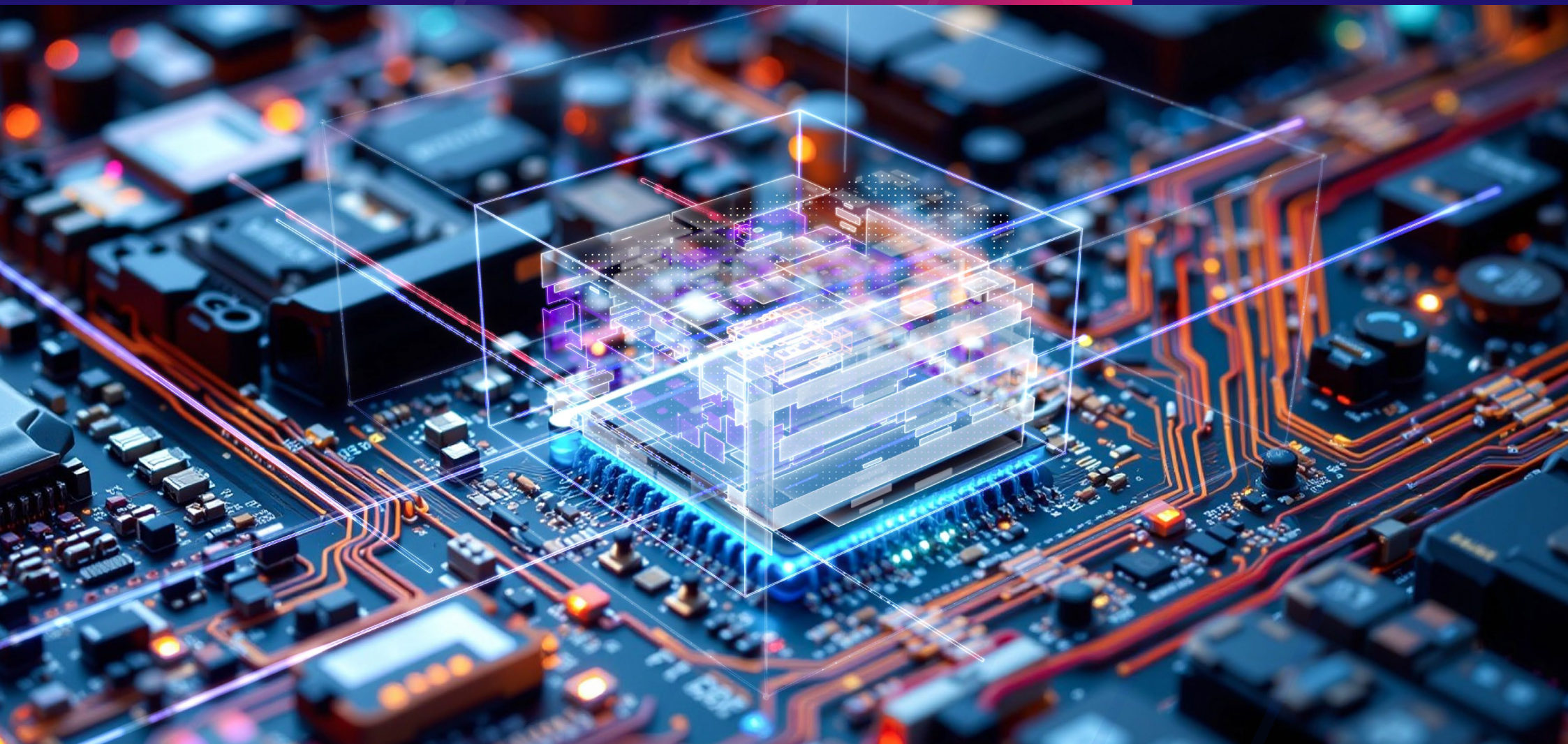


Paper

Competitieve systemen

Ontdek hoe digitalisering van de maakindustrie de arbeidsproductiviteit kan verhogen

TNOvector
Centre for Societal Innovation and Strategy



Inhoudsopgave

1. Inleiding	3
2. Digitalisering van de maakindustrie: een kans en een uitdaging	5
3. Perspectief op een concurrerend industrieel systeem	7
4. Conclusie en aanbevelingen	9
Geraadpleegde literatuur	11

Dit paper maakt deel uit van een paperseries geschreven voor het TNO Vector Symposium 2025:
De kracht van samenwerkende systemen – Sturen naar een vitale, competitieve en veilige samenleving.

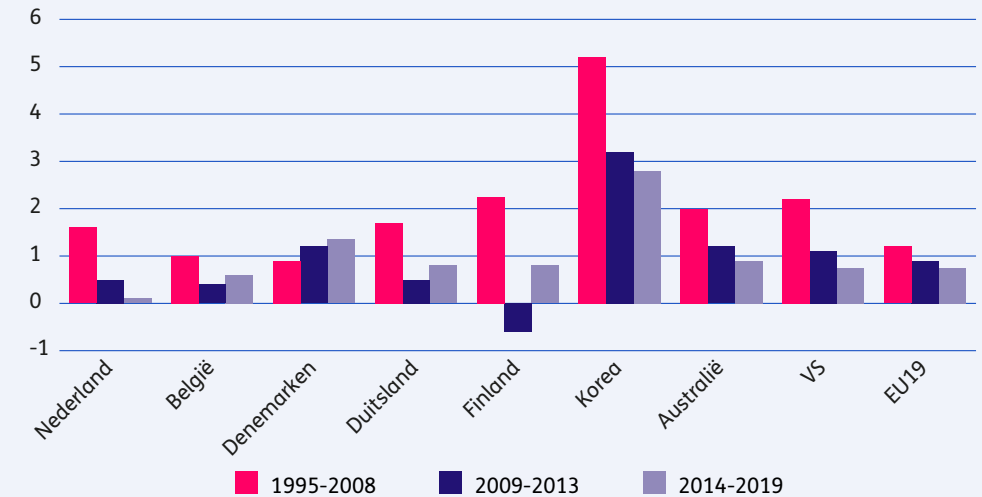
Het doel van dit paper is om de deelnemers inzicht te geven in het onderwerp van discussie.

1. Inleiding

De economieën van Nederland en de EU staan onder toenemende druk door elkaar versterkende uitdagingen. Emissies moeten worden verminderd, terwijl geopolitieke ontwikkelingen het bouwen van veerkrachtige en autonome economische systemen vereisen. Tegelijkertijd stellen consumenten steeds hogere eisen: ze verwachten snelle(re) levering en betaalbare producten. Dat betekent voor bedrijven een hogere output in minder tijd. Om concurrerend te blijven, moet de economie daarom uitzonderlijk productief zijn. Tegelijkertijd krimpt echter de actieve beroepsbevolking (Draghi, 2024) en blijft de groei van arbeidsproductiviteit afnemen (Figuur 1),¹ hetgeen een belangrijke uitdaging vormt.

Concurrentievermogen gaat verder dan de prestaties van individuele bedrijven of kostenefficiëntie; het is het vermogen van een samenleving als geheel om op lange termijn productiviteit, innovatie en duurzame ontwikkeling te bevorderen. Draghi (2024) benadrukte dat het versterken van het concurrentievermogen meer omvat dan het verlagen van kosten of het verbeteren van marktefficiëntie; het gaat in essentie om het versterken van de onderliggende systemen die innovatie, investeringen en strategische autonomie mogelijk maken.²

Figuur 1: Gemiddelde jaarlijkse groei van de arbeidsproductiviteit per gewerkt uur, TNO (2025b)



¹ Met dalende vruchtbaarheidscijfers en een toenemende levensverwachting, zal tegen 2050 ongeveer 22% van de wereldbevolking ouder dan 60 jaar zijn.

² Draghi (2024) wijst ook op een groeiende innovatiekloof, met name in Europa. Factoren zijn onder andere risicomijdende denkwijzen, strikte regelgeving en een braindrain, waarbij Europa achterblijft op de VS wat betreft bbp-groei. Het regelgevingsdoolhof in de EU, bijvoorbeeld bij de adoptie van AI, belemmert innovatie verder, wat het risico op economische stagnatie vergroot en investeringen kan ontmoedigen.

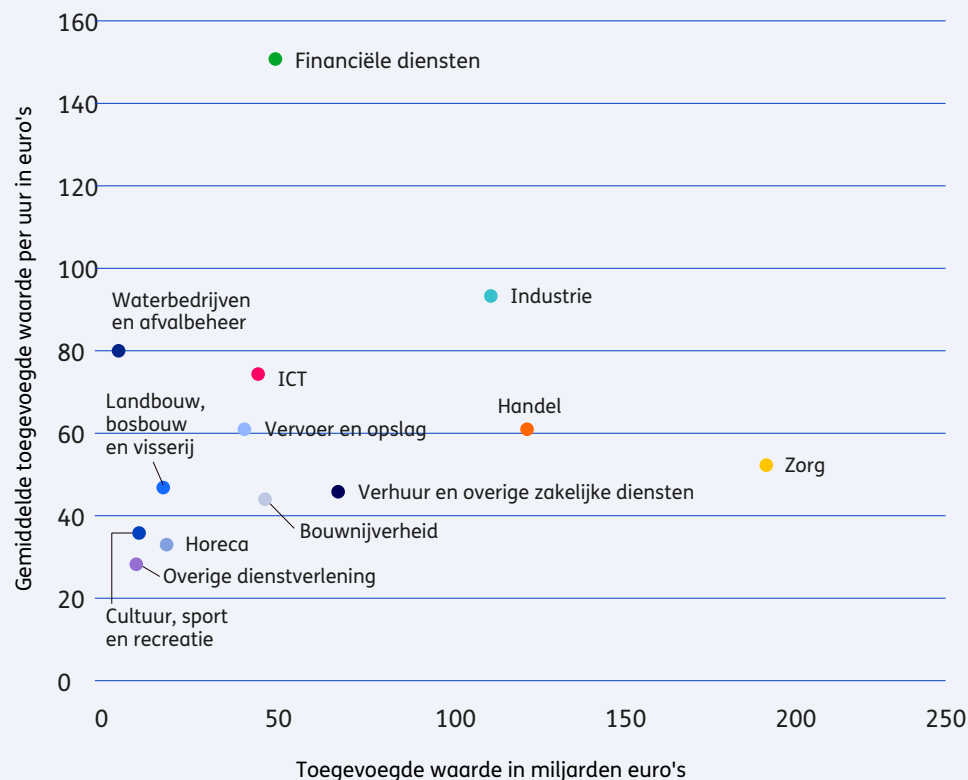
De maakindustrie is hierbij een belangrijke sector. Deze sector vormt niet alleen een pijler van economische productiviteit en werkgelegenheid (Figuur 2)³, maar fungeert ook als een belangrijke domein voor de digitale transformatie. Om concurrerend te blijven, moeten maakbedrijven weerbaarheid combineren met wendbaarheid. Ze moeten zich aanpassen aan veranderende ketens en inspelen op de vraag naar snellere, meer gepersonaliseerde producten, terwijl ze tegelijkertijd omgaan met stijgende kosten voor arbeid, materialen en energie, én voldoen aan steeds hogere kwaliteitseisen.

Het toepassen van digitale en automatiseringstechnologieën is essentieel om het concurrentievermogen van de maakindustrie op lange termijn te waarborgen, ook wel Smart Industry genoemd.⁴ Deze ontwikkeling biedt kansen om arbeidsintensieve taken te versterken of te automatiseren. Denk aan het optimaliseren van workflows, het verminderen van menselijke fouten en het mogelijk maken van realtime datagedreven besluitvorming. Hierdoor kunnen medewerkers efficiënter werken en zich richten op cognitief veeleisende taken (Javaid et al., 2022), terwijl routinematige taken sneller en nauwkeuriger worden uitgevoerd. Deze ontwikkelingen dragen direct bij aan hogere arbeidsproductiviteit.

De centrale vraag van dit paper is:
Hoe kunnen de kansen die de digitalisering van de maakindustrie biedt, maximaal worden benut en de bijbehorende uitdagingen worden gemitigeerd om de arbeidsproductiviteit te verhogen en het concurrentievermogen te waarborgen?

De opbouw van dit paper is als volgt. In Hoofdstuk 2 worden de kansen en uitdagingen van digitalisering in de maakindustrie besproken. Hoofdstuk 3 presenteert concrete voorbeelden en suggesties om deze kansen te benutten en de uitdagingen te mitigeren. Hoofdstuk 4 sluit af met conclusies en aanbevelingen.

Figuur 2: Omvang en toegevoegde waarde per uur voor de belangrijkste sectoren⁵ in de Nederlandse economie in 2023. Gegevens CBS, figuur door TNO.



³ De maakindustrie draagt bij aan de arbeidsproductiviteit als een snelgroeiende sector met hoge productiviteit, met een toegevoegde waarde van 116 miljard euro in 2023 (TNO, 2024a).

⁴ Dit omvat onder andere het gebruik van automatisering van standaardontwerp, en robotica, Internet of Things (IoT), kunstmatige intelligentie (AI), big data-analyse en cyber-fysieke systemen om efficiëntie, flexibiliteit en besluitvorming te verbeteren. Zie bijvoorbeeld de Smart Industry-roadmap (2020) voor meer voorbeelden.

⁵ De volgende sectoren zijn niet opgenomen in deze figuur: grondstoffen, energie, handel in onroerend goed, overheidsdiensten, onderwijs en huishoudens.

2. Digitalisering van de maakindustrie: een kans en een uitdaging

Grootste kansen

Arbeidsproductiviteit wordt gedefinieerd als de hoeveelheid goederen en diensten die per werknemer wordt geproduceerd.⁶ Digitalisering van de maakindustrie kan de arbeidsproductiviteit verhogen door efficiëntere werkprocessen, betere kwaliteit van product- en diensten, minder verspilling en lagere operationele kosten.⁷ Deze efficiëntiewinst draagt bij aan een sterkere concurrentiepositie, wat investeringen in digitale technologieën aantrekkelijk maakt (Deepak Kumar et al., 2023; Matt et al., 2020).

De digitale transformatie van de maakindustrie maakt gebruik van onderling verbonden systemen om de **efficiëntie op de werkvloer te verhogen**, bijvoorbeeld door taken gedeeltelijk of volledig te automatiseren (zie bijvoorbeeld Ghobakhloo et al., 2022). Wanneer digitale technologieën worden ingezet in een fabriek (en in ketens), werken verschillende systemen samen om de efficiëntie en dus de productiviteit te verhogen. Moderne fabrieksystemen, omvatten naast medewerkers meestal geavanceerde machines, automatisering en data-analyse binnen één productie-faciliteit.⁸ Deze technologieën zijn gericht

op het optimaliseren van productieprocessen, het verminderen van stilstand en het verbeteren van de productkwaliteit op basis van realtime monitoring en controle – ook wel flexibele productie genoemd.

Daarnaast gaan digitale technologieën verder dan de fabrieksvloer, namelijk over de volledige waardeketen: door het hele netwerk van leveranciers, fabrikanten, distributeurs en klanten. In deze zogeheten verbonden fabrieken worden verschillende processen geïntegreerd zoals engineering, werkvoorbereiding, logistiek, productie en distributie. Digital Twins en simulaties maken het mogelijk om vooraf proceswijzigingen te testen zonder fysiek afval te genereren. Door voorspellend onderhoud, geoptimaliseerde toewijzing van middelen en verminderde stilstand kunnen bedrijven de **operationele kosten op termijn** aanzienlijk **verlagen**.

Digitalisering van de maakindustrie kan nauwkeurige controle van materiaal- en energie verbruik vergemakkelijken, wat bijdraagt aan efficiëntere productie en minimale milieu-impact. Geavanceerde monitoringsystemen en voorspellende analyses maken vroegtijdige detectie van

defecten en procesafwijkingen mogelijk, wat bijdraagt aan consistentere **kwaliteitsborging** en minder herbewerking of terugroepacties.

Daarnaast biedt digitalisering mogelijkheden om werk toegankelijker te maken voor een bredere groep werknemers met diverse achtergronden en opleidingsniveaus (de Vries et al., 2025). Ook kan het inwerkproces ondersteund worden met digitale oplossingen, zoals digitale werk-instructies. Hiermee zijn nieuwe medewerkers sneller in staat zelfstandig te functioneren (de Vries et al., 2025). Het inzetten van digitale technologieën voor een groot deel van het personeelsbestand draagt bij aan een algehele toename van de productiviteit en arbeidsparticipatie

Voornaamste uitdagingen

Digitalisering kan bedrijven een voor-sprong opleveren op gebieden zoals: arbeidsproductiviteit, duurzaamheid, en toegankelijkheid. Toch zijn er aanzienlijke (adoptie-) uitdagingen (zie bijvoorbeeld: Ghobakhloo et al., 2022; Zabudkina et al., 2024; TNO, 2024a; Rani et al., 2025). Deze uitdagingen omvatten financiële, technische, organisatorische, sociale en wettelijke

aspecten. Vooral voor MKB-bedrijven zijn de belangrijkste uitdagingen de volgende.

De kosten van het upgraden naar digitale technologieën kunnen aanzienlijk zijn voordat productiviteitswinsten worden gerealiseerd. Dit gaat vaak gepaard met beperkte beschikbaarheid van middelen.⁹ De hoge initiële investeringskosten, in combinatie met onzekerheid over het rendement op de korte tot middellange termijn en het ontbreken van garanties op een succesvolle transformatie, maken dat vooral grotere ondernemingen met ruime financiële middelen deze investeringen kunnen dragen. MKB-bedrijven daarentegen komen vaak financiële middelen te kort. Bovendien zijn de personen die het meest geschikt zijn om digitale transformaties te leiden – de zogenaamde change agents – vaak ook degenen die verantwoordelijk zijn voor de dagelijkse bedrijfsvoering, waardoor zij weinig tijd en ruimte hebben om veranderingen te realiseren.

Organisatiecultuur en interne weerstand tegen verandering, evenals beperkte beschikbaarheid van kennis, middelen en vaardigheden, kunnen de digitale transitie ook in de weg staan. Als voorbeeld kan

⁶ Glossary: Labour productivity - Statistics Explained - Eurostat: Wanneer dit wordt bekeken voor een sector of de gehele economie, wordt de arbeidsproductiviteit gedefinieerd als de hoeveelheid toegevoegde waarde is per eenheid arbeid voor die sector of economie als geheel.

⁷ In Nederland worden de ontwikkelingen op dit gebied gestimuleerd via het Smart Industry-programma (Smart Industry Schaaalprong Agenda 2022–2026).

⁸ Zie bijvoorbeeld Roadmap-Smart-Industry-2020.pdf.

⁹ Volgens Corrado et al. (2021) werd een hoge industriële output historisch gezien aangedreven door grote voorraden fysiek kapitaal. Tegenwoordig maken digitale technologieën uitbreiding van de schaal waarop bedrijven opereren mogelijk. Internationaal leidt dit tot een toenemende kloof binnen sectoren tussen de meest productieve bedrijven (dat zijn bedrijven met hogere investeringen in immaterieel kapitaal) en de rest van de bedrijven in die sectoren.

adoptie worden belemmerd door moeilijkheden bij het aanpassen van en aan bestaande werkwijzen, aangezien de overgang naar datagestuurde, geautomatiseerde werkprocessen in de praktijk een andere werk- en denkwijze vraagt.

Ondanks het potentieel van digitalisering, vormt de integratie van geavanceerde technologieën intern in de fabriek en over keten een aanzienlijke uitdaging. Voor bedrijven met een beperkte mate van basale digitalisering blijven geavanceerde digitale toepassingen in de maakindustrie grotendeels buiten bereik. Binnen de ketens van de maakindustrie komt dit veelvuldig voor. Een groot aantal MKB-bedrijven werkt handmatig of gebruikt verouderde of niet-interoperabele machines en softwaresystemen, die niet gemakkelijk compatibel zijn met nieuwe digitale technologieën.¹⁰ Het vervangen of aanpassen van dergelijke systemen vereist hoge investeringen en brengt vaak operationele verstoringen met zich mee. Het gebrek aan standaardisatie in bestaande systemen bemoeilijkt verdere integratie-inspanningen.

Succesvolle digitale transformatie vereist dat systemen onderling samenwerken: naadloze interactie tussen technologieën en machines, zowel binnen de fabriek als in de hele keten. Als dat niet gebeurt, blijven de voordelen van digitalisering en automatisering beperkt waardoor efficiëntie en productiviteitswinst minder worden.

Een tekort aan werknemers met de benodigde digitale vaardigheden is een volgende uitdaging (FME, 2022; TNO, 2024a). Veel MKB-bedrijven missen medewerkers met digitale kennis en vaardigheden die nodig zijn om digitale technologieën effectief te onderhouden en in de praktijk werkend te houden. Het gebruik, onderhoud en doorontwikkeling van digitale technologieën vraagt om specialistische kennis en vaardigheden rondom data-analyse, cybersecurity en systeemintegratie. Het aantrekken van gekwalificeerd personeel of het bijscholen van bestaande werknemers vraagt investeringen in tijd en geld.

Er is een groeiende kloof tussen de koplopers en de rest in het gebruik van digitale toepassingen (TNO, 2024a). In sectoren waarin digitale technologieën en digitale vaardigheden intensiever worden ingezet, en waarin het algemene vaardigheidsniveau hoger ligt, boeken 'late adopters' slechts langzaam vooruitgang. Dit duidt op belemmeringen voor de overdracht van technologieën en kennis (Berlingieri et al., 2020). De groeiende kloof heeft meerdere implicaties: bedrijven die geen digitale technologieën adopteren, lopen het risico achter te blijven bij hun concurrenten, met mogelijk verlies van marktaandeel en omzet tot gevolg. Ze kunnen ook moeite hebben om te innoveren, waardoor hun vermogen om te reageren op de veranderende marktvraag wordt beperkt. De

ongelijkheid in digitale adoptie kan bijdragen aan bredere economische ongelijkheid, aangezien digitaal vooroplopende bedrijven floreren terwijl anderen achterblijven.

Kortom, digitalisering van de maakindustrie biedt duidelijke voordelen, maar er zijn ook tal van uitdagingen verbonden aan de digitale transformatie, variërend van financiële, technologische en organisatorische drempels tot aanpassing van het personeelsbestand. Voor een succesvolle digitale transformatie is een systeem aanpak nodig waarin aandacht is voor zowel technologie, organisatie als de medewerkers. Het volgende hoofdstuk zal ingaan op praktische suggesties: van het benutten van geavanceerde technologieën tot het bevorderen van een werkomgeving waarin mensen samenwerken.

¹⁰ Het gebrek aan interoperabiliteitsstandaarden en de gefragmenteerde aard van industriële toeleveringsketens verergeren deze problemen.

3. Perspectief op een concurrerend industrieel systeem

Hoewel organisaties bekend zijn met de kansen van de digitalisering, voorzien veel organisaties (de bovengenoemde) uitdagingen en stellen ze zichzelf veel vragen over waar te beginnen (zie ook de tekstbox).

Het verhogen van de arbeidsproductiviteit binnen maakbedrijven is een complex vraagstuk dat **een systeem aanpak** vereist, die de perspectieven van het primaire proces, de medewerkers, de organisatie, de technologieën en een positie in een waardeketen tegelijkertijd in overweging

neemt om tot effectieve oplossingen te komen. Relaties binnen de keten, met partners, fieldlabs en kennisinstellingen, zijn belangrijk en spelen een rol bij het stimuleren van de digitalisering van de maakindustrie.

Hiernaast worden enkele belangrijke aandachtspunten besproken die kunnen helpen bij het verkennen, ontwikkelen en implementeren van oplossingen om de arbeidsproductiviteit te verhogen, met name voor MKB-bedrijven.

Veel (kleine en middelgrote) maakbedrijven stellen zichzelf de volgende vragen over hoe en waar te beginnen met digitalisering en robotisering:

- Hoe zorg ik voor voldoende flexibiliteit en aanpassingsvermogen in productie met lage volumes en hoge variatie met digitalisering en robotisering? Met andere woorden, hoe kunnen technologische oplossingen in de productie snel of automatisch worden aangepast aan productvarianten en nieuwe producten?
- Hoe integreren deze nieuwe technologieën met mijn bestaande IT en machine-infrastructuur?
- Hoe zorg ik voor afstemming in de toeleveringsketen: met klanten en leveranciers?
- Hoe krijg ik mijn mensen uit verschillende afdelingen mee met deze veranderingen?
- Hoe zorg ik ervoor dat technologie effectief wordt geadopteerd en kan worden gebruikt, onderhouden en bijgewerkt op de werkvloer?
- Hoe zorg ik ervoor dat de kennis van ervaren professionals over productieprocessen en machines wordt vastgelegd, bewaard (in beslissingsondersteunende systemen) en overgedragen aan (onervaren) collega's?

Begin met interne betrokkenheid.

Medewerkersbetrokkenheid is cruciaal voor het succes van elke verandering. Het verhogen van de arbeidsproductiviteit kan effectief worden aangepakt door een project te starten met een interne trekker en een multidisciplinair team met de kennis vanuit werkvoorbereiding, productie, engineering, kwaliteit en IT. Dit zorgt ervoor dat kennis en perspectieven vanuit de hele organisatie worden samengebracht. Dit draagt ook bij aan betrokkenheid van de medewerkers.

In de initialisatiefase is de afbakening van de scope belangrijk. Differentiatie tussen korte en lange termijn doelen stelt het projectteam in staat om enerzijds snel tastbare resultaten te behalen en anderzijds toe te werken naar structurele innovaties met een duurzaam karakter.

Verschillende organisaties en publiek-private initiatieven implementeren al slimme digitale technologieën, wat inspiratie kan bieden. Publiek-private initiatieven omvatten fieldlabs¹¹, regionale innovatiehubs en brancheverenigingen. Deze initiatieven stimuleren kruisbestuiving en bevorderen de adoptie van best practices en opkomende technologieën.¹²

Niet alle expertise en vaardigheden zijn binnen het bedrijf direct beschikbaar om met nieuwe technologieën te werken. Waar specifieke kennis of competenties binnen de organisatie ontbreken kan gerichte externe expertise worden ingeschakeld. Bijvoorbeeld door samenwerking met kennisinstellingen, industrie-experts en technologische integrators of service providers. Deze strategische partnerschappen dragen bij aan de kwaliteit en toepasbaarheid van de ontwikkelde oplossingen en vergroten de kans op succesvolle implementatie binnen de operationele context.

Zet mensen en primaire processen

centraal. Effectieve technologische innovatie vereist dat zowel het primaire productieproces als de medewerkers centraal staan in technologische ontwikkeling en implementatie (a human-centric approach, EC, 2021, Baltrusch et al., 2021). Vooral in omgevingen met hoge variatie en lage volumes – waar volledige automatisering vaak niet haalbaar is – blijft de rol van gekwalificeerde medewerkers essentieel bij taken zoals assemblage, inspectie, onderhoud en oplossen van storingen.

¹¹ Andere voorbeelden van succesvolle implementatie zijn te vinden in TNO (2024d).

¹² Zie bijvoorbeeld, <https://smartindustry.nl/personeel-meenemen-in-innovatieve-ontwikkelingen#ondernemersverhalen>; <https://metaalunie.nl/Teqnow/Productiviteit>.

De kennis en praktische ervaring van deze medewerkers zijn een cruciale bron voor het ontwerpen, evalueren en implementeren van slimme technologieën, zoals robotica en digitale oplossingen. Alleen door hun inzichten systematisch te benutten, kunnen technologieën worden ontwikkeld die aansluiten en worden gebruikt bij echte werkprocessen. Vragen stellen zoals “welke stappen worden momenteel handmatig uitgevoerd?”, “waar loop je als medewerker tegen aan tijdens je werk, waardoor je niet door kan?” en “welke informatie of ondersteuning ontbreekt?” helpt bij het identificeren van zinvolle technologische en organisatorische interventies.

Hoewel veel technologieën al op de markt beschikbaar zijn, vereist succesvolle toepassing binnen een fabriek doorgaans maatwerk. Dit vereist samenwerking tussen interne teams en externe partners, zoals technologie-integrators of machinebouwers, om oplossingen te ontwikkelen die zijn afgestemd op de specifieke context van het bedrijf. Denk bijvoorbeeld aan implementaties van digitale werk instructiesystemen in verschillende bedrijven (TNO, 2024c).

Sluit aan op de bestaande infrastructuur binnen de fabrieken en over de ketens om effectieve informatievoorziening te garanderen op de werkvloer. Om het volledige potentieel van digitalisering in de maakindustrie te benutten, is het essentieel om verbinding te maken met de bestaande

IT- en machine-infrastructuur, zowel binnen de fabriek als extern in de keten. Een effectieve strategie begint laagdrempelig, door gebruik te maken van gegevens die al beschikbaar zijn via bestaande machines en systemen. Initiatieven zoals Versterking van het Nederlandse Industriële MKB tonen aan dat met beperkte middelen waardevolle procesverbeteringen kunnen worden bereikt. Concrete toepassingen zijn bijvoorbeeld het koppelen van digitale werk instructies aan ERP-systemen of het koppelen van (inspectie) data aan productpaspoort in een remanufacturing lijn.

In de praktijk zijn veel bestaande en nieuwe systemen echter niet inherent interoperabel, wat leidt tot de noodzaak van technische en financieel intensieve aanpassingen. Om dit aan te pakken, is het raadzaam om aan te sluiten bij bestaande datastandaarden voor keteninformatie-uitwisseling, zoals die zijn ontwikkeld binnen initiatieven zoals het Smart Connected Supplier Network. Deze standaarden bevorderen de compatibiliteit en schaalbaarheid van digitale oplossingen.

Best practices en actuele voorbeelden van succesvolle integratie- en digitaliseringsprojecten zijn te vinden op platforms zoals Smart Industry Nederland. Deze bieden waardevolle inzichten voor bedrijven die hun digitale infrastructuur stap voor stap willen ontwikkelen en toekomstbestendig willen maken.

Maak gebruik van slimme oplossingen met en rond AI om de werknemers te ondersteunen. Ontwikkelingen in generatieve kunstmatige intelligentie (GenAI) gaan snel vooruit en bieden nieuwe kansen voor industriële digitalisering. Een toepassingsgebied betreft het versnellen van de creatie en het onderhoud van digitale werk instructiesystemen. Hoewel het digitaliseren van instructies waarde toevoegt, blijkt de praktische uitvoering, zoals het creëren en bijwerken van inhoud, vaak arbeidsintensief voor werkvoorbereiding en engineering (TNO, 2024c).

Met het gebruik van AI-gestuurde tools kunnen werk instructies automatisch worden gegenereerd op basis van video-beelden van acties op de werkvloer. Dit verlaagt de drempel voor het maken van instructies en stelt medewerkers in staat om samen en snel digitale inhoud te creëren (bijvoorbeeld via tools zoals Instant Instructions - Tech Transfer).

Daarnaast biedt GenAI in combinatie met 3D-gegevens de mogelijkheid om machines automatisch te besturen, zoals flexibele productie geautomatiseerde workflow generatie en autonome workflow 3D-printen. Dit bevordert meer autonome en adaptieve controle van productieprocessen, vooral in complexe of zeer gevarieerde productie-omgevingen. Deze toepassingen illustreren het potentieel van GenAI om niet alleen bestaande processen te optimaliseren, maar ook nieuwe vormen van interactie

tussen mensen, gegevens en machines mogelijk te maken.

Hoewel technologische innovaties in productieomgevingen beloven bij te dragen aan hogere arbeidsproductiviteit, blijft de werkelijke impact vaak onvoldoende begrepen. Evaluaties tot nu toe richten zich meestal op individuele technologieën of beoordelingen op bedrijfsniveau en zijn vaak momentopnames. Er zijn enkele praktische voorbeelden beschikbaar. Zo hebben het Inther-onderzoek (Stroosma, 2022) en andere experimenten de impact van digitalisering en automatisering op doorlooptijden, foutreductie en efficiëntie gemeten. Initiatieven zoals Versterking van het Nederlandse industriële MKB tonen ook op bedrijfsniveau aan hoe technologische interventies leiden tot concrete verbeteringen.

De langetermijneffecten van deze technologische oplossingen op de arbeidsproductiviteit zijn echter nog onderbelicht. Meer studies zijn nodig die bedrijven over langere perioden volgen. Alleen dan kan worden bepaald of de initiële productiviteitswinsten duurzaam zijn en in hoeverre deze effecten kunnen worden opgeschaald naar sectorale of macro-economische niveaus. Toekomstig onderzoek moet zich daarom richten op het kwantificeren van structurele effecten en het ontwikkelen van methoden om de productiviteitsimpact systematisch te meten binnen verschillende technologische en organisatorische contexten.¹³

¹³ Zie bij voorbeeld [FRAIM](#) voor meer informatie.

4. Conclusie en aanbevelingen

Om concurrerend te blijven, moeten bedrijven efficiënter werken en meer produceren met minder middelen met als doel de arbeidsproductiviteit te verhogen. Innovatie van productieprocessen op basis van digitalisering en automatisering is hierbij essentieel. De digitalisering van de maakindustrie, die centraal staat in deze discussie, wordt met het jaar urgenter. Hoe langer bedrijven wachten met het implementeren van digitale oplossingen, des te complexer en kostbaarder de transitie zal worden. Deze toenemende urgentie wordt versterkt door oplopende druk op de sector, veroorzaakt door arbeidsmarktkrapte, snel veranderende klantbehoeften en toenemende mondiale concurrentie.

Digitale technologieën bieden tal van voordelen, zoals verhoogde efficiëntie, kostenbesparingen en verbeterde kwaliteit. Ze maken het mogelijk dat meer output kan worden gegenereerd door werkprocessen te optimaliseren, menselijke fouten te verminderen en realtime datagestuurde beslissingen mogelijk te maken. Daarnaast stellen ze werknemers in staat om efficiënter te werken en zich te richten op taken met hogere waarde. Alles bij elkaar hebben ze het potentieel om de algehele concurrentiekracht van de bedrijven te verbeteren.

Toch ondervinden veel bedrijven, vooral MKB-bedrijven, nog steeds moeite met het

implementeren van Smart Industry-oplossingen. De hoge kosten voor het upgraden van bestaande systemen en de implementatie van digitale technologieën vormen vaak een drempel, evenals het tekort aan werknemers met de benodigde digitale vaardigheden. Deze knelpunten beperken niet alleen de interne digitale transformatie, maar bemoeilijken ook de integratie in bredere ketens, met name wanneer partnerorganisaties nog geen gebruikmaken van digitale en automatiseringstechnologieën. Wanneer slechts een deel van de keten geavanceerde technologieën toepast, ontstaan er knelpunten in de gegevensuitwisseling, coördinatie en procesafstemming, wat ten koste gaat van de algehele efficiëntie en responsiviteit van de waardeketen. Deze asymmetrie in digitaliseringsniveau vormt daarmee een rem op collectieve productiviteitsgroei en concurrentievermogen in de sector als geheel.

Daarom is het van essentieel belang dat digitaliseringsinspanningen starten in de meest innovatieve delen van de sector, bij de meest vooruitstrevende bedrijven. Deze koplopers, vaak gevestigd in strategische industriële clusters vormen de motor achter nieuwe niches en economische kansen voor Nederland en de Europese Unie. Hun vroege adoptie van digitale oplossingen stelt standaarden, vermindert risico's via

gedeelde leerervaringen, en fungeert als katalysator voor bredere transformatie binnen de industrie. Een voorbeeld hiervan is het NXTGEN Hightech-domein, waarin onder meer de hightech maakindustrie een centrale rol speelt. Dit domein levert een belangrijke bijdrage aan technologische vooruitgang en economische ontwikkeling.

Aanbevelingen

De digitalisering van de maakindustrie gebeurt niet vanzelf. Om de kansen die het biedt om de productiviteit te maximaliseren en de uitdagingen te mitigeren, doen wij de volgende aanbevelingen aan MKB-bedrijven:

- Stel medewerkers en de primaire processen centraal bij een succesvolle technologieontwikkeling en -integratie. Digitalisering moet dus gebaseerd zijn op een **mensgerichte aanpak**. Deze aanpak zorgt ervoor dat technologische oplossingen niet alleen zijn afgestemd op het primaire proces, de taken, maar vooral op de behoeften van de medewerkers, wat leidt tot praktisch en effectief gebruik.
- Adopteer arbeidsbesparende technologieën zoals robotica en kunstmatige intelligentie (AI) binnen een **breed scala aan organisaties, vooral voor MKB-bedrijven**. Door deze geavanceerde technologieën te integreren, kunnen MKB-bedrijven hun processen stroomlijnen, het aantal handmatige

handelingen verminderen en efficiëntie verbeteren. Dit helpt niet alleen bij het aanpakken van arbeidstekorten, maar stelt bedrijven ook in staat zich te richten op innovatie en groei. De implementatie van robotica en AI kan leiden tot aanzienlijke kostenbesparingen, verbeterde nauwkeurigheid en snellere doorlooptijden, waardoor MKB-bedrijven wendbaarder en responsiever worden voor marktbehoeften. Het omarmen van deze technologieën is essentieel voor MKB-bedrijven om te gedijen in een snel evoluerend economisch landschap.

- Bied onderwijs en training om **mensen uit te rusten met de vaardigheden** die nodig zijn om zich aan nieuwe technologieën aan te passen. Dit omvat niet alleen technische vaardigheden, maar ook het bevorderen van een cultuur die verandering en innovatie omarmt. Gebruikersgerichte ontwerpprincipes moeten worden toegepast om technologieën te creëren die toegankelijk en gemakkelijk te gebruiken zijn, zodat iedereen kan profiteren van digitale transformatie.

Andere Ecosysteempartners spelen ook een rol bij het stimuleren van digitalisering van de maakindustrie en het verminderen van de uitdagingen die ermee gepaard gaan. Hiervoor doen wij de volgende aanbevelingen:

- **Kennisinstituten en RTO's** (Research and Technology Organisation) zoals universiteiten en TNO kunnen de rol vervullen van onafhankelijke adviseur, ontwikkelaar of orchestrator bij de ontwikkeling van technologieën die kunnen helpen om de arbeidsproductiviteit te verhogen. Tevens kunnen RTOs helpen bij de ontwikkeling van dergelijke technologieën en werken daar al aan (zie bijvoorbeeld [Instant Instructions - Tech Transfer EN, Flexible manufacturing automated workflow generation | TNO](#)).
- **Beleidsmakers** spelen een cruciale rol met hun beleidsinstrumenten bij het bevorderen van een innovatief ecosysteem dat kleine en middelgrote ondernemingen (MKB-bedrijven) ondersteunt bij de digitalisering van de maakindustrie. Door publiek-private samenwerkingen te stimuleren, kunnen beleidsmakers een omgeving creëren waarin MKB-bedrijven toegang hebben tot de middelen en samenwerkingsmogelijkheden die nodig zijn voor onderzoek en ontwikkeling en innovatie. Onlangs lanceerde het Ministerie van EZ bijvoorbeeld het beleidsexperiment [Shaping the Future of Work](#) voor MKB-bedrijven. Dit omvat samenwerking tussen FRAIM (TUDelft, RoboHouse), TNO, Metaalunie, FME, Bouwend NL,

Techniek NL. Mensgerichte innovatie en systematische benaderingen vanuit verschillende perspectieven zijn onderwerpen van dit experiment. De aanpak en ervaringen zullen worden geëvalueerd en hopelijk in de komende jaren worden opgeschaald. Ter aanvulling op publieke initiatieven zijn gerichte beleidspraktijken noodzakelijk om private investeringen in digitale technologie en infrastructuur te stimuleren. Denk hierbij aan fiscale voordelen, co-investeringsregelingen, garantiestellingen en innovatievouchers die de financiële drempels voor met name het MKB verlagen. Door investeringsrisico's te beperken, kunnen overheden aanzienlijke private kapitaalinbreng mobiliseren en de brede adoptie van digitale oplossingen versnellen.

Het bevorderen van digitale transformatie van de maakindustrie vereist een **systeem aanpak** op basis van een **gezamenlijke inspanning** van alle betrokken actoren in het ecosysteem (inclusief koplopers en volgers). Op deze manier kan de digitale transformatie worden omgezet in een duurzaam concurrentievoordeel.

Geraadpleegde literatuur

Baltrusch, S. J., Krause, F., de Vries, A. W., van Dijk, W., & de Looze, M. P. (2021). What about the human in human robot collaboration? A literature review on HRC's effects on aspects of job quality. *Ergonomics*, 65(5), 719–740. <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1984585>.

Berlingieri, G. et al. (2020), “Laggard firms, technology diffusion and its structural and policy determinants”, OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, No. 86, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/281bd7a9-en>.

Corrado, C. et al. (2021), “New evidence on intangibles, diffusion and productivity”, OECD Science, Technology and Industry Working Papers, No. 2021/10, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/de0378f3-en>.

Deepak Kumar, S., Arun Manohar, G., Surya Teja, R., Ramana Rao, P.S.V., Mandal, A., Behera, A. and Srinivasa Rao, P. (2023). Smart Manufacturing Technologies in Industry 4.0. In *Intelligent Manufacturing Management Systems* (eds K. Muduli, V.P. Kommula, D.K. Yadav, M. Chithirai Pon Selvan and J. Kandasamy). <https://doi.org/10.1002/9781119836780.ch2>.

Draghi, M. (2024). The Future of European Competitiveness—A Competitiveness Strategy for Europe. https://commission.europa.eu/document/97e481fd-2dc3-412d-be4c-f152a8232961_en.

European Commission (2021) Directorate-General for Research and Innovation, Breque, M., De Nul, L. and Petridis, A., Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry, Publications Office of the European Union, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>.

FME (2022) Aanvalsplan Arbeidsmarkt-tekorten: Techniek, Bouw en Energie, <https://www.fme.nl/system/files/publicaties/2022-11/Aanvalsplan%20Techniek%20versie%20voor%20website.pdf>.

Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Vilkas, M., Grybauskas, A. and Amran, A. (2022), “Drivers and barriers of Industry 4.0 technology adoption among manufacturing SMEs: a systematic review and transformation roadmap”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 33 No. 6, pp. 1029-1058. <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2021-0505>.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., Suman, R., (2022) Significant applications of Cobots in the field of manufacturing, *Cognitive Robotics*, Volume 2, 2022, Pages 222-233, ISSN 2667-2413, <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.10.001>.

Matt, D.T., Rauch, E. (2020). SME 4.0: the role of small-and medium-sized enterprises in the digital transformation. In: *Industry 4.0 for SMEs: Challenges, Opportunities and Requirements*. Palgrave Macmillan, *SME 4.0: The Role of Small- and Medium-Sized Enterprises in the Digital Transformation* | SpringerLink.

Rani, P., Mishra, A.R., Alshamrani, A.M. et al. (2025) Adoption of Smart Manufacturing Technologies in Small and Medium Enterprises Using Picture Fuzzy Combinative Distance-Based Assessment Model. *J Knowl Econ*. <https://doi.org/10.1007/s13132-025-02693-x>.

Smart Industry roadmap (2020) Research agenda for HTSM, ICT and the route for NWA, https://hollandhightech.nl/_asset_public/Innovatie/Technologieen/z_pdf_roadmaps/Roadmap-Smart-Industry-2020.pdf.

Smart Industry Program (2022) Smart Industry Schaalsprong Agenda 2022–2026, <https://open.overheid.nl/repository/ronl-b01093f75135ad2ed28456366e6acf6972051aa3/1/pdf/22221006bijlage-1-schaalsprong-agenda-2022.pdf>.

Stroosma, E. (2022, September 12). Met een tablet in de hand rolmotoren vervangen. *Logistiek.nl*. <https://www.logistiek.nl/187002/met-een-tablet-in-de-hand-rolmotoren-vervangen>.

TNO (2024a) Smart Industry impact: looking back and forward, whitepaper, *Whitepaper Smart Industry impact: looking back and forward*.

TNO (2024b), Nederland spendeert te weinig aan R&D en loopt steeds verder achter op buurlanden, https://vector.tno.nl/publish/pages/4803/tno-vector-nederland-r_d-investeringen-lopen-achter.pdf.

TNO (2024c), Aan de slag met digitale werkinstructies, Whitepaper, https://www.tno.nl/publish/pages/11082/paper_tno_digitale_werkinstructies.pdf.

TNO (2024d), Hoe kunnen Smart Industry fieldlabs in de toekomst effectief worden ingezet, Rapport Smart Industry fieldlabs, https://vector.tno.nl/publish/pages/5108/tno_vector-paper_fieldlabs_voor_de_toekomst_toegankelijk_1.pdf.

TNO (2025a) Het Nederlandse concurrentievermogen, in het licht van het Draghi-rapport: The future of European competitiveness, <https://publications.tno.nl/publication/34644080/ABbMWCTh/TNO-2025-R10842.pdf>.

TNO (2025b) Arbeidsproductiviteit vitaal voor verdienvermogen – Oplossingen voor achterblijvende groei, TNO whitepaper in het kader van 'De Staat van Nederland Innovatieland 2024', <https://publications.tno.nl/publication/34643650/UXBZ0DxA/TNO-2024-R12516.pdf>.

Vries, A.W. de, Oosterhout, J. van, Vries, M.N. de, Geit, E. de, Koen, J. (2025). Make complex assembly work more accessible through projection based work instructions, [manuscript in preparation].

Zabudkina, A., Lisein, O., Pichault, F. (2024). Under Pressure: Strategic Choices and Contextual Trade-Offs of SMEs Facing Industry 4.0 Implementation. In: Braccini, A.M., Pallud, J., Pennarola, F. (eds) Technologies for Digital Transformation . ItAIS 2022. Lecture Notes in Information Systems and Organisation, vol 64. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52120-1_7.

Auteurs

Anastasia Yagafarova, Gu van Rhijn, Joris Vierhout & Aijse de Vries

TNOvector
Centre for Societal Innovation and Strategy

Met dank aan: Claire Stolwijk, Kristina Karanikolova & Marc Courage

12 juni 2025

tnovector.nl