



Hogeschool
van Amsterdam



LECTORALE REDE

Toekomst van de industrie / Industrie van de toekomst

Ondersteuning van industriële transitie
met Industriële Digital Twins

Dr. Ir. Jurjen Helmus
Lector Industriële Digital Twins

Creating Tomorrow

Toekomst van de industrie | Industrie van de toekomst
Ondersteuning van industriële transitie met Industriële Digital Twins

Toekomst van de industrie | Industrie van de toekomst

Ondersteuning van industriële transitie met Industriële Digital Twins

Lectorale rede

Uitgesproken op dinsdag 3 juni 2025

door

Dr.Ir. Jurjen Helmus

Lector Industriële Digital Twins

Lab Lead Maintenance Lab

ISBN 978-94-6301-565-3

Academische Uitgeverij Eburon, Utrecht
www.eburon.nl

Omslagontwerp: Textcetera, Den Haag

© 2025 J. Helmus / Hogeschool van Amsterdam

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de rechthebbende. Tekst- en datamining van (delen van) deze uitgave is uitdrukkelijk niet toegestaan.

All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training and similar technologies.

Inhoudsopgave

Inleiding	7
De toekomst van de industrie	9
Het effect van het mondiale speelveld op de Europese industrie	9
De strategie van Europa	12
De energietransitie in de industrie	14
Europese voorzieningszekerheid, circulaire transitie en het Europees Digitaal Product Paspoort	15
De rol van European Digital Innovation Hubs (EDIH) in de digitalisering van de industrie	16
Twin Transition: duurzaam en digitaal gaan hand in hand	18
De staat van de Nederlandse industrie	19
De uitdagingen van de regionale industrie	21
De impuls van het verhoogde defensiebudget op de Nederlandse maakindustrie	22
Conclusie	23
De industrie van de toekomst – van industrie 4.0 naar 5.0	27
Kunstmatige Intelligentie	28
Physics-informed neural networks	31
RAGS en reasoning met LLMs	32
Slimme autonome systemen en <i>agentic AI</i>	35
Synthetische data en simulatie met Foundation Models	36
TinyML en Edge AI – het snelle goedkope en veilige alternatief voor AI	37
Open data sharing	39
Conclusie	42
Het lectoraat Industriële Digital Twins	43
Ambities en doelstellingen	44
De onderzoeksvraag van het lectoraat	45
De industriële Digital Twin	46
Huidig gebruik van Digital Twins in de industrie	49

Uitdagingen in het ontwikkelen en gebruik van Industriële Digital Twins	50
Onderzoekslijnen van het lectoraat	52
Onderzoekslijn 1 – Van fysiek naar digitaal	54
Onderzoekslijn 2 – Virtuele modellering en simulatie	57
Onderzoekslijn 3 – Feedbackoptimalisatie van Digital Twins	59
Het ecosysteem rondom het lectoraat	61
Output van het lectoraat	64
Relatie met onderwijs	66
Lopende en opkomende onderzoeksprojecten	71
TinyML voor energiebesparing in de industrie (onderzoekslijn 1)	71
Noninvasive Monitoring of Systems (onderzoekslijn 1 – 2)	73
TechPass – Digitaal product paspoort (onderzoekslijn 2 – 3)	74
De virtuele servicemonteur (onderzoekslijn 3)	75
LOCOMOTIVE Low-cost sensor platform for condition monitoring and predictive maintenance (onderzoekslijn 1 – 2)	78
Woord van dank	81
Verantwoording van het gebruik van generatieve AI in de lectorale rede	83
Methodologische keuzes en auteurschap	83
Prompts en documentatie	83
Finetunen van resultaten	84
Rol van het taalmodel	84
Structurering en editing	84
Bibliografie	85

Inleiding

Het zal de meeste lezers niet ontgaan zijn dat de Nederlandse industrie op dit moment in zwaar weer verkeert. Diverse media hebben verslag gedaan van de noodkreet van industriële partijen, werknemers- en werkgeversorganisaties. De wereld bevindt zich op een kantelpunt, gekenmerkt door ingrijpende geopolitieke en technologische transformaties. Internationale machtsverhoudingen verschuiven snel door de opkomst van nieuwe economische grootmachten, de herpositionering van gevestigde spelers zoals de Verenigde Staten en Europa, en het gevecht om grondstoffen. Tegelijkertijd ontwikkelen digitale technologieën zoals kunstmatige intelligentie zich in razend tempo, wat invloed heeft op de bedrijfsvoering in de industrie.

Deze lectorale rede verkent en verbindt deze dynamiek met de kernactiviteiten van het lectoraat Industriële Digital Twins (iDTs). In het eerste hoofdstuk schets ik de macro-economische en geopolitieke trends die de mondiale industrie beïnvloeden, daarna geef ik een analyse van de regionale impact op de Nederlandse maakindustrie. In het tweede hoofdstuk ga ik in op technologische ontwikkelingen, waarbij digitalisering en duurzaamheid centraal staan. Vervolgens belicht ik de rol van het lectoraat iDTs in het verbinden van deze geopolitieke en technologische veranderingen met praktische toepassingen in de industrie. In het laatste hoofdstuk presenteer ik concrete voorbeelden van lopende projecten binnen het lectoraat, zoals het gebruik van iDTs voor onderhoudsoptimalisatie en energie-efficiëntie.

Het lectoraat iDTs richt zich expliciet op de (maak)industrie – een aandachtsgebied dat relatief nieuw is voor de Hogeschool van Amsterdam (HvA). Deze focus onderstreept een wederzijds belang: aan de ene kant biedt het lectoraat bedrijven handvatten om te navigeren door snelle technologische veranderingen, aan de andere kant versterkt de HvA haar positie als kennispartner voor de (maak)industrie.

Deze rede is bedoeld voor een breed publiek: van industriële partners en professionals tot studenten en onderzoekers. Voor de industrie biedt het inzicht in de nieuwste technologische mogelijkheden en hoe deze zijn in te zetten om huidige en toekomstige uitdagingen het hoofd te bieden. Studenten vinden in

deze rede een waardevol overzicht van de dynamiek en ontwikkelingen die hun als toekomstige professionals te wachten staan. Onderzoekers kunnen putten uit de geschetste verbanden tussen mondiale trends en concrete toepassingen in de industrie.

Met deze rede hoop ik met het iDT lectoraat iDTs bij te dragen aan een toekomstbestendige industrie, waarin technologie niet alleen een middel is voor efficiëntie, maar ook een katalysator voor duurzaamheid en samenwerking. Ik wens u veel plezier bij het lezen van deze lectorale rede. Moge het u inspireren, informeren en aanzetten tot reflectie over de rol die wij allen kunnen spelen in het vormgeven van de industrie van de toekomst.

De toekomst van de industrie

In dit hoofdstuk verken ik de vraag of er een toekomst bestaat voor de Nederlandse maakindustrie, en op welke wijze. Om de waarde van het lectoraat te begrijpen, moet ik eerst een beeld schetsen van de historische en actuele staat van de Nederlandse industrie. Dit biedt niet alleen inzicht in de bijdrage van de industrie aan de economie, maar ook in de behoefte van het werkveld voor het lectoraat.

Om inzicht te krijgen in de staat van de Nederlandse industrie maak ik in dit hoofdstuk een brede analyse binnen een mondiale en Europese context. Het hoofdstuk begin ik met een verkenning van mondiale trends, zoals de geopolitieke verschuivingen rond BRICS+¹ en de economische koers van grootmachten als de Verenigde Staten (VS) en China. Vervolgens zoom ik in op de Europese uitdagingen die een directe impact hebben op de concurrentiekracht van de industrie. Hierna volgt een beschouwing van de historische en huidige staat van de Nederlandse industrie, waarbij ik de sterke sectoren en hun innovatiekracht bespreek.

Tot slot belicht ik het regionale speelveld, met aandacht voor belangrijke clusters rondom Groot-Amsterdam en de rol van beleid en samenwerkingsverbanden in het versterken van de industrie. Deze structuur zorgt voor een duidelijke en inzichtelijke analyse van zowel de bedreigingen als de kansen voor de industrie en het lectoraat.

Het effect van het mondiale speelveld op de Europese industrie

Nieuwe geopolitieke omstandigheden en razendsnelle ontwikkelingen op dat gebied hebben ingrijpende gevolgen voor de Europese industrie. Wereldwijde concurrentie, protectionisme, marktverstoringen en handelsspanningen nemen stuk voor stuk toe, en het internationale handelsstelsel, zoals vastgelegd in afspraken binnen de Wereldhandelsorganisatie (WTO), komt steeds vaker

1 Brazilië, Rusland, India, China, Zuid-Afrika, Iran, Verenigde Arabische Emiraten, Ethiopië, Egypte, Argentinië en Saoedi-Arabië.

onder druk te staan [1], [2]. Nieuwe grootmachten (zoals de BRICS+) steken de kop op en gevestigde partners (zoals de VS) slaan nieuwe wegen in [3]. Dit gecombineerd met een periode van wereldwijde economische onzekerheid die voor de deur staat, maakt dat de Europese industrie rekening moet houden met nieuwe uitdagingen.

De recente geopolitieke ontwikkelingen hebben aanzienlijke gevolgen voor de Europese en Nederlandse industrie. De herverkiezing van Donald Trump als president van de VS heeft geleid tot een versterkte *'America First'*-politiek, met verhoogde importtarieven en een nadruk op binnenlandse productie [4]. Dit creëert onzekerheid over export voor Europese bedrijven naar de Amerikaanse markt [5].

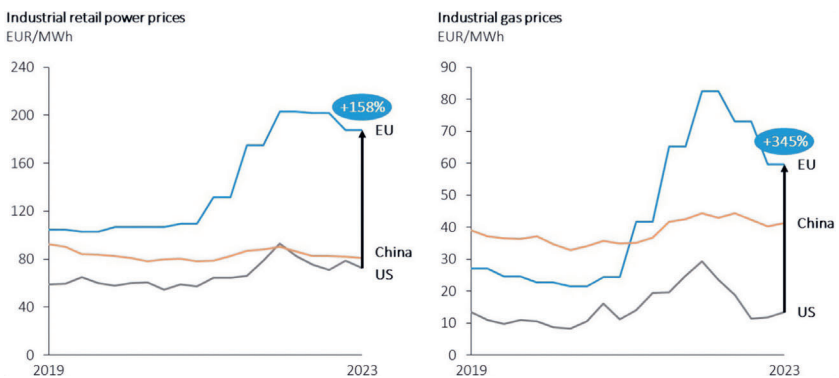
Tegelijkertijd heeft de uitbreiding van de BRICS+, onder leiding van Rusland en China, de invloed van opkomende economieën vergroot en de machtsverhoudingen in de wereld verder verschoven naar het oosten [3]. Ook dit vergroot de concurrentiedruk op Europese bedrijven en benadrukt de noodzaak voor strategische aanpassingen in handel en industrie [1]. Hoewel de economische impact van de uitbreiding nu nog beperkt is, verhoogt de toegenomen invloed van BRICS+ binnen internationale organisaties zoals de Verenigde Naties en de Wereldhandelsorganisatie, de druk op de Europese handelspositie. Daarnaast hebben de assertieve buitenlandse politiek van Rusland en de groeiende spanningen rondom Oekraïne geleid tot sancties en stijgende energieprijzen, die de productiekosten voor de Europese industrie verder onder druk zetten. Dit benadrukt de noodzaak van strategische aanpassingen binnen de EU om haar industriële concurrentiepositie te behouden [1], [6], [7].

De opkomst van China als economische grootmacht versterkt deze uitdagingen en creëert aanzienlijke druk op de Europese industrie. Chinese bedrijven excelleren niet alleen in kostenbeheersing, maar ook in technologische vooruitgang. Daardoor eisen ze wereldwijd marktleiderschap op in sectoren zoals kunstmatige intelligentie en groene technologie [8], [9], [10].

Daarnaast is de beschikbaarheid van schaarse metalen van belang voor de Europese industrie, vooral gezien de geopolitieke spanningen en de afhankelijkheid van import uit landen zoals China. De controle die China heeft over de internationale toeleveringsketens van kritieke grondstoffen (zoals palladium en kobalt) geeft het land een strategisch voordeel en maakt de Europese industrie kwetsbaar. Europa beschikt ook over enkele reserves van zeldzame metalen,

met recente vondsten in Zweden [11] en Noorwegen [11], [12], terwijl ook Spanje en Finland kleinere voorraden hebben [13], [14], maar de winning wordt beperkt door complexe regelgeving en milieubezwaren. Tegelijkertijd versterkt de opkomst van de BRICS+-landen de mondiale concurrentie om deze essentiële grondstoffen, waardoor Europese bedrijven nog hogere kosten en leveringsonzekerheid ervaren. Dit onderstreept de noodzaak voor Europa om in te zetten op strategische autonomie door diversificatie van leveranciers, investeringen in eigen mijnbouw en een circulaire strategie die recycling en hergebruik van deze grondstoffen bevordert.

Europese bedrijven worden door deze ontwikkelingen gedwongen niet alleen hun efficiëntie te verbeteren, maar ook fors te investeren in onderzoek en ontwikkeling om relevant te blijven. Tegelijkertijd wordt de concurrentiepositie van Europa verder ondermijnd door interne factoren, zoals hoge energiekosten en een tekort aan technisch geschoold personeel, wat innovatie en productiecapaciteit beperkt. Deze ontwikkelingen maken het van belang voor Europa om een duidelijke strategie te ontwikkelen die autonomie en technologische zelfvoorziening bevordert. Daarnaast worden Europese bedrijven geconfronteerd met hogere energiekosten in vergelijking met de VS, waar tarieven voor elektriciteit en gas aanzienlijk lager liggen. Dit prijsverschil, dat kan oplopen tot 150% voor elektriciteit en 350% voor gas, maakt het voor Europese producenten nog moeilijker om te concurreren op internationale markten (Figuur 1) [1].



Figuur 1. Industriële energiepijzen (elektriciteit links; gas rechts). Bron: Draghi-rapport, European Commission, 2024. Based on Eurostat (EU), EIA (US) and CEIC (China), 2024 [1].

De mondiale ontwikkelingen volgen elkaar in hoog tempo op, variërend van financiële tariefstellingen tot geopolitieke herschikkingen en strategische samenwerkingen. Om zijn concurrentiepositie te behouden, werkt Europa aan een samenhangende industriële strategie [15], [16], [17]. De groeiende erkenning van het belang van een gezamenlijke aanpak stimuleert de bereidheid binnen de EU-lidstaten om gezamenlijk op te treden.

De verwachting is dat dit leidt tot beleidsinitiatieven zoals de versterking van strategische autonomie en investeringen in digitale en duurzame transitie. Deze ontwikkelingen zullen direct van invloed zijn op de richting van het lectoraat in de komende jaren. Zo zullen specifieke Europese programma's en subsidieregelingen worden opgezet om industriële uitdagingen aan te pakken, waarbij partners van het lectoraat en het iDT lectoraat zelf actief zullen aanhaken om innovatieve oplossingen te ontwikkelen en bij te dragen aan de toekomstbestendigheid van de Nederlandse industrie.

De strategie van Europa

Deze sectie gaat dieper in op de uitdagingen voor de industrie vanuit het perspectief van Europa. Het Europees strategisch kader biedt belangrijke inzichten voor de veranderingen binnen de Nederlandse industrie en de rol die het lectoraat hierin kan spelen. De inrichting van het lectoraat is zodanig vormgegeven dat deze aansluit bij de bredere industriële transitie en de noodzaak van innovatie en strategische autonomie binnen de Europese context [7], [15].

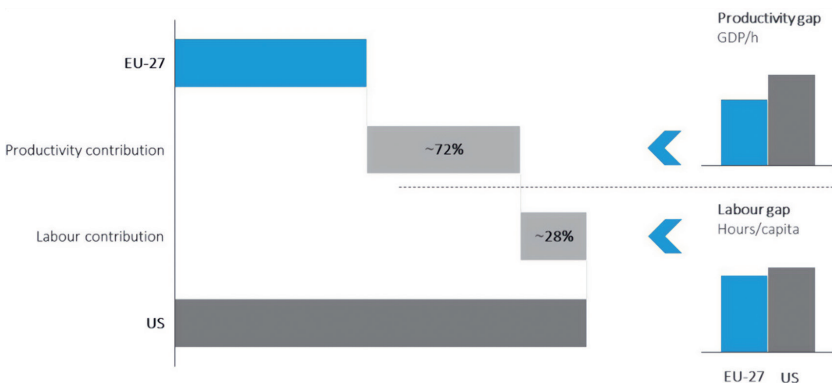
Europa maakt zich al sinds het begin van deze eeuw zorgen over een afnemende economische groei. Hoewel diverse strategieën zijn ingezet om de groei te stimuleren, blijft de trend dalend. De kloof in het bruto binnenlands product (BBP) tussen de EU en de VS is in de afgelopen decennia steeds groter geworden, voornamelijk door een tragere productiviteitsgroei in Europa. Ongeveer 70% van het gat tussen het verschil in BBP tussen de VS en EU wordt verklaard door de productiviteit die in de EU lager ligt (zie Figuur 2). Een belangrijke bijdrage van het lectoraat ligt dan ook bij het verhogen van productiviteit middels digitalisering.

De gunstige mondiale context waarin Europa opereerde is aan het verschuiven. Wereldwijde handel, die lange tijd groeide onder multilaterale handelsregels, lijkt zijn piek te hebben bereikt. Europese bedrijven worden geconfronteerd met meer concurrentie van buitenaf en minder toegang tot buitenlandse

markten. Daarnaast heeft Europa abrupt zijn belangrijkste energievoorzieners, Rusland, verloren, wat zijn energiezekerheid heeft ondermijnd [18], [19].

Europa probeert deze uitdagingen het hoofd te bieden door de industriële strategie te herzien en zich te richten op strategische autonomie [20], [21]. Dit omvat het versterken van de Europese productieketens, het stimuleren van hightechindustrieën en het verminderen van de afhankelijkheid van derde landen voor kritieke grondstoffen en energievoorzieningen. Het Green Deal Industrial plan en de Net-Zero Industry Act zijn voorbeelden van beleidsinitiatieven die Europa moeten positioneren als een concurrerende en duurzame industriezone.

De Europese Commissie heeft recent de Competitiveness Compass [21], [22], [23] geïntroduceerd, een strategisch kader om de concurrentiekracht van Europa te versterken en duurzame welvaart te waarborgen. Dit initiatief legt de nadruk op innovatie, decarbonisatie en economische veiligheid als kernpunten voor de toekomst. Europa kampt met een productiviteitskloof ten opzichte van andere wereldeconomieën, maar beschikt over sterke fundamenten zoals een hoogopgeleide beroepsbevolking en een krachtige interne markt. Door het wegnemen van structurele barrières en het bevorderen van eenheid en snelheid in beleidsvorming, wil de EU haar positie in de wereldmarkt behouden en versterken.



Figuur 2. Vergelijking arbeidsproductiviteit EU en VS. Bron: [1].

De op dit moment in ontwikkeling zijnde Clean Industrial Deal zal een belangrijke rol spelen in het verder verduurzamen van de Europese industrie [16]. Deze deal bouwt voort op de Green Deal en richt zich op investeringen in schone technologieën, CO₂-reductie en de versterking van strategische sectoren zoals batterijproductie en waterstof. Door regelgeving te vereenvoudigen en financiële steun te bieden aan innovatieve bedrijven, wil de EU de overstap naar een koolstofneutrale economie versnellen en de Europese industrie concurrerend houden op het wereldtoneel. Dit initiatief legt de nadruk op innovatie, decarbonisatie en economische veiligheid als kernpunten voor de toekomst.

Het lectoraat heeft een aantal onderzoeksactiviteiten gepland die worden beïnvloed door Europese initiatieven. In de volgende subsecties licht ik deze initiatieven toe en bespreek ik hun impact op het onderzoek in de komende jaren.

De energietransitie in de industrie

De energietransitie vormt een onderdeel van de Europese industriële strategie. De hoge energieprijzen en de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen vragen om een verschuiving naar duurzame energiebronnen, zoals waterstof, wind- en zonne-energie [9], [24], [25]. Dit proces vereist aanzienlijke investeringen in infrastructuur, zoals elektriciteitsnetwerken, energieopslagcapaciteit en waterstofclusters [24].

Daarnaast hebben Europese bedrijven, zoals eerder genoemd, te maken met concurrentie vanuit regio's waar energiekosten lager liggen, zoals de VS en China [1]. Dit maakt het noodzakelijk om de energie-efficiëntie van de Europese industrie te verhogen en tegelijkertijd subsidies en stimuleringsmaatregelen in te zetten om de transitie te versnellen. De EU heeft via het Green Deal Industrial Plan en de Net-Zero Industry Act een geïntegreerde aanpak ontwikkeld om de industrie te ondersteunen bij het overstappen op klimaatneutrale energiebronnen en technologieën [17].

Een belangrijk onderdeel van deze transitie is de elektrificatie van industriële processen, waarbij bedrijven worden gestimuleerd om gebruik te maken van hernieuwbare energiebronnen. Daarnaast wordt ingezet op waterstof als alternatieve energiedrager, vooral in sectoren waar directe elektrificatie niet mogelijk is, zoals de zware industrie en transportsector. Het versterken van grensoverschrijdende samenwerking binnen de Europese energiemarkt en het

implementeren van smart grids moeten ervoor zorgen dat de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van duurzame energie toenemen [7].

De waterstoftransitie speelt een essentiële rol in de verduurzaming van de Europese industrie. Waterstof biedt een veelbelovende oplossing voor sectoren waar directe elektrificatie moeilijk is, zoals de staalindustrie, chemische industrie en zwaar transport. De Europese Unie heeft ambitieuze doelstellingen gesteld voor de productie van hernieuwbare waterstof, met als doel 10 miljoen ton per jaar te produceren en nog eens 10 miljoen ton te importeren tegen 2030. Om deze transitie te faciliteren, investeert de EU in de ontwikkeling van waterstofcorridors, productiecapaciteit en de nodige infrastructuur. Bovendien worden er innovatieve technologieën ontwikkeld voor de efficiënte productie, opslag en distributie van groene waterstof. Het lectoraat iDTs is ook betrokken bij het project groenvermogenNL, waardoor er een directe link ontstaat tussen het onderzoek en de praktische toepassing in de industrie [24], [26].

Voor industriële processen die hoge temperaturen vereisen (tot circa 250 graden Celsius), kunnen hogetemperatuurwarmtepompen (HT-warmtepompen) een alternatief vormen. Echter, de businesscase voor een-op-eenvervangende van aardgas door bijvoorbeeld een e-boiler is meestal niet sluitend, mede door de hoge operationele kosten en de noodzaak van een grotere aansluiting op het elektriciteitsnet, wat kan leiden tot netcongestie [27]. Warmtepompen daarentegen, zeker wanneer toegepast in combinatie met warmte-integratie, bieden een aantrekkelijker perspectief op energiebesparing en CO₂-reductie [27]. Al naargelang de vraag vanuit de industrie zich in deze richting ontwikkelt, kan het lectoraat met bijvoorbeeld het energielab van de faculteit techniek van de HvA als kennis- en experimenteelocatie hierop verder ontwikkelen.

De industriële energietransitie vormt een van de toepassingen van het lectoraat iDTs aan de HvA. Samen met het Nederlandse Smart Industry fieldlab TechPort werkt het lectoraat actief aan de energietransitie in het project Just Transition Fund (zie de beschrijving op pagina 71) [28].

Europese voorzieningszekerheid, circulaire transitie en het Europees Digitaal Product Paspoort

De Europese industrie is sterk afhankelijk van kritieke grondstoffen en zeldzame metalen die essentieel zijn voor hightechproductie en de energietransitie. De stijgende wereldwijde vraag naar deze materialen, gecombineerd met

geopolitieke spanningen, maakt voorzieningszekerheid een groeiende zorg voor Europa. De Critical Raw Materials Act [29] richt zich op het diversifiëren van de toeleveringsketens en het versterken van de interne terugwinning van secundaire kritieke grondstoffen, zodat de afhankelijkheid van externe leveranciers zoals China en Rusland vermindert. Dit beleid moet de stabiliteit en concurrentiekracht van de Europese industrie garanderen.

Om deze afhankelijkheid verder te verminderen, zet Europa ook sterk in op circulariteit. Dit betekent dat de focus verschuift naar grondstoffenhergebruik, efficiënter materiaalgebruik en product- en ketenherontwerp. Door hergebruik en recycling van materialen te stimuleren, kan de vraag naar primaire metalen afnemen, wat zowel de duurzaamheid als de leveringszekerheid van de industrie ten goede komt. Strengere regelgeving omtrent productontwerp en het gebruik van secundaire grondstoffen, draagt hieraan bij [30].

Een sleutelinstrument in deze circulaire transitie is het Europees Digitaal Product Paspoort (DPP) [31], [32]. Dit paspoort biedt inzicht in de samenstelling, herkomst en recyclebaarheid van producten, waardoor niet alleen binnen Europa duurzame productieketens zijn op te zetten, maar ook producten van buiten de EU met vervuilende en schadelijke ketens zijn te weren. Dit beleid dient dus een dubbel doel: aan de ene kant interne verduurzaming van de Europese industrie en aan de andere kant een versterking van de strategische autonomie door minder afhankelijk te zijn van niet-duurzame importstromen.

Het lectoraat iDTs werkt op dit moment samen met de onderzoekers van het lectoraat Circulair Ontwerpen en Ondernemen en Circular Systems Engineering aan de ontwikkeling van digitale product paspoorten [33], [34].

De rol van European Digital Innovation Hubs (EDIH) in de digitalisering van de industrie

Op technologisch vlak heeft Europa grotendeels de digitale revolutie, geleid door internetinnovaties en bijbehorende productiviteitswinst, gemist. Dit verklaart voor een groot deel de productiviteitskloof tussen de EU en de VS. Europa is ook zwak gepositioneerd in opkomende technologieën die toekomstige groei zullen aandrijven. Slechts vier van de vijftig grootste technologiebedrijven wereldwijd zijn van Europese afkomst, wat illustreert hoe ver Europa achterloopt. In de afgelopen vijftig jaar is er geen enkel EU-bedrijf vanuit het niets gegroeid tot een marktwaarde boven de 100 miljard euro, terwijl alle zes de

Amerikaanse bedrijven met een waardering boven de 1 biljoen euro in deze periode zijn ontstaan [1]. Dit onderstreept de structurele uitdagingen waarmee de Europese industrie kampt en de noodzaak voor diepgaande hervormingen en strategische aanpassingen om concurrentiekracht te behouden [35].

De European Digital Innovation Hubs (EDIH's) [36], [37] spelen een rol in de digitale transformatie van het Europese bedrijfsleven, met name voor het midden- en kleinbedrijf (mkb). Deze hubs fungeren als onestopshops waar bedrijven, onderzoeksinstituten en overheden samenwerken aan de ontwikkeling, toepassing en implementatie van digitale technologieën. Ze bieden ondersteuning bij de adoptie van AI, data-analyse en cybersecurity, waardoor bedrijven efficiënter en concurrerender worden.

Een belangrijk aspect van de EDIH's is hun rol bij het testen van digitale oplossingen via het 'test before invest'-principe. Dit stelt bedrijven in staat om nieuwe technologieën en innovaties te testen voordat ze grote investeringen doen, wat het risico vermindert en de kans op succesvolle implementatie vergroot [38].

EDIH's combineren regionale aanwezigheid met pan-Europees netwerkvermogen. Ze zijn strategisch gevestigd in verschillende regio's binnen de EU-lidstaten, waardoor ze dicht bij lokale bedrijven opereren. Tegelijkertijd maken ze deel uit van een breder Europees netwerk, wat kennisuitwisseling en expertisedeling mogelijk maakt. Elke EDIH specialiseert zich in bepaalde technologieën of sectoren, maar kan via het netwerk toegang bieden tot complementaire expertise van andere hubs. Bovendien kunnen EDIH's bedrijven helpen bij het vinden van partners en het betreden van nieuwe markten in andere EU-landen.

In Nederland hebben de EDIH's een sterke focus op het mkb, met name op maakbedrijven die nauw verbonden zijn met de Smart Industry-programma's. De EDIH Digital Hub Noordwest is een voorbeeld van zo'n hub die het mkb in Utrecht, Flevoland en Noord-Holland ondersteunt bij hun digitale transitie [36]. Een belangrijke partner in deze EDIH is de HvA (in het bijzonder dit lectoraat), die als werkpakketleider fungeert voor het 'test before invest'-onderdeel [36]. Dit onderstreept de rol die onderwijsinstellingen spelen in het verbinden van academische kennis met praktische toepassingen voor het bedrijfsleven. Met deze initiatieven zet Europa in op een toekomstbestendige industrie die veerkrachtig en innovatief blijft, ondanks de toenemende mondiale concurrentie en geopolitieke uitdagingen.

Twin Transition: duurzaam en digitaal gaan hand in hand

De Twin Transition verwijst naar de gelijktijdige en onderling verbonden transformatie naar een duurzame en digitale economie-industrie [39]. Dit concept staat centraal in het beleid en de strategie van de EU om de economie te moderniseren en concurrerend te houden, terwijl tegelijkertijd de klimaatdoelstellingen worden behaald. De kernpunten van de Twin Transition omvatten op het gebied van duurzaamheid het streven naar klimaatneutraliteit in 2050 [40], het bevorderen van de circulaire economie, het investeren in schone energiebronnen en het verminderen van broeikasgasemissies [39], [40].

De EU ziet een sterke synergie tussen de groene en digitale transitie. Digitale technologieën kunnen helpen bij het monitoren en optimaliseren van energieverbruik en emissies [28]. Slimme energienetwerken maken efficiënter gebruik van hernieuwbare energiebronnen mogelijk. Ook kan digitalisering leiden tot dematerialisatie (vermindering van benodigde hoeveelheid grondstoffen per product) en daarmee tot minder grondstoffenverbruik.

De Europese Commissie heeft verschillende beleidsinitiatieven gelanceerd om de Twin Transition te ondersteunen, waaronder de Europese Green Deal, die streeft naar een klimaatneutraal Europa in 2050, de digitale strategie 'Europe fit for the Digital Age', en het herstelplan NextGenerationEU, dat sterk inzet op groene en digitale investeringen. Het iDT lectoraat speelt in op de Twin Transition door laagdrempelige technologie aan te bieden ten behoeve van duurzaamheid.

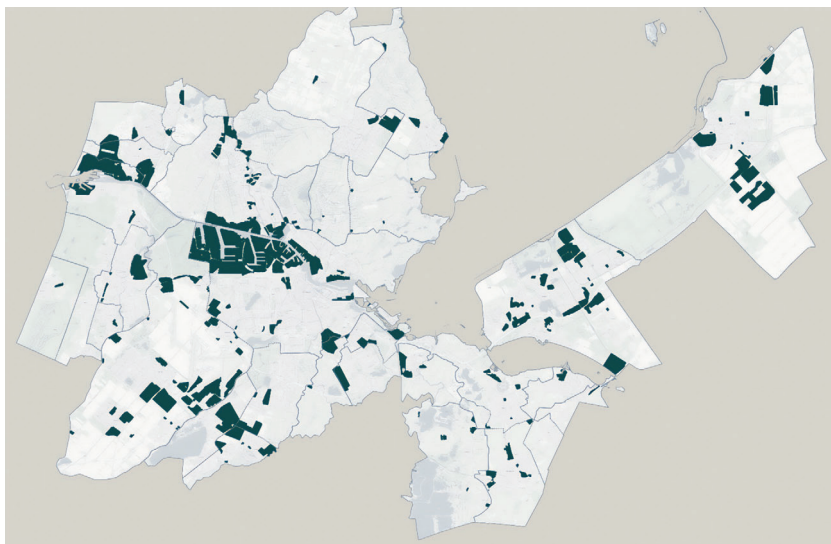
De staat van de Nederlandse industrie

De Nederlandse industrie heeft zich sinds de zestiende eeuw ontwikkeld van een agrarische basis naar een handelsmacht via de VOC, met industrialisering die pas midden negentiende eeuw op gang kwam. Deze vertraagde start verhinderde niet dat Nederland uitgroeide tot een industriële speler met textiel, scheepsbouw en later chemie als pijlers [41]. De Nederlandse industrie heeft door de eeuwen heen een transformatie ondergaan van een agrarische naar een diensteneconomie, maar blijft een pijler van welvaart en innovatie [42].

Na 1950 versnelde de verschuiving naar diensten door automatisering en globalisering. Tegen 2020 werkte nog slechts 2% van de beroepsbevolking in de landbouw en 18% in industrie, terwijl de dienstensector 80% van de banen omvat [43]. Ondanks een afnemend aandeel in het bbp – van 40% in 1960 naar 20% in 2020 – is de industrie verantwoordelijk voor ruim 80% van de goederenexport [44]. Tussen 2000 en 2023 groeide de toegevoegde waarde van de industrie met 55%, maar het bbp-aandeel daalde van 14% naar 12% [44]. De machine-industrie verdrievoudigde haar productie en werd de grootste subsector (20,8% aandeel), gevolgd door voeding (19,6%) en chemie (15,7%) [44]. Deze groei werd gedreven door kapitaalintensivering en technologische innovatie. Uit recente rapporten blijkt dat de arbeidsproductiviteit in de Nederlandse industrie sinds 2021 met slechts 9% is gestegen, ondanks investeringen in automatisering [45]. Hiermee blijft deze arbeidsproductiviteit achter ten opzichte van mondiale ontwikkelingen.

Een blik op de industrie in de regio van het lectoraat levert het volgende beeld op (Figuur 3). De maakindustrie in de Metropoolregio Amsterdam (MRA) draagt bij aan de regionale economie, met een bruto regionaal product van 196,7 miljard euro in 2024 en werkgelegenheid voor 94.000 personen in deze sector [47]. De machinebouwsector in de MRA omvat 15.000 banen in metaalverwerking en 11.000 in systemen [48], met bedrijven zoals Koninklijke Boon Edam, HGG, Tata Steel, Holland Mechanics als internationale iconen. De fieldlabs TechValley (regio Noord-Holland) [49], 3D-makerszone (regio Haarlem) en TechPort (regio IJmond) [50] ondersteunen deze bedrijven via hun werkgroepen en projecten op het gebied van digitalisering. Hierbij heeft TechValley een focus op de discrete maakindustrie met focus op AI, maintenance en circulariteit. TechPort

werkt aan groene energie (van windpark tot waterstof) en AI voor energiebesparing [28]. Beide fieldlabs zijn partner van het lectoraat.



Figuur 3. Overzicht bedrijventerreinen met industrie in Metropoolregio Amsterdam. (Bron: [46]).

Gekeken naar de regio (groot) Amsterdam is een weifelend beleid op industrie te zien vanuit de lokale overheid. Aan de ene kant zoekt Amsterdam ruimte voor woonlocaties, aan de andere kant is het lokale verdienvermogen van de stad van belang voor de economische leefbaarheid [51]. Zo ondergaat Amsterdam-Noord met de NDSM (Nederlandsche Dok en Scheepsbouw Maatschappij), van oudsher een industriële enclave, een radicale transformatie tot woongebied [52]. Het wegdrücken van industrie uit de stad Amsterdam betekent voor het lectoraat een noodzakelijke focus buiten de ring van de stad. De Port of Amsterdam is een hub voor logistiek, industrie en energie, die noodzakelijk is om de infrastructuur voor industriële energietransitie te stutten. Recentelijk heeft de Amsterdam Economic Board (AEB) drie hernieuwde regionale thema's opgesteld waaronder het thema *schone regio*, wat inzet op circulair gebruik van grondstoffen, hernieuwbare energie en een *schone industrie* [52]. Voor het lectoraat is de verbinding met de AEB op de ontwikkeling van de industriële thema's van belang.

De uitdagingen van de regionale industrie

De regionale industrie rondom het lectoraat staat voor complexe uitdagingen die zowel economische als maatschappelijke gevolgen hebben. Drie kerngebieden springen hierbij naar voren: de geleidelijke daling van de arbeidsproductiviteit, het aanhoudende personeelstekort en de obstakels rondom de energietransitie [53], [54].

De arbeidsproductiviteit in Noord-Holland wordt mede gevormd door de geografische en economische dynamiek van de regio. Terwijl Amsterdam een concentratie van hoogproductieve bedrijven in de creatieve en financiële sectoren huisvest, kampen de omliggende traditionele industriële clusters in de MRA met een groeiende kloof in productiviteit [48]. Een bijkomend probleem is dat de hoge woonkosten en concurrentie – en daarmee stijgende arbeidskosten – tussen industrie en dienstensector om technisch talent, investeringen in automatisering bij middelgrote bedrijven remmen [55].

Tegelijkertijd wordt de sector geconfronteerd met een tekort aan technisch geschoold personeel, waarbij instroom- en uitstroomproblemen samenvallen [53], [56]. Het personeelstekort in de Nederlandse industrie is uitgegroeid tot een structureel knelpunt. Werkgeversorganisatie VNO-NCW benadrukt dat de instroom van technisch geschoolden al jaren achterblijft bij de vraag, terwijl vergrijzing en uitstroom leiden tot een braindrain van praktijkkennis [57]. Ondanks campagnes zoals 'Be an Engineer' en 'Make it Work' kiezen te weinig jongeren voor technische opleidingen. De uitstroom van ervaren personeel vormt een even groot risico. In Noord-Holland, waar de gemiddelde leeftijd in de industrie rond de 51 jaar ligt, dreigt bij pensionering 40% van de kritische proceskennis verloren te gaan. Dit is vooral problematisch bij bedrijven met complexe productieprocessen. De verwachting is dat AI aan de instroomzijde kan ondersteunen door het overdragen van expliciete en impliciete kennis van de oude generatie naar de jongere.

De energietransitie stelt de industrie voor een dubbele uitdaging: aan de ene kant de omschakeling naar duurzame energiebronnen, aan de andere kant de fysieke beperkingen van het elektriciteitsnet. In Noord-Holland, waar bedrijven-terreinen zoals Westpoort en Beverwijk kampten met netcongestie, vertaalt dit zich direct naar investeringsbeslissingen [58], [59]. De netcongestie in Noord-Holland bereikte in 2023 een kritiek punt, waarbij nieuwe aansluitingen voor bedrijven in de Zaanstreek een wachttijd van 18-24 maanden kregen. Dit remt

niet alleen de elektrificatie van bestaande processen, maar ook de groei van projecten gerelateerd aan waterstof.

Zowel wetenschappelijk onderzoek als praktijkervaring benadrukken de cruciale rol van AI & Digital Twins bij deze uitdagingen. Het lectoraat heeft als ambitie om de praktijkpartners ondersteunen bij deze uitdagingen.

De impuls van het verhoogde defensiebudget op de Nederlandse maakindustrie

De recente ontwikkelingen rondom Oekraïne en de toenemende druk vanuit de VS om de NAVO-norm van 2% van het bbp aan defensie te besteden, hebben geleid tot een significante verhoging van het Nederlandse defensiebudget [60]. Met een jaarlijks budget van 24 miljard euro biedt dit aanzienlijke kansen voor de Nederlandse maakindustrie om te innoveren en groeien.

Een strategie in dit verband is het concept van ‘industrieversterkend inkopen’ [61]. Dit houdt in dat bij de aanschaf van defensiematerieel niet alleen wordt gekeken naar de directe militaire behoeften, maar ook naar de mogelijkheden om de Nederlandse industrie te versterken. Bij industrieversterkend inkopen worden tijdens het verwervingstraject, in samenwerking met kennisinstituten, mogelijkheden onderzocht om de aankoop van defensiematerieel te koppelen aan de versterking van de Nederlandse industriële basis.

De beleidsnota *Defensie Strategie voor Industrie en Innovatie 2025-2029* van Nederland legt nadruk op het verminderen van afhankelijkheid van buitenlandse leveranciers en het versterken van de binnenlandse productiecapaciteit [62]. Dit biedt kansen voor gevestigde Nederlandse bedrijven zoals Thales Nederland en Damen Shipyards, maar ook voor innovatieve start-ups en mkb-bedrijven in de maakindustrie.

De verhoogde investeringen in defensie stimuleren onderzoek en ontwikkeling in hightechsectoren zoals kunstmatige intelligentie, autonome systemen en cyberspacetechnologieën. Deze innovaties illustreren het principe van dual-use-technologieën die zowel militaire als civiele toepassingen hebben. Terwijl deze ontwikkelingen primair gericht zijn op defensiedoelinden, bieden ze ook aanzienlijke mogelijkheden voor civiele toepassingen. Dit dual-use-karakter versterkt niet alleen de defensiecapaciteiten, maar draagt ook bij aan de bredere technologische vooruitgang bij maakbedrijven en economische groei. Het biedt

de potentie om concurrentiekracht van de Nederlandse maakindustrie te versterken, zowel in de defensiesector als in civiele markten.

De ontwikkeling van producten voor defensie brengt voor maakbedrijven nieuwe uitdagingen met zich mee, zoals vraagstukken rondom cybersecurity, Internet of Things (IoT) en digitalisering. Deze ontwikkelingen vereisen niet alleen technologische aanpassingen, maar ook een herziening van processen en beveiligingsstrategieën.

Het lectoraat iDTs volgt deze ontwikkelingen op de voet door actief deel te nemen aan defensie-initiatieven (zoals het Dutch Prognostics Lab – een initiatief van de Nederlandse Defensie Academie) en samen te werken met de maakindustrie, waar de impact van deze innovaties direct voelbaar is. Door deze verbindingen te leggen, biedt het lectoraat waardevolle inzichten en ondersteuning bij het integreren van digitale technologieën in zowel militaire als civiele toepassingen.

Conclusie

In dit hoofdstuk heb ik de vraag 'is er een toekomst voor de Nederlandse industrie' vanuit mondiaal macro-economisch perspectief verkend. Mijn antwoord is *een voorzichtig ja*, er is een toekomst voor de Nederlandse industrie, maar deze toekomst is niet vanzelfsprekend. Ze vereist een gerichte inzet op digitalisering, energietransitie, grondstoffenbeleid, veiligheidsmaatregelen en interne marktdynamiek. Alleen door actie te ondernemen op deze gebieden kan de industrie succesvol blijven opereren in een internationale context. Een positieve ontwikkeling is dat recentelijk het maatschappelijk bewust zijn op het belang en behoud van Nederlandse industrie toegenomen is.

De digitalisering van productiefaciliteiten vormt een belangrijk startpunt. Door in te zetten op autonome productie kunnen bedrijven niet alleen het hoofd bieden aan personeelstekorten, maar ook de kosten verlagen en de efficiëntie verhogen. Hierbij is het van essentieel belang dat expliciete én impliciete productiekennis wordt opgenomen in de digitale systemen, zodat technologische vooruitgang direct aansluit bij de Nederlandse expertise.

Daarnaast is de energietransitie onontkoombaar. Op korte termijn moeten energiekosten verlaagd worden, bijvoorbeeld via EU-subsidies, om de

concurrentiepositie te herstellen. Op de lange termijn moet de focus liggen op duurzame oplossingen zoals elektrificatie en waterstof, die niet alleen kosteneffectief zijn, maar ook tegemoetkomen aan de klimaatdoelstellingen. Het realiseren van een energiebesparende en duurzame industrie is noodzakelijk.

Een andere sleutel tot succes is de versterking van de grondstoffenvoorziening binnen de EU. Dit vraagt om een circulaire aanpak waarin cycli grondstoffen van productie tot hergebruik binnen de EU worden gesloten, maar ook om het ontwikkelen van nieuwe bronnen binnen Europa zelf, bijvoorbeeld voor zeldzame metalen. Het digitaal productpaspoort biedt een krachtig middel om de herkomst en stroom van materialen te reguleren en de interne markt te beschermen tegen oneerlijke concurrentie vanuit het buitenland.

Behalve technologische en ecologische aspecten, speelt ook veiligheid een grote rol. Cybersecurity en een robuuste, veerkrachtige digitale infrastructuur zijn essentieel om de continuïteit van productiesystemen te waarborgen. Zonder vertrouwen in veilige processen verliest de industrie haar basis en haar innovatievermogen.

Een bloeiende interne markt binnen de EU kan bijdragen aan de versterking van de Nederlandse industrie. Dit vereist dat consumenten en bedrijven gestimuleerd worden om voor Europese groene verantwoorde producten te kiezen, bijvoorbeeld via eerlijke regelgeving die productie in lagelonenlanden ontmoedigt en nearshoren aantrekkelijk maakt.

De transitie naar deze toekomst vraagt om een gezamenlijke inspanning van overheden, industrie en kennisinstellingen. Het lectoraat Industriële Digital Twins kan hierbij een ondersteunende rol vervullen door praktische handvatten te bieden aan ondernemers en bedrijven. Het succes van de Nederlandse industrie ligt in haar vermogen om digitalisering, duurzaamheid en circulaire economie slim te combineren binnen een breedgedragen strategisch beleidskader.

Voor wat betreft de regio van het lectoraat, de Metropoolregio Amsterdam (MRA), zou deze er goed aan doen een krachtig beleid te ontwikkelen en handvatten te geven, zodat de maakindustrie onderkend, ondersteund en toekomstbestendig wordt. Dit beleid dient zich te richten op verschillende aspecten die de sector kunnen versterken en innovatie stimuleren. Centraal bij dit beleid staat een doordachte ruimtelijke ordening, waarbij bestaande

bedrijventerreinen beter worden benut, nieuwe terreinen worden ontwikkeld en belemmeringen vanwege netcongestie worden aangepakt. Regionale afstemming en een sterk ruimtelijk kader zijn hierbij essentieel. Tegelijkertijd moet het beleid de energietransitie en de transitie naar een circulaire economie faciliteren.

De conclusie is voorzichtig en noodzakelijk: er *is* een toekomst voor de Nederlandse industrie, maar die toekomst vraagt om actie. Door nu te kiezen voor innovatie en samenwerking, kan Nederland zich handhaven als een industriële speler in een steeds competitievere mondiale economie. Door praktische hulpmiddelen en inzichten aan te reiken, beoogt het lectoraat de industrie te helpen bij het navigeren door deze uitdagende periode van transformatie. Deze ondersteuning is nodig, aangezien veel bedrijven worstelen met de snelheid en complexiteit van de veranderingen waarmee ze worden geconfronteerd.

De industrie van de toekomst – van industrie 4.0 naar 5.0

Naast de economische en politieke ontwikkelingen die op dit moment plaatsvinden, ondergaat het technologische landschap momenteel een ongekend snelle ontwikkeling. Dit hoofdstuk analyseert de technologische ontwikkelingen om de andere zijde van de vraag te beantwoorden, namelijk hoe de industrie van de toekomst eruitziet, gegeven deze ontwikkelingen. Deze analyse is van belang voor het lectoraat Industriële Digital Twins, omdat zowel wetenschappelijk onderzoek als praktijkervaring de rol van AI en Digital Twins (DTs) als sleuteltechnologieën benadrukken [63]. Echter, uit onderzoek blijkt dat maakbedrijven achterblijven in de adoptie door het tekort aan kennis en ervaring met digitalisering en AI [35], [64].

In dit hoofdstuk richt ik me specifiek op digitale technologie. Het is belangrijk om te benadrukken dat ik hierbij bewust afbakenen en bepaalde systemen, zoals hogetemperatuurwarmtepompen, fotovoltaïsche installaties en (zachte) robotica, buiten beschouwing laten. Deze afbakening is gekozen omdat het lectoraat zich primair concentreert op de ontwikkeling en toepassing van DTs en de integratie van technologische systemen, in plaats van op de ontwikkeling van de technologische systemen zelf.

De combinatie van de noodzaak beschreven in het vorige hoofdstuk, en de technologische ontwikkelingen, leiden de transformatie van de industriële sector van 4.0 naar industrie 5.0 [65]. Industrie 4.0 verwijst naar de vierde industriële revolutie, gekenmerkt door de integratie van digitale technologieën in productieprocessen. Industrie 5.0 bouwt hierop voort door de nadruk te leggen op de samenwerking tussen mens en machine, met een focus op duurzaamheid en maatschappelijke impact [66]. Dit vraagt om een herijking van innovatiestrategieën van bedrijven en een stimulerend Nederlands beleid via topsectoren zoals Sleuteltechnologieën en Digitalisering [67]. De recent geïntroduceerde Kennis- en Innovatieagenda (KIA) *Digitalisering 2024-2027* onderstreept dit belang [68]. Het lectoraat sluit aan bij ontwikkelingen op Europees en Nederlands niveau door te participeren in de netwerken en initiatieven die voortvloeien uit het Missiegedreven Topsectoren- en Innovatiebeleid.

Kunstmatige Intelligentie

De afgelopen tien jaren tonen een evolutie van *rule-based* systemen en big data via data science en Machine Learning (ML) naar geavanceerde AI-toepassingen. Hoewel de terminologie is veranderd, blijven de fundamentele concepten van data-analyse, patroonherkenning en voorspellende modellen op basis van statistiek de kern vormen van deze ontwikkeling. Deze state-of-the-artanalyse schetst de belangrijkste ontwikkelingen en toepassingen van AI in de industriële context.

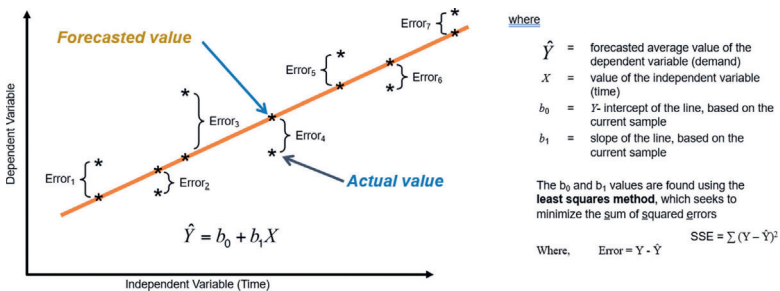
AI-modellen zijn in essentie wiskundige systemen die ontworpen zijn om patronen in data te herkennen en voorspellingen te doen. De meeste ML-modellen, zoals support vector machines (SVM), Gradient Boosting en decision trees, zijn gebaseerd op statistische principes en optimalisatiealgoritmes [69], [70]. AI-modellen, met name neurale netwerken, zijn geïnspireerd door de perceptron, een concept uit 1957 dat de basis vormt voor moderne *deep learning* [71]. De perceptron werkt als een eenvoudige kunstmatige neuron – zoals we in de biologie kennen – die inputwaarden combineert met gewichten en een activatiefunctie toepast om een output te genereren [71].

Een AI- of ML-model bestaat uit vier kerncomponenten (zie figuur 4):

1. **Data.** Het model wordt getraind op data waarbij de gewichten (de coëfficiënten van het model) worden aangepast om patronen te leren.
2. **Het model.** Dit beschrijft de werkelijkheid en verwerkt inputdata om een output te genereren. Moderne AI-modellen gebruiken vaak *multilayer* perceptrons (MLPs), waarbij meerdere lagen van neuronen samenwerken voor complexe taken zoals classificatie of regressie.
3. **De loss-functie.** Deze meet hoe goed het model presteert door de afwijking van de voorspellingen ten opzichte van de echte data te kwantificeren. Complexe loss-functies kunnen verschillende fouten (zoals type I en type II) verschillend gewen.
4. **Het optimalisatiealgoritme.** Dit algoritme berekent hoe de gewichten van het model moeten worden aangepast om de loss-functie te minimaliseren en het model te verbeteren.

Deze componenten vormen samen het fundament van AI-systemen en maken het mogelijk om uiteenlopende toepassingen te realiseren, van beeldherkenning tot spraakverwerking en voorspellende analyses.

In Figuur 4, worden deze componenten voor het eenvoudige model van lineaire regressie uitgewerkt. Bij lineaire regressie bestaat de dataset uit een afhankelijke variabele (Y) en een of meer onafhankelijke variabelen (X). Het lineaire regressiemodel wordt beschreven door de vergelijking $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon$, waarbij β_0 het intercept is, β_1, \dots, β_n de regressiecoëfficiënten zijn voor de onafhankelijke variabelen X_1, \dots, X_n , en ϵ de foutterm vertegenwoordigt. Het model benadert de wereld als een rechte lijn. Voor lineaire regressie wordt meestal de Mean Squared Error (MSE) gebruikt als loss-functie. Deze kwantificeert hoe goed het model de data voorspelt door het gemiddelde van de gekwadrateerde verschillen tussen voorspelde en werkelijke waarden te berekenen. Bij lineaire regressie wordt doorgaans de methode van de kleinste kwadraten gebruikt om de optimale waarden voor de regressiecoëfficiënten te vinden. Deze methode minimaliseert de som van de gekwadrateerde residuen (het verschil tussen voorspelde en werkelijke waarden).



Figuur 4. De componenten van een ML- of AI-model geschetst voor lineaire regressie.

Tussen 2015 en 2020 legden Convolutional Neural Networks (CNNs) de basis voor AI-predictive analytics voor beelddata, terwijl Recurrent Neural Networks (RNNs) en Long Short-Term Memory (LSTM-)netwerken dat deden voor tijdreeksen [72]. De beschikbaarheid van GPU-clusters en frameworks zoals TensorFlow [73] of PyTorch [74] democratiseerde de toegang tot deep learning, wat leidde tot een explosie van AI-toepassingen in diverse sectoren (gezondheidszorg, financiën, media). Waar AI tien jaar geleden vooral een academische aangelegenheid was, zien we de laatste vijf jaar concrete implementaties in de industrie. De opkomst van ondersteunende technologieën in de hele digitale keten – van sensor via AI naar deployment (zie figuur 5) – heeft de barrières aanzienlijk verlaagd voor bedrijven om innovatieve oplossingen daadwerkelijk te implementeren.



Figuur 5. De digitale keten – de weg van fysieke wereld naar implementatie.

Generative Adversarial Networks (GANs), geïntroduceerd in 2014 door Ian Goodfellow, markeren een belangrijke mijlpaal in de ontwikkeling van generatieve AI [75]. GANs bestaan uit twee concurrerende neurale netwerken die in competitie met elkaar tot synthetische realistische data output leiden: een generator die realistische data probeert te creëren, en een discriminator die probeert te onderscheiden tussen echte en gegenereerde data [75]. GANs hebbende toepassing van AI verbreed van voorspellen van datapunten naar genereren van (synthetische) data (zoals plaatjes, video's). Deze genererende vorm van AI heeft de maatschappelijke bekendheid van AI enorm doen toenemen [75].

In de laatste vijf jaar (2020-2025) versnelde de adoptie van transformer-architecturen en generatieve AI [76]. GPT-3 (2020) demonstreerde de schaalbaarheid van Large Language Models (LLMs), terwijl diffusionmodellen (zoals DALL-E) synthetische datageneratie van gedetailleerde plaatjes mogelijk maakten. Deze ontwikkelingen hebben de weg vrijgemaakt voor nog geavanceerdere AI-systemen, met name op het gebied van redeneren en probleemoplossing. Een recente mijlpaal is de introductie van Reasoning Models [77], die een totale verschuiving markeren in de manier waarop AI-systemen complexe taken benaderen. Reasoning Models zijn in staat om het menselijk redeneren na te bootsen door systematisch plannen en uitvoeren van complexe taken. Deze modellen zijn voor het lectoraat interessant voor het virtuele service monteur project (zie pagina 75 van het VSM project).

Een andere AI-technologie die zich parallel aan voorgenoemde modellen ontwikkeld heeft is Transfer Learning [78]. Bij Transfer Learning wordt een vooraf getraind model hergebruikt voor nieuwe, gerelateerde taken door de gewichten van de onderste laag of lagen opnieuw te trainen op basis van een nieuwe dataset. Dit maakt het mogelijk om generieke kennis (bijvoorbeeld over onderhoud) toe te passen op specifieke domeinen (bijvoorbeeld specifieke machines), waardoor krachtige oplossingen kunnen worden gecreëerd voor nicheproblemen met beperkte trainingsdata. Het resulteert in snellere ontwikkeling, lagere computationele vereisten en verbeterde

prestaties. Voor het lectoraat is Transfer Learning een belangrijk onderdeel om de resultaten van een prototype of mechanisme te schalen naar generieke modellen.

Een geavanceerde vorm van Transfer Learning is *few-shot* learning of *one-shot* learning, een techniek waarbij AI-systemen nieuwe concepten kunnen leren op basis van slechts een of enkele voorbeelden [78]. Deze aanpak heeft de afgelopen jaren een aanzienlijke ontwikkeling doorgemaakt sinds het ontstaan in de vroege jaren 2000 als oplossing voor het probleem van beperkte trainingsdata in bepaalde domeinen. Dit laatste is voor projecten gerelateerd aan industrieel onderhoud interessant omdat juist daar weinig data van beschikbaar zijn.

Een laatste belangwekkende trend in het veld is Federated Transfer Learning (FTL) [79], die Transfer Learning integreert met Federated Learning om collaboratieve modeltraining mogelijk te maken terwijl dataprivacy wordt gewaarborgd. Moderne benaderingen zoals Parameter Efficient Fine-Tuning (PEFT) spelen hierbij een belangrijke rol, met name in projecten zoals de toepassing van Large Language Models in de industrie en bij DTs [80]. PEFT maakt het mogelijk om zelfs de grootste modellen efficiënt aan te passen aan specifieke taken met beperkte rekenkracht, wat de toepasbaarheid van geavanceerde AI-technologieën in industriële contexten vergroot.

In Nederland heeft de opkomst van AI geleid tot de vorming van ecosystemen en groeifondsen rondom AI zoals de Nederlandse AI Coalitie (NLAIC nu AI4NL), Kickstart AI of ICAI-labs (Innovation Centre for Artificial Intelligence) en Ethical, Legal and Societal Aspects (ELSA) labs. Het iDT lectoraat maakt deel uit van de AI gemeenschap van de HvA via het HvA Center of Expertise for Applied AI.

In de volgende secties worden enkele AI-technologieën uitgelicht die nauw aansluiten bij het werkveld van het lectoraat. Hoewel deze technologieën een belangrijke focus vormen, is het speelveld van AI momenteel veel breder en omvat het een scala aan innovatieve toepassingen die nog volop in ontwikkeling zijn.

Physics-informed neural networks

Physics-Informed Neural Networks (PINNs) zijn een vorm van hybride AI waarin kunstmatige intelligentie en natuurkunde gecombineerd worden [81]. Hierdoor kunnen complexe processen (zoals diffusie, trilling, mechanische impuls) worden gemodelleerd en gesimuleerd op een manier die zowel nauwkeurig

als efficiënt is. In essentie combineren PINNs de flexibiliteit en het leervermogen van neurale netwerken met de grenzen en formules die voortkomen uit fysische wetten.

Het combineren van AI met fysica kan op verschillende manieren, afhankelijk van het specifieke probleem en de beschikbare informatie. Een veelgebruikte aanpak is de residuele methode, waarbij de fysische vergelijkingen, zoals de Navier-Stokes-vergelijkingen voor vloeistofdynamica [82], [83], worden toegevoegd als een extra loss-functie aan het netwerk. Het netwerk wordt dan getraind om niet alleen te passen bij de beschikbare data, maar ook om deze vergelijkingen zo goed mogelijk te respecteren.

Een andere benadering is de methode van gradiëntversterking, die niet alleen de vergelijkingen zelf, maar ook hun gradiënten meeneemt in het optimalisatie-algoritme. Dit kan de nauwkeurigheid verbeteren, vooral wanneer het fysische systeem richting kan geven aan de gewichten. Een recente innovatie is causale training, die ervoor zorgt dat het netwerk de fysische causaliteit respecteert tijdens het trainingsproces, wat belangrijk is voor het modelleren van dynamische systemen aanwezig in de industrie [84]. PINNs worden ingebed in Model Predictive Control (MPC) om complexe dynamische systemen te besturen [85], waarbij de simulatiesnelheid van PINNs een aanzienlijk voordeel biedt. Dit is potentieel interessant voor het lectoraat om te verwerken in voorspellingen doen voor aansturing van DTs [86], [87]. In de structurele mechanica worden ze ingezet voor het oplossen van golfvergelijkingen, wat helpt bij het analyseren van structurele integriteit en het voorspellen van materiaalgedrag onder belasting [83], [88], [89]. Dit wordt bijvoorbeeld gedaan voor het analyseren van vibratiedata van rollagers onder mechanische stress en deformatie. Het lectoraat experimenteert met PINNs op de data gegenereerd uit de lagertestbank (de Wentelteef, zie figuur 12) en het industriële koelsysteem (zie figuur 17).

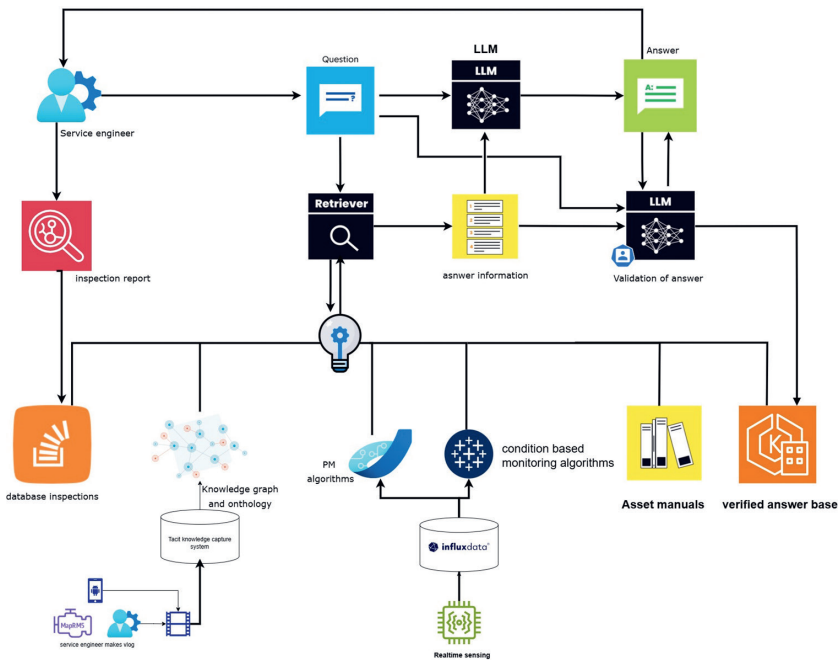
RAGS en reasoning met LLMs

De opkomst van LLMs heeft een revolutie teweeggebracht in de manier waarop we met kunstmatige intelligentie omgaan. LLMs, zoals ChatGPT van OpenAI en Gemini van Google, zijn in staat om relevante en lopende teksten te produceren die vaak nauwelijks van menselijke creaties te onderscheiden zijn.

Echter, LLMs hebben ook beperkingen. Ze kunnen onnauwkeurige of verouderde informatie produceren, wat problematisch is voor bedrijfstoepassingen

die up-to-date en betrouwbare gegevens vereisen. Daarnaast is de output niet uitlegbaar, waardoor het niet te achterhalen is waarom het model deze output geeft. Dit maakt de output onbetrouwbaar en maakt het moeilijk om verantwoordelijkheid hiervoor te dragen.

Om deze uitdaging aan te pakken, is Retrieval-Augmented Generation (RAG) ontwikkeld (zie ook figuur 6). Een RAG-systeem werkt in de basis in twee stappen: eerst haalt het relevante informatie op uit een specifieke kennisbank, en vervolgens gebruikt het een LLM om deze informatie te interpreteren en een antwoord te genereren. Naast statische informatie (zoals handleidingen) is in de industriële sector behoefte aan realtime data over de staat van een asset of component. Door *predictive analytics* op basis van realtime data mee te geven als relevante informatie, kan een industriële RAG zinvol interacteren met een servicemonteur of operator (zie p. 75 van het Virtuele service monteur project).



Figuur 6. Architectuurschets van de virtuele servicemonteur.

In september 2024 lanceerde OpenAI het o1-model, dat gebruikmaakte van reinforcement learning om stapsgewijs door problemen te redeneren. Dit type Reasoning Model is in essentie een verfijnde benaming voor een geavanceerd type large language model (LLM) dat een complexe vraagstelling ontleedt in kleinere, behapbare onderdelen [77]. In plaats van een ingewikkeld probleem in één keer te proberen op te lossen, werkt het model stapsgewijs naar een antwoord toe. Deze benadering wordt geïllustreerd door OpenAI's nieuwste modellen, zoals O1 en O3-mini. Deze 'denkende' modellen produceren eerst een uitgebreide interne gedachtegang voordat ze de gebruiker van een antwoord voorzien.

Dit model presteerde op het niveau van PhD-studenten in natuurkunde, scheikunde en biologie, en overtrof zelfs hun capaciteiten in programmeren. Begin 2025 volgde de release van DeepSeek-R1, een opensource reasoning model dat vergelijkbare prestaties leverde als OpenAI's o1, maar met aanzienlijk minder computationele vereisten. Dit model demonstreerde het potentieel van efficiëntere trainingmethoden voor AI, waarbij geavanceerde redeneer-capaciteiten werden bereikt zonder de noodzaak van enorme rekenkracht. De verwachting is dat deze reasoning models de komende jaren krachtiger en efficiënter worden, zodanig dat ze op industriële edge devices kunnen draaien direct verbonden met relevante assets.

Een recente ontwikkeling van LLM-modellen is multimodaliteit, waarbij de mogelijkheid om tekst, audio en video te verwerken, gecombineerd wordt. Modellen zoals Microsoft's Phi-3 Vision (een variant van de Phi-4-familie, Gemini van Google en GPT-4V(ision)) kunnen audio en visuele input interpreteren en integreren met prompts [90]. Deze systemen maken gebruik van *embeddings* (numerieke vertaling van de inhoud van een video of tekst) om verschillende modaliteiten te integreren. Visuele en auditieve data worden eerst omgezet in numerieke embeddings via speciale encoders. Deze embeddings worden vervolgens gecombineerd met tekstuele embeddings. De LLM kan hierdoor verbanden leggen tussen de verschillende modaliteiten, en contextuele informatie afleiden die verder gaat dan tekst alleen. Een prompt kan bijvoorbeeld een afbeelding bevatten, waarna het model een beschrijving genereert of vragen over de afbeelding beantwoordt.

In de maak- en procesindustrie wordt op dit moment volop geëxperimenteerd met vormen van taalmodellen die specifiek geënt zijn op uitdagingen van de industrie. Een specifiek voorbeeld is het uitlezen en schrijven van Piping and

Instrumentation Diagrams (P&ID's) en andere industriële tekeningen. Onderzoekers hebben methoden voorgesteld waarbij P&ID's worden omgezet in *knowledge graphs*, waardoor LLMs in staat zijn om op een intuïtievare manier informatie uit deze diagrammen te halen.

LLM-gebaseerde virtuele assistenten kunnen verbonden worden aan realtime sensordata en data-analyses van fabrieksapparatuur om vroegtijdig te communiceren richting eindgebruikers over vroegtijdig onderhoud (zie figuur 6). Door patronen te herkennen die duiden op mogelijke storingen, kunnen ze operators waarschuwen en gerichte onderhoudsadviezen geven. Het lectoraat houdt zich hiermee bezig in het project de virtuele servicemonteur (zie p. 75.)

Slimme autonome systemen en *agentic AI*

Agentic AI is een opnieuw opkomend concept voortgekomen uit hoe reasoning LLM-systemen taken zelfstandig kunnen opdelen en uitvoeren. Maar het heeft ook een link met klassieke Agent-based AI Models. AI agents hebben het vermogen om zelfstandig acties te ondernemen die consistent bijdragen aan het bereiken van een gespecificeerd doel, zonder dat hun gedrag vooraf volledig is gespecificeerd. Deze agents kunnen externe services (via APIs) voor specifieke taken inzetten, waarbij ze wachten op de resultaten en deze vervolgens integreren in de overkoepelende redentatie- en planningsstrategie. Dit proces van taakdecompositie, externe interactie, en intelligente integratie stelt AI agents in staat om complexe, meervoudige opdrachten aan te pakken met een hoge mate van zelfstandigheid.

Agentic AI heeft ook gelijkenissen met klassieke AI-concepten zoals Agent-Based Modelling (ABM) en multi-agent systems (MAS). ABM richt zich op het simuleren van interacties tussen intelligente agents binnen complexe systemen. MAS bouwen hierop voort door de interacties tussen meerdere typen agents te bestuderen. Een interessant aspect van ABM is dat systemen kunnen worden geoptimaliseerd vanuit de doelstellingen van de individuele agents, waarbij emergent gedrag ontstaat uit hun interacties. In de industrie kunnen MAS en agentic AI-concepten gebruikt worden voor zelfstandig opererende machines en productielijnen waarbij onderlinge afstemming nodig is tussen de machines.

Recente ontwikkelingen in reinforcement learning en onderhandelingsstrategieën laten MAS onderhandelen met elkaar tot een acceptabel optimum bereikt

is. Voor de industriële context zou dit kunnen betekenen dat op bedrijventerreinen productiefaciliteiten over verschillende bedrijven zo aangestuurd worden (gegeven de onderliggende belangen zoals orders, prijzen, roostering van personeel) dat er een vermindering is van eerdergenoemde energiecongestie of reststromen. De vakgroep Intelligente Autonome Systemen (IAS) van het CWI (waar het lectoraat zetelt) houdt zich bezig met decentrale energiesystemen, die toepasbaar zijn op dit vraagstuk van industriële energiecongestie.

Synthetische data en simulatie met Foundation Models

De integratie van tijdreeksanalyse in Foundation Models (FMs) biedt de mogelijkheid om in plaats van taal (waar FMs in eerste instantie voor ontwikkeld zijn) sensordata te genereren of simuleren. Foundation Models worden gekenmerkt door hun enorme schaal, pre-training op grote, ongelabelde datasets, en hun vermogen om algemene patronen toe te passen op specifieke taken via fine-tuning. De transformers in FMs gebruiken het mechanisme van *self-attention* om contextuele relaties tussen elementen in een sequentie te modelleren. Dit mechanisme leidt tot een dieper begrip van patronen in data en is zowel toepasbaar op taal (sequenties van woorden) als timeseries data (sequenties van sensormeetpunten).

Traditionele methoden voor tijdreeksanalyse, zoals autoregressieve modellen of eenvoudige neurale netwerken, hebben vaak beperkingen in het herkennen van niet-lineaire en langdurige afhankelijkheden in de data. Hierdoor zijn ze wel geschikt voor puntpredicties maar niet voor het genereren van grote hoeveelheden synthetische data of simulaties. Recent onderzoek op FMs voor timeseries toont aan dat deze modellen niet alleen geschikt zijn voor individuele datasets, maar ook kunnen worden toegepast op verschillende soorten tijdreeksen, zoals machinemetingen, onderhoudslogboeken en procesdata [91].

De adaptatie van Foundation Models naar tijdreeksdata en simulatie vereist wel aanpassingen in de architectuur omdat – in tegenstelling tot natuurlijke taal, waar tokens discrete eenheden zijn (woorden of subwoorden) – tijdreeksdata uit continue waarden bestaan met complexe temporele afhankelijkheden. Zo hebben industriële sensordata vaak multivariabele eigenschappen, waarbij verschillende sensoren simultaan gegevens produceren die onderling gecorreleerd kunnen zijn en ook nog data genereren afhankelijk van de Remaining

Useful Lifetime (RUL) van de componenten. Door specifieke datasets met faalmechanismes toe te voegen, kunnen FMs data genereren die anomalieën nabootsen die vergelijkbaar zijn met reële sensormetingen waar faalmechanismen in zitten. Denk hierbij aan een GPT model voor sensor data waar de gebruiker kan vragen “doe mij een synthetische dataset van slijtage faalmechanisme aan een tandwiel met 52 tanden van RVS wat met 350rpm draait gemeten door een vibratiesensor geplaatst op de as met een meetfrequentie van 300Hz”.

De verwachting is dat een industrieel FM op korte termijn gepubliceerd wordt omdat diverse start-ups hier al mee bezig zijn. Waar mogelijk wil het lectoraat hieraan meewerken vanuit de IAS-groep op het CWI.

TinyML en Edge AI – het snelle goedkope en veilige alternatief voor AI

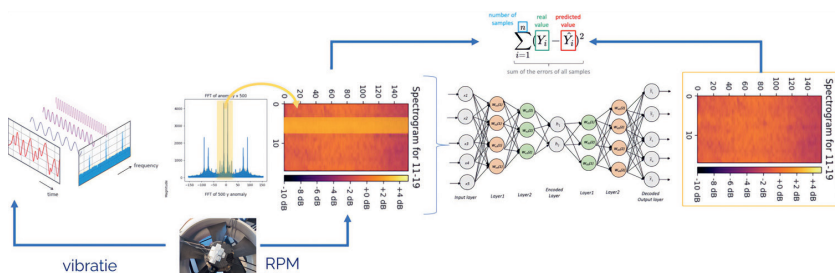
Tiny Machine Learning (TinyML) is een opkomende technologie in de wereld van kunstmatige intelligentie die steeds meer toepassing vindt in de industrie. Hoewel het concept sinds de late jaren 2010 bestaat, heeft het recentelijk aan momentum gewonnen door de opkomst van goedkopere hardware en geoptimaliseerde algoritmes. TinyML richt zich op het ontwikkelen van ultrakleine, energiezuinige ML-modellen die direct op microcontrollers en edge devices kunnen draaien.

Deze technologie bestaat uit verschillende componenten, die samen de basis vormen voor het functioneren van TinyML in industriële toepassingen. De hardwarecomponent omvat energiezuinige microcontrollers, zoals Arduino of ESP32, die speciaal zijn ontworpen om met beperkte rekenkracht en minimaal energieverbruik te werken. Deze microcontrollers zijn vaak niet groter dan een vingernagel, maar bevatten toch voldoende verwerkingskracht om complexe ML-algoritmes uit te voeren.

De softwarecomponent bestaat uit lichtgewicht ML-frameworks, zoals TensorFlow Lite of Edge Impulse, die geoptimaliseerd zijn voor gebruik op deze kleine devices. Deze frameworks bieden de nodige tools en bibliotheken om ML-modellen te ontwikkelen, te trainen in de cloud om vervolgens te implementeren op microcontrollers, zonder dat er grote hoeveelheden geheugen of rekenkracht nodig zijn. Hierbij vormen modeloptimalisatietechnieken een onderdeel van TinyML.

Zo worden technieken als kwantisatie en pruning toegepast om de grootte en complexiteit van ML-modellen te reduceren, zodat ze efficiënt kunnen draaien op devices met beperkte resources. Quantisatie houdt in dat hoog nauwkeurige getallen (zoals 32 getallen achter de komma) getallen omgezet worden naar minder nauwkeurige getallen (zoals 16 of 8 getallen achter de komma), wat de rekenkracht en het geheugengebruik aanzienlijk vermindert, zonder dat het de precisie van het model teveel aantast. Pruning (letterlijk vertaald snoeien) houdt in dat er onderdelen van het netwerk van perceptrons verwijderd worden wat het model aanzienlijk minder complex en rekenintensief maakt.

De voordelen van TinyML ten opzichte van traditionele AI-systemen zijn aanzienlijk: het is energiezuinig, biedt realtime verwerking, waarborgt privacy door data lokaal te houden, en bespaart kosten door geen dure cloudinfrastructuur te vereisen. Bovendien maakt TinyML het mogelijk om AI-toepassingen te implementeren op kleine, goedkope microcontrollers, waardoor de technologie toegankelijker wordt voor een breder scala aan toepassingen en industrieën. Deze eigenschappen maken TinyML bijzonder geschikt voor edge computing en toepassingen voor internet of things, waar beperkte rekenkracht en energieverbruik cruciale factoren zijn.



Figuur 7. Schematische weergave van TinyML device met algoritme voor anomaly detection voor trilling van ventilator.

Een voorbeeld van TinyML uitgevoerd in het lectoraat is een trillingssensor die, samen met een algoritme voor anomaly detection, op de edge draait om afwijkingen in het functioneren van machines te detecteren (figuur 7). De data van de trillingssensor worden via een Fourier-transformatie omgezet in een trillingsspectrum. Deze transformatie zet trillingen over de tijd om in een spectrum van frequenties, waardoor bepaalde patronen en afwijkingen zichtbaar worden. De verkregen data worden vervolgens gevoed aan een auto-encoder,

een type neurale netwerk dat getraind is om data in normale omstandigheden te reproduceren. Wanneer data die afwijkingen bevatten in de auto-encoder worden gestopt, zal het verschil tussen de input en de output – gemeten als de ‘mean square error’ – significant groter zijn dan bij normale data. Dit komt doordat de auto-encoder niet in staat is om de afwijkende data accuraat te reconstrueren, wat resulteert in een grotere foutmarge. Deze methode maakt het mogelijk om realtime afwijkingen te detecteren en potentiële problemen vroegtijdig te signaleren, wat bijdraagt aan een efficiënter onderhoud en een vermindering van ongeplande stilstand.

In de industrie wordt TinyML toegepast voor predictief onderhoud, kwaliteitscontrole, en energiebeheer in slimme fabrieken. TechPort, een partner van het lectoraat iDTs, is actief bezig met toepassingen van TinyML in de industrie. In september 2023 heeft TechPort verschillende use-cases afgerond bij bedrijven als Tata Steel, Hilton Foods Holland en Biscuits International, gericht op geluidslokalisatie, predictive maintenance en kwaliteitscontrole.

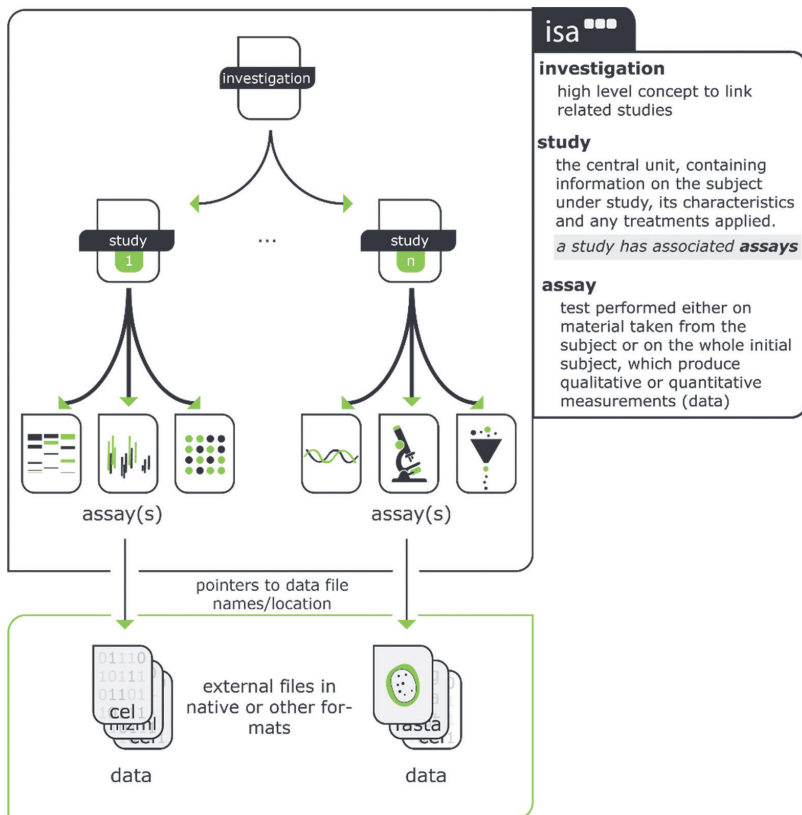
Open data sharing

De industrie staat voor een andere aanzienlijke uitdaging: een tekort aan publiek beschikbare data, met name faaldata. Dit gebrek aan gegevens belemmert de ontwikkeling van geavanceerde voorspellende onderhoudsmodellen en beperkt het vermogen van bedrijven om hun processen te optimaliseren. Juist het veilig delen van data, vooral faaldata uit fysieke emulaties zoals aanwezig in maintenance labs, is van belang voor de vooruitgang van de industrie.

Fysieke emulaties met proefopstellingen in labs bieden een unieke kans om gecontroleerde faalscenario's te creëren en te bestuderen. Deze gesimuleerde omgevingen stellen onderzoekers en ingenieurs in staat om waardevolle inzichten te verkrijgen in hoe systemen en componenten falen onder verschillende omstandigheden. Echter, de data die uit deze emulaties worden gegenereerd, blijven vaak binnen de muren van individuele organisaties, waardoor de bredere industrie niet kan profiteren van deze kennis.

Open data sharing heeft het potentieel om de industrie op verschillende manieren te helpen innoveren en efficiënter te worden. Door het delen van gegevens tussen bedrijven en sectoren zijn nieuwe inzichten te verkrijgen en samenwerkingen te stimuleren. Een belangrijk aspect hierbij is het gebruik van

gestandaardiseerde frameworks zoals ISA (Investigation, Study, Assay), dat helpt bij het structureren en beschrijven van experimentele metadata [134] (figuur 8). Dit maakt het mogelijk om gegevens uit verschillende bronnen te combineren en te analyseren, wat kan leiden tot nieuwe ontdekkingen en innovaties.



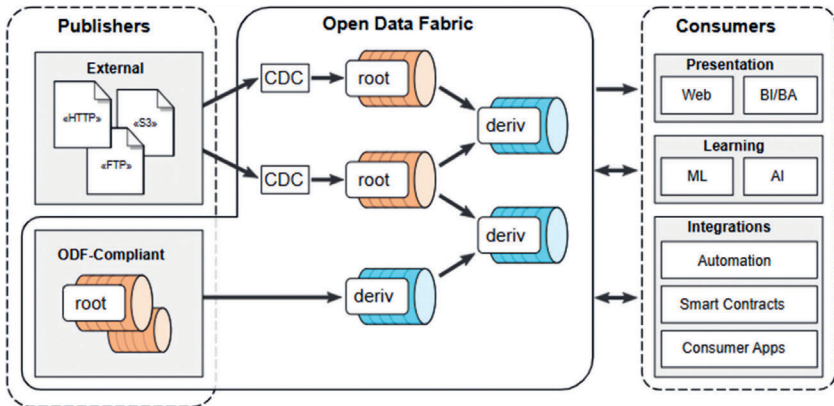
Figuur 8. Schematische weergave van het ISA datastandaardisatieprotocol [bron [134]].

Het ecosysteem ODDS (Open Data for Data Science) biedt een platform voor het veilig en efficiënt delen van industriële gegevens [108] (zie figuur 9). Door gebruik te maken van gedecentraliseerde opslag en blockchaintechnologie kunnen bedrijven samenwerken aan onderzoek en ontwikkeling zonder gevoelige informatie prijs te geven. Dit is vooral waardevol in sectoren waar intellectueel

eigendom en vertrouwelijkheid van groot belang zijn, zoals de farmaceutische industrie of de halfgeleiderindustrie.

Een ander toepassingsgebied van ODDS is het decentraal delen van (sensor)data in een digitaal productpaspoort (DPP). Het DPP vereist robuuste datasystemen om productinformatie in complexe ketens te volgen terwijl het eigenaarschap van de data onveranderd blijft. Door in een DPP het ODDS-systeem met Distributed Ledger-Technologie (DLT) en het ISA Commons-meta-dataframework te combineren, is een standaardisatie van dynamische DDP-data te bewerkstelligen waarbij de unieke hashcode van de dataset de integriteit en het eigenaarschap waarborgt.

Wetenschappelijk onderzoek toont aan dat open data sharing in de industrie kan leiden tot verbeterde besluitvorming, procesoptimalisatie en productontwikkeling. Een studie gepubliceerd in Royal Society Open Science benadrukt echter dat er nog steeds barrières zijn voor het delen van gegevens, zoals gebrek aan incentives en zorgen over privacy. Om deze uitdagingen aan te pakken, is het belangrijk om robuuste structuren van data governance te implementeren en de voordelen van data sharing duidelijk te communiceren aan alle belanghebbenden.



Figuur 9. Schematische weergave van het ecosysteem ODDS [108].

Een andere vorm van open data delen is via Federated Learning. Federated Learning biedt een veelbelovende oplossing voor industrieën die willen profiteren

van gezamenlijke data-analyse zonder directe toegang tot elkaars ruwe gegevens [4] [5]. Deze techniek stelt bedrijven in staat om machinelearningmodellen te trainen op gedistribueerde datasets door alleen de coëfficiënten (zoals $\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_3$ in de formule van Figuur 4) van de modellen te delen, terwijl de data lokaal blijven. Door het delen van modelgewichten in plaats van ruwe data kunnen bedrijven samenwerken zonder gevoelige informatie bloot te geven. Dit is bijzonder relevant voor sectoren zoals de gezondheidszorg, waar strikte privacyregels gelden, of in de productie-industrie, waar bedrijven concurrentievoordelen willen behouden. Door Federated Learning te combineren met initiatieven voor open data, kunnen industrieën de voordelen van data sharing realiseren zonder compromissen te sluiten op het gebied van vertrouwelijkheid en eigendom van gegevens.

Conclusie

De conclusie over het effect van technologie op de industrie is zowel veelbelovend als urgent. De technologische ontwikkelingen zullen wereldwijd effect hebben op de industrie in termen van productiviteit en efficiëntie, maar ook in energieverbruik. Juist de Europese industrie zou baat kunnen hebben bij een snelle adoptie van digitale technologie.

Het huidige momentum is gunstig voor deze transitie. De technologische infrastructuur is rijp voor implementatie, en er is een groeiend besef van de noodzaak tot innovatie om concurrerend te blijven op de wereldmarkt. De digitale transformatie van de industrie is geen keuze meer, maar een noodzaak voor het behoud van concurrentiekracht en duurzaamheid. [92] Het is nu aan de Europese industrie om dit momentum te benutten. Door proactief te investeren in deze technologieën en de bijbehorende menselijke vaardigheden, kan Europa zijn positie als industriële leider versterken. De technologie biedt de middelen, maar het is de visie en daadkracht van industriële leiders die zullen bepalen of Europa deze kans ten volle benut.

Echter, de weg naar succesvolle implementatie is niet zonder uitdagingen. Het vereist een benadering die verder gaat dan alleen technologische investeringen. Juist hierbij is een rol voor het praktijkgericht onderzoek aan het hbo weggelegd. Het lectoraat iDTs kan deze praktijkgerichtheid combineren met de fundamentele kennis uit het CWI.

Het lectoraat Industriële Digital Twins

Het lectoraat Industriële Digital Twins is een samenwerking tussen de Hogeschool van Amsterdam (HvA), het Centrum Wiskunde en Informatica (CWI) en industriële consortiumpartijen. Het heeft de ambitie om de komende jaren handvatten te ontwikkelen die industriële partijen ondersteunen bij het inzetten van het gedachtegoed Digital Twin (DTs) voor uitdagingen op het gebied van onderhoud en duurzame transitie en human capital. Het richt zich expliciet op de industriële variant van DTs, die een sterke focus op realtime data en simulatie heeft, daar waar DTs in andere sectoren zich meer richten op visualisatie of immersive technologies (zoals virtual of eXtended realities (VR/XR)).

Het lectoraat brengt drie bewegingen samen, resulterend in een unieke samenwerking op het gebied van Industriële Digital Twins (iDTs) in Nederland.

- (i) Het speelt in op de behoefte van industriële partners (zoals TechPort en TechValley) van het lectoraat om hun industriële processen te veranderen middels DT-technologie en artificiële intelligentie, teneinde verduurzaming en verbetering van onderhoud(s-) en productieprocessen te realiseren.
- (ii) Het lectoraat sluit aan bij een nieuwe focus van de HvA faculteit Techniek op het profileringsstema Smart Industry en Centre of Expertise Applied AI (CoE-AAI) [93].
- (iii) Het is de wens van het CWI om de recente technologische ontwikkelingen op het gebied van autonome systemen en AI uit de onderzoeksgroepen van het CWI ook in de industrie toe te passen.

Dit lectoraat voegt nieuwe praktijkgerichte kennis toe aan lopende en nieuwe projecten of samenwerkingen van het CWI. Hierbij kan het lectoraat bouwen op de state-of-the-artkennis van het CWI en deze toepassen binnen de context van een hogeschool.

Het lectoraat kent vier thema's (komende uit de analyse van de toekomst van de industrie uit hoofdstuk 1 en passend bij de technologische ontwikkelingen uit (hoofdstuk 2):

- C. Circulaire transitie – focus op digitaal product paspoort.
- E. Energiebesparing voor industriële processen – focus op meten en slim aansturen van systemen.
- O. Slim datagedreven Onderhoud voor industriële assets – focus op predictive maintenance.
- P. Personeelstekort in technische industrie – focus op (i) ondersteuning onervaren personeel en (ii) extraheren en expliciteren van kennis uit ervaren personeel.

Met deze vier thema's wil het lectoraat een antwoord vormen op de urgentie van duurzame, efficiënte én mensgerichte digitalisering in de industrie, verankerd in inzichten uit hoofdstuk 1 en 2. Deze focus laat ook zien dat er gebieden zijn waar het lectoraat zich niet op richt, zoals autonome fabrieken, robotisering of disassemblage. Ook heeft het lectoraat een expliciete focus op de industriële vragen die losstaan van stedelijke ontwikkeling, luchtvaart of bouw.

Ambities en doelstellingen

Het lectoraat iDTs heeft als visie het bevorderen van de implementatie van DT-technologie om industriële transitie te faciliteren en de concurrentiepositie van de industrie te vergroten. Dit streven sluit aan bij de groeiende behoefte aan digitalisering en innovatie in de industriële sector.

Om deze ambitie te verwezenlijken, richt het lectoraat zich op het ontwikkelen van praktisch toepasbare methoden en technologieën. Deze aanpak combineert fundamenteel onderzoek met praktijkgerichte toepassingen, waarbij fysieke werkende schaalmodellen een centrale rol spelen. Door te werken met deze schaalmodellen, zowel in labopstellingen als in het werkveld, zijn complexe industriële processen te emuleren, simuleren en optimaliseren.

Een wens van het lectoraat is de oprichting van een Smart Industry (field)lab, in samenwerking met partners uit het bedrijfsleven, waar bedrijven de kans krijgen om in een learning community actief deel te nemen aan fysieke experimenten met relevante schaalmodellen en DTs. Het maintenance lab van de HvA zou kunnen fungeren als een brug tussen theorie en praktijk, waar bedrijven hands-on ervaring kunnen opdoen met DT-technologie en direct kunnen bijdragen aan de ontwikkeling en implementatie ervan in hun eigen industriële context.

De focus van het onderzoek ligt op het ontwikkelen van methodieken, handvatten en algoritmes die specifiek zijn afgestemd op de behoeften van (mkb-) maakbedrijven. Deze praktijkgerichte benadering komt voort uit gesprekken met Smart Industry en regionale fieldlabs, waaruit blijkt dat er een sterke vraag is naar concrete, implementeerbare oplossingen. Door zich te richten op tastbare producten en toepassingen, streeft het lectoraat ernaar de drempel voor de adoptie van DT-technologie te verlagen en de industriële transitie te versnellen.

Met deze integrale aanpak wil het lectoraat de kloof tussen academisch onderzoek bij het CWI en praktische toepasbaarheid overbruggen.

De onderzoeksvraag van het lectoraat

Het lectoraat kent een praktijkgerichte en een academische vraagstelling.

Praktijkgerichte vraagstelling:

1. Op welke wijze kunnen Industriële Digital Twins bijdragen aan de transitie van de Nederlandse (maak)industrie?
2. Wat is nodig om (faal)mechanismen fysiek te emuleren in (proef)opstellingen zodat relevante informatie uit de fysieke component kan worden opgevangen?
3. Onder welke omstandigheden kan laagdrempelige technologie worden gebruikt om hoogcomplexere DT-technologie te ontwerpen en implementeren, zodat deze voor de (maak)industrie relevant is toe te passen?
4. Wat is nodig aan optimalisatie van feedbackloops om de toegevoegde waarde van DT's tot uitwerking te laten komen in de (maak)industrie?

Academische vraagstelling (AV1-3):

1. Op welke wijze kunnen kennis en algoritmes van één object (proefopstelling) gegeneraliseerd worden naar andere fabrieksoopstellingen?
2. Op welke wijze kunnen feedbackmechanismen (uit DT-simulatie resultaten) geoptimaliseerd worden voor gebruikers?
3. Hoe kan de inzet van verschillende vormen van (generatieve) AI in een Foundation Model ingezet worden voor het ontwikkelen van DT's?

De industriële Digital Twin

Om de onderzoekslijnen beter te begrijpen, wordt eerst ingegaan op de definitie en de componenten van de DTs (figuur 10). Het concept van DTs vindt zijn oorsprong in de luchtvaart- en ruimtevaartindustrie en in de auto-industrie van de jaren zeventig en tachtig, waar vroege digitale modellen werden gebruikt voor simulaties. De term 'Digital Twin' zelf werd echter pas in 2003 populair, toen Michael Grieves deze introduceerde tijdens een conferentie over productlevenscyclusbeheer. In de jaren 2010 en 2020 begon de industrie het concept uit te breiden, waarbij het niet langer beperkt bleef tot producten, maar ook hele productieprocessen (voorraadbeheersing, planning, machinebesturing) ging omvatten.

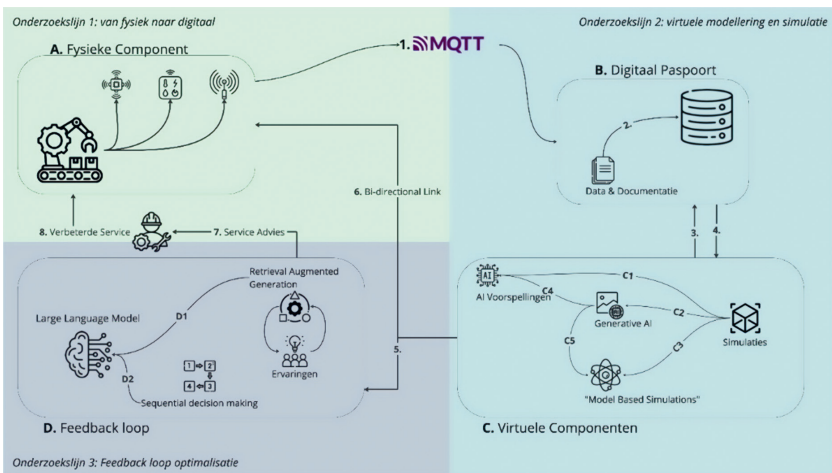
Een DT is in de basis een virtuele representatie van een fysiek object. Deze virtuele tegenhanger onderscheidt zich door zijn vermogen om zowel de micro- als macrodynamiek van het fysieke object op een realistische wijze te simuleren [94], [95]. Een kenmerk van DT is dat deze voortdurend wordt gevoed met realtime sensorgegevens van het fysieke object en vaak wordt geïntegreerd met externe databronnen. Hiermee ontstaat een digitaal paspoort [30] van een asset waarin de data uit de levensloop in opgeslagen worden.

Er zijn verschillende soorten implementaties van het DT-concept. Zo is er bij een *Digital Model* alleen een handmatige gegevensinvoer en fungeert deze als een statische referentie zonder live-updates. Een *Digital Shadow* automatiseert de gegevensoverdracht van de fysieke naar de virtuele entiteit, waardoor passief monitoren mogelijk is, maar ontbreekt het aan een simulatiemodel of een bidirectionele link die de fysieke met digitale wereld verbindt. De DT heeft een volledig geautomatiseerde bidirectionele gegevensuitwisseling, waardoor de virtuele entiteit niet alleen de fysieke tegenhanger kan simuleren, maar ook kan beïnvloeden door het resultaat van voorspellende modellen en feedbackloops. Een DT van een industriële motor kan bijvoorbeeld operationele parameters in realtime aanpassen op basis van voorspellende onderhoudsalgoritmes.

Het hart van de digitale component van de DT omvat geavanceerde simulatie- en voorspellingsmodellen. Binnen de ontwikkeling van deze component zijn er twee methodologische benaderingen: Model-Free en Model-Based (zie figuur 10C). In een Model-Free DT wordt het simulatie- en voorspellingsmodel in de digitale wereld ontwikkeld op basis van inkomende data van een specifiek fysiek object of proces. Algoritmes zetten deze data om in regels die het gedrag van

het fysieke systeem benaderen of simuleren. Het lectoraat richt zich voornamelijk op ML-gedreven ontwikkeling middels de Model-Free methode, omdat deze dynamisch is. In een Model-Based DT worden wiskundige modellen gebruikt voor simulaties (Modelica Simulink, Matlab, Comsol) [96], [97], [98], [99], [100]. Deze modellen zijn te valideren met de data uit sensoren. De grote uitdaging hierbij is dat fysieke industriële systemen op basis van hun gebruik zullen afwijken van de simulatie en daardoor vaak moeilijk wiskundig te modelleren zijn.

De Model-Freemethode biedt de potentie om dynamische, adaptieve, zelflerende DTs te ontwikkelen die om kunnen gaan met de ruis die voortkomt uit slijtage en het type gebruik, terwijl de Model-Basedmethode telkens opnieuw moet worden aangepast als het fysieke systeem verandert [101]. De statische Model-Basedmethode is wel minder afhankelijk van data, een uitdaging bij het toepassen van ML in de industrie. Het lectoraat zal zich daarom ook richten op het gebruiken van statische modellen voor het optimaliseren van de ML-modellen (Figuur 10C5).

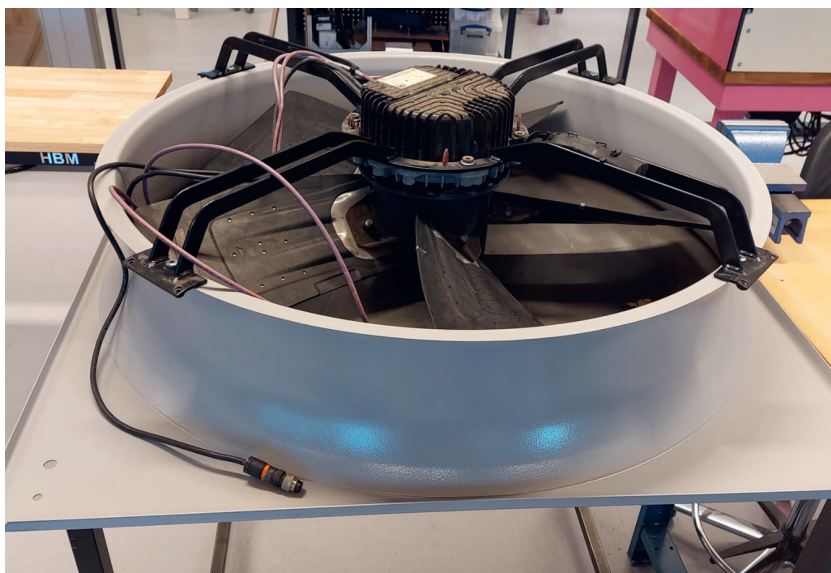


Figuur 10. Componenten van de Digital Twin (geïnspireerd op [102]).

De fysieke component van de DT wordt zowel in de wetenschappelijke literatuur als in de praktijk onvoldoende erkend, terwijl deze juist van belang is voor het genereren van accurate data voor simulaties. Het fysiek emuleren van (faal) mechanismen met proefopstellingen in een lab en het verzamelen van data

hierover biedt waardevolle mogelijkheden om voorspelmodellen te ontwikkelen (figuur 10A). Binnen het Maintenance Lab werken momenteel verschillende installaties, zoals een industriële koelinstallatie (figuur 17), toegangspoort van Boon Edam (figuur 15), condensventilator (figuur 11) en een lagertestbank (figuur 12). Deze installaties stellen het lectoraat in staat om (faal)mechanismen fysiek te emuleren en gedetailleerde data hierover te genereren.

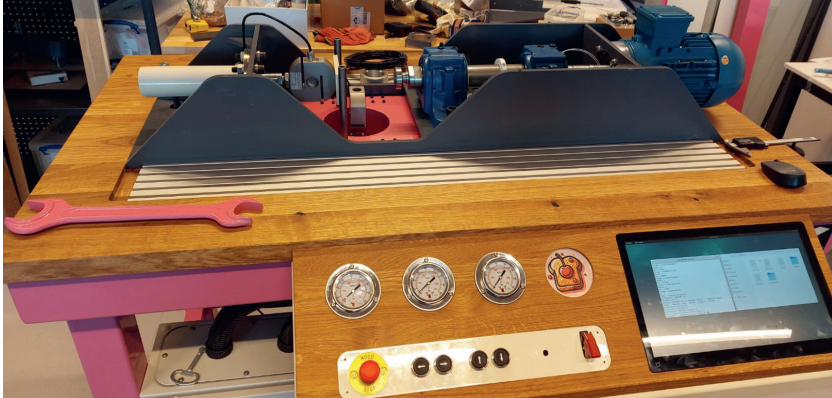
Bovendien maakt het generaliseren het mogelijk om de opgedane kennis en modellen breder toe te passen middels Transfer Learning. Hierdoor kan efficiëntie en effectiviteit in het onderhoud en beheer van vergelijkbare assets worden bereikt. Dit aspect van fysieke simulatie en datacollectie is een waardevolle aanvulling en zal bijdragen aan de verdere ontwikkeling van DTs, zowel in de praktijk als in de wetenschap.



Figuur 11. Industriële condensventilator in het Maintenance Lab ten behoeve van onderzoek naar faalmechanismen.

Een component van een DT is de feedbackloop tussen het digitale model en de fysieke wereld (figuur 10D). Deze feedback loop stelt de DT in staat om invloed uit te oefenen op het gedrag van het fysieke object, waarbij soms menselijke

interactie in de loop wordt geïntegreerd. Het optimaliseren van besluitvorming kan met reinforcement learning-algoritmes of sequential decision modeling, waardoor optimale sturingsstrategieën zijn te bepalen op basis van beschikbare data.



Figuur 12. De Wentelteef – een lagertestbank.

Wat betreft het betrekken van gebruikers, kunnen de eerder beschreven Large Language Models (LLMs) en modellen voor Retrieval Augmented Generation (RAG) worden gebruikt om interactie met gebruikers van de DTs mogelijk te maken [103]. Deze RAG-modellen zijn in staat om extra informatie, zoals handleidingen of literatuur, toe te voegen aan de analyses uit de DT. Daardoor zijn er heldere instructies te geven aan gebruikers. Hierbij worden bijvoorbeeld machine- en sensorgegevens naar begrijpelijke taal vertaald. Dat resulteert in een meer toegankelijke en gebruiksvriendelijke benadering van het monitoren en beheren van industriële assets.

Huidig gebruik van Digital Twins in de industrie

De wetenschappelijk literatuur toont aan dat DTs een steeds prominentere rol spelen in diverse industriële sectoren, waarbij aangetekend moet worden dat veel implementaties vooral *proof of concepts* zijn. Daarbij is er een verschil te zien tussen hoe fabrikanten als Siemens en Bosch aan de grote industrie DT-platformen leveren en hoe de kleinere maakindustrie hiermee werkt. Toonaangevende platformen, zoals Siemens MindSphere, Cordis en ABB

Ability, integreren tegenwoordig DTs met de PLCs waardoor technici realtime diagnostische informatie kunnen visualiseren tijdens veldinspecties. In de midden- en kleinbedrijven van de maakindustrie worden DTs ingezet voor vooral predictief onderhoud, kwaliteitscontrole en procesoptimalisatie.

In het recent afgeronde EU-project Change2Twin zijn diverse proof of concepts ontwikkeld [104]. Hoewel de exacte beschrijving van de fysieke en digitale componenten ontbreekt, geeft het overzicht wel inzicht in de staat van DTs in de beroepspraktijk. Bedrijven als Salvagnini Maschinenbau en Tekkan Plastik hebben verbeteringen gerealiseerd in machinebeschikbaarheid en productiekwaliteit [105]. Marovt en Industrie Saleri Italo uit de automotive-sector benutten DTs voor het optimaliseren van productieprocessen en het verbeteren van onderdelenontwerp. In de logistiek worden DTs gebruikt voor het verbeteren van containeroverslag en het trainen van havenarbeiders, zoals gedemonstreerd door Terminal San Giorgio en de British Columbia Maritime Employers Association. En de luchtvaartindustrie, met name bedrijven als GE of Rolls-Royce, zet DTs in voor het monitoren van vliegtuigmotoren, waardoor onderhoud geoptimaliseerd en ongeplande stilstand geminimaliseerd wordt.

Uitdagingen in het ontwikkelen en gebruik van Industriële Digital Twins

De implementatie van DTs in industriële omgevingen kent diverse technische barrières en uitdagingen die aangepakt moeten worden.

Een van de voornaamste uitdagingen is de validatie en ontwikkeling van nauwkeurige simulatiemodellen. Het creëren van virtuele representaties met hoge betrouwbaarheid, die complexe fysieke systemen precies weerspiegelen, is technisch veeleisend. Het valideren van deze modellen om te garanderen dat ze realistisch gedrag onder verschillende omstandigheden (binnen en buiten het bereik van de data) accuraat weergeven, vereist uitgebreide tests. De ontwikkeling van multifysica, multischaalmodellen die ingewikkelde industriële processen in real time kunnen simuleren, is computationeel veeleisend.

Aangezien DTs afhankelijk zijn van uitgebreide dataverzameling en -uitwisseling tussen fysieke en virtuele omgevingen, is het waarborgen van cyberveiligheid en gegevensbescherming een vereiste. De recente ontwikkeling laat zien dat industriële systemen beperkt beveiligd zijn en daardoor potentiële doelwitten worden voor cyberaanvallen. Het implementeren van robuuste veiligheidsmaatregelen

met behoud van de vereiste connectiviteit en datastromen vormt een grote technische hindernis. Hoewel dit buiten de scope van het lectoraat valt, verwacht het lectoraat samen te werken met onderzoeksgroepen die hier binnen HvA en CWI expertise in hebben.

Het ontbreken van gestandaardiseerde protocollen en interfaces voor de implementatie van DTs belemmert de interoperabiliteit tussen verschillende systemen en leveranciers. Het lectoraat verwerkt deze standaard in de ontwikkeling van devices.

Industriële Digital Twins vereisen vaak realtime of bijna realtime gegevensverwerking om tijdige inzichten en acties te kunnen bieden. Het verwerken van grote hoeveelheden sensordata, het integreren hiervan met historische informatie, en het uitvoeren van complexe simulaties in real time leveren aanzienlijke technische uitdagingen op. Dit vereist geavanceerde databeheersystemen, edge computing-capaciteiten en efficiënte algoritmes voor data-analyse en modelupdates.

Naarmate de complexiteit en schaal van industriële systemen toenemen, wordt het waarborgen van de schaalbaarheid en prestaties van DTs steeds uitdagender. Het beheren van meerdere onderling verbonden DTs in een hele productiefaciliteit of toeleveringsketen, vereist robuuste infrastructuur en efficiënte toewijzing van middelen. Het balanceren van het detailniveau in simulaties met computationele beperkingen blijft een voortdurende uitdaging.

Industriële omgevingen zijn dynamisch, met frequente veranderingen in processen, apparatuur, componenten en bedrijfsomstandigheden. Het up-to-date houden van DT-modellen in een *asset administration shell* en het nauwkeurig weerspiegelen van deze veranderingen, is een continue uitdaging. Het ontwikkelen van geautomatiseerde methoden voor modelonderhoud, kalibratie en aanpassing is voor langdurige effectiviteit.

Het lectoraat erkent deze barrières en is voornemens de partners in onderzoeksprojecten te voorzien van handvatten om deze barrières te slechten.

Onderzoekslijnen van het lectoraat

De onderzoekslijnen van het lectoraat zijn opgebouwd op basis van de ontwikkelingsstadia van DT-technologie. Deze benadering stelt het lectoraat in staat om zich te concentreren op de verschillende aspecten van DT, van fundamenteel onderzoek tot praktische toepassing.

Het lectoraat heeft de onderzoekslijnen gebaseerd op de verschillende componenten van DT-technologie. Er zijn drie hoofdlijnen geformuleerd om de veelzijdigheid van DT-gerelateerde onderzoeksthema's te weerspiegelen. Deze opdeling van onderzoekslijnen is tot stand gekomen in nauwe samenwerking met consortiumpartners, zowel de voorlopers als de volgers.

- De eerste lijn, 'Van fysiek naar digitaal', (figuur 10A) richt zich op zowel (i) de ontwikkeling van fysieke proefopstellingen voor simulaties als op (ii) digitalisering binnen bedrijven. Hierbij wordt de brug geslagen tussen de fysieke wereld en de digitale representaties ervan, met als doel het verbeteren van processen en systemen. Veel maakbedrijven bevinden zich nog in een vroeg stadium van hun digitaliseringstraject, en daarom sluiten ze het beste aan bij onderzoekslijn 1. Deze lijn richt zich op het wegnemen van belemmeringen voor digitalisering in productieprocessen, wat een belangrijke behoefte is voor maakbedrijven die hun productie willen moderniseren [106].
- De tweede lijn, 'Virtuele Modelling en Simulatie', (figuur 10B) legt de nadruk op het gebruik van data voor het ontwikkelen van algoritmes en het generaliseren van oplossingen naar specifieke fysieke Twins. De overgang van onderzoekslijn 1 naar onderzoekslijn 2, 'Virtuele Modelling en Simulatie', is een natuurlijke vervolgstap voor bedrijven die al een bepaalde mate van volwassenheid hebben bereikt.
- De derde lijn, 'Feedbackoptimalisatie', (figuur 10D) richt zich op het vinden van optimale stuurstrategieën voor machines en medewerkers. Deze onderzoekslijn onderzoekt hoe de interactie tussen machines onderling of met menselijke input kan leiden tot verbeterde besluitvorming en efficiëntere processen.

Tot slot, disseminatie van kennis is een kernactiviteit van het lectoraat. Dit is niet zozeer een onderzoekslijn, waardoor het in dit trajectplan niet uitvoerig beschreven wordt. De disseminatie vindt plaats via open *repositories* waar resultaten als producten gebruikt kunnen worden, en via kennisdeelsessies met fieldlabpartners TechPort en TechValley, en de European Digital Innovation

Hub. Ook is het mogelijk om kennis via workshops en leerpaden in modules van Leven Lang Ontwikkelen (LLO) te dissemineren.

De kracht van de opdeling in deze lijnen is drieledig:











1. Het maakt de rolverdeling tussen de HvA en het CWI helder en transparant. Voor lijn 1 en 3 is de HvA in de lead, voor lijn 2 is dat het CWI.
2. De afzonderlijke lijnen kunnen onafhankelijk van elkaar worden onderzocht, wat flexibiliteit biedt in het aanpakken van specifieke onderzoeksvragen en uitdagingen binnen elk gebied. Tegelijkertijd vormen deze een samenhangend geheel, wat bijdraagt aan een breder begrip en de ontwikkeling van DT-technologie als geheel.
3. De onderzoekslijnen zijn afgestemd op de digitale volwassenheid van de participerende bedrijven in het consortium. Dit betekent dat bedrijven kunnen deelnemen aan de lijnen die het meest relevant zijn voor hun huidige behoeften en capaciteiten, waardoor het onderzoek aansluit bij de specifieke uitdagingen van elk bedrijf.

Onderzoekslijn	Onderzoeksvraag	Leidende partij	Belangrijkste partners
Lijn 1	PV2, PV3, A1	HvA	Ijskoud, Freezerdata, CWD, ODDS
Lijn 2	A3	CWI	Syntho, SURF
Lijn 3	PV3, PV4, A2	HvA & CWI	Ijskoud, Freezerdata, Velotech
Disseminatie	P1	HvA, CWI	TechPort, TechValley

Door deze opdeling kunnen zowel de HvA als het CWI effectief bijdragen aan de ontwikkeling en implementatie van DT-technologieën, rekening houdend met de behoeften en mogelijkheden van de deelnemende bedrijven. Dit zorgt voor een flexibele en op maat gemaakte aanpak om de industrie te ondersteunen bij de digitale transitie.

Hieronder is een schema te zien van de vraag van enkele partners van het lectoraat in de relatie tot de onderzoekslijnen en thema's van het lectoraat. Te zien is dat onderhoud en energie op dit moment de meest prangende thema's zijn.

Tabel 1. Overzicht praktijkvragen van partners van het lectoraat

kanaal	Bedrijf	Use-case / vraag articulatie	Thema / Lijn
TECH VALLEY	 croonwolter&dros	Hoe kunnen we met edge devices snel en goedkoop onderhoud behoefte detecteren?	O / 2
	 FreezerData	Hoe ondersteunen we monteurs met real-time datagedreven virtuele service monteur op basis van LLMs en simulatie?	O & P / 3
	 USKOUb	Kunnen we een generiek simulatie model ontwikkelen voor koelsystemen om anomalies vroegtijdig te detecteren?	O & P / 1 + 2
	 BOON EDAM YOUR ENTRY EXPERTS	Hoe kunnen we faalmechanismen van onze poorten en deuren zowel fysiek als digitaal simuleren om maintenance beter te plannen?	O / 1 + 2
	 EKB	Kunnen we op basis van data en simulatie modellen en taalmodellen beter sturen op onderhoud?	O / 3
TECHPORT	 VELOTECH.AI	Hoe kunnen we met onze Edge AI oplossing snel en privacy preserving streamen naar een data platform?	P / 1 + 2
	 VanDerEng	Hoe kunnen we energie besparen op onze machines door ze beter af te stellen?	E / 1 + 2
	 Strohm	Welke inzichten tbv onderhoud en energie besparing (congestie) kunnen we krijgen uit onze machines en extra sensormetingen	E & O / 2
	 SYNTHO	Hoe kunnen we een generatief AI model ontwikkelen voor sensor data?	E & O / 2
		Hoe kan een digitaal productpaspoort onze business in de toekomst ondersteunen?	C / 1 + 2

Onderzoekslijn 1 – Van fysiek naar digitaal

De onderzoekslijn 'Van fysiek naar digitaal' bestaat uit twee soorten activiteiten. Ten eerste richt de onderzoekslijn zich op de ontwikkeling van fysieke (proef) opstellingen voor simulaties. Daarnaast richt deze zich ook op digitalisering binnen bedrijven. Hierbij wordt onderzocht hoe informatie optimaal kan worden verzameld en geïntegreerd vanuit de fysieke componenten van de DT. Het doel van de onderzoekslijn 'Van fysiek naar digitaal' is bedrijven handvatten te bieden waarmee zij snel en effectief gegevens kunnen verzamelen voor hun operationele assets.

Voor operationele assets is het vaak niet wenselijk of zelfs onmogelijk om componenten bewust te laten falen of opnieuw af te stellen voor energieonderzoek. Hierdoor ontbreken regelmatig cruciale data over het (faal)gedrag van deze componenten. Het lectoraat biedt daarom samen met het Maintenance Lab van de HvA (figuur 13) een oplossing: een fysieke experimentele omgeving met een dubbele functie. Enerzijds worden hier voor onderzoeksdoeleinden systemen ontwikkeld die faalmechanismen nauwkeurig kunnen nabootsen (figuur 12, 15 en 20). Anderzijds kunnen bedrijven in deze gecontroleerde omgeving hun eigen assets testen en analyseren, zonder dat dit hun operationele processen verstoort (figuur 11).

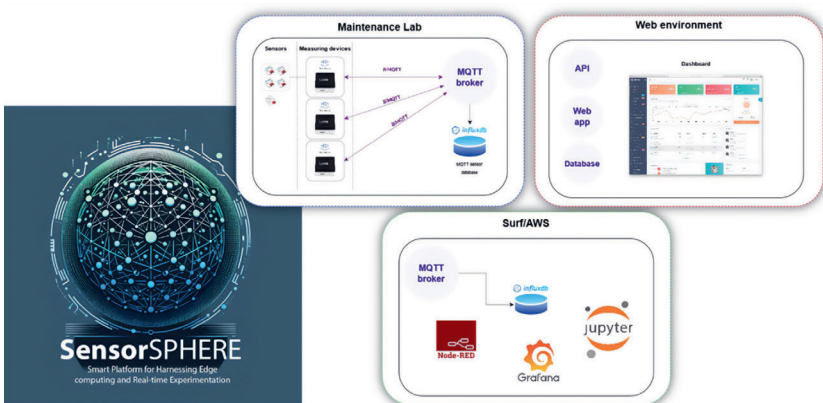


Figuur 13. Het Maintenance Lab dat ruimte biedt aan bedrijven om met hun assets te experimenteren.

Bij de tweede activiteit ligt de focus op het ontwikkelen van laagdrempelige technologieën voor het genereren van data die geschikt zijn voor maakbedrijven. Uit gesprekken met partners van TechPort over digitalisering bleek dat industriële sensoren vaak te kostbaar en overgedimensioneerd zijn. Bovendien vereisen deze sensoren aansluiting op IPC/PLC-systemen, wat vaak leidt tot vendor lock-in en hoge kosten. Dit kan de businesscase van DT-experimenten in gevaar brengen.

De HvA ontwikkelt daarom in samenwerking met TechPort en SURF een low code, opensource soft- en hardware sensorsysteem waarmee bedrijven snel en kosteneffectief kunnen experimenteren [2]. Dit product – de SensorSPHERE – stelt het lectoraat beschikbaar aan bedrijven, onderzoekers en studenten.

De kit bestaat uit een microcontroller met TinyML-functionaliteit, verschillende plug-and-play sensoren (waaronder hoogwaardige IMU-trillingsensoren, temperatuursensoren en omgevingssensoren), alsmede draadloze communicatiemodules.



Figuur 14. Schematische weergave van de SensorSPHERE.

Een recente ontwikkeling die wordt onderzocht, is het gebruik van Machine Learning op sensorboards (TinyML en edge computing). Deze technologie stelt bedrijven in staat om snel en kosteneffectief sensorgegevens te verzamelen zonder grote ICT-infrastructuur. Wel is het belangrijk te benadrukken dat de kwaliteit van de sensoren – inclusief nauwkeurigheid, kalibratie, elektromagnetische compatibiliteit en ruis – bepalend is voor de uiteindelijke kwaliteit van de DT.

Naast TinyML wordt daarom ook onderzoek gedaan naar hightechsystemen zoals fotonica en industriële sensoren. Deze worden geïntegreerd in proefopstellingen om referentiedata te genereren waarmee de TinyML-boards zijn te valideren. Deze aanpak draagt bij aan de ontwikkeling van betaalbare én betrouwbare sensortechnologie voor DTs in de maakindustrie.

Een laatste onderzoeksaspect betreft de samenwerking tussen bedrijven via open data standaarden voor gegevensuitwisseling en -opslag. Een effectieve manier om Digital Twins toegankelijk te maken voor het mkb is het gebruik van (Europese) standaarden zoals OPC-UA en ISA [107], waarin grote organisaties hebben vastgelegd hoe (meta)data voor assets gestructureerd worden.

Een belangrijk aandachtspunt is hoe kennisinstellingen en bedrijven op een veilige manier in real time gegevens kunnen delen. Het aangesloten project ODDS (Open Data for Data Science) [108] heeft als doel gegevensuitwisseling

voor alle partijen eenvoudig en betaalbaar te maken, met focus op wereldwijd hergebruik en samenwerking rond realtime schone data. Deze onderzoekslijn verkent deze uitdagingen verder.



Figuur 15. Ontwikkeling van een faalmechanisme-emulatiesysteem voor poorten van Boon Edam gemaakt voor mbo-studenten binnen het project Green Tech Campus.

Onderzoekslijn 2 – Virtuele modellering en simulatie

In deze onderzoekslijn staat de ontwikkeling van voorspel- en simulatiemodellen centraal voor een gegeven dataset (het digitale paspoort van een fysiek object, weergegeven als B in figuur 10). Deze lijn omvat verschillende typen algoritmes die nauw met elkaar samenhangen:

- (I) **Modelgebaseerde modellen** die op basis van fysisch-wiskundige principes het systeemgedrag modelleren en data genereren als output.
- (II) **Generatieve modellen** die inkomende datastromen zo nauwkeurig mogelijk synthetiseren voor analysedoeleinden.
- (III) **Foundation modellen** (AI-gedreven simulatiemodellen) die systeemdy-namiek simuleren voor specifieke condities of parameterinstellingen.
- (IV) **AI-gedreven voorspelmodellen** die voorspellingen doen op basis van inkomende data, synthetische data en simulatieoutput.

Digital Twins zijn sinds hun opkomst vooral ontwikkeld op basis van deterministische, natuurkundige simulaties – een modelgebaseerde benadering (punt i). Voor complexe industriële systemen is het echter vaak niet mogelijk om alle

afzonderlijke componenten nauwkeurig te simuleren, noch om variaties tussen systemen te modelleren. Deze beperkingen ontstaan door productievataties tijdens fabricage, levensduurgebonden veranderingen van componenten, en de focus op normale bedrijfsomstandigheden in de modellen, terwijl juist zeldzame faalmechanismen vaak de meeste toegevoegde waarde bieden. Daarnaast beschikken veel bedrijven niet over de kennis en kunde voor dergelijk geavanceerd modelleren.

De benadering van dit lectoraat is daarom om de dynamiek van fysieke assets uit de beschikbare data te halen door (AI-gedreven) algoritmes. Deze vernieuwde aanpak biedt kansen voor bedrijven die wel toegang hebben tot data, maar niet over complexe wiskundige modellen van hun assets beschikken.

De generatieve modellen (punt ii) worden ingezet om systeemdynamiek zo nauwkeurig mogelijk te synthetiseren op basis van inkomende data. Een recente ontwikkeling op dit gebied zijn Physics-Informed Neural Networks, waarbij Deep Learning wordt gecombineerd met fysica die traditioneel via differentiaalvergelijkingen wordt gemodelleerd [109-111]. Dit resulteert niet alleen in een schaduwdataset voor voorspelmodellen, maar geeft ook inzicht in systeemdynamiek door analyse van modelparameters. Door inkomende data te vergelijken met synthetische data via anomaliedetectie zijn afwijkende patronen te identificeren [112].

Met de opkomst van grootschalige generatieve modellen zoals GPT & Perplexity (taal) en DALL-E & Midjourney (beeld) is een verschuiving ontstaan naar zogenaamde Foundation Models [113, 114]. Deze modellen, getraind op enorme datasets, kunnen voor diverse taken worden afgestemd. ChatGPT bijvoorbeeld is getraind op uitgebreide tekstdata en kan worden gespecialiseerd voor specifieke toepassingen zoals wiskundige problemen [115].

Hoewel voor een scala aan toepassingen Foundation Models ontwikkeld zijn, is er nog weinig aandacht voor dit type model voor sensordata en industriële modellering. Wel wordt gewerkt aan Foundation Models (Open MatSci) in materiaalkunde en de chemische industrie [114]. Het lectoraat heeft de ambitie om in de komende jaren op basis van data uit assets een eerste stap te zetten naar een industrieel Foundation Model. De samenwerking van het consortium met CWI en Syntho als partners om dit model te ontwikkelen op de SURF-architectuur, gebruikmakend van proefopstellingen bij de HvA en industriële partners, biedt een basis om deze ambitie te verwezenlijken.

De AI-gedreven voorspelmodellen hebben als doel (faal)mechanismen te interpreteren, classificeren en voorspellen. Toepassingen variëren van het bepalen van de resterende levensduur (Remaining Useful Lifetime, RUL) of energiebesparingspotentieel van componenten, tot het identificeren van causale relaties tussen componentgedrag. Dit onderscheidt toevalligheden van daadwerkelijke onderhoudsindicatoren en ondersteunt engineers bij Failure Mode and Effect Analyses (FMEA).

Onderzoekslijn 3 – Feedbackoptimalisatie van Digital Twins

Onderzoekslijn 3 richt zich op de optimalisatie van de respons voor het systeem, de organisatie of de eindgebruiker op basis van de analyse uit onderzoekslijn 2. Bijvoorbeeld: wanneer een simulatie aangeeft dat er op korte termijn een storing zal optreden in een machine, kan een bijsturing plaatsvinden of een (spoed)reparatie worden uitgevoerd op component-, machine- of machinepark- of organisatieniveau. De bijsturing kan direct vanuit de digitale component naar de fysieke component plaatsvinden, maar ook via een eindgebruiker, bijvoorbeeld via een Large Language Model. De optimale configuratie van bijsturing is afhankelijk van de context en tijdigheid.

In deze onderzoekslijn ligt de focus op drie verschillende aspecten: (i) het geven van inzicht in causale verbanden (Root Cause Analysis) om sturing te optimaliseren [116]; (ii) toepassing van multi-objective planning en sequential decision-making [117,118] die de complexiteit van meerdere doelstellingen doorrekent [119-121]; (iii) optimalisatie van communicatie naar eindgebruikers met behulp van Retrieval Augmented Generation (RAG) die taalmodellen koppelt aan onderliggende documenten [103]. Bij deze drie aspecten wordt uitgegaan van de koppeling met de digitale simulatieomgeving (figuur 10C).

Het eerste aspect wordt onderzocht door in de digitale component de relaties tussen onderdelen in een netwerk te modelleren. Hierdoor wordt het mogelijk om de verspreiding van een anomalie in de fysieke wereld te onderzoeken. Zo kan op basis van netwerksimulaties, gebaseerd op data uit de fysieke wereld, een foutsequentiepatroon worden afgeleid [116,122]. Dit lijkt op het omgekeerde van een Root Cause Analysis, van waaruit een gevolg wordt teruggeredeneerd naar een oorzaak.

Het tweede aspect staat in relatie tot het praktisch implementeren van de feedbackloop in een organisatie. Daarbij is de vertaling van de uitkomsten uit de DT

naar betere beslissingen in de context van de organisatie van belang. Vanuit het CWI wordt er binnen de vakgroepen Intelligent and Autonomous Systems (IAS) en Stochastics onderzoek gedaan naar efficiënte manieren om complexe beslissingen te optimaliseren. Deze complexiteit vindt zijn oorsprong in het feit dat (i) de waardering van de oplossing voor verschillende stakeholders anders kan zijn, (ii) de voorkeuren voor verschillende deelaspecten van de oplossing kunnen veranderen over tijd (de oplossing van vandaag hoeft niet voor morgen te gelden), (iii) de werkelijkheid nooit voldoende data geeft om alle combinaties door te rekenen.

Een belangrijk aspect hierbij is dat het eindresultaat van de bijsturing dikwijls verschillende contrasterende aspecten behelst, zoals kosten versus baten, exploratie versus exploitatie, of efficiëntie versus robuustheid. Een kernmerk van dit multi-objective optimisation-probleem is dat er geen unieke optimale oplossing bestaat maar een hele verzameling aan mogelijkheden, elk optimaal voor een bepaalde combinatie van voorkeuren – het zogenoemde Pareto front [123,124]. Vaak is het noodzakelijk om de trade-off tussen deze verschillende doelstellingen te balanceren. Algoritmes om het gehele Pareto front efficiënt te bepalen, of minstens te benaderen, zijn daarom essentieel.

Middels een DT-simulatiemodel is het mogelijk om scenario's voor de verschillende oplossingen door te rekenen. Binnen AIS wordt daartoe onderzoek gedaan naar sequential decision-making in de context van multi-objective planning en learning. Hierbij is het van belang dat de modellen simultaan rekening houden met verschillende objectieven (bijvoorbeeld de belangen van meerdere stakeholders) [124-126], alsmede de volgorde van de beslissingsstappen (sequential decision-making [117,118]). Afhankelijk van hoe concreet het model kan worden gespecificeerd, zullen zowel planning- als learningtechnieken (bijvoorbeeld reinforcement learning) worden ingezet [127-129].

Het laatste aspect van deze onderzoekslijn betreft de interactie tussen de eindgebruikers en DTs middels taalmodellen. Sinds de opkomst van transformernetwerken (zoals ChatGPT) hebben taalmodellen een sprong in kwaliteit gemaakt. Een recente trend is de koppeling van een taalmodel aan een vectordatabase, waardoor de antwoorden uit het taalmodel worden verrijkt met domeinkennis (bijvoorbeeld installatie- of onderhoudshandleidingen van assets) [103]. Door beide componenten middels een framework als LangChain te koppelen, wordt het mogelijk om (i) contextbewustzijn en redenering toe te voegen aan de interactie, zoals taalvaardigheid en controle op relevante

domeinkennis in de interactie [130]. Binnen de onderzoeksgroep van de lector wordt naast deze interactie vanuit de gebruiker gewerkt aan algoritmes die machines zelfstandig hun (toekomstige) status kunnen uitleggen aan de gebruikers.

Het ecosysteem rondom het lectoraat

Voor het lectoraat is een consortium gevormd van drie soorten partners. Ten eerste zijn er voorlopende mkb-bedrijven die in samenwerking met het lectoraat DTs ontwikkelen. Ten tweede zijn er Smart Industry fieldlabs die via hun uitgebreide netwerk use-cases aanleveren voor lopende projecten. Tot slot zijn er technologieproviders die ondersteuning bieden voor het onderzoek.

Deze diversiteit aan partners creëert een dynamiek die vergelijkbaar is met het succesvolle vliegwiel dat bij TechValley is geïntroduceerd [49]. Binnen dit vliegwiel werken de voorlopende mkb-bedrijven samen met onderzoekers en infrastructuurproviders om *demonstrators* te ontwikkelen. Uit deze samenwerking ontstaat waardevolle kennis en ervaring die kan worden gebruikt als demonstratiemateriaal voor de volgende bedrijven.

De consortiumleden hebben connecties binnen het Smart Industry-netwerk en zijn betrokken bij lopende projecten, waardoor een open Learning Community ontstaat [131]. Het consortium zal met enige regelmaat bijeenkomen om laatste inzichten, ervaringen en ontwikkelingen met elkaar te delen. Ook zal het consortium met de HvA en het CWI de onderzoeksagenda aanscherpen en kansen voor subsidies verkennen.

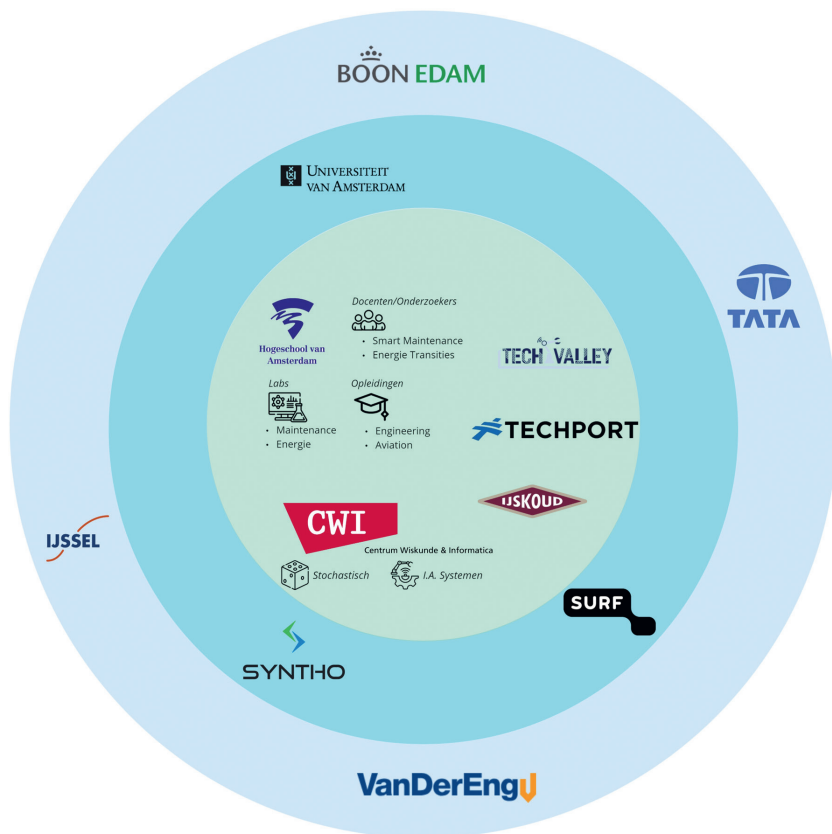
Bovendien hebben de consortiumleden de intentie uitgesproken om deel te nemen aan toekomstige subsidieprojecten. Dit getuigt van hun betrokkenheid en hun bereidheid om gezamenlijk financiering te zoeken voor nieuwe projecten en initiatieven.

Tabel 2. Overzicht consortium partners.

Consortiumpartij	Rol in het project	Expertise	Meerwaarde
Firma IJskoud	Voorloper in fysieke opstelling ontwikkeling en use-cases DT.	Koeltechniek en onderhoud.	IJskoud heeft met HvA al geïnvesteerd in het maken van een demonstrator DT in het lab.
Freezerdata	(Door)ontwikkelen dataplatform voor demonstrator DT voor koelen. Voorloper op use-cases met Taalmodellen (ChatGPT).	Ontwikkelaar van AI-gedreven sensorplatform speciaal voor koelinstallaties.	Kennis van sensoren, data science, AI, maar ook duiding van requirements voor werkvloer.
Velotech Solutions	Ondersteuning ontwikkeling en experimenten met edge AI-sensorplatform.	Assetmanagement-computer vision lidar + point clouds.	Het experimenteren met Velotech op hun platform is van belang voor kennisdeling met andere partijen.
Croon Wolter Dros	Actief experimenteren ingebrachte assets/componenten. Aanleveren data van machines en assets.	Onderhoudsstrategie, business-cases, heeft eigen AI-afdeling.	CWD heeft in strategisch plan om via digitalisering te verduurzamen (energie/circulair) en onderhoud te optimaliseren.
Tech Valley	Opstellen use-cases met partners voor maintenance. Ondersteunen partners bij uitwerken en implementeren use-cases. Ontwikkelen van een Learning Community.	Opstellen cases, innovatiemanagement, subsidietrajecten en expertise in de sector machinebouw.	TV is als fieldlab de schakel tussen bedrijven en kennisinstellingen.

Consortiumpartij	Rol in het project	Expertise	Meerwaarde
TechPort	Opstellen use-cases met partners over smart energy. Ondersteunen partners bij uitwerken en implementeren use-cases.	Open innovatie, fieldlab smart maintenance, samenwerking mbo.	Schakel tussen bedrijven en kennisinstellingen.
Syntho	Ontwikkelpartner simulatiealgoritmes.	Generatieve AI.	Syntho heeft unieke kennis op het genereren van synthetische data.
SURF	Infrastructuur ondersteunen.	High performance computing (HPC).	SURF biedt vanuit de EDIH [132] budgettenondersteuning op HPC.
DELL Nederland / Open Data for Data Science	Aanleveren tooling voor veilig delen van data via blockchain.	ODDS opendata-laag.	Toegang tot de ODDS-layer en ondersteuning.

De kenniskring in deze samenwerking werkt aan het creëren van een continu lerend en experimenterend ecosysteem, waarbij regelmatige overlegmomenten en workshops de verbindende schakels vormen tussen theoretisch onderzoek en industriële toepassingen. Om bedrijven zelfstandig te maken in digitalisering werkt het lectoraat met een stramien van *voordoen samen-doen, zelf doen*, waarbij projecten in onderzoek, stages, afstuderen overgaan in begeleiding van bedrijven. Via de werkgroepen van TechValley en de TechPort Learning Communities worden actuele onderzoeksresultaten, technologische doorbraken en nieuwe subsidies met partners besproken. Deze sessies combineren inhoudelijke presentaties met strategische agendasetting, waarbij de HvA en het CWI optreden als wetenschappelijke sparringpartner.



Figuur 16. De kenniskring van het lectoraat.

Output van het lectoraat

Wetenschappelijke publicaties vormen een belangrijk deel van de output van het lectoraat iDTs. Deze publicaties richten zich op de verschillende aspecten van DT-technologie, variërend van de technische implementatie tot aan de toepassing en effecten in de praktijk. Bij het ontwikkelen van deze output werkt het lectoraat samen met het Centrum Wiskunde en Informatica.

In lijn met de ontwikkeling binnen het hbo-onderzoek richt het lectoraat zich niet alleen op traditionele wetenschappelijke tijdschriften, maar ook op

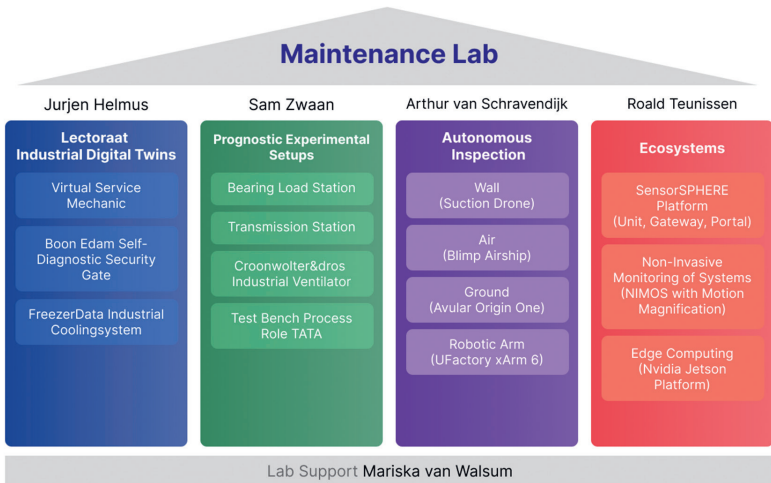
conferenties, podcasts, vakbladen en andere publicatievormen die beter aansluiten bij de doelgroep in de beroepspraktijk. Deze publicaties behandelen onderwerpen zoals beschrijving van use-cases en handvatten voor succesvolle introductie van DTs specifiek in relatie tot de industriële uitdagingen op dit moment.

Een ander belangrijk onderdeel van de output van het lectoraat iDTs betreft open hardware en open software, met name voor de eerste onderzoekslijn 'Van fysiek naar digitaal'. Het lectoraat heeft ervoor gekozen om via publieke repositories zoals Git, ODDS en Hackster oplossingen en resultaten te delen voor de componenten van DTs. Dit past in de bredere beweging naar ontwikkeling van opensourcesoftware en -hardware. Door gebruik te maken van deze publieke repositories kan het lectoraat niet alleen zijn eigen kennis delen, maar ook gebruikmaken van de *wisdom of the crowd*, waarbij communities van gebruikers wereldwijd bijdragen aan de doorontwikkeling en verbetering van de hardware en software.

Verder ontwikkelt het lectoraat als onderdeel van zijn output gedetailleerde bouwtekeningen en ontwerprichtlijnen voor fysieke emulatiesystemen van diverse use-cases. Deze systemen worden ontworpen op basis van onderzoek naar faalmechanismen in industriële processen, waarbij er bijzondere aandacht is voor de dynamische interacties tussen fysieke componenten en hun digitale tegenhangers. De ontwerpen specificeren de optimale plaatsing van sensoren op basis van gevoeligheidsanalyse. De bouwtekeningen omvatten ook gedetailleerde data-architecturen voor realtime data capture en opslag, waarbij rekening wordt gehouden met de noodzaak om enorme hoeveelheden sensordata efficiënt te verwerken en op te slaan voor latere analyse. Ten slotte bevatten de bouwtekeningen algoritmepseudocode voor de transformatie van ruwe data naar betekenisvolle inzichten. Met het beschikbaar stellen van dit type output wil het lectoraat bedrijven en andere kennisinstellingen in staat stellen om snel voor hun use-cases DTs te adopteren.

Een andere belangrijke vorm van output van het lectoraat betreft datasets (uit de fysieke opstellingen) die voldoen aan de data standaards zoals ISA. Het lectoraat werkt aan het ontwikkelen van datasets die als voorbeeld kunnen dienen voor bedrijven die met DTs aan de slag willen. Deze datasets kunnen gebruikt worden voor het trainen van algoritmes, het valideren van modellen en het testen van implementaties.

De activiteiten van het lectoraat vinden plaats in het Maintenance Lab. Het Maintenance Lab slaat een brug tussen de fysieke wereld en de digitale wereld door faalmechanismen in assets fysiek te emuleren. In het lab vinden diverse onderwijsactiviteiten in vier pilaren plaats (zie figuur 18), waarvan drie van de vier pilaren een sterke relatie hebben met het lectoraat (Ecosystemen, prognostics en Digital Twins).

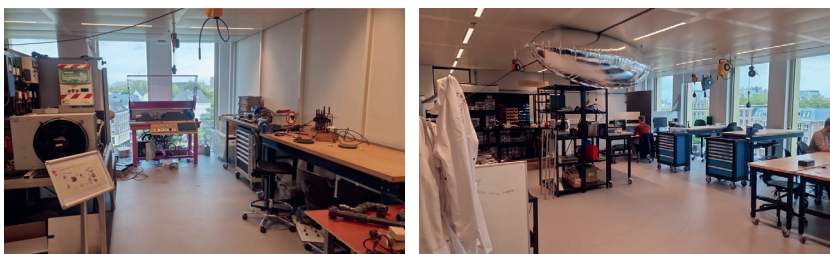


Figuur 18. Overzicht activiteiten Maintenance Lab.

De opbrengsten van het onderzoek zijn als studie- en lesmateriaal in te brengen. De ontwikkelde proefopstellingen en digitale simulaties lenen zich goed voor experimenteel onderwijs.

Het lectoraat iDTs integreert verschillende typen onderwijsactiviteiten in zijn programma. Een belangrijk aspect is het ontwikkelen van componenten van DTs, zowel in fysieke als digitale vorm, wat specifiek gericht is op de ontwikkelopleiding. Dit wordt aangevuld met twee andere benaderingen van leren. De eerste richt zich op het leren gebruiken van DTs en de bijbehorende algoritmes, waarbij studenten ervaring opdoen en kennismaken met DTs en digitalisering. Deze leervorm sluit goed aan bij de activiteiten van Leven Lang Ontwikkelen

(LLO). De tweede benadering betreft het reflectief leren innoveren met DTs, waarbij de focus ligt op bedrijven die zelf aan de slag willen gaan met deze technologie. Deze driedelige aanpak zorgt ervoor dat het lectoraat een breed spectrum aan leerbehoeften kan bedienen, variërend van praktische vaardigheden tot strategische innovatie in de context van Industriële Digital Twins.



Figuur 19. Impressie Maintenance Lab.

Doordat het onderzoek zowel een fysieke als een digitale component vereist, sluit het onderzoek aan bij verscheidene opleidingen van de HvA [9]. Zo is het onderzoek van de fysieke component relevant voor de richtingen van de opleidingen Engineering (werktuigbouwkunde, elektrotechniek en productontwikkeling) en Technische Natuurkunde en sluit de digitale component naadloos aan op software en AI-gerichte opleidingen.

Voor het fysieke aspect van onderhoud wordt binnen diverse projecten ook de samenwerking met ROC's (ROC van Amsterdam en NOVA College) verkend [133] en met de Universiteit Twente Werktuigbouwkunde. Ook heeft het lectoraat een samenwerking met de bachelors Informatica, Kunstmatige intelligentie en Informatiekunde van de UvA.

Op het moment van schrijven werken twee mbo-studenten technicus mechanica van het ROC van Amsterdam (vanuit het project Green Tech Campus) samen met een hbo-student Werktuigbouwkunde en een student Werktuigbouwkunde van de Universiteit Twente aan de ontwikkeling het Boon Edam emulatiesysteem (figuur 15). Zodra de dit systeem operationeel is, kunnen studenten ICT, Toegepaste wiskunde en AI data verzamelen en algoritmes trainen.

Tabel 3. Overzicht enkele onderwijs activiteiten gerelateerd aan het lectoraat.

Opleiding	Leerjaar	Programma	Relatie onderzoekslijn	Activiteit
Engineering TBK	2	Vak Maintenance	1 / 3	Fysiek experimenteren met assets en data. Ontwikkelen optimale maintenanceplanning.
Engineering breed	4	Integraal project	1 / 2 / 3	(Door)ontwikkelen nieuwe proefopstellingen. Ontwikkelen algoritmes. Onderzoek succesfactoren DT implementatie .
Toegepaste wiskunde	3	Advanced Machine Learning	2 / 3	(Door)ontwikkeling algoritmes op basis data van assets voor analyse en feedbackloop.
Alle opleidingen	4	Integraal project	2 / 3	(Door)ontwikkeling integratie taalmodellen (RAG).
Minor en master Applied AI	X	Afstudeeronderzoek in Maintenance Lab	2 / 3	(Door)ontwikkeling DT-systemen.
Minor Data science	3	Use-cases in Smart Industry track	1	Ontwikkelen proof of concepts voor TinyML-systemen.
UvA	4	Informatica Informatiekunde Kunstmatige intelligentie	2	Ontwikkeling algoritmes voor diverse doeleinden.
Universiteit Twente	4	Werktuigbouwkunde	1	Ontwikkeling fysieke emulatie systemen.

Opleiding	Leerjaar	Programma	Relatie onderzoekslijn	Activiteit
Roc van Amsterdam	2-4	Stage en afstuderen niveau 2-4 mechatronisch technicus, elektrotechniek	1/3	Ontwikkeling fysieke systemen met focus op aansturing en PLC.
Nova College	2-4	Projecten stage en afstuderen	1 / 2	Ontwikkeling Tata Steel bridal Roll test bank in JTF-project.

Lopende en opkomende onderzoeksprojecten

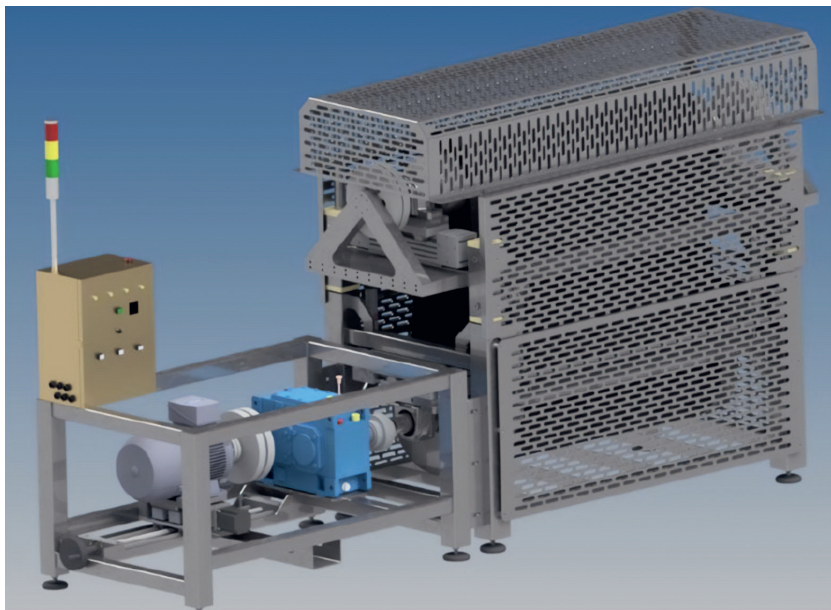
In dit hoofdstuk staat een bloemlezing van lopende en aankomende projecten

TinyML voor energiebesparing in de industrie (onderzoekslijn 1)

Het project Just Transition Fund (JTF), gehonoreerd aan TechPort, richt zich op het verduurzamen van de maakindustrie via technologieën zoals Tiny Machine Learning (TinyML) [1]. Het project beoogt energieverbruik en CO₂-uitstoot te verminderen door digitalisering en procesoptimalisatie bij met name mkb-bedrijven [28]. Het TechPort Fieldlab Edge AI voor Smart Industry (in de aanvraag Smart Energy) fungeert als proeftuin waar bedrijven, onderzoekers en studenten experimenteren met sensortechnologie en Machine Learning op microcontrollers. Een doel van het project is het toegankelijk maken van deze technologieën voor het mkb, waarbij het lectoraat Industriële Digital Twins van de Hogeschool van Amsterdam (HvA) participeert via onderzoek naar betaalbare sensoren en interoperabiliteit (zoals OPC-UA) [107].

Het JTF-project is een direct antwoord op de noodzaak van de industrie in Noord-Holland – traditioneel afhankelijk van fossiele brandstoffen – om te verduurzamen. Voor de TechPort-regio, een cluster van maakbedrijven en kennisinstellingen, vertaalt dit zich naar investeringen in energie-efficiëntie via TinyML [108]. Deze technologie maakt lokale dataverwerking en analytics op microcontrollers mogelijk. Het fieldlab biedt een infrastructuur voor testen, demonstreren en opschalen van use-cases, zoals het monitoren van energieverbruik per machine of het voorspellen van onderhoudsbehoeften, hinder en veiligheid (bij Tata Steel) [28].

Het Edge AI Fieldlab van TechPort omvat drie kerncomponenten: een Smart Sensor Lab voor het ontwikkelen van goedkope sensoren, een proefinstallatie voor simulaties van industriële processen, en een open sensor- en dataplatform voor veilige data-analyse (de eerdergenoemde SensorSPHERE) [28]. Het lectoraat werkt samen met TechPort en Nova College aan de ontwikkeling van een Bridal Roll Test Bank als demonstrator van de mogelijkheden van TinyML (zie figuur 20).



Figuur 20. Door HvA-studenten ontwikkeld concept voor een test bank voor Bridal Rolls voor Tata Steel.

Rondom TechPort hebben dertig bedrijven, waaronder mkb'ers zoals Strohm en IJssel Technologie, zich gecommitteerd aan het verlagen van hun energieverbruik [28]. TinyML speelt hierbij een cruciale rol door realtime data-analyse op apparaten zelf, zonder afhankelijkheid van clouddiensten. Voorbeelden zijn:

- Piekbelastingsmanagement. Bedrijven meten stroomverbruik per machine en voorspellen pieken om energieverstopping te voorkomen. Bij koekjesproducent Biscuits International wordt bijvoorbeeld het energieprofiel van ovens geoptimaliseerd [28].
- Predictive maintenance. Trillingssensoren op transportbandrollen bij Tata Steel detecteren vroegtijdig slippen, wat productiekwaliteit en energie-efficiëntie verbetert [28]. Etiketfabrikant VanderEng gebruikt sensornetwerken om slijtage van elektromotoren te monitoren, wat leidt tot een geschatte 15-25% energiebesparing [28].

Deze toepassingen reduceren niet alleen kosten, maar positioneren bedrijven ook als koplopers in markten waar duurzaamheid een eis is [28].

Het lectoraat van de HvA draagt bij via onderzoekslijn 1: Van fysiek naar digitaal. Vanuit deze lijn ondersteunt het lectoraat het JTF-project bij het ontwikkelen van schaalbare sensoren die compatibel zijn met bestaande industriële infrastructuur. Het doel is interoperabiliteit: standaardisatie van data-uitwisseling tussen machines van verschillende fabrikanten [2].

Noninvasive Monitoring of Systems (onderzoekslijn 1 – 2)

De industriële sector staat voor aanzienlijke uitdagingen op het gebied van efficiëntie, predictive maintenance en het minimaliseren van ongeplande stilstand. Het vroegtijdig zichtbaar maken van mogelijke plekken waar schade aan systemen kan ontstaan door trillingen, helpt bij het efficiënt inzetten van schaars personeel. In dit kader presenteert Motion Magnification (MM) zich als een innovatieve oplossing. In de academische literatuur wordt MM beschouwd als een lens waardoor we een wereld van trillingen kunnen observeren die niet waar te nemen zijn met het blote oog. MM, gebaseerd op AI-gestuurde Computer Vision, analyseert subtiele, vaak onzichtbare bewegingen in videobeelden met een buitengewone nauwkeurigheid, waardoor fysieke sensoren overbodig worden (zie QR-code voor een voorbeeldfilmje).

Het lectoraat voert, in samenwerking met partners Ijskoud, Holland Mechanics en Tempres Systems, gericht onderzoek uit naar de grenzen van deze innovatie door enerzijds de business requirements te onderzoeken en anderzijds technische ontwikkelingen door te voeren. Binnen het lectoraat wordt deze technologie ingezet om de gezondheid van systemen te meten en te voorspellen met cameraopstellingen. Deze systemen kunnen trillingen tot op pixelniveau detecteren en analyseren. Met video-vibratieanalyse is uit elke pixel het trillingsspectrum af te leiden, waardoor HD-beeld (1920 x 1080) staat voor miljoenen sensoren.



Figuur 21. Scan voor het voorbeeldfilmje.

Het primaire doel van dit project is het integreren van MM in onderhouds- en productieprocessen om zowel operationele efficiëntie te verhogen als technische storingen te voorkomen. Dit gebeurt via drie hoofddoelen: ten eerste het verminderen van productiviteitsverlies door vroegtijdige detectie van afwijkingen, ten tweede het verspreiden van de technologie naar diverse industriële sectoren, en ten derde het opzetten van vervolgonderzoek naar technologische lacunes.

MM maakt gebruik van geavanceerde AI-algoritmes om videodata te analyseren en trillingen te isoleren. In tegenstelling tot traditionele sensoren, die beperkt zijn in plaatsing en meetbereik, biedt MM een niet-invasieve oplossing die vooral nuttig is bij complexe systemen zoals koelinstallaties, halfgeleiderapparatuur en wielproductiemachines. Een concrete use-case van IJskoud richt zich bijvoorbeeld op het identificeren van defecten in pijpleidingen via trillingspatronen, terwijl Holland Mechanics MM inzet voor kwaliteitscontrole bij het spannen van fietswielen [1]. Daarnaast onderzoekt het team bij Tempres Systems de spindels waar wafers voor ASML op liggen die de oven in gaan.

Het project resulteert in een schaalbaar MM-platform dat trillingen tot op microniveau kan analyseren, wat een revolutie teweegbrengt in predictive maintenance. Daarnaast levert het project een gedetailleerd eindrapport op met richtlijnen voor implementatie en vervolgonderzoek, bijvoorbeeld naar de integratie van MM in Digital Twins. De bevindingen en ontwikkelde tools worden na afronding vrij toegankelijk gemaakt via een opensource repository, wat verdere adoptie en aanpassing door andere sectoren stimuleert.

TechPass – Digitaal product paspoort (onderzoekslijn 2 - 3)

De maakindustrie staat voor grote uitdagingen op het gebied van duurzaamheid en leveringszekerheid van grondstoffen. Om deze aan te pakken, richt de sector zich op geïntegreerde circulaire productie- en consumptiesystemen. Digitale productpaspoorten (DPP's) worden hierbij gezien als essentieel voor de transitie naar een circulaire maakindustrie. DPP's verstrekken gedetailleerde informatie over materialen, productieprocessen en de levenscyclus van producten, wat transparantie, traceerbaarheid en hergebruik bevordert.

TechValley heeft echter tijdens workshops en gesprekken met mkb'ers ervaren dat ondernemers en engineers verschillende obstakels ondervinden bij

de implementatie van DPP's. De kosten en benodigde investeringen in kennis, netwerk, organisatie en digitale infrastructuur vormen vooral voor kleinere bedrijven een uitdaging. Daarnaast bestaat er onzekerheid over hoe DPP's kunnen bijdragen aan circulaire strategieën en businessmodellen.

Om deze uitdagingen aan te pakken, is het onderzoek TECHPASS [34] opgezet met als centrale vraag: 'Hoe kunnen digitale technologieën ondernemers en engineers van wereldwijd opererende mkb'ers in de hightech maakindustrie helpen bij het implementeren van DPP's om zo te komen tot praktische, haalbare en duurzame circulaire oplossingen?' Het onderzoek wordt uitgevoerd door de HvA in samenwerking met mkb-partners EKB, EMT en HGG, en wordt ondersteund door brancheorganisaties als Koninklijke Metaalunie en FME.

Het onderzoek start met een verkenning van de huidige stand van zaken en kennishiaten rond DPP-implementatie bij mkb'ers, gevolgd door een technologieverkenning naar digitaliseringsmogelijkheden. Parallel hieraan worden circulaire businesskansen en ontwerpstrategieën onderzocht middels workshops en interviews met consortiumpartners. De inzichten uit deze activiteiten worden vervolgens geïntegreerd tot concrete adviezen over DPP-implementatie voor de betrokken mkb'ers. Het project culmineert in een innovatieagenda met generieke aanbevelingen voor praktijk, onderwijs en verder onderzoek, die wordt gedissemineerd via de betrokken brancheorganisaties. Gedurende het hele traject worden studenten ingezet voor aanvullend onderzoek en conceptuele ontwerpen, wat bijdraagt aan de praktijkgerichtheid en toepasbaarheid van de resultaten.

De verwachte resultaten van het project omvatten een omschrijving van de state-of-the-art en kennishiaten over DPP-implementatie bij mkb'ers, een technologieverkenning, case-specifiek advies voor consortiumpartners over circulaire businesskansen en DPP-implementatie, en een generieke publicatie met een innovatieagenda en aanbevelingen voor praktijk, onderwijs en verder onderzoek.

De virtuele servicemonteur (onderzoekslijn 3)

De Nederlandse industrie kampt al jaren met een toenemend personeelstekort. Veel technici en onderhoudsmonteurs bereiken binnen enkele jaren hun pensioenleeftijd, terwijl er onvoldoende instroom is van jongere technici

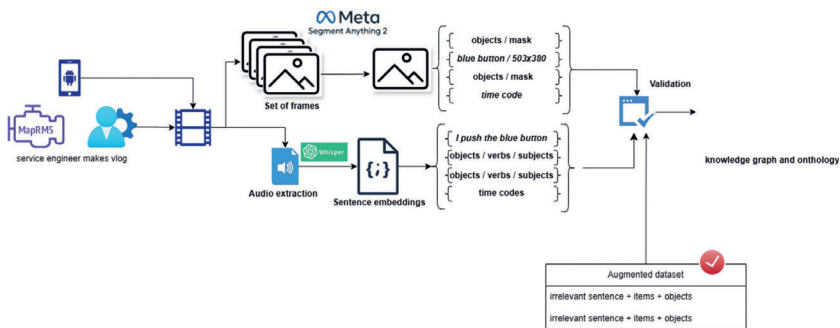
om hen te vervangen. Sleuteltechnologieën voor digitalisering, zoals generatieve AI, Large Language Models (LLMs) en Digital Twins, bieden een oplossing in de vorm van de virtuele servicemonteur. Dit systeem combineert realtime data met storingsanalyses en documentatie om monteurs te ondersteunen bij het op afstand diagnosticeren en oplossen van problemen (figuur 6).

Het proces begint wanneer een service engineer een vraag stelt. Deze vraag wordt verwerkt door een 'Retriever' die relevante informatie ophaalt uit verschillende bronnen. Deze bronnen omvatten een database met inspectierapporten, een knowledge graph en bijbehorende ontologieën, predictive maintenance (PM) algoritmes, realtime sensordata via InfluxData, condition-based monitoring algoritmes, asset manuals en een database met geverifieerde antwoorden.

De opgehaalde informatie wordt vervolgens gebruikt door een LLM om een antwoord te genereren. Dit antwoord wordt gevalideerd door een tweede LLM om de nauwkeurigheid en relevantie te waarborgen. De validatiestap is cruciaal omdat dit ervoor zorgt dat de service engineer betrouwbare en accurate informatie ontvangt, wat essentieel is voor het effectief uitvoeren van hun taken.

Dit systeem maakt ook gebruik van *tacit knowledge*, vastgelegd via een 'Tacit knowledge capture system', waardoor de ervaring en expertise van service engineers wordt benut en gedeeld. Tacit knowledge, een concept geïntroduceerd door Michael Polanyi (1966), verwijst naar kennis die moeilijk te formaliseren en over te dragen is via conventionele middelen. Door deze kennis te integreren, kan het systeem complexere problemen aanpakken en meer gepersonaliseerde oplossingen bieden. Het uiteindelijke doel is om de service engineer te voorzien van de juiste informatie op het juiste moment, waardoor de efficiëntie en effectiviteit van het onderhoudsproces worden verbeterd.

Om deze uitdaging het hoofd te bieden, werkt de HvA samen met de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) aan een innovatieve pijplijn van vlog naar informatie. Deze pijplijn maakt het mogelijk om gesprekken en vlogs van medewerkers om te zetten in relevante, gestructureerde informatie. De opkomst van multimodale LLMs – die tekst, spraak en beelden kunnen verwerken – maakt het mogelijk om deze informatie te combineren met knowledge graphs en ontologiemodellen van assets of machines.



Figuur 22. Tacit knowledge pipeline.

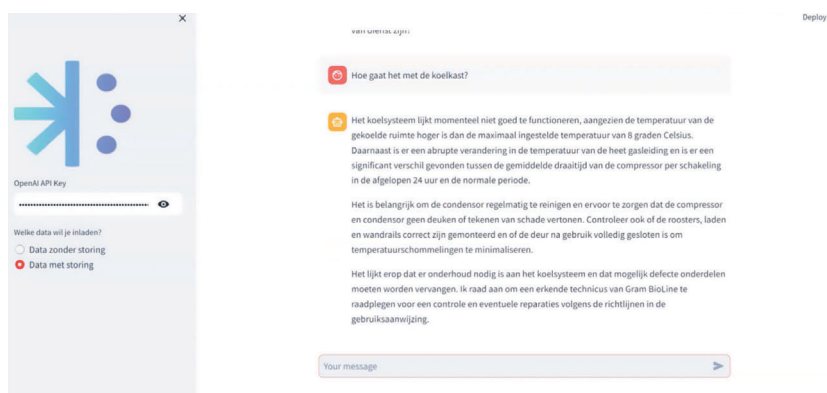
Figuur 22 illustreert een geavanceerd systeem voor het vastleggen van tacit knowledge van servicemonteurs tijdens hun werkzaamheden. Het proces begint wanneer een monteur een video-opname maakt van een handeling, zoals het bedienen van industriële apparatuur. Deze multimodale data worden vervolgens verwerkt via verschillende AI-componenten. De videofragmenten worden geanalyseerd door bijvoorbeeld Meta Segment Anything 2, dat objecten identificeert en classificeert in categorieën zoals drukknoppen, 3D-objecten en interfaces. Parallel hieraan extraheert het systeem audio en verwerkt dit tot sentiment embeddings. Het combineert vervolgens deze modaliteiten om handelingen te structureren in een syntactisch formaat (objecten, werkwoorden, onderwerpen), gekoppeld aan tijdcodes. Na validatie tegen een bestaande knowledge graph en ontologie wordt deze informatie opgeslagen in een augmented dataset met gestructureerde zinnen en objectrelaties.

Zodra de pijplijn van vlog naar gestructureerde informatie volledig is ontwikkeld, zal deze in de praktijk worden getest. Dit gebeurt met oud-medewerkers van een aantal deelnemende bedrijven, zodat de effectiviteit en gebruiksvriendelijkheid van het systeem zijn te valideren. Het doel is om een duurzame methode te ontwikkelen waarmee bedrijven impliciete kennis niet alleen kunnen behouden, maar ook kunnen gebruiken als trainingsmateriaal voor nieuwe generaties technici.

Zoals Polanyi stelde: 'We kunnen meer weten dan we kunnen vertellen.' In industriële contexten is deze impliciete kennis bijzonder waardevol, aangezien ervaren monteurs vaak intuïtief weten hoe ze complexe problemen moeten diagnosticeren en oplossen.

Sinds de presentatie van de virtuele servicemonteur hebben al meer dan acht bedrijven via het Fieldlab Smart Industry TechValley interesse getoond in het cocreëren van een vervolgvversie. HVA-studenten gaan op basis van de huidige versie een specifieke implementatie ontwikkelen die aansluit bij de use-cases van deze bedrijven.

Daarnaast wordt binnen de European Digital Innovation Hub Noordwest Nederland onderzocht hoe dit concept is om te vormen tot een schaalbaar en betaalbaar platform dat inzetbaar is in een breed scala aan mkb-maakbedrijven. Dit houdt in dat er wordt gekeken naar de overgang van een generieke virtuele monteur naar specifieke versies die aangepast zijn aan de behoeften van verschillende bedrijven.



Figuur 23. Voorbeeld van de digitale servicemonteur testopstelling zoals ontwikkeld voor Freezerdata.

LOCOMOTIVE Low-cost sensor platform for condition monitoring and predictive maintenance (onderzoekslijn 1 – 2)

Het project Low-cost sensor platform for condition monitoring and predictive maintenance (LOCOMOTIVE) heeft als doel een innovatieve, kostenefficiënte oplossing te ontwikkelen voor condition monitoring (CBM) en predictive maintenance (PdM) in de industrie. Dit is van groot belang, gezien de groeiende behoefte aan geavanceerde onderhoudsstrategieën om kostbare uitval en downtime te voorkomen.

Roterende mechanische componenten, zoals lagers en tandwielen, zijn gevoelig voor defecten door continue belasting en slijtage, wat leidt tot verhoogde trillingen, efficiëntieverlies en uiteindelijk storingen. Industrieën wereldwijd worden geconfronteerd met uitdagingen op het gebied van de betrouwbaarheid van apparatuur, wat de operationele efficiëntie beïnvloedt. Traditionele onderhoudsmethoden, zoals reactief onderhoud (reageren op storingen nadat ze zich voordoen) en preventief onderhoud (gebaseerd op geplande routines), leiden tot hoge kosten voor onderhoud en hoge inzet van personeel.

Datagedreven benaderingen zoals CBM en PdM bieden veelbelovende alternatieven voor traditionele onderhoudsmethoden. CBM analyseert de actuele conditie van apparatuur, terwijl PdM voorspelt wanneer onderhoud nodig is. Hoewel deze technieken storingen kunnen voorkomen en efficiëntie verbeteren, worden ze beperkt geïmplementeerd door een gebrek aan hoogwaardige, realtime, storingsdata. De hoge kosten van het onderhoud van betrouwbare sensorsystemen en de behoefte aan geavanceerde infrastructuur en analysetools vormen ook significante barrières, zeker voor mkb-maakbedrijven. Bovendien ontbreekt het veel bedrijven aan de expertise die nodig is om deze technieken effectief te implementeren. Hierdoor worden CBM en PdM voornamelijk toegepast op kritieke assets, waarbij de kosten van uitval het hoogst zijn.

Een van de grootste uitdagingen voor het midden- en kleinbedrijf is de beschikbaarheid en kwaliteit van storingsdata. Om dit te overkomen, worden in dit project door componentenspecifieke testbanken hoogwaardige storingsdata gegenereerd door componenten (zoals lagers of tandwielen) onder gecontroleerde omstandigheden tot falen te laten draaien. Deze 'ground truth'-data kunnen de nauwkeurigheid van voorspellende algoritmes verbeteren en worden gebruikt om sensorsystemen met een lagere betrouwbaarheid te kalibreren. Door dit te doen, kan PdM een levensvatbare optie worden voor minder kritieke componenten en voor het mkb een kosteneffectieve oplossing bieden.

Recente initiatieven in Nederland, zoals het project Joint Transition Fund (JTF) bij TechPort en de European Digital Innovation Hubs Noordwest Nederland (EDIH's), richten zich op het ondersteunen van het mkb bij de adoptie van betaalbare sensortechnologieën en oplossingen als Tiny Machine Learning (TinyML) voor onderhoud. Deze projecten ontwikkelen goedkope sensor boards en maken gebruik van edge computing, waardoor bedrijven de prestaties van

apparatuur kunnen monitoren zonder de hoge infrastructuurkosten die doorgaans met PdM gepaard gaan.

Hoewel deze inspanningen veelbelovende resultaten hebben laten zien, blijft een belangrijke beperking bestaan: het gebrek aan hoogwaardige data om deze low-cost sensoren te kalibreren.

Het project LOCOMOTIVE beoogt deze uitdagingen aan te pakken door een opensource resource-efficiënt PdM-platform te ontwikkelen voor twee specifieke gevallen: lagers en planetaire tandwielkasten. Het project zal gebruikmaken van high-fidelity data van testbanken om voorspellende algoritmes te verbeteren, waardoor nauwkeuriger en betrouwbaardere voorspellingen mogelijk zijn. Daarnaast zal het project zich richten op de integratie van low-cost sensor-systemen met deze algoritmes om betaalbare, schaalbare oplossingen voor het mkb te bieden. Door low-cost sensoren te kalibreren met hoogwaardige data, tracht dit project PdM naar een breder scala aan componenten en industrieën te brengen, waardoor uiteindelijk de betrouwbaarheid van apparatuur wordt verbeterd en de operationele kosten voor bedrijven van alle groottes worden verlaagd.

Woord van dank

Aan het einde van deze lectorale rede wil ik graag een moment nemen om mijn dank uit te spreken aan allen die hebben bijgedragen aan de totstandkoming van dit lectoraat Industriële Digital Twins en aan mijn persoonlijke en professionele ontwikkeling die hieraan vooraf is gegaan.

Allereerst gaat mijn oprechte dank uit naar het College van Bestuur van de Hogeschool van Amsterdam en in het bijzonder naar Esther Ras, decaan van de faculteit Techniek. Jullie vertrouwen in mij en de vrijheid die jullie mij hebben gegeven om de banden met de industrie aan te halen binnen het profilerings-thema Smart Industry, hebben uiteindelijk geleid tot dit lectoraat. Esther, je rol als sparringpartner is van onschatbare waarde geweest. Ook Erwin, dank voor al je steun voor mijn ontwikkeling gedurende jouw loopbaan bij de HvA.

Dit lectoraat biedt mij de kans om een betekenisvolle bijdrage te leveren aan de ontwikkeling van een toekomstbestendige industrie in onze regio en aan het maatschappelijk verdienvermogen. Ik kijk ernaar uit om de samenwerking tussen het lectoraat en de andere lectoraten van de faculteit techniek en de opleidingen van de faculteit Techniek, en waar zinvol ook daarbuiten, te versterken. In het bijzonder verheug ik mij erop de relatie tussen het engineeringonderwijs en het onderzoek te verstevigen, onderzoek vanuit de sterktes van het onderwijs.

De realisatie van dit lectoraat zou niet mogelijk zijn geweest zonder de steun van het Centrum Wiskunde & Informatica (CWI). Mijn dank gaat uit naar Ton de Kok, Eric Pauwels, Rob van der Mei en Tim Baarslag voor het inzien van de waarde van dit lectoraat voor het CWI. Eric, jouw visie om van *toy systems* naar *real-world* onderzoek te gaan, beschouw ik als een moedige keuze van het CWI. Ik kijk ernaar uit om de vakgroep Intelligente Autonome Systemen zo goed mogelijk met de praktijk te verbinden.

Ik ben ook enorm dankbaar voor de steun van het Centre of Expertise Applied AI. Nanda Piersma en Geert Wissink, jullie hebben je echt ingezet om dit lectoraat van de grond te krijgen. Zonder jullie enthousiasme en doorzettingsvermogen had ik hier vandaag niet gestaan. Jullie hebben je hard gemaakt voor dit lectoraat.

Deze rede zou niet tot stand zijn gekomen zonder het team van het Maintenance Lab. Roald, Arthur, Nathan, Erwin, Sam, Lisanne en Mariska, Daniel, jullie hebben van het Maintenance lab binnen het JMH een broedplaats gemaakt voor innovatie en verbinding met partners. Het is voor mij een tweede thuis waar we samen hebben bewezen van meerwaarde te zijn voor de industrie met onze fysieke opstellingen voor Digital Twins. Ook dank ik de studenten die hebben meegeholpen, in het bijzonder Sten, Bart, Bram, Lenka, Maxime en Wessel, voor jullie waardevolle feedback.

Mijn dank gaat ook uit naar onze partners uit het bedrijfsleven die het lectoraat steunen, en naar de Smart Industry Fieldlabs TechPort en TechValley die betrokken zijn. Gerik, Theo, André, Sandra en José, ik ben ervan overtuigd dat we de komende jaren iets bijzonders gaan neerzetten voor de industrie. De samenwerking met IJskoud/Freezerdata, waarin we AI voor koelsystemen fysiek hebben gemaakt, heeft bij andere partijen zoveel deuren geopend. José, Henk en Daniel, jullie bijdrage hierin is van onschatbare waarde geweest.

Tot slot wil ik mijn echte thuisbasis bedanken. Madelief jouw onvoorwaardelijke steun voor al mijn projecten is de fundering waarop ik kan bouwen. Madelief, jouw aanwezigheid in mijn leven is essentieel; je houdt me scherp en geeft me de vrijheid om te groeien. Eele en lanthe jullie zijn de volgende generatie waar wij de wereld weer aan overdragen. En natuurlijk mijn ouders, familie en vrienden, jullie humor, steun en soms ook relativerende opmerkingen houden mij met beide benen op de grond.

Met dit lectoraat begint een nieuwe fase in mijn professionele leven. Ik kijk ernaar uit om samen met jullie allen de uitdagingen aan te gaan die voor ons liggen en de kansen te benutten die de toekomst ons biedt in het fascinerende veld van Industriële Digital Twins.

Verantwoording van het gebruik van generatieve AI in de lectorale rede

In het kader van transparantie en wetenschappelijke integriteit verantwoord ik hieronder hoe generatieve AI is ingezet tijdens het schrijven van deze lectorale rede. Deze verantwoording licht het creatieproces toe, de rol van de auteur, en de interactie met technologieën zoals Large Language Models, Retrieval Augmented Generation en Reasoning Models (voornamelijk Perplexity.ai). Hierbij heb ik gestreefd naar een heldere scheiding tussen menselijke regie en geautomatiseerde ondersteuning.

Methodologische keuzes en auteurschap

Ik heb gedurende het schrijfproces actief regie gevoerd over zowel de inhoudelijke richting als de technische uitvoering. Generatieve AI is ingezet als hulpmiddel om bepaalde tekstuele elementen te genereren, maar de uiteindelijke verantwoordelijkheid voor de argumentatie, structuur en wetenschappelijke onderbouwing berust volledig bij de auteur.

Prompts en documentatie

De prompts die zijn gebruikt om generatieve AI aan te sturen, zijn door de auteur zelf ontworpen. Deze prompts baseerden zich op specifieke onderzoeksvragen en thema's die voortvloeien uit de context van Industriële Digital Twins, zoals beschreven in de aangeleverde wetenschappelijke literatuur. Ook heeft de auteur projectvoorstellen die zonder LLMs door de auteur zelf geschreven zijn (bijvoorbeeld het trajectvoorstel), gebruikt om het LLM te voeden. De documentatie is eveneens door de auteur geselecteerd en aangeleverd. Hierbij heeft de auteur kritisch gekeken naar de betrouwbaarheid en relevantie van bronnen, in lijn met academische standaarden. De prompts zijn publiek beschikbaar op <https://www.perplexity.ai/collections/lectorale-rede-industriele-dig-Gazp1nN6R9OnYQfbv0CHPg>.

Finetunen van resultaten

De door AI gegenereerde output is door mij gefinetuned om te voldoen aan wetenschappelijke eisen. Dit omvatte het herschrijven van zinnen, het aanpassen van terminologie en het versterken van logische verbanden. Zo werden bijvoorbeeld concepten als Industry 5.0 en de macro-economische trends expliciet gekoppeld aan casussen uit de praktijk, zoals beschreven in de bronnen. Dit finetunen gebeurde iteratief, waarbij ik de AI-resultaten telkens evalueerde op helderheid en nauwkeurigheid.

Rol van het taalmodel

Het gebruikte taalmodel fungeerde primair als een tekstgenerator op basis van aangeleverde snippets en prompts. Ik voorzag het model van zinnen die de hoofdlijnen van paragrafen vormden, projectvoorstellen, fragmenten uit wetenschappelijke literatuur, beleidsteksten, en technische rapporten, waarna het model deze informatie synthetiseerde tot coherente alinea's.

Een voorbeeld is dat ik prompts aan het LLM gaf over het gebruik van Digital Twins in de industrie met focus op de uitdagingen in de Nederlandse industrie, gecombineerd met onderliggende documenten over deze uitdagingen en wetenschappelijke literatuur over Digital Twins in de industrie. Zo gaf ik gedurende elke stap in het proces richting aan het LLM op welke wijze te reageren.

Structurering en editing

Hoewel het taalmodel hielp bij het verbinden van ideeën en het genereren van vloeiende zinsstructuren, lag de structuur van het document in handen van de auteur. Dit omvatte het indelen van hoofdstukken en secties, het prioriteren van onderwerpen en het waarborgen van een logische opbouw.

Bibliografie

- [1] 'The future of European competitiveness _ A competitiveness strategy for Europe.pdf.
- [2] 'Tweede diepgaande evaluatie van voor Europa strategische domeinen', Europese Commissie. Geraadpleegd: 18 februari 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy/second-depth-review-strategic-areas-europes-interests_nl.
- [3] 'Expansion of BRICS'.
- [4] 'Europa en Trumps handelstarieven: Impact en bescherming', Atradius. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://atradius.nl/kennisbank/blog/europa-en-trumps-handelstarieven>.
- [5] 'VS dreigen met 25% importtarief: wat betekent dit voor Nederlandse ondernemers?', WijBusinessNieuws. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://wbn.nl/wijbusinessnieuws/vs-importtarief-van-25-bedreigt-nederlandse-export/>.
- [6] 'Geopolitiek en Europa', Nederland in 2040. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://toekomstnederland2040.nl/verwachtingen/geopolitiek-en-europa/>.
- [7] "'Europese samenwerking cruciaal om geopolitieke risico's het hoofd te bieden'", DNB. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.dnb.nl/algemeen-nieuws/nieuws-2024/europese-samenwerking-cruciaal-om-geopolitieke-risico-s-het-hoofd-te-bieden/>.
- [8] 'De Chinese economie zit vast: Europa vreest de gevolgen', NOS. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://nos.nl/nieuwsuur/artikel/2514205-de-chinese-economie-zit-vast-europa-vreest-de-gevolgen>.
- [9] 'Beperk afhankelijkheid Europa van Chinese windenergie en elektrolyzers', tno.nl/nl. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.tno.nl/nl/newsroom/insights/2024/05/afhankelijkheid-windenergie-europa-china/>.
- [10] 'Special: We moeten praten over China...', ABN AMRO Bank. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.abnamro.com/research/nl/onze-research/visie-op-2025-special-we-moeten-praten-over-china>.
- [11] 'Zeldzame aardmetalen in Zweden: willen we meer mijnbouw in Europa?', Universiteit Leiden. Geraadpleegd: 18 februari 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.universiteitleiden.nl/in-de-media/2023/01/zeldzame-aardmetalen-in-zweden-willen-we-meer-mijnbouw-in-europa>.

- [12] 'Grootste voorraad zeldzame aardmetalen van Europa ontdekt in Noorwegen', vrtnws.be. Geraadpleegd: 18 februari 2025. [Online]. Beschikbaar op: [https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2024/06/06/grootste-voorraad-zeldzame-aardmetalen-van-europ a-ontdekt-in-noo/](https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2024/06/06/grootste-voorraad-zeldzame-aardmetalen-van-europ-a-ontdekt-in-noo/).
- [13] 'Zeldzame grondstoffen uit Europese bodem halen? Ook in Nederland kan dat, met lithium: "Mogelijk genoeg voor alle elektrische auto's"', EenVandaag. Geraadpleegd: 18 februari 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://eenvandaag.avrotros.nl/item/zeldzame-grondstoffen-uit-europese-bodem-halen-ook-in-nederland-kan-dat-met-lithium-genoege-voor-alle-elektrische-autos/>.
- [14] 'Zeldzame grondstoffen uit eigen bodem: Nu kan Europa zelf metalen winnen', Wetenschap in Beeld. Geraadpleegd: 18 februari 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://wibnet.nl/techniek/zeldzame-grondstoffen-van-eigen-bodem-nu-kan-europa-zelf-metalen-winnen>.
- [15] 'Dringend actie nodig om Europese industrie te redden', MKB-Nederland. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.mkb.nl/artikelen/dringend-actie-nodig-om-europese-industrie-te-redden>.
- [16] 'Clean Industrial Deal', European Commission. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/nl/ip_25_550.
- [17] 'Clean Industrial Deal: geen "end game" maar startschot', VNO-NCW. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.vno-ncw.nl/artikelen/clean-industrial-deal-geen-end-game-maar-startschot>.
- [18] 'Markteffecten van de Russische invasie in Oekraïne: EU-respons', Consilium. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.consilium.europa.eu/nl/policies/eu-response-russia-military-aggression-against-ukraine-archive/impact-of-russia-s-invasion-of-ukraine-on-the-markets-eu-response/>.
- [19] 'Gascrisis speelt de Europese industrie nog steeds parten', Credit Expo Nederland. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.creditexpo.nl/gascrisis-speelt-de-europese-industrie-nog-steeds-parten/>.
- [20] ' "Strategische autonomie grondstoffen is overlevingsvoorwaarde voor Europese industrie"', ANP Perssupport. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://persportaal.anp.nl/artikel/defb063d-b2ae-41b0-808c-8aa26c81d254/strategische-autonomie-grondstoffen-is-overlevingsvoorwaarde-voor-europese-industrie>.
- [21] 'Concurrentievermogen en industrie', Consilium. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.consilium.europa.eu/nl/topics/competitiveness-and-industry/>.
- [22] 'EU's Competitiveness Compass: Strategy for Economic Renewal', PricewaterhouseCoopers. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www>.

[pwc.nl/en/insights-and-publications/tax-news/other/eus-competitiveness-compass-strategy-for-economic-renewal.html](https://www.pwc.nl/en/insights-and-publications/tax-news/other/eus-competitiveness-compass-strategy-for-economic-renewal.html).

- [23] 'Competitiveness', European Commission. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://commission.europa.eu/priorities-2024-2029/competitiveness_en.
- [24] 'GroenvermogenNL', GroenvermogenNL. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://groenvermogennl.org/>.
- [25] 'Industriële transformatie', TNO. Geraadpleegd: 11 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.tno.nl/nl/duurzaam/co2-neutrale-industrie/industriële-transformatie/>.
- [26] 'Novar en Avitec investeren in groen waterstofproject H2 Hollandia', Maakindustrie Nieuws. Geraadpleegd: 17 januari 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.maakindustrie.nl/nieuws/energie/novar-en-avitec-investeren-in-groen-waterstofproject-h2-hollandia/>.
- [27] 'Een-op-een vervangen gas bij industriële warmte kan niet uit | Energiea'.
- [28] P.J. IJmond, 'Techport Fieldlab Smart Energy'.
- [29] 'Critical raw materials act', Consilium. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/critical-raw-materials/>.
- [30] 'Ecodesign for Sustainable Products Regulation', European Commission. Geraadpleegd: 1 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_en.
- [31] A. Preut, J.-P. Kopka en U. Clausen, 'Digital Twins for the Circular Economy, Sustainability, vol. 13, nr. 18, Art. nr. 18, jan. 2021, doi: 10.3390/su131810467.
- [32] 'Digital Product Passport', European Commission. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://hadea.ec.europa.eu/calls-proposals/digital-product-passport_en.
- [33] 'Digitale productpaspoorten', Regieorgaan SIA. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://regieorgaan-sia.nl/financiering/digitale-productpaspoorten/>.
- [34] 'TechValley lanceert project "TECHPASS" met Hogeschool van Amsterdam', TechValley-NH. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://techvalley-nh.nl/nieuwsbericht/techvalley-lanceert-project-techpass-met-hogeschool-van-amsterdam/>.
- [35] 'Cisco-onderzoek: amper vier procent van Nederlandse bedrijven volledig klaar om AI in te zetten', Emerce. Geraadpleegd: 17 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op:

- <https://www.emerge.nl/wire/ciscoonderzoek-amper-vier-procent-nederlandse-bedrijven-volledig-klaar-om-ai-zetten>.
- [36] 'Digitaal oplaadpunt voor het mkb', EDIH Digital Hub Noordwest. Geraadpleegd: 17 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://edih-dhnw.nl/>.
- [37] 'European Digital Innovation Hubs | Shaping Europe's digital future'. Geraadpleegd: 14 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/edihs>
- [38] 'AWS-Unlocking-Ambitions-Netherlands-Report.pdf'.
- [39] S. Muench, E. Stoermer, K. Jensen, T. Asikainen, M. Salvi en F. Scapoo, Towards a green & digital future: key requirements for successful twin transitions in the European Union. in EUR, no. 31075. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. doi: 10.2760/977331.
- [40] 'The twin green & digital transition: How sustainable digital technologies could enable a carbon-neutral EU by 2050', European Commission. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/twin-green-digital-transition-how-sustainable-digital-technologies-could-enable-carbon-neutral-eu-2022-06-29_en.
- [41] T. van Bree, 'De waarde van de Nederlandse industrie'.
- [42] 'Directe belang van industrie in Nederland'.
- [43] T. van Bree, 'De waarde van de Nederlandse industrie'.
- [44] 'De Nederlandse industrie vanaf 2022', CBS. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.cbs.nl/nl-nl/longread/de-nederlandse-economie/2025/de-nederlandse-industrie-vanaf-2022?onepage=true>.
- [45] T. van Bree, T. Bastein, J. Vierhout en W. Bolhuis, 'Toekomst van de Nederlandse industrie'.
- [46] 'IBIS Bedrijventerreinen', Data overheid. Geraadpleegd: 21 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://data.overheid.nl/dataset/ibis-bedrijventerreinen>, <https://data.overheid.nl/dataset/ibis-bedrijventerreinen>.
- [47] 'Economische Verkenningen Metropool Regio Amsterdam 2024'.
- [48] K. Amsterdam, 'Ambitiedocument Maakindustrie MRA 2.0: Strategie'.
- [49] 'Next Generation Machine Engineering', TechValley-NH. Geraadpleegd: 10 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://techvalley-nh.nl/>.
- [50] 'Techport – voor de toekomst van de maak- en onderhoudsindustrie', Techport. Geraadpleegd: 10 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://techport.nl/>.
- [51] M. van Bokkum, 'Amsterdam wil bouwen, maar de industrie wil niet weg uit het hart van de hoofdstad', NRC, 25 september 2024. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.nrc.nl/nieuws/2024/09/25/amsterdam-wil-bouwen-maar-de-industrie-wil-niet-weg-uit-het-hart-van-de-hoofdstad-a4867168>.

- [52] 'Voor een schone samenleving, nu en in de toekomst', AEB Amsterdam. Geraadpleegd: 4 oktober 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.aebamsterdam.nl/>.
- [53] 'Hoe groot is het tekort aan technisch personeel?', Studium. Geraadpleegd: 25 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.studium.nl/nieuws/hoe-groot-is-het-tekort-aan-technisch-personeel/>.
- [54] 'Aanpak personeelstekort in techniek en ICT', Rijksoverheid.nl. Geraadpleegd: 10 oktober 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2023/02/03/aanpak-personeelstekort-in-techniek-en-ict>.
- [55] 'Op-zoek-naar-de-sleutel_hoe-behouden-we-sleutelberoepen-voor-de-stad_2023.pdf', Kenniscentrum Ongelijkheid. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://www.kenniscentrumongelijkheid.nl/wp2023/wp-content/uploads/2023/03/op-zoek-naar-de-sleutel_hoe-behouden-we-sleutelberoepen-voor-de-stad_2023.pdf.
- [56] 'De impact van het tekort aan technisch personeel', Procestechneek. Geraadpleegd: 25 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.procestechneek.nl/blog/impact-tekort-technisch-personeel/>.
- [57] 'VNO-NCW'. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.vno-ncw.nl>.
- [58] 'Aanpak netcongestie: slimme energie-oplossingen voor ondernemers', Gemeente Beverwijk. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.beverwijk.nl/netcongestie>.
- [59] '€ 500.000 subsidie voor ondernemers om netcongestie aan te pakken'. Noord-Holland.nl. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://www.noord-holland.nl/Actueel/Archief/2025/Februari_2025/500_000_subsidie_voor_ondernemers_om_netcongestie_aan_te_pakken.
- [60] Defensienota 2024 – Sterk, slim en samen.
- [61] 'COMMIT sorteert voor op Defensienota'. Materieelgezien. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://magazines.defensie.nl/materieelgezien/2024/08/commit-sorteert-voor-op-defensienota>.
- [62] 'Defensie Industrie Strategie (DIS)', Rijksoverheid.nl. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.rijksoverheid.nl/ministeries/ministerie-van-defensie/contact/zakendoen-met-defensie/defensie-industrie-strategie-dis>.
- [63] 38070132 Bijlage 1 Kennis- en Innovatieconvenant 2024-2027.pdf.
- [64] 'Roadmap FME Platform_0.pdf', FME. Geraadpleegd: 25 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: https://www.fme.nl/system/files/publicaties/import/Roadmap%20FME%20Platform_0.pdf.
- [65] M. Ghobakhloo, M. Iranmanesh, M.-L. Tseng, A. Grybauskas, A. Stefanini en A. Amran, 'Behind the definition of Industry 5.0: a systematic review of technologies,

- principles, components, and values', *J. Ind. Prod. Eng.*, vol. 40, nr. 6, pp. 432-447, aug. 2023, doi: 10.1080/21681015.2023.2216701.
- [66] B.D. Sarkar, V. Shardeo, A. Dwivedi en D. Pamucar, 'Digital transition from industry 4.0 to industry 5.0 in smart manufacturing: A framework for sustainable future', *Technol. Soc.*, vol. 78, p. 102649, sep. 2024, doi: 10.1016/j.techsoc.2024.102649.
- [67] 'Sleuteltechnologieën', Topsector ICT. Geraadpleegd: 14 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://topsector-ict.nl/sleuteltechnologie%C3%ABn>.
- [68] T. van Bree, G. Gijsbers, V. Janssen en M. Goes, 'Herijking sleuteltechnologieën 2023', nr. 2023, 2023.
- [69] N. Khan en S.A. Ammar Taqvi, 'Machine Learning an Intelligent Approach in Process Industries: A Perspective and Overview', *ChemBioEng Rev.*, vol. 10, nr. 2, pp. 195-221, 2023, doi: 10.1002/cben.202200030.
- [70] Q. Le, L. Miralles-Pechuán, S. Kulkarni, J. Su en O. Boydell, 'An Overview of Deep Learning in Industry', in *Data Analytics and AI*, Auerbach Publications, 2020.
- [71] F. Rosenblatt, 'The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain', *Psychol. Rev.*, vol. 65, nr. 6, pp. 386-408, 1958, doi: 10.1037/h0042519.
- [72] 'A Review of Recurrent Neural Networks: LSTM Cells and Network Architectures', MIT Press. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://direct.mit.edu/neco/article-abstract/31/7/1235/8500/A-Review-of-Recurrent-Neural-Networks-LSTM-Cells>.
- [73] M. Abadi e.a., 'TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning', gepresenteerd bij 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 16), 2016, pp. 265-283. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.usenix.org/conference/osdi16/technical-sessions/presentation/abadi>.
- [74] A. Paszke e.a., 'PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library', in *Advances in Neural Information Processing Systems*, Curran Associates, Inc., 2019. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2019/hash/bdbca288fee7f92f2bfa9f7012727740-Abstract.html.
- [75] I. Goodfellow e.a., 'Generative adversarial networks', *Commun ACM*, vol. 63, nr. 11, pp. 139-144, okt. 2020, doi: 10.1145/3422622.
- [76] A. Vaswani e.a., 'Attention is All you Need', in *Advances in Neural Information Processing Systems*, Curran Associates, Inc., 2017. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/hash/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Abstract.html.
- [77] J. Wei e.a., 'Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models'.

- [78] 'A survey of transfer learning', *Journal of Big Data*. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://link.springer.com/article/10.1186/S40537-016-0043-6>.
- [79] 'Federated transfer learning for machinery fault diagnosis: A comprehensive review of technique and application', *ScienceDirect*. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327024007350?casa_token=RFgRUgL6rMUAAAAA:akVDEeE5LDI56b_nMiYFcxVdpgO8ea8CudMtGy1pGW9PLzbbj5WFh1NzBej8K7kHCqjKSwbS4A.
- [80] F. Islam, A.S. Raihan, en I. Ahmed, 'Applications of Federated Learning in Manufacturing: Identifying the Challenges and Exploring the Future Directions with Industry 4.0 and 5.0 Visions', 16 mei 2023, arXiv: arXiv:2302.13514. doi: 10.48550/arXiv.2302.13514.
- [81] J. Xiong, O. Fink, J. Zhou en Y. Ma, 'Controlled physics-informed data generation for deep learning-based remaining useful life prediction under unseen operation conditions', *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 197, p. 110359, aug. 2023, doi: 10.1016/j.ymsp.2023.110359.
- [82] J. Chen e.a., 'Accelerating Thermal Simulations in Additive Manufacturing by Training Physics-Informed Neural Networks With Randomly Synthesized Data', *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 24, nr. 1, p. 011004, jan. 2024, doi: 10.1115/1.4062852.
- [83] A. Bakdi, M. Bruch, Q. Liang en E. Vanem, 'Physics-Informed Data-Driven Approaches to State of Health Prediction of Maritime Battery Systems', *Annu. Conf. PHM Soc.*, vol. 16, nr. 1, nov. 2024, doi: 10.36001/phmconf.2024.v16i1.4135.
- [84] S. Wang, S. Sankaran en P. Perdikaris, 'Respecting causality for training physics-informed neural networks', *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 421, p. 116813, mrt. 2024, doi: 10.1016/j.cma.2024.116813.
- [85] F. Monegaglia e.a., 'A Physics-Informed AI Control System for Enhanced Safety and Automation in Hollow Glass Manufacturing', *Procedia Comput. Sci.*, vol. 253, pp. 3123-3132, 2025, doi: 10.1016/j.procs.2025.02.037.
- [86] Y. Qin, H. Liu, Y. Wang en Y. Mao, 'Inverse physics-informed neural networks for digital twin-based bearing fault diagnosis under imbalanced samples', *Knowl.-Based Syst.*, vol. 292, p. 111641, mei 2024, doi: 10.1016/j.knosys.2024.111641.
- [87] F.A. Garcia, H. Devriendt, H. Metin, M. Özer en F. Naets, 'Physics-informed digital twin design for supporting the selection of process settings in continuous manufacturing, with a focus in fiberboard production', *Comput. Ind.*, vol. 168, p. 104267, jun. 2025, doi: 10.1016/j.compind.2025.104267.
- [88] Z. Chen, S.-K. Lai en Z. Yang, 'AT-PINN: Advanced time-marching physics-informed neural network for structural vibration analysis', *Thin-Walled Struct.*, vol. 196, p. 111423, mrt. 2024, doi: 10.1016/j.tws.2023.111423.

- [89] S. Shen e.a., 'A physics-informed deep learning approach for bearing fault detection', *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 103, p. 104295, aug. 2021, doi: 10.1016/j.engappai.2021.104295.
- [90] D. Zhang e.a., 'MM-LLMs: Recent Advances in MultiModal Large Language Models', 28 mei 2024, arXiv: arXiv:2401.13601. doi: 10.48550/arXiv.2401.13601.
- [91] G. Zerveas, S. Jayaraman, D. Patel, A. Bhamidipaty en C. Eickhoff, 'A Transformer-based Framework for Multivariate Time Series Representation Learning', 8 december 2020, arXiv: arXiv:2010.02803. doi: 10.48550/arXiv.2010.02803.
- [92] ' "Jetzt ist die Zeit, sich über ein zukunftsfähiges Geschäftsmodell Gedanken zu machen" ', Markt und Wirtschaft Westfalen. Geraadpleegd: 21 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://mawi-westfalen.de/jetzt-ist-die-zeit-sich-ueber-ein-zukunftsaehiges-geschaeftsmodell-gedanken-zu-machen/>.
- [93] 'Centre of Expertise Applied Artificial Intelligence', Hogeschool van Amsterdam. Geraadpleegd: 25 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.hva.nl/appliedai>
- [94] H. van Der Valk, J. Hunker, M. Rabe en B. Otto, 'Digital Twins in Simulative Applications: A Taxonomy', in 2020 Winter Simulation Conference (WSC), Orlando, FL, USA: IEEE, dec. 2020, pp. 2695-2706. doi: 10.1109/WSC48552.2020.9384051.
- [95] H. van Der Valk, H. Haße, F. Möller en B. Otto, 'Archetypes of Digital Twins', *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 64, nr. 3, pp. 375-391, jun. 2022, doi: 10.1007/s12599-021-00727-7.
- [96] 'ScienceDirect Snapshot', Science Direct. Geraadpleegd: 2 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121003656>.
- [97] 'Full Text PDF'. Geraadpleegd: 2 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/8/686/pdf?version=1660526877>.
- [98] 'Full Text PDF'. Geraadpleegd: 2 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/17512549.2022.2136240>.
- [99] 'Full Text PDF'. Geraadpleegd: 17 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/18/10467/pdf?version=1632379006>.
- [100] H. Feng, C. Gomes, M. Sandberg, C. Thule, K. Lausdahl en P.G. Larsen, 'Developing a Physical and Digital Twin: An Example Process Model', in 2021 ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C), okt. 2021, pp. 286-295. doi: 10.1109/MODELS-C53483.2021.00050.
- [101] B. Biller en S. Biller, 'Implementing Digital Twins That Learn: AI and Simulation Are at the Core', *Machines*, vol. 11, nr. 4, Art. nr. 4, apr. 2023, doi: 10.3390/machines11040425.
- [102] 'Archetypes of Digital Twins', *Business & Information Systems Engineering*. Geraadpleegd: 10 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12599-021-00727-7>.

- [103] P. Lewis e.a., 'Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks', in *Advances in Neural Information Processing Systems*, Curran Associates, Inc., 2020, pp. 9459-9474. Geraadpleegd: 2 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/hash/6b493230205f780e1bc26945df7481e5-Abstract.html>.
- [104] 'Titel', Change2Twin Project'. Geraadpleegd: 17 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.change2twin.eu/>.
- [105] 'Winners of Deployment Voucher 2021', Change2Twin Project. Geraadpleegd: 19 maart 2025. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.change2twin.eu/success-stories/winners-of-deployment-voucher-2021/>.
- [106] M. Perno, L. Hvam en A. Haug, 'Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers', *Comput. Ind.*, vol. 134, p. 103558, jan. 2022, doi: 10.1016/j.compind.2021.103558.
- [107] 'Unified Architecture', OPC Foundation. Geraadpleegd: 10 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>.
- [108] 'ODDS'. Geraadpleegd: 10 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.project-odds.com/>
- [109] Y. Chen en S. Koohy, 'GPT-PINN: Generative Pre-Trained Physics-Informed Neural Networks toward non-intrusive Meta-learning of parametric PDEs', *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 228, p. 104047, jan. 2024, doi: 10.1016/j.finel.2023.104047.
- [110] M.H. Taufik en T. Alkhalifah, 'LatentPINNs: Generative physics-informed neural networks via a latent representation learning', 11 mei 2023, arXiv: arXiv:2305.07671. doi: 10.48550/arXiv.2305.07671.
- [111] L. Yang, D. Zhang en G.E. Karniadakis, 'Physics-Informed Generative Adversarial Networks for Stochastic Differential Equations', *SIAM J. Sci. Comput.*, vol. 42, nr. 1, pp. A292-A317, jan. 2020, doi: 10.1137/18M1225409.
- [112] W. Booyse, D.N. Wilke en S. Heyns, 'Deep digital twins for detection, diagnostics and prognostics', *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 140, p. 106612, jun. 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106612.
- [113] R. Bommasani e.a., 'On the Opportunities and Risks of Foundation Models', 12 juli 2022, arXiv: arXiv:2108.07258. doi: 10.48550/arXiv.2108.07258.
- [114] K.L.K. Lee, C. Gonzales, M. Spellings, M. Galkin, S. Miret en N. Kumar, 'Towards Foundation Models for Materials Science: The Open MatSci ML Toolkit', in *Proceedings of the SC '23 Workshops of The International Conference on High Performance Computing, Network, Storage, and Analysis*, nov. 2023, pp. 51-59. doi: 10.1145/3624062.3626081.
- [115] 'Solving olympiad geometry without human demonstrations', *Nature*. Geraadpleegd: 10 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06747-5>.

- [116] W. Wang, Q. Chen, T. Liu en L. Tang, 'Digital-Twin assisted Root Cause Analysis of Anomalies in NFV Environment', in ICC 2021 – IEEE International Conference on Communications, jun. 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500464.
- [117] C. Agrell, K. Rognlien Dahl en A. Hafver, 'Optimal sequential decision making with probabilistic digital twins', SN Appl. Sci., vol. 5, nr. 4, p. 114, mrt. 2023, doi: 10.1007/s42452-023-05316-9.
- [118] 'Algorithms for sequential decision-making', ProQuest. Geraadpleegd: 10 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.proquest.com/openview/a5d90257a5e9ca8aa233e9f29edad1f4/1?pq-origsite=gscholar&cbl=-18750&diss=y>.
- [119] C. Audet, J. Bigeon, D. Cartier, S. Le Digabel en L. Salomon, 'Performance indicators in multiobjective optimization', Eur. J. Oper. Res., vol. 292, nr. 2, pp. 397-422, jul. 2021, doi: 10.1016/j.ejor.2020.11.016.
- [120] C.F. Hayes e.a., 'A Practical Guide to Multi-Objective Reinforcement Learning and Planning', Auton. Agents Multi-Agent Syst., vol. 36, nr. 1, apr. 2022, doi: 10.1007/s10458-022-09552-y.
- [121] C.F. Hayes, M. Reymond, D.M. Roijers, E. Howley en P. Mannion, 'Distributional Monte Carlo Tree Search for Risk-Aware and Multi-Objective Reinforcement Learning', 2021.
- [122] W. Wang, L. Tang, C. Wang en Q. Chen, 'Real-Time Analysis of Multiple Root Causes for Anomalies Assisted by Digital Twin in NFV Environment', IEEE Trans. Netw. Serv. Manag., vol. 19, nr. 2, pp. 905-921, jun. 2022, doi: 10.1109/TNSM.2022.3151249.
- [123] 'Multi-objective multi-agent decision making: a utility-based analysis and survey | Autonomous Agents and Multi-Agent Systems', auteur. Geraadpleegd: 11 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10458-019-09433-x>.
- [124] B. Zhu, M. Dang en A. Grover, 'Scaling Pareto-Efficient Decision Making Via Offline Multi-Objective RL', 30 april 2023, arXiv: arXiv:2305.00567. doi: 10.48550/arXiv.2305.00567.
- [125] H. Hosamo, M.H. Hosamo, H.K. Nielsen, P.R. Svennevig en K. Svidt, 'Digital Twin of HVAC system (HVACDT) for multi-objective optimization of energy consumption and thermal comfort based on BIM framework with ANN-MOGA', Adv. Build. Energy Res., vol. 17, nr. 2, pp. 125-171, mrt. 2023, doi: 10.48550/arXiv.2305.00567.
- [126] G. Tian e.a., 'Multi-Objective Evolutionary Algorithm With Machine Learning and Local Search for an Energy-Efficient Disassembly Line Balancing Problem in Remanufacturing', J. Manuf. Sci. Eng., vol. 145, nr. 051002, jan. 2023, doi: 10.1115/1.4056573.
- [127] L. Espinosa-Leal, A. Chapman en M. Westerlund, 'Autonomous Industrial Management via Reinforcement Learning: Towards Self-Learning Agents for

- Decision-Making', J. Intell. Fuzzy Syst., vol. 39, nr. 6, pp. 8427-8439, dec. 2020, doi: 10.3233/JIFS-189161.
- [128] Y. Wang, Y. Liu, W. Chen, Z.-M. Ma en T.-Y. Liu, 'Target transfer Q-learning and its convergence analysis', Neurocomputing, vol. 392, pp. 11-22, jun. 2020, doi: 10.1016/j.neucom.2020.02.117.
- [129] S. Parisi, M. Pirota en M. Restelli, 'Multi-objective Reinforcement Learning through Continuous Pareto Manifold Approximation', J. Artif. Intell. Res., vol. 57, pp. 187-227, okt. 2016, doi: 10.1613/jair.4961.
- [130] 'Introduction | 🦉🔗 Langchain'. Geraadpleegd: 11 februari 2024. [Online]. Beschikbaar op: https://python.langchain.com/docs/get_started/introduction.
- [131] 'Learning communities', Holland High Tech. Geraadpleegd: 25 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://hollandhightech.nl/hoewehelpen/human-capital-1/learning-communities>.
- [132] 'Digitaal oplaadpunt voor het mkb', EDIH Digital Hub Noordwest. Geraadpleegd: 17 januari 2024. [Online]. Beschikbaar op: <https://edih-dhnw.nl/>.
- [133] P.J. IJmond, 'Techport Fieldlab Smart Energy'.
- [134] <https://www.isacommons.org/>

Hoe kan Digital Twin-technologie de Nederlandse maakindustrie helpen om efficiënt, energiezuinig en circulair te werken? Met praktijkgericht onderzoek helpt het lectoraat Industriële Digital Twins van de Hogeschool van Amsterdam (HvA) bedrijven om CO2-neutraal te worden, en daarmee internationaal competitief te blijven.

Zowel grote als mkb(maak)bedrijven staan de komende jaren voor meerdere uitdagingen. Niet alleen moeten zij onderhoud efficiënter uitvoeren, ook moeten ze energieverbruik verminderen in hun productieproces met het oog op de energietransitie. Daarnaast hebben ze de opdracht om grond- en afvalstoffen zoveel mogelijk te hergebruiken om mee te gaan in de circulaire transitie.

Een Digital Twin is een digitale representatie of virtuele kopie van een object, systeem of proces in de 'echte wereld.' Dit kan van alles zijn: een koelsysteem,

een fabriek met lasersnijmachines, maar ook een bedrijven-terrein. De kopie is real-time verbonden met zijn fysieke wederhelft en communiceert continu met sensoren die het gedrag ervan nabootsen. Algoritmen zetten de data die binnenkomen om in bruikbare inzichten en acties; zij vormen in feite het brein van de Digital Twin. Een belangrijk kenmerk is de feedback-loop vanuit de virtuele omgeving terug naar de fysieke wereld. Denk hierbij aan aansturing van machines of mensen.

Digital Twin-technologie maakt het mogelijk om processen, producten en systemen via data-analyse en simulatie gericht te verbeteren. Van het testen van prototypes tot het voorspellen en inplannen van onderhoud. Hiermee kunnen bedrijven veel tijd, geld en energie besparen. Het lectoraat Industriële Digital Twins onderzoekt hoe zij deze technologie het beste kunnen inzetten.

ISBN 9789463015653

