implementatie. Ondanks deze onrijpheid worden de voordelen van Digital Twins duidelijk erkend. Ze verbeteren operationele processen door realtime monitoring en simulaties, verhogen de transparantie binnen supply chains en maken snellere aanpassingen mogelijk bij verstoringen, zoals geopolitieke spanningen of pandemieën. Bovendien dragen ze bij aan duurzaamheid door optimalisatie van middelen en reductie van CO₂-uitstoot.

Aan de andere kant brengen Digital Twins ook uitdagingen met zich mee. Problemen zoals data-integriteit, hoge implementatiekosten, interne acceptatie en beveiligingsrisico's vormen belangrijke belemmeringen. Het effectief benutten van Digital Twins vereist aanzienlijke investeringen in infrastructuur, technologie en veranderingsmanagement. Tegelijkertijd bieden ze unieke voordelen, zoals verbeterde risico-inschatting en een holistische aanpak van Supply Chain Management.

Om deze voordelen optimaal te benutten, moeten bedrijven investeren in het opbouwen van een geïntegreerd ecosysteem dat realtime data-uitwisseling ondersteunt. Technologieën zoals Internet of Things (IoT), Artificiële Intelligentie (AI) en Big Data-analyse spelen hierin een sleutelrol. Daarnaast is er behoefte aan bredere samenwerking tussen industrieën, academische instellingen en technologieleveranciers om uniforme definities en standaarden te ontwikkelen. Dit zal niet alleen de implementatie vergemakkelijken, maar ook bijdragen aan de adoptie van best practices. Het succes van Digital Twins hangt af van de bereidheid van organisaties om verandering te omarmen. Daarom moeten bedrijven interne trainingsprogramma's en verandermanagementstrategieën opstellen om acceptatie en effectiviteit te waarborgen. Bovendien biedt de technologie bedrijven een unieke kans om hun ecologische voetafdruk te verminderen en hulpbronnen te optimaliseren, wat centraal moet staan in strategische planning.

De Digital Twin-technologie biedt een enorm potentieel voor verdere ontwikkeling en toepassing binnen SCM en daarbuiten. Hoewel er uitdagingen zijn, maken de voordelen het een waardevolle investering voor bedrijven die streven naar innovatie en duurzaamheid. Het is essentieel om toekomstig onderzoek te richten op kwantitatieve evaluaties van de impact van Digital Twins, zowel op operationele efficiëntie als op milieuprestaties. Met deze aanbevelingen vormt deze masterproef een basis voor verdere verkenning van de mogelijkheden en beperkingen van Digital Twins, met als doel bij te dragen aan de versterking en modernisering van supply chains.

Bibliografie

Abideen, A. Z., Sundram, V. P. K., Pyeman, J., Othman, A. K., & Sorooshian, S. (2021). Digital Twin Integrated Reinforced Learning in Supply Chain and Logistics. *Logistics*, 5(4), 84. <https://doi.org/10.3390/logistics5040084>

About | digital urban european twins. (z.d.). DUET. Geraadpleegd 17 januari 2025, van <https://www.digitalurbantwins.com/publications>

Ambra, T., Caris, A., & Macharis, C. (2019). Towards freight transport system unification: Reviewing and combining the advancements in the physical internet and synchromodal transport research. *International Journal of Production Research*, 57(6), 1606-1623. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1494392>

Ambra, T., & Macharis, C. (2020). Agent-Based Digital Twins (ABM-Dt) In Synchromodal Transport and Logistics: The Fusion of Virtual and Physical Spaces. *2020 Winter Simulation Conference (WSC)*, 159-169. <https://doi.org/10.1109/WSC48552.2020.9383955>

Bandara, L. V., & Buics, L. (2024). Digital Twins in Sustainable Supply Chains: A Comprehensive Review of Current Applications and Enablers for Successful Adoption. *Engineering Proceedings*, 79(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079064>

Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access*, 7, 167653-167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>

Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817-820. <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>

Birkel, H., & Müller, J. M. (2021). Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability – A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125612>

Blomkvist, Y., & Ullemar Loenbom, L. (2020). Improving Supply Chain Visibility within Logistics by Implementing a Digital Twin: A Case Study at Scania Logistics. *Att Förbättra Synligheten Inom Logistikkedjor Genom Att Implementera En Digital Tvilling En Fallstudie På Scania Logistics*, 109.

Busse, A., Gerlach, B., Lengeling, J. C., Poschmann, P., Werner, J., & Zarnitz, S. (2021). Towards Digital Twins of Multimodal Supply Chains. *Logistics*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/logistics5020025>

Creazza, A., Dallari, F., & Melacini, M. (2010). Evaluating logistics network configurations for a global supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 15(2), 154-164. <https://doi.org/10.1108/13598541011028750>

De digital twin, derde oog op het terrein | Port of Antwerp-Bruges. (z.d.). Geraadpleegd 17 januari 2025, van <https://www.portofantwerpbruges.com/de-digital-twin-derde-oog-op-het-terrein>

Dematic Operate Software. (z.d.). Geraadpleegd 17 januari 2025, van <https://www.dematic.com/en-us/software/operate/>

DHL Logistics Trend Radar 7.0. (z.d.).

Digital Transport and Logistics Forum (DTLF)—European Commission. (z.d.). Geraadpleegd 17 januari 2025, van https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/digital-transport-and-logistics-forum-dtlf_en

Digital Twin. (z.d.). [fw_Inspiring]. Siemens.Com Global Website. Geraadpleegd 17 januari 2025, van <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/digital-enterprise/digital-twin.html>

DISPATCH project | MOBI VUB. (z.d.). Geraadpleegd 17 januari 2025, van <https://mobi.paddlecms.net/dispatch-project>

Fan, Y., & Stevenson, M. (2018). A review of supply chain risk management: Definition, theory, and research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(3), 205-230. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2017-0043>

Francis, V. (2008). Supply chain visibility: Lost in translation? *Supply Chain Management: An International Journal*, 13(3), 180-184. <https://doi.org/10.1108/13598540810871226>

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>

Ghadge, A., Kara, M. E., Moradlou, H., & Goswami, M. (2020). The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(4), 669-686. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2019-0368>

Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication

Grieves, M. W. (2023). Digital Twins: Past, Present, and Future. In N. Crespi, A. T. Drobot, & R. Minerva (Red.), *The Digital Twin* (pp. 97-121). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4

Grzybowska, K., & Stachowiak, A. (2022). Global Changes and Disruptions in Supply Chains—Preliminary Research to Sustainable Resilience of Supply Chains. *Energies*, 15(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/en15134579>

Homepage. (z.d.). DT4GS. Geraadpleegd 17 januari 2025, van <https://dt4gs.eu/>

Hu, C., Fan, W., Zeng, E., Hang, Z., Wang, F., Qi, L., & Bhuiyan, M. Z. A. (2022). Digital Twin-Assisted Real-Time Traffic Data Prediction Method for 5G-Enabled Internet of Vehicles. *IEEE*

Transactions on Industrial Informatics, 18(4), 2811-2819.
<https://doi.org/10.1109/TII.2021.3083596>

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. (2020). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/341542060_A_digital_supply_chain_twin_for_managing_the_disruption_risks_and_resilience_in_the_era_of_Industry_40

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. In D. Ivanov, A. Dolgui, & B. Sokolov (Red.), *Handbook of Ripple Effects in the Supply Chain* (pp. 309-332). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14302-2_15

Jafari, H., Ghaderi, H., Malik, M., & Bernardes, E. (2023). The effects of supply chain flexibility on customer responsiveness: The moderating role of innovation orientation. *Production Planning & Control*, 34(16), 1543-1561. <https://doi.org/10.1080/09537287.2022.2028030>

Jamil, S., Rahman, M., & Fawad. (2022). A Comprehensive Survey of Digital Twins and Federated Learning for Industrial Internet of Things (IIoT), Internet of Vehicles (IoV) and Internet of Drones (IoD). *Applied System Innovation*, 5(3), 56. <https://doi.org/10.3390/asi5030056>

Kajba, M., Jereb, B., & Obrecht, M. (2023). Considering IT Trends for Modelling Investments in Supply Chains by Prioritising Digital Twins. *Processes*, 11(1), 262.
<https://doi.org/10.3390/pr11010262>

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), 4103. <https://doi.org/10.3390/app11094103>

Lechler, S., Canzaniello, A., Roßmann, B., Gracht, H. A. von der, & Hartmann, E. (2019). Real-time data processing in supply chain management: Revealing the uncertainty dilemma. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(10), 1003-1019.
<https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2017-0398>

Liu, Y. K., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2022). State-of-the-art survey on digital twin implementations. *Advances in Manufacturing*, 10(1), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s40436-021-00375-w>

Merlino, M., & Sproge, I. (2017). The Augmented Supply Chain. *Procedia Engineering*, 178, 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.053>

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.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2998530>

- 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(2), 29. <https://doi.org/10.3390/asi4020029>
- Park, K. T., Son, Y. H., & Noh, S. D. (2021). The architectural framework of a cyber physical logistics system for digital-twin-based supply chain control. *International Journal of Production Research*, 59(19), 5721-5742. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1788738>
- Physical Internet Living Labs | imec Vlaanderen. (z.d.). imec. Geraadpleegd 17 januari 2025, van <https://www.imec.be/nl/vlaamse-innovatiemotor/samenwerking/vlaamse-onderzoeksprogrammas/physical-internet-living-labs>
- Projects – inlecom. (z.d.). Geraadpleegd 17 januari 2025, van <https://inlecom.eu/group/projects/>
- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*, 8, 21980-22012. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
- Rigó, L., Fabianová, J., Lokšík, M., & Mikušová, N. (2024). Utilising Digital Twins to Bolster the Sustainability of Logistics Processes in Industry 4.0. *Sustainability*, 16(6), 2575. <https://doi.org/10.3390/su16062575>
- (Roger) Jiao, J., You, X., & Kumar, A. (2006). An agent-based framework for collaborative negotiation in the global manufacturing supply chain network. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(3), 239-255. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.04.003>
- Roumeliotis, C., Dasygenis, M., Lazaridis, V., & Dossis, M. (2024). Blockchain and Digital Twins in Smart Industry 4.0: The Use Case of Supply Chain-A Review of Integration Techniques and Applications. *Designs*, 8(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/designs8060105>
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
- Spieske, A., & Birkel, H. (2021). Improving supply chain resilience through industry 4.0: A systematic literature review under the impressions of the COVID-19 pandemic. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107452. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107452>
- 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., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? *Procedia Manufacturing*, 13, 1175-1182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.191>

Voipio, V., Elfvengren, K., Korpela, J., & Vilko, J. (2022). Driving competitiveness with RFID-enabled digital twin: Case study from a global manufacturing firm's supply chain. *Measuring Business Excellence*, 27(1), 40-53. <https://doi.org/10.1108/MBE-06-2021-0084>

Warehouse Emulation Software. (z.d.). Geraadpleegd 17 januari 2025, van <https://www.dematic.com/en-us/insights/articles/warehouse-simulation-software/>

Werbińska-Wojciechowska, S., Giel, R., & Winiarska, K. (2024). Digital Twin Approach for Operation and Maintenance of Transportation System—Systematic Review. *Sensors*, 24(18), 6069. <https://doi.org/10.3390/s24186069>

Wu, Y., Zhang, K., & Zhang, Y. (2021). Digital Twin Networks: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(18), 13789-13804. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3079510>

Zhang, Y. (2024). *Digital Twin: Architectures, Networks, and Applications* (Vol. 16). Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51819-5>

Bijlagen

Bijlage 1: Interviewleidraad

De interviews waren semigestructureerd: er werd vooraf een lijst met vragen opgesteld, maar er was ruimte om de gesprekken flexibel te laten verlopen en dieper in te gaan op relevante onderwerpen die tijdens het interview naar voren kwamen. De interview leidraad omvat de volgende vragen:

- 1) Kunt u beschrijven hoe uw organisatie digital twins gebruikt in het logistieke proces?
 - a) Wat is een Digital Twin? Wat verstaat u onder het concept?
 - b) Is de Digital Twin effectief in realtime of zit er een vertraging op?
- 2) Welke voordelen heeft uw bedrijf ervaren sinds de implementatie van digital twins in supply chain management?
- 3) Welke uitdagingen heeft u ondervonden bij de integratie van IoT met digital twins voor supply chain zichtbaarheid?
 - a) Hoe wordt de data beschermd? Is dit een probleem?
- 4) Hoe draagt het gebruik van digital twins bij aan duurzamere transport- en logistieke processen in uw organisatie?
 - a) Kunnen Digital Twins gebruikt worden voor dynamic routing?
- 5) Hoe werkt uw organisatie samen met andere belanghebbenden in het logistieke netwerk om digital twins effectief te benutten?
 - a) Zijn er andere bedrijven (zoals transportbedrijven) die jullie voorzien van data?
 - b) Wordt de Digital Twin gebruikt om de ervaring te verbeteren voor klanten of vooral om interne processen te ondersteunen?
- 6) Moet elk bedrijf zelf een Digital Twin ontwikkelen? In dit geval enkel mogelijk voor bedrijven met een globale supply chain?
- 7) Wat zijn volgens u de belangrijkste toekomstige ontwikkelingen voor digitale twins in de logistieke sector?