

Herijking sleuteltechnologieën 2023



Auteurs

Thijmen van Bree (TNO), Govert Gijsbers (TNO),
David Otto (TNO), Vera Janssen (NWO-TNO),
Emma Winkels (NWO), Marijn Goes (NWO),
Leon Gielgens (NWO), Tom van der Horst (TNO)

Update juli 2024

TNO innovation
for life



Herijking sleuteltechnologieën 2023

Inhoudsopgave

1. Achtergrond	3	Bijlagen	33
2. Doel van dit rapport	3	1. Overzicht van de belangrijkste doorgevoerde wijzigingen 2018-2023	34
3. Criteria sleuteltechnologieën	4	2. Lijst van experts die deelnamen aan (online) discussiebijeenkomsten	36
4. Proces herijking sleuteltechnologieën	5	3. Toelichting wijzigingen 2023-2024	39
5. Resultaten	6	4. Overzicht van de belangrijkste doorgevoerde wijzigingen 2023-2024	40
5.1 Generieke wijzigingen	6		
5.2 Inhoudelijke aanpassingen per sleuteltechnologiecluster	7		
5.3 Samenvattend overzicht	11		
5.4 Overige opmerkingen	11		
6. Ten slotte	11		
7. Sleuteltechnologieën Herijking 2023, TNO en NWO	12		
7.1 Advanced materials	13		
7.2 Photonics and optical technologies	15		
7.3 Quantum technologies	17		
7.4 Digital and information technologies	19		
7.5 Chemical technologies	22		
7.6 Nanotechnology	24		
7.7 Life science and biotechnologies	27		
7.8 Engineering and fabrication technologies	30		

1. Achtergrond

Het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) ontwikkelt een Nationale Technologiestrategie (NTS). Deze heeft tot doel om een visie te vormen als basis voor de inzet van middelen op (sleutel)technologieën en daarmee bij te dragen aan efficiëntere, gerichte investeringskeuzes. De NTS is daarmee richtinggevend voor de vormgeving van de ontwikkeling van sleuteltechnologieën en de prioriteiten die daarbinnen én daartussen worden gelegd.

Het startpunt van de NTS bestaat uit een herijking van de lijst Sleuteltechnologieën die na een voorverkenning van NWO en TNO in 2017 en verdiepende bibliometrische analyse van Elsevier in 2018 is vastgesteld. Die lijst van 50 sleuteltechnologieën, onderverdeeld in acht clusters, heeft vervolgens in 2019 een plek gekregen in de KIA Sleuteltechnologieën.

Los van de kennis- en innovatievragen in de KIA Sleuteltechnologieën zelf, speelt de lijst van sleuteltechnologieën onder andere een rol in de brede inzet op sleuteltechnologieontwikkeling binnen Topsectoren (via KIA's), het Nationaal Groeifonds, NWO-calls en als basis voor de inzet van regionale middelen en EU-cofinanciering.

In deze versie van juli 2024 zijn enkele wijzigingen doorgevoerd ten opzichte van de eerdere publicatie in maart 2023. Definities en beschrijvingen van enkele sleuteltechnologieën zijn gewijzigd op basis van de Nationale Technologiestrategie (NTS), die is gepubliceerd door het Ministerie van Economische Zaken & Klimaat (EZK) in januari 2024 en tot stand is gekomen door een samenwerking met TNO, NWO en EZK. Een overzicht van de wijzigingen en een toelichting zijn te vinden in bijlage 3 en 4.

2. Doel van dit rapport

Ons doel met de herijking van de lijst van sleuteltechnologieën is om de bestaande lijst inhoudelijk te verdiepen en te verrijken, zodat deze het Nederlandse sleuteltechnologieland accuraat representeert en er een goede kapstok voor de vorming van de NTS ontstaat. Specifieke vragen in de herijkingsexercitie zijn:

Primair

- Kan voor iedere technologie een heldere definitie en duiding met keywords worden toegevoegd?¹
- Is de lijst van sleuteltechnologieën compleet? Zijn er nieuwe technologieën die moeten worden toegevoegd?

Secundair

- Zijn er aanpassingen nodig aan bestaande sleuteltechnologieën op de lijst?
- Is binnen categorieën verder onderscheid mogelijk of gewenst?
- Kunnen (gemotiveerd) subcategorieën worden samengevoegd?
- Kunnen er technologieën van de lijst worden afgevoerd?

¹ Hierbij richten we ons op een algemeen begrip (ook voor de relatieve leek), waarin de kernaspecten van iedere technologie worden benoemd, niet zozeer het vangen van alle niches (zoals in de bibliometrische analyses van Elsevier (2018) of de RVO (2019)). Per categorie beogen we de relevante inhoudelijke ontwikkelingen sinds 2017 te vangen.

3. Criteria sleuteltechnologieën

Het begrip sleuteltechnologieën wordt in de Kennis- en Innovatieagenda Sleuteltechnologieën (KIA-ST) als volgt gedefinieerd: “[Sleuteltechnologieën] omvat[ten] zowel de Key Enabling Technologies (KET’s) als de Future and Emerging Technologies uit de Europese programma’s Horizon 2020 en diens opvolger Horizon Europe. Sleuteltechnologieën worden gekenmerkt door een breed toepassingsgebied of bereik in innovaties en/of sectoren. Ze zullen de manier waarop we leven, leren, innoveren, werken en produceren ingrijpend veranderen en kansen bieden om problemen in de samenleving op te lossen.

Sleuteltechnologieën zijn essentieel bij het oplossen van maatschappelijke uitdagingen en/of leveren een grote potentiële bijdrage aan de economie, door het ontstaan van nieuwe bedrijvigheid en nieuwe markten, het vergroten van de concurrentiekracht, en het versterken van de banengroei. Ze maken baanbrekende proces-, product- en/of diensteninnovaties mogelijk en zijn relevant voor de wetenschap, de maatschappij en de markt”².

Samengevat zijn daarmee belangrijkste elementen van een sleuteltechnologie:

- Brede toepasbaarheid;
- Enabling en vernieuwend karakter;
- Zicht op toepassing in de middellange termijn;
- Voldoende substantie of basis in het Nederlandse innovatiesysteem (universiteiten, kennisinstellingen, bedrijven, inclusief startups) zodat wordt bijgedragen aan lange termijn economisch potentieel voor Nederland.

Omdat het een herijking van een bestaande lijst betreft, is tevens expliciet aandacht besteed aan actualiteit. Hiermee wordt bedoeld in hoeverre de nieuwe suggesties ontwikkelingen reflecteren die sinds 2018 hebben plaatsgevonden in wetenschap en technologie (bijvoorbeeld de snelle opmars van kunstmatige intelligentie) en economie en maatschappij (bijvoorbeeld de klimaattransitie).

Bovenstaande elementen hebben we als criteria gehanteerd bij het overwegen of nieuwe technologieën aan de lijst toegevoegd (of afgevoerd) dienen te worden.

² https://www.nwo.nl/sites/nwo/files/assets/20191015%20KIA-ST_1.pdf

4. Proces herijking sleuteltechnologieën

Het ministerie van EZK heeft bij NWO en TNO een adviesaanvraag neergelegd om te komen tot een herijking van de lijst van sleuteltechnologieën uit 2018. Voor de herijking is een gefaseerde aanpak gevolgd, bestaande uit een eerste fase van deskresearch gevolgd door expertconsultatie ter aanscherping en validatie. Gegeven de korte doorlooptijd van dit traject (november – december 2022) is de expertconsultatie pragmatisch ingestoken middels het verzamelen van schriftelijke input, online groepsbijeenkomsten en twee fysieke bijeenkomsten op het ministerie van EZK.

Het doel van de expertconsultatie was om een voldoende representatief beeld te krijgen voor alle clusters van sleuteltechnologieën. Daarom zijn technologisch experts bevraagd die vanuit een brede blik op technologieontwikkeling en toepassingsmogelijkheden kunnen reflecteren.

Op basis van deskresearch hebben NWO en TNO een eerste voorzet gemaakt van een herziene lijst van sleuteltechnologieën. Deze werd begin november 2022 gedeeld met het Kernteam Sleuteltechnologieën, waarna commentaar is verwerkt in een volgende versie die op 23, 24 en 25 november jongstleden is besproken in een viertal online sessies met experts. Vervolgens hebben NWO en TNO deze en andere inhoudelijke aanscherpingen verwerkt in een tabel met sleuteltechnologieën die als input diende voor twee fysieke bijeenkomsten op het ministerie van EZK op 16 december jongstleden. Op basis hiervan werd de versie ontwikkeld die in dit rapport is opgenomen. Een overzicht van de wijzigingen ten opzichte van de lijst uit 2018 is opgenomen in bijlage 1. De namen van de deelnemers aan de online sessies en aan live sessies op 16 december staan in bijlage 2.

5. Resultaten

Het belangrijkste resultaat van de herijkingsexercitie wordt gepresenteerd in de tabel in dit rapport en is naast deskresearch gebaseerd op de mondelinge en schriftelijke bijdragen van meer dan 60 experts. Tussen begin november en eind december 2022 heeft het NWO-TNO team vier verschillende versies van deze tabel geproduceerd. Over classificaties, categorieën, titels, definities, toepassingen en keywords zal altijd discussie mogelijk blijven.

De belangrijkste wijzigingen ten opzichte van de lijst ST 2018 kunnen worden samengevat op twee niveaus: generiek (voor alle sleuteltechnologieën) en specifiek voor individuele (clusters van) sleuteltechnologieën.

5.1 Generieke wijzigingen

1. Sterkere ordening op basis van technologieën in plaats van toepassingen

Deelnemers aan de discussiebijeenkomsten viel op dat in sommige sleuteltechnologieclusters technologieën en toepassingen door elkaar liepen. In de huidige lijst van sleuteltechnologieën worden zoveel mogelijk de onderliggende technologieën als basis voor de indeling gebruikt, omdat het bij sleuteltechnologieën met name om het enabling karakter gaat. Op deze wijze is bijvoorbeeld 'industriële biotechnologie' niet meer opgenomen in de nieuwe lijst. Daarbij blijven een aantal lastige keuzes over. Voorbeelden zijn medische technologieën, civil engineering en stromingsleer en -technologieën. Hoewel dit (technologisch, economisch en maatschappelijk) zeer belangrijke vakgebieden en disciplines vormen, zijn ze gebaseerd op onderliggende enabling technologies die in deze lijst centraal staan. Er is gepoogd die onderliggende technologieën een plek te geven binnen de meest logische categorie en daarmee te komen tot een lijst die binnen clusters intern samenhangend is en overkoepelend (uitzoomend op de gehele lijst) voldoende coherent is.

2. Raakvlakken en samenhang tussen sleuteltechnologieën

Belangrijke input van de deelnemers in de discussies betrof de samenhang en raakvlakken tussen sleuteltechnologieën. Er werd onder andere benadrukt dat de oplossing voor maatschappelijke opgaven schuilt in de koppeling van verschillende sleuteltechnologieën. Daarbij werd ook genoemd dat een belangrijke rol is weggelegd voor systems engineering. Een dergelijke 'rode draad' door alle sleuteltechnologieclusters heen werd gezien als sleutel om te komen tot integrale oplossingen voor grote maatschappelijke vraagstukken.

Wij hebben in de herijkte lijst, in het tekstblok met de algemene clusterdefinitie, nu de raakvlakken met andere clusters/sleuteltechnologieën expliciet vermeld. Om aan deze nadruk op samenhang en systeemdenken recht te doen is systems engineering als nieuwe sleuteltechnologie toegevoegd binnen het cluster Engineering & Fabrication technologies.

3. Plaatsing van sleuteltechnologieën in een cluster

In een aantal gevallen blijft de plaatsing (en naamgeving) van een sleuteltechnologie op de herijkte lijst onderwerp van discussie. Een voorbeeld betreft imaging technologies. Momenteel staat deze technologie onder Engineering and Fabrication technologies, maar ook binnen de clusters Life science and biotechnologies en Advanced materials speelt het een belangrijke rol. Een ander voorbeeld is bio-nanotechnologie (of nano-biotechnologie) die zowel onder biotechnologie als onder nanotechnologie een plek kan vinden. Hier is zoveel mogelijk gekozen voor een pragmatische oplossing, wetende dat er wellicht meer logische plekken zouden zijn. Belangrijk is om ook te vermelden dat de categorieën in 2018 vanuit pragmatisch oogpunt zijn gekozen om technologieën te bundelen. Daarmee hebben ze geen expliciete betekenis. In het kader van de NTS zal juist zoveel mogelijk naar de individuele technologieën worden gekeken (zie ook 2, doel van dit rapport).

5.2 Inhoudelijke aanpassingen per sleuteltechnologiecluster

1. Advanced materials

Tijdens de online discussiesessie over Advanced materials was er consensus onder de deelnemers om de vijf toepassingsgebieden uit de Nationale Agenda Materialen (Energiematerialen, Elektronische materialen, Constructie materialen, Zachte/biomaterialen en Coatings/filmmaterialen) te gebruiken als ordening van de onderliggende sleuteltechnologieën. Uit het Kernteam Sleuteltechnologieën daarentegen klonk met name de oproep om onderscheid aan te brengen op technologieën in plaats van toepassingsgebieden.

Wij hebben nu gekozen voor een ordening van materialen langs hun functioneel-technische eigenschappen (welke op verschillende schaalniveaus nano, micro, macro) ingezet kunnen worden. Daarbij hebben we enkele samenvoegingen doorgevoerd om herkenning met de Nationale Agenda Materialen te vergroten.

Tijdens de discussies met experts werd opgemerkt dat ‘materials by design’ als nieuwe, opkomende technologie een plek zou moeten krijgen op de lijst. Daarbij gaat het om een radicaal andere wijze van het ontwerpen van materialen, waarbij de gewenste eigenschappen van materialen het startpunt vormen. Geavanceerde computertechnologieën (zoals quantum computing) worden gebruikt om materialen met gewenste functionaliteiten te realiseren. Daarbij werd tevens aangegeven dat ‘materials by design’ echt iets anders is dan ‘designer materials’ die al een plek hadden op de oude lijst. Nu is die categorie inhoudelijk aangescherpt en hernoemd tot ‘Meta materials’. In de nu gehanteerde onderverdeling van sleuteltechnologieën hebben we materials by design opgenomen als key word en beschrijven we voorts de trend om geavanceerde computing in te zetten bij het ontwerpen van geavanceerde materialen.

2. Photonics and optical technologies

Tijdens de (online) discussiesessies met experts werd aangegeven dat het verstandig was om ‘optical’ een meer prominente plek te geven binnen dit sleuteltechnologiecluster. Om die reden is de naam van het cluster gewijzigd in ‘Photonics and Optical technologies’, naast inhoudelijke aanscherpingen van de categorieën zelf. Die inhoudelijke aanscherpingen hebben geleid tot het herbenoemen van de oude sleuteltechnologie ‘Integrated photonics’ naar ‘Optical systems and integrated photonics’.

De achtergrond voor deze wijziging is dat men binnen het cluster Photonics and optical technologies een drietal acties kan verrichten met lichtgolven en deeltjes: opwekken, opvangen en meten en verwerken voor bepaalde optische functies. Photon generation technologies richten zich op het opwekken, Photonic/Optical detection and processing houdt zich bezig met het opvangen en meten van fotonen en lichtgolven, Optical systems omvatten de verwerking hiervan om bepaalde optische functies te vervullen.

Ook integrated photonics houdt zich bezig met verschillende fotonische/optische functies. Hier gaat het om de integratie in een functionele chip. Vanuit dit perspectief is het logisch om integrated photonics samen met optical systems te benoemen in de sleuteltechnologie ‘Optical systems and integrated photonics’. Mede op basis van input van experts zijn de keywords aangepast, zodat deze nu ook optical systems voldoende ondervangen (naast keywords over geïntegreerde fotonica die al op de oude lijst stonden).

3. Quantum technologies

De beschrijvingen en keywords bij de sleuteltechnologieën binnen het cluster Quantum technologies zijn inhoudelijk aangescherpt op basis van desk research en de suggesties van experts. Dit heeft geleid tot een naamswijziging van 'Quantum sensors and metrology' naar 'Quantum sensing'. Voorts zijn onder andere software en quantum materials op basis van de opmerkingen van experts duidelijker benoemd binnen de bestaande categorieën.

4. Digital and information technologies

Op basis van de (online) discussies met experts en suggesties voor inhoudelijke aanscherpingen zijn een aantal grotere wijzigingen doorgevoerd in de sleuteltechnologieën binnen het cluster Digital and Information Technologies. Allereerst betreft dit een naamswijziging van het cluster zelf, welke voortvloeit uit een discussie over de 'niet-digitale technologie' 'Neuromorphic technologies'. Deze technologie werd genoemd als sterk opkomend en relevant voor het energie-efficiënt verwerken van informatie. Met het opnemen van neuromorphic technologies als 'niet-digitale technologie', ontstond een noodzaak om de naam van het cluster breder te trekken naar 'Digital and Information technologies'. In generieke zin werd door experts benadrukt dat er ook met betrekking tot Digital technologies een grote opgave schuilt in verduurzaming middels energiebesparing en energiezuinige computing, data-opslag en dergelijke. Duurzame informatie- en communicatietechnologie (Green ICT) is derhalve op de herijkte lijst van sleuteltechnologieën benoemd als toepassingsgebied.

Tijdens de online discussiebijeenkomst met experts kwam de vraag ter sprake of Digital Twinning als nieuwe technologie het best een plek kon krijgen binnen het cluster Digital and Information technologies in plaats van Engineering and Fabrication technologies, waar Digital Twinning in een eerdere werkversie van de herijking een plek had gekregen. Er is besloten om Digital Twinning, tezamen met 'Immersive Technologies' toe te voegen als nieuwe sleuteltechnologie binnen het cluster Digital and Information technologies. Het belangrijkste argument hiervoor is dat Digital twinning (met zijn vele toepassingsgebieden) een meer generiek karakter heeft en breder is dan de toepassing in industriële productieprocessen³.

Naar aanleiding van de online discussiesessie was een openstaande vraag tijdens de fysieke bijeenkomst op 16 december waar 'Data Spaces' (data-ecosystemen) het best een plek kon krijgen op de herijkte lijst. Er was onder experts brede steun om deze technologie te benoemen tezamen met data science en data analytics.

Ook gaven experts aan dat Blockchain beter geschrapt kon worden als zelfstandige sleuteltechnologie en dat de onderliggende elementen van security, privacy en trust een plek zouden kunnen krijgen in een bredere beschrijving van 'Software Technologies'. Tevens gaven experts aan dat de categorie X-Computing (cloud, grid, edge, High-Performance) beter hernoemd kon worden en dat er het best een onderscheid gemaakt kan worden met betrekking tot computing en digitale infrastructuur/future communication. Op basis van concrete inhoudelijke suggesties van experts heeft dit geleid tot het gezamenlijk benoemen van 'Software technologies and computing' als nieuwe sleuteltechnologie en daarnaast 'Digital Connectivity Technologies' te benoemen op de herijkte lijst.

3 Binnen het cluster Engineering & Fabrication technologies wordt de relatie met digital twinning nog wel gelegd in de nieuwe sleuteltechnologie 'Digital manufacturing technologies'

5. Chemical technologies

De beschrijvingen en keywords bij de sleuteltechnologieën binnen het cluster Chemical technologies zijn inhoudelijk aangescherpt op basis van desk research en de suggesties van experts. De belangrijkste wijzigingen betreffen hier de naamswijziging en omvorming van de oude categorie 'Microreactors' naar '(Advanced) Reactor engineering' en hernoeming en aanscherping van de zesde sleuteltechnologie binnen dit cluster: 'Electricity-driven chemical reaction technologies'. Deze laatste wijziging is doorgevoerd om elektrificatie uitgebreider te beschrijven, in samenhang met elektrochemie, plasmachemie en fotochemie.

6. Nanotechnology

De belangrijkste wijziging die is doorgevoerd binnen het cluster Nanotechnology betreft het verplaatsen van 'Semi-conductor devices' naar het cluster Engineering & Fabrication technologies, waar deze technologie een plek heeft gekregen onder 'Micro electronics'. Onder meer vanwege het strategische belang (Chips act en strategische autonomie) was er een roep om semiconductor technologies meer expliciet te benoemen op de herijkte lijst van sleuteltechnologieën. Daarnaast gaven experts tijdens de online discussiebijeenkomst aan dat de beschrijving van de oude categorie 'Nanoscale devices' breder getrokken moest worden, onder meer om duidelijk te maken dat hier alle typen functionaliteit (optisch, magnetisch, elektronisch, mechanisch) onder vallen. Dit heeft geleid tot het inhoudelijk aanscherpen en benoemen van de nieuwe sleuteltechnologie 'Functional devices and structures (on nanoscale)'. Tevens is de categorie Nanomanufacturing inhoudelijk aangescherpt, onder andere met de toevoeging van een beschrijving over het belang van vervuilsbeheersing.

7. Life Science and biotechnologies

Tijdens de online expertconsultatie was er consensus dat tien sleuteltechnologieën binnen het cluster Life sciences en Biotechnologies teveel waren. De veelheid aan sleuteltechnologieën droeg niet bij aan een functioneel onderscheid en begrip. Er is zodoende een consolidatie doorgevoerd naar drie brede sleuteltechnologieën en Bio-informatics als vierde sleuteltechnologie binnen dit cluster. Tijdens de fysieke bijeenkomsten op 16 december jongstleden zijn vervolgens een aantal aanvullende opmerkingen geplaatst die hebben geleid tot verdere inhoudelijke aanscherping. Zodoende is 'Biomolecular technologies' verder aangescherpt tot 'Biomolecular and -cell technologies' en is 'Biosystems' hernoemd tot 'Biosystems and organoids'. Tijdens de fysieke bijeenkomst was de koppeling met Medtech en de toepassing van life science and Biotechnologies in gezondheid en zorg een discussiepunt. Deelnemers constateerden dat het medische technologiedomein vrijwel niet aan bod komt, onder meer doordat alle herijkte sleuteltechnologieën binnen dit cluster een focus op de biotechnologie hebben.

Er is naar aanleiding van deze discussie getracht de relevante toepassingsgebieden in het medische domein expliciet te benoemen, zowel in het tekstblok met de clusterdefinitie van Life science and Biotechnologies als de koppeling met medical devices te benoemen in het cluster Engineering & Fabrication technologies.

8. Engineering and fabrication technologies

Naar aanleiding van de discussie over het belang van een integraal perspectief en de koppeling van verschillende sleuteltechnologieën in toepassingen voor het adresseren van maatschappelijke uitdagingen, is 'Systems engineering' toegevoegd als nieuwe sleuteltechnologie binnen het cluster Engineering & Fabrication technologies.

'Semiconductor technologies' is toegevoegd als nieuwe sleuteltechnologie binnen Engineering & Fabrication technologies omdat dit een eigenstandig technologieveld is dat in toenemende mate maatschappelijk en economisch relevant is, onder andere vanwege strategische autonomie en de Chips Act. Onder Semiconductor technologies zijn eerdere sleuteltechnologieën als High Frequency and Mixed Signal technologies en Semicon devices (verplaatst vanuit het cluster Nanotechnology) toegevoegd. Digital manufacturing technologies is opgenomen als brede sleuteltechnologie die bouwt op een aantal andere technologieën en systemen zoals digital twins, cyber-physical systems, digitale platformen, ERP systemen, robotica, AI en

machine learning, etc. Tijdens de discussie werden ook andere nieuwe industriële technologieën genoemd, zoals depositietechnologie (het aanbrengen van nanocoatings op grote oppervlakten). Deze technologie is ondergebracht in het cluster Nanotechnology.

Bij verschillende sleuteltechnologieën onder Engineering & Fabrication technologies rees de vraag waar deze het best geplaatst konden worden. In deze context werden bijvoorbeeld Imaging technologies en optomechatronics genoemd. Enerzijds vroeg men af of deze technologieën niet gevat konden worden onder Systems engineering (hetgeen wel een risico op een heel erg brede vergaarbak zou opleveren). Anderzijds werden deze technologieën 'monodisciplinair' genoemd, terwijl de andere technologieën in sterke mate over integratie gaan. Ook werd opgemerkt dat de eerdere beschrijving van (opto)mechatronics teveel over optics ging en nog te weinig over mechatronics. Op basis van de suggesties en commentaren is de sleuteltechnologie 'Mechatronics en optomechatronics' hernoemd en inhoudelijk aangescherpt.

Het brede toepassingsbereik en integratieve karakter van Engineering en Fabrication technologies kwam ook ter sprake in relatie tot Medtech en toepassingen in Life Sciences and Health.

Genoemd werd ook dat alle technologieën onder Engineering & Fabrication zeer relevant zijn voor gezondheid en zorg en de productie van medische apparaten en instrumenten. Gegeven de sterke positie die Nederland heeft op zowel Life Science en Health onderzoek als Engineering en Fabrication technologies (hightech equipment), maar dat juist de krachtenbundeling van deze gebieden nog onvoldoende van de grond komt, wordt door meerdere partijen benadrukt dat Medtech 'as such' apart moet worden gepositioneerd. Vooralsnog is besloten dit echter niet te doen. Om deze relevantie/kans wel tot uiting te laten komen is gekozen voor het expliciet benoemen van dit thema als toepassingsgebied. Voorts geldt ook hier dat de herijkte lijst van sleuteltechnologieën onderliggende technologieën centraal stelt. Medtech als zodanig is derhalve niet opgenomen als separate sleuteltechnologie.

Tijdens de expertconsultatie was er tot slot nog discussie over twee onderwerpen. Het eerste onderwerp betreft stromingsleer/stromingstechnologieën (fluidics). Er werd door experts benadrukt dat er nog veel kennisvragen leven op het gebied van deze technologie. Daarbij werd aangegeven dat er een noodzaak is om dit vakgebied op de herijkte lijst breder aan bod te laten komen dan alleen het benoemen van micro- en nanofluidics binnen het cluster Nanotechnologies. Door de lijst heen is derhalve getracht de relevantie van fluidics te benoemen in de beschrijving en keywords van de onderliggende technologieën op de lijst. Het brede vakgebied als zodanig is niet als aparte categorie benoemd onder Engineering & Fabrication technologies. Als tweede werd geconstateerd dat civil engineering niet in de lijst van sleuteltechnologieën genoemd wordt, terwijl dit een voor Nederland belangrijke discipline is en bovendien van cruciaal belang in het goed doorlopen van transities en transformaties (om klimaatdoelen te behalen). Aangezien civil engineering vooral voortbouwt op de onderliggende enabling technologies die in de herijkte lijst van sleuteltechnologieën centraal staan, is deze discipline als zodanig niet opgenomen op de lijst.

5.3 Samenvattend overzicht van de belangrijkste wijzigingen

Bijlage 1 presenteert in tabelvorm een overzicht van alle wijzigingen in de herijkte lijst van sleuteltechnologieën ten opzichte van die uit 2018.

5.4 Overige opmerkingen

Aan het eind van de bijeenkomst op 16 december 2022 kwam het onderwerp kernenergie en de daarvoor benodigde technologieën nog ter sprake. Er werd geconstateerd dat relevante technologieën zoals moderne technologieën voor kernsplijting en ultracentrifuges nu nergens een plek hebben op de lijst.

Dit terwijl er (hernieuwde) relevantie wordt gezien in het licht van duurzame energieopwekking. Binnen de bestaande sleuteltechnologieclusters is deze technologie echter moeilijk onder te brengen. Dit zou wellicht een apart cluster vereisen. Dit onderwerp is om pragmatische redenen, gegeven de korte resterende doorlooptijd van de huidige herijkingsexercitie, niet verder geadresseerd.

6. Ten slotte

Dit rapport en de bijlagen zijn het eindproduct van het adviestraject dat het Ministerie van EZK bij NWO en TNO belegd heeft. Op 24 december 2022 is een conceptrapport gedeeld met het Kernteam Sleuteltechnologieën en alle deelnemers van de expertsessies. Hierop zijn nog enkele schriftelijke reacties met suggesties ter correctie, aanscherping of aanvulling gekomen. In de periode januari – maart 2023 zijn nog enkele laatste kleine wijzigingen doorgevoerd in het rapport. Het rapport is in de huidige vorm akkoord bevonden op 16 maart door het kernteam sleuteltechnologieën. Het Ministerie van EZK gebruikt dit rapport vervolgens in de verdere stappen om medio 2023 te komen tot een Nationale Technologiestrategie.

7. Sleuteltechnologieën

Herijking 2023, TNO en NWO

7.1 Advanced materials

Definitie

Geavanceerde materialen hebben mechanische, fysische en functionele eigenschappen die bepalend zijn voor (nieuwe, revolutionaire) toepassingen en functionaliteiten van producten. Geavanceerde materialen variëren (enorm) in schaalgrootte, van nano- en microschaal tot voorwerpen om ons heen. Vanaf structuren op de kleinste schaal worden de mechanische, fysische en functionele eigenschappen van materialen gevormd. Zo kunnen additieven specifieke eigenschappen toevoegen aan materialen, zoals zelfreinigend vermogen. Synthese en karakterisatietechnieken zijn van belang voor de vervaardiging van geavanceerde materialen⁴.

Materials Science & Engineering houdt zich bezig met de fabricage, synthese en het actief aanpassen van materialen. Een volledig nieuwe methode om materialen te ontwerpen betreft materials by design waar (geavanceerde) computational methodes worden ingezet, om op basis van gewenste eigenschappen, nieuwe materialen te ontwerpen⁵.

Raakvlakken met andere sleuteltechnologieën

Chemical technologies, Engineering & Fabrication technologies, Nanotechnology, Life Science and Biotechnologies, Quantum technologies (quantum materials), Digital technologies (onder andere AI en geavanceerde computing ten behoeve van 'materials by design'), Photonics and optical technologies (onder andere Optical systems and integrated photonics, Photovoltaics).

Mogelijke toepassingen (niet uitputtend)

Energietransitie, Duurzaamheid⁶, Transport, Gezondheid en zorg, Advanced manufacturing, High precision systems, Bouw, ICT, Space, Defensie en veiligheid.

⁴ MaterialenNL Platform (2020). Nationale Agenda Materialen. Synthese zelf is onderdeel van de sleuteltechnologie 'Process technology, including process intensification' binnen het cluster Chemical technologies.

⁵ Materials by design is niet meegenomen als sleuteltechnologie omdat hier een ordening langs functioneel-technische eigenschappen van materialen wordt gehanteerd.

⁶ Voor alle geavanceerde materialen is het met betrekking tot circulariteit en de klimaatdoelen van groot belang om de energie- en CO2-footprint in ogenschouw te nemen in het initiële ontwerp, de fabricage en recycling van de materialen. Ook is de natuurlijke voorraad en beschikbaarheid van materialen van belang, met name waar het gaat om grootschalige adoptie van materialen. Dit raakt aan de EU programma's over 'critical materials' en het onderwerp strategische autonomie.

Advanced materials

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Energy materials	Energy materials omvat alle materialen die het mogelijk maken om (duurzaam opgewekte) energie op te slaan, te transporteren, efficiënt te vangen en efficiënt om te zetten naar een andere vorm of energiedrager.	Batteries, Heat batteries, Electrochemical cells, Fuel cells, Flywheel, , Solar fuels, Hydrogen storage and transport, Power to Hydrogen, Power to Gas, Power to Heat, Power to Chemicals, Wind to electricity, gas or hydrogen, Molten salt, Electrolysis, Carbon Capture materials, magneto- and electro-caloric materials, Phase change materials.
Optical, electronic, magnetic and nanomechanical materials	Optical, electronic, magnetic and nanomechanical materials omvat materialen die het hart vormen van de integrated circuits en sensortechnologie. De materialen geven functionaliteit aan communicatie toepassingen en gegevensverwerking en -opslag. Verdere miniaturisering en integratie met een vermindering van energiegebruik staat hierin centraal. Toepassingen hebben een groot frequentiebereik van dc, via akoestisch, IR, zichtbaar licht tot Röntgen-toepassingen in Radar en lithografie.	Transistors, transistor materials, dielectrics, conductors and isolators, electrical and magnetic data storage and processing, superconductors for sensing and computing, Optical sensing, Transducers and computing, IR optics, X-ray and EUV optics.
Meta materials	Meta materials zijn kunstmatig ontworpen materialen die vanwege hun ruimtelijke structuur andere eigenschappen hebben dan de samenstellende delen. Metamaterialen onderscheiden zich door een functionaliteit die gegeven wordt door een hiërarchische structuur met verschillende lengteschalen. Dit geeft metamaterialen hun optische of mechanische eigenschappen gekoppeld aan hun macrostructuur.	Opals, Shells, Colloid-crystals, Cloaking devices, Radar absorbers, Stealth technology, Mechanical materials for static or dynamical properties, Mechatronics.
Soft/bio materials	Soft/bio materials bestaan uit organische en polymere componenten met een divers aantal functionaliteiten door vezels, coatings en cellulaire vormen. Ze vinden onder andere toepassingen in biologische en biomedische systemen voor diagnostische en therapeutische doelstellingen.	Organic and bio-polymer materials, Polymers, Plastics, Colloids, Emulsions, Nanocarriers, Tissue engineering, Bio-inspired materials, Bio-degradable materials.
Thin films and coatings	Thin films and coatings zijn dunne lagen materiaal, variërend van nano- tot microschaal, die worden aangebracht op diverse oppervlakten en ondergronden. Door het aanbrengen van één of meerdere van dergelijke lagen of dunne films op andere materialen of oppervlakten kunnen extra functionaliteiten aan producten worden gegeven, zoals beschermende, zelfreinigende, zelfhelende, reflecterende (voor alle straling), absorberende, elektrische-, optische of magnetische eigenschappen.	Paints, Chemical or optical protective layers (e.g. for corrosion protection), Low-friction coatings, Low-wear coatings, Low-adhesion coatings, Biocompatible coatings, Food preservation, Active and passive materials in the IC technology, Coatings for optical functionality (such as antireflection, compound mirrors), Deposition technologies including various evaporation/vapor deposition techniques, Electro spraying, Atomic Layer Deposition, Pulsed Laser Deposition.
Construction and structural materials	Construction and structural materials omvat materialen die zorgen voor draagkracht of sterkte onder mechanische, chemische, fysieke of thermische druk. Hieronder vallen composieten die bestaan uit samengestelde materialen met glas, keramiek, hout of polymeren.	Concrete, Steel and other metallic alloys and compounds, Green steel, Wood-based composites, Cross-laminated timber, Lightweight composites (metal and polymer), Ceramics alloys, Ceramic foams, Glass ceramics, Green steel, Service life design, Sustainable and circular materials design, Recyclability.
Smart materials	Smart materials reageren op veranderingen in de omgeving, zoals licht, warmte, vocht, druk of bacteriën. Deze materialen kunnen onder externe invloeden veranderen of zichzelf herstellen.	Responsive material, Molecular recognition, Artificial receptors, Reversible bonding, Self-assembly, Self-repair material, Supramolecular Chemistry, Stimuli responsive material, Switchable materials, self-sensing materials, Smart delivery, Shape memory materials, Self-repair materials, self-healing materials, Membranes.

7.2 Photonics and optical technologies

Definitie

Photonics and optical technologies omvatten technologieën die zich richten op het opwekken, transporteren, detecteren en manipuleren van lichtgolven en lichtdeeltjes (fotonen). Fotonen kunnen in verschillende typen (onder andere polarisatie en coherentie) en op verschillende golflengtes (kleuren) worden opgewekt, gemanipuleerd, getransporteerd en gebruikt voor verschillende doeleinden. Denk hierbij aan fotonische circuits, LEDs, lasers of de omzetting in elektrische energie. Vaak ligt de waarde van fotonica in de samenwerking met elektronica, computeralgoritmen en technologische platformen.

Raakvlakken met andere sleuteltechnologieën

Advanced materials (onder andere Thin films and coatings), Nanotechnology (onder andere Functional devices and structures (on nanoscale), Nanomanufacturing), Quantum technologies (onder andere Quantum communication en Quantum computing), Digital and Information technologies (onder andere Digital Twinning and Immersive technologies), Engineering & Fabrication technologies (onder andere Semiconductor technologies, Imaging technologies).

Mogelijke toepassingen (niet uitputtend)

Space, sensor networks, klimaat- en aarde-observatie, micro- en nanosatellieten, energietransitie, data networks, advanced recycling, medical devices, optische metrologie, diagnostiek.

Photonics and optical technologies

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Photovoltaics	Photovoltaics is de technologie waarbij zonlicht middels zonnecellen wordt omgezet in elektriciteit.	Absorbers (materials), Antireflection Coatings, Collector Efficiency, Conductive Films, Conversion Efficiency, Metamaterials, Nano-photonics, Nanowires, Organic Photovoltaics, Oxide Films, Perovskite Solar Cells, Photocurrents, Semiconductor Doping, Thermophotovoltaic Conversion, Thin Film Circuits, Silicon Solar cells, Multi-Junction Solar Cells.
Optical systems and integrated photonics	Optical systems zijn geconstrueerde systemen om licht te breken of te weerkaatsen om bepaalde optische functies te vervullen. Zo is bijvoorbeeld communicatie mogelijk met fotonen als informatiedrager. Geïntegreerde fotonica is de technologie die verschillende fotonische functies (genereren, moduleren, detecteren, etc.) integreert in een functionele fotonische chip. Systeemintegratie is een belangrijk element in de toepassing van geïntegreerde fotonica.	Analog-optical interconnection technology, Fiber Optics Communications, Integrated Optics & systems, Integrated photonic smart antennas, Microphotonics, Nano-photonics, Optical Fiber Communication, Optical Resonators, Optical signal technology, Phase Modulation, photonic chips, Photonic Devices, Photonic Integrated Circuits, Photonic Integration Technology, Photonic phased array system, Photonic signal processing, Wavelength Filters, Biosensing, Photonic packaging, Photon Manipulation, Photon Conversion, Green ICT, Free Space optics, Fibres & Fibre Systems, Photonic Communication, Optical metrology systems, Gradient index (GRIN) lenses, Diffractive optics, Laser optics & systems, Optical System design/optomechanics, Theoretical and applied non-imaging optics, Theoretical and applied imaging optics, Space optics, Aberration theory.
Photonic/optical detection and processing	Photonic/optical detection and processing omvat het opvangen en meten van fotonen en andere lichtgolven binnen het volledige frequentiespectrum (inclusief Röntgen en UV), die worden ontvangen uit onder meer beelden, gegevensverbindingen en experimenteel spectroscopisch onderzoek. Fotonische detectie houdt zich bezig met het ontwerp, de fabricage en het testen van enkelvoudige en meervoudige detectoren. Ook het meten, ontwerpen, maken, simuleren en testen van en met optische systemen valt hieronder. ⁷	Photonic Sensing, Single-Photon Detection, Anticoincidence Detectors, CCD, Image Sampling, Wavelength detectors, Integral Field Unit, Inverse Synthetic Aperture Radar, Laser radiometry, Optical Imaging, Radar Signal Processing, Signal Reconstruction, Signal Sampling, Spectral Imaging, Fibre optical systems, Fibre optic sensors, Spectroscopy, Remote sensing, Photodiodes, LIDAR, Optical metrology, Nano-photonics, Lithography, X-ray optics, EUV optics, Opto-acoustics, Electro-optics, Ptychography, Computational optics, Aspherical and freeform optics, Optical scattering, Grazing incidence optics, Freeform optics.
Photon generation technologies	Bij photon generation technologies gaat het om het opwekken van fotonen door middel van lasers en andere lichtbronnen. De nadruk komt daarbij steeds meer te liggen op single photon generation wat onder meer belangrijk is in quantumtechnologie, high power lasers voor industrial processing en fiber lasers voor ultra korte pulsen.	Optical Lasers, Atom Lasers, Entangled photon generation, Light emitting diode, Microchip laser, Multi-photon generation, Nano-photonics, Optical fiber dispersion, Optical fiber lasers, Organic Lasers, Organic light emitting diode, Photon pair generation, Photonic microwave, Quantum dot, Single photon emitters, Single photon generation, Solar-pumped Lasers, Triple-photon generation, Waveform generation, Quantum Dot LEDs, Perovskite LED, Laser-driven light sources, Solid state lighting, VCSEL, XUV, X-ray sources.

⁷ [https://www.optica.org/en-us/get_involved/technical_groups/poe/photonic_detection_\(pd\)/](https://www.optica.org/en-us/get_involved/technical_groups/poe/photonic_detection_(pd)/)

7.3 Quantum technologies

Definitie

Quantum technologies maken gebruik van het duale karakter van de kleinste deeltjes die we kennen, zoals fotonen en elektronen, maar ook van vergelijkbare systemen die quantum eigenschappen vertonen. Deze systemen kunnen zuivere quantum toestanden aannemen. De kleinste deeltjes vertonen het niet-lokale gedrag, en quantum toestanden kunnen verstrengeld zijn. Hierdoor ligt de weg open naar de quantum computer (met bijbehorende quantum software), quantum communication en quantum sensing. Een quantum bit (eenheid van digitale informatie) kan tegelijk 0 en 1 zijn. Hierdoor kunnen berekeningen op andere wijze worden uitgevoerd, waarmee oplossingen voor complexe vraagstukken gevonden kunnen worden.

Voorbeelden zijn het zoeken naar overeenkomsten tussen zeer grote datasets, en het bouwen en optimaliseren van zeer complexe modellen. Ook kan er veiligere communicatie over lange afstand worden gerealiseerd en staat quantum technologie aan de wieg van een nieuwe generatie sensoren. Hybride vormen waarin het quantum netwerk is verweven met klassieke netwerken wordt de volgende stap.

Raakvlakken met andere sleuteltechnologieën

Digital Technologies (onder andere Software Technologies and computing), Photonics and optical technologies (onder andere Photon generation technologies, Photonic/Optical detection and processing, Optical systems and integrated photonics), Nanotechnology (onder andere Functional devices and structures (on nanoscale), nanomaterials), Engineering & fabrication technologies (onder andere Semiconductor technologies).

Mogelijke toepassingen (niet uitputtend)

Cybersecurity, Digital infrastructure, Mobile Data/Wireless Data Communication, Advanced instrumentation, Medicine development.

Quantum technologies

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Quantum computing	Quantum computing bestaat uit verschillende lagen, waaronder onder andere de hardware, virtual en software ^{8,9} , en maakt gebruik van de wetten van de quantummechanica om problemen op te lossen die te complex zijn voor klassieke computers ¹⁰ . Er wordt onderscheid gemaakt tussen dedicated quantumcomputers, algemene (universal) quantumcomputers en hybride vormen. Een dedicated quantumcomputer kan maar één specifiek optimalisatievraagstuk oplossen en een algemene (universal) quantumcomputer heeft miljoenen quantum bits nodig om alle type vraagstukken aan te kunnen. Een hybride vorm is de combinatie van een quantum computer met een High Performance Computer.	Cluster State, Cooling Capacity, Quantum Cables, Quantum Hardware, Quantum Algorithms, Quantum Circuits, Quantum Computation, Quantum Information Processing, Quantum Software Technology, Quantum Optics, Semiconductors, Superconducting Quantum Computing, Superconducting Resonators, Scalable Quantum I/O, Quantum materials, Neutral Atom Quantum Computing, Quantum software, Quantum materials, Quantum Hall effect, Quantum entanglement, Quantum simulators.
Quantum communication	Binnen Quantum communication worden quantum- toestanden op verschillende plaatsen in het netwerk, zowel via grondnetwerken als satellietnetwerken, met elkaar verbonden, zodat quantuminformatie kan worden verstuurd. Quantum communication is extreem veilig omdat (ongewilde) tussentijdse metingen (onderschepping) de quantumtoestand merkbaar verandert.	Quantum Channel, Quantum Communication, Quantum Computation, Quantum Key Distribution, Cryptology technologies, Quantum Information, Quantum Optics Quantum Teleportation, Quantum Internet, Quantum memory, Quantum repeaters, Quantum integrated photonics, Post Quantum Crypto.
Quantum sensing	Quantum sensing behelst de technologie van het toepassen van quantumprincipes om meetnauwkeurigheid te bereiken die nauwkeuriger en gevoeliger is dan conventionele sensoren.	Nanomechanical Quantum Systems, Quantum metrology, Quantum sensor, Inertial sensors, atomic clocks, Quantum Magnetometer, Quantum testbed, Advanced Optical technologies, superconducting and magnetic materials, topological insulators.

8 [Layered Architecture for Quantum Computing](#)

9 [Relative timescales for critical operations in QuDOS within each layer.... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)

10 <https://www.ibm.com/topics/quantum-computing>

7.4 Digital and information technologies

Definitie

Digital and Information technologies is de verzamelnaam voor alle technologie die data- en informatie-gedreven is. De sleuteltechnologieën die hieronder beschreven staan gaan over vele mogelijke handelingen hiervan: analyseren, genereren, opslaan, bewerken, uitwisselen, beveiligen en interacteren. Ook het automatiseren en simuleren van data is mogelijk en het imiteren van menselijke manieren voor het omgaan met informatie. Digitale technologieën zijn ‘general purpose technologies’ en zorgen voor verbindingen op verschillende niveaus en voor de integratie in verschillende disciplines/sectoren. Soevereiniteit, duurzaamheid en de rol van de mens staan hierbij steeds meer centraal.

Raakvlakken met andere sleuteltechnologieën

Engineering and fabrication technologies (onder andere Semiconductor technologies), Life sciences and biotechnology, Advanced materials, Chemical technologies, Photonics and optical technologies, Nanotechnology, Quantum technologies.

Mogelijke toepassingen (niet uitputtend)

Smart industry, eHealth, Smart Grids, Data platforms, Precision farming, Health Robots, Metaverse, Cybersecurity, Digitale en Fysieke Veiligheid, Wearables, Gaming, Autonomous Driving, Logistics, Telecommunication networks, High-tech equipment, Energy transition, Life sciences, Duurzame informatie- en communicatietechnologie (Green ICT).

Digital and information technologies (1)

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Artificial intelligence (AI)	Artificial intelligence (AI) is een systeemtechnologie die erop gericht is om gedrag door machines te realiseren dat lijkt op natuurlijke intelligentie. AI omvat verschillende leerstrategieën, namelijk supervised machine learning, unsupervised learning, reinforcement learning en deep learning. In toenemende mate worden voor AI hybride vormen ontwikkeld waarin mens en AI samenwerken of kennis gedreven modellen met data-gedreven machine learning. Veel aandacht is er het afgelopen jaar voor generatieve AI, waarbij teksten, afbeeldingen, audio en andere content automatisch gegenereerd kunnen worden op basis van invoer van gebruikers.	Deep learning, Supervised Machine learning, Unsupervised Machine learning, Autonomous decision making, Autonomous systems, Context awareness, Machine-Reasoning, Neural networks, Neuroevolution, Reinforcement learning, Reasoning, Swarm Intelligence, Robotic Process Automation, Turingtest, Hybrid AI, Symbolic reasoning, Natural language processing, Large scale AI models, Speech recognition, Neuromorphic computing.
Data science, data analytics and data spaces	Data science, data analytics and data spaces betreft alle aspecten van het verzamelen, beheren, ontsluiten, delen, verwerken en analyseren van data middels dataverwerkingstechnologieën om waarde te creëren. Data science heeft betrekking op wetenschappelijke methoden, processen en systemen om kennis en inzichten te onttrekken uit data. Data analytics richt zich op het Intern gebruik interpreteren van gegevens om waardevolle inzichten te verkrijgen. Een data space is een gedecentraliseerde, op standaarden gebaseerde structuur om vrijwillig en met vertrouwen federatief data te kunnen delen/hergebruiken. Vele verschillende vormen van data zijn voor de hedendaagse AI de bron voor het leren (trainen) van AI modellen.	Data spaces, Data bases, Data lakes, Federated architecture, FAIR data (Findability, Accessibility, Interoperability, and Reusability), Data sharing, Autonomous analytics, Context awareness, Data as a Service (DaaS), Data accuracy, Data confidentiality, Data mining, Data science, Distributed computing, Machine learning, Pattern mining, Visual analysis, Information retrieval, Process mining, Geospatial data analytics, Text analysis, Natural language processing, Data collection, Data integration, Data cleaning, Human-Data Interaction.
Cybersecurity technologies	Cybersecuritytechnologieën zijn de digitale technische toepassingen die bedoeld zijn om relevante digitale risico's te verkleinen. Dit omvat ook het omgaan met risico's op schade of uitval van digitale systemen en de beschikbaarheid, integriteit en vertrouwelijkheid van gegevens. Daarnaast zijn cybersecuritytechnologieën gericht op het voorkomen van cyberincidenten en, wanneer cyberincidenten zich hebben voorgedaan, deze te ontdekken, schade te beperken en herstel eenvoudiger te maken. Wat een aanvaardbaar niveau is, is veelal de uitkomst van een risico-afweging.	Confidentiality, Integrity, Availability, Socio-technical systems, (post quantum) Encryption, Privacy and data protection, Secure computing, Digital identity, Identity management, Vulnerabilities, Malware, DDOS, Ransomware, Secure networks, OT/IT security, Security by design, Privacy by design, Hardware security, Platform security, Software security, Data security, Cyber espionage.
Software technologies and computing	Software technologies and computing richt zich op het ontwikkelen van methoden en technieken voor software zodat software bruikbaar en betrouwbaar is en blijvend onderhoudbaar. Daarbij is de trend enerzijds dat technologieën in toenemende mate gedistribueerde architecturen ondersteunen. Belangrijke voorbeelden daarvan zijn blockchains met het oog op decentralised trust systems, alsook cloud, edge, grid, high-performance en mobile computing. Anderzijds worden nieuwe programmeertalen, ontwikkelmethoden en testomgevingen steeds dominanter, om het hoofd te kunnen blijven bieden aan strengere kwaliteitseisen en verhoogde snelheid van innovatie.	Ledger technologies, Immutable ID, File sharing, Crypto currencies, Metaverse, Software Engineering, Cloud model, Data as a Service, Storage as a Service (SaaS), Data centres, Virtualization, Virtual machines, Distributed computing, Distributed Cyber Physical Systems, Fog computing, General-purpose computing, Graphics processing units (GPGPU), High performance computing cluster (HPCC), Parallel computing, Mobile cloud, Identity management, Domain-Specific Languages, Quantum computing, AI-based software testing, Low-Code platforms, Autonomous systems, Control distribution, Software Verification, Software Repository Analysis, Software Verification, Legacy Renovation, Model-Driven Engineering, Programming languages, Resource modeling, discovery, and management, Open source, Holistic system engineering, Responsible and sustainable computer ecosystems, Digital continuum: IoT to Edge to Cloud, Memory and storage technologies, Hardware and software co-design, System monitoring, testing, and benchmarking, Serverless and containerization.

Digital and information technologies (2)

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Digital connectivity technologies	Digital connectivity technologies zal zorgen voor nieuwe generatie draadloze en vaste netwerken die de grotere vraag naar capaciteit aankunnen, die robuust en flexibel zijn, en die efficiënt met energie en materialen omspringen. Veel van deze netwerken zullen programmeerbaar zijn om optimaal tegemoet te kunnen komen aan de grote diversiteit aan eisen vanuit applicaties. Te denken valt aan zeer grote bandbreedte voor netwerken in high performance computing, zeer lage latency netwerken voor autonoom rijden en industriële toepassingen, en zeer sterke beveiliging voor financiële- en overheidssectoren.	5G, 6G, Network slicing, Network Virtualization, LaserSatCom, Fiber infra, Edge Infra, Intelligent/deep connectivity, Zeekabels, IoT, logical connectivity protocols, (data link, network, transport, session), Novel multiple access (SDMA, NOMA), Cross-layer optimization, Smart networks and services, Semantic communication, Tactile internet, Digital communication networks, In-network computing, Digital and programmable infrastructure, Zero-latency networking, Optical communication, Photonics, Quantum networks, Quantum communication.
Digital Twinning and Immersive technologies	Digital Twinning and Immersive technologies zijn een digitale representatie van fysieke processen en systemen ten behoeve van digitale, autonome productie, analyse, en optimalisatie. Digital twins worden onder andere gebruikt voor engineering en fabrication technologies voor modelleren van machines en processen, in Life Science and Health en medtech voor een digitale tegenhanger van een organisme (zoals de mens). Digital twins ontwikkelen zich in toenemende mate tot meer interactieve en dynamische systemen (die bijvoorbeeld processen kunnen aan- en bijsturen). Digital twins bouwen voort op een aantal andere digitale technologieën zoals computing, connectivity and communication technologies, cloud en IoT netwerken, data science voor het delen en analyseren van data, AI voor predictie en immersive technologies voor de creatie van realistische ervaringen en optimale interactie met de kunstmatige, gesimuleerde omgeving. Immersive technologies transformeren ervaringen naar een realistischer niveau door het virtueel samen brengen van het zicht (beeld), het geluid en zelfs de aanraking van gebruikers.	Industry 4.0, Smart Industry, Virtual devices, Virtual product, Virtual worlds, Virtual human, Digital technical intelligence, Real-time and embedded systems, Physical systems, Cyber-physical systems, Predictive modeling, Optimization, Simulation, Digital interaction, Digital Engineering, performance monitoring, performance optimization, predictive maintenance, Mixed, virtual and extended reality (AR/MR/VR/XR), Social XR, Social touch, Virtual worlds, Human-machine interaction, Tele-operation, Digital data spaces, Holographic/volumetric media, Rendering engine, Haptics, Cybernetics, Metaverse, Brain-computer interaction, Human augmentation, Sensing, AI, Data science, Software technologies and computing.
Neuromorphic technologies	Neuromorphic technologies richten zich op bio-geïnspireerde hardware voor het energie-efficiënt verwerken van informatie. Neuromorphic kan betrekking hebben op directe modellen van biologische structuren zoals neuronen en synapsen, maar ook op digitale en/of analoge implementaties van kunstmatige neurale netwerken zoals gebruikt in machine learning en robotics. Hardware implementatie van neuromorphic technologies kan gerealiseerd worden door onder andere memristors, spintronic devices en complexe nanomateriaal netwerken.	Neuromorphic Computing, Unconventional Computing, In-matter Computing, AI Hardware, Memristors, Cognitive Matter, Artificial Synapses, Artificial Neurons, Spiking Neural Networks.

7.5 Chemical technologies

Definitie

Chemische technologieën worden gebruikt in conversieprocessen van grondstoffen naar producten. Functionaliteit van producten ontstaat daarbij vooral vanuit structuur en samenstelling. Chemische technologieën stellen ons in staat om veilige en duurzame producten en processen te ontwerpen, opereren, analyseren en optimaliseren voor vrijwel alle eindmarkten.

Raakvlakken met andere sleuteltechnologieën

Advanced materials, Engineering- and fabrication technologies (onder andere Systems engineering), Digital Technologies (onder andere Digital Twinning and Immersive technologies), Life science and biotechnologies, Quantum Technologies (onder andere (hybrid) quantum computing).

Mogelijke toepassingen (niet uitputtend)

Circularity, Recycling (mechanical & physical; quality and safety of recycled products), Novel food processing, Food safety, Safety of (recycled) products and production processes (e.g. accumulation of contaminants, toxicity, hygiene), Energy transition (electro-chemistry, Photo-chemistry, Energy conversion and storage, Power2Gas, Power2Liquids, synthetic fuels, biofuels), Base chemicals, (advanced/special) Chemical products, Pharmaceuticals, Water purification and clean water, Advanced recycling, CC(U)S, (Bio)polymers, Separation, (non-target) Analysis, Process analytics.

Chemical technologies

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Process technology, including process intensification	Process technology, including process intensification richten zich op het optimaal, stabiel en veilig ontwerpen van (groene) chemische productieprocessen. Een belangrijke trend is om in productieprocessen meer gebruik te maken van groene (duurzame) grondstoffen, bijproducten en reststromen te beperken en deze zoveel mogelijk te hergebruiken en recycleren. Hieronder vallen zaken als: schaalbaarheid, warmte-integratie, veiligheid, optimale downstream processing, ruimtebeslag en kostenefficiëntie. Conversietechnologie is naast separation technologies een essentieel onderdeel van chemische productieprocessen. We gaan hier uit van op koolstof gebaseerde grondstoffen en laten vooralsnog metalen en mineralen grondstoffen buiten beschouwing. Procestecnologie kan ook voor de omzetting en zuivering van mineralen en metalen worden ingezet.	Process systems engineering, Process integration, Synthesis, Photoredox synthesis, Protein synthesis (e.g. CO ₂ -to-protein), (chemical) Recycling, Polymerization, De-polymerization, Pyrolysis, Green chemistry, Renewable feed stock, Bioreactor(s), Bioprocessing, Fermentation, Enzymatic conversion, biomaterials, biochemicals, Bio-hydrogen, Metabolic engineering, Green solvents, Non-toxic chemicals, Nutraceuticals.
(Advanced) Reactor engineering	(Advanced) Reactor engineering faciliteert chemische reacties op grote en op (zeer) kleine schaal. Reactordesign (zoals bijvoorbeeld microreactordesign) is hierbij van belang.	Process intensification, fluid mechanics, multi-phase reactants, Advanced heat and mass transfer concepts, Modelling, Lab-on-a-chip, process-on-a-chip, Reaction telescoping, Microchannels, Photochemistry, Micro/milli channels, electricity-driven chemical reactors.
Separation technology	Separation technology betreft het tot een voor de toepassing benodigde zuiverheid of goede functionaliteit opwerken van grondstoffen, welke veelal verwerkt zijn in complexe producten. Daarbij wordt gebruik gemaakt van meso- en microstructuren en wordt gestreefd naar het behoud van of het bereiken van specifieke structuren. Ook in de milieutechnologie speelt Separation technology een belangrijke rol. Scheiding kan plaatsvinden op basis van chemische of fysische eigenschappen van grondstoffen en producten. ¹¹	Drying, Dehydration, Air purification, Fuel purification, Water purification, Gas filter, Liquid filter, Filter membranes, Membrane filtration, Vapor filter, Distillation filter, Extraction filter, Crystallization filter, Reactive distillation, Metal recycling, De-polymerization.
Catalysis	Catalysis maakt het proces van omzetten van grondstoffen in andere producten efficiënter: minder energie voor een specifieke chemische reactie, of bevordering van omzetting naar een specifiek eindproduct. Ook stelt catalysis ons in staat om 'slimmere' producten uit andere grondstoffen te maken (bijvoorbeeld de inzet van enzymen als katalysator om voedselvariëaties zoals kunstvlees te maken, of om methanol en suikers als grondstof te gebruiken). Er kan onderscheid gemaakt worden in homogene-, heterogene en bio-katalyse.	Biocatalysis, Homogeneous catalysis, Heterogeneous catalysis, Single-atom catalysis, Green Chemistry Technology, Catalysis for (advanced) Recycling, Catalysis for (de-)polymerization, Nanoreactors, Cross coupling, Electrocatalysis, Catalytic DNA, Photocatalysis, Reaction intermediates, Catalytic oxidation, Chemical activation, (de)Hydrogenation, Polymerization, isomerization.
Analytical technologies	Analytical technologies omvat geavanceerde analyse-, detectie- en meetmethoden om grondstoffen, tussenproducten of eindproducten, (in vaste, vloeistof of gasvorm te onderzoeken op onder andere zuiverheid, materiaaleigenschappen en toxiciteit. Daarbij is er sprake van dynamische analyse van structuur op verschillende schaalniveaus (1 nm – 1 mm).	Analytical separation, Spectroscopy, Chromatography, Microscopy, Sequencing, Magnetic resonance, Mass Spectrometry, Chromatography, Ray absorption, Xray, Tomography, non-target analysis.
Electricity-driven chemical reaction technologies	Electricity-driven chemical reaction technologies sluiten aan bij de trend om bestaande chemische processen te elektrificeren om daarmee emissies te reduceren. Elektriciteit kan zowel direct als indirect in een chemische reactie worden ingezet, en gericht zijn op de aard van de energietoevoer of het reactiemechanisme. Voorbeelden van dat laatste zijn elektrochemische of fotochemische processen die respectievelijk elektrische energie of fotonen inzetten om chemische verbindingen te maken of te breken en grondstoffen in het reactieproces te sturen naar specifieke eindproducten.	Electrical naphtha cracking, Electrical reforming, Electrochemistry (including hydrogen production), Electrochemical processes, CCU, Bio(electro)chemical processes, Electro-chemical fermentation, Energy conversion and storage, Fuel Cells, Energy carriers, Batteries, Plasma technologies, Hydrometallurgical metals recycling, Power-to-x technologies.

¹¹ Tijdens de expertconsultatie werd genoemd dat scheidingstechnologieën ook omgekeerd, bij het mixen (van moeilijk mengbare stoffen), ingezet worden.

7.6 Nanotechnology

Definitie

Nanotechnologie werkt met verschijnselen op nanoschaal, dat wil zeggen ongeveer 1 tot 100 nanometer en met hoge precisie. Nanotechnologie omvat de beeldvorming, modellering, meting, ontwerp, karakterisering, productie en toepassing van structuren, apparaten en systemen door gecontroleerde manipulatie van grootte en vorm op nanometerschaal (atomaire, moleculaire en macromoleculaire schaal) die structuren, apparaten en systemen oplevert met nieuwe en superieure kenmerken of eigenschappen¹². Daarmee is nanotechnologie enabling voor vele andere technologieën en zijn er duidelijke raakvlakken met andere sleuteltechnologieën via integratieve toepassingen.

Raakvlakken met andere sleuteltechnologieën

Photonics & optical technologies (onder andere Optical systems and integrated photonics), Quantum technologies, Engineering & Fabrication Technologies (Micro electronics), Life Science and biotechnologies, Advanced materials, Chemical Technologies.

Mogelijke toepassingen (niet uitputtend)

Nano device modelling, Nano-structured surfaces, Nano-structured materials, Materials characterization, Sensor networks, advanced manufacturing, Quantum devices, Bio-inspired technologies, Bio-enabled technologies, lab-on-a-chip, organ-on-a-chip, nanomedicine, Medical diagnostics.

¹² https://www.nanowerk.com/nanotechnology/introduction/introduction_to_nanotechnology_1.php

Nanotechnology (1)

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Nanomanufacturing	Nanomanufacturing omvat fabricageprocessen om structuren en functionaliteit op nanoschaal te bouwen ¹³ . Nanomanufacturing heeft raakvlakken met de fabricage van nanomaterialen zelf. (zie hieronder). Zo is ook voor Nanomanufacturing het karakteriseren en (theoretisch) ontwerpen van materialen van belang, in combinatie met de instrumenten/methodes om nanomaterialen te maken of te laten groeien. Daarbij worden computational methodes ingezet. Tevens omvat Nanomanufacturing het integreren van nanodevices in producten, waarbij ook de opschaling van fabricage van één device naar grote aantallen aan de orde is. Tenslotte is het aanbrengen van nano-coatings op grote oppervlakten (depositie technologie) een belangrijke uitdaging in de productie van onder meer wafers en zonnepanelen. Een aandachtspunt tijdens Nanomanufacturing is vervuilingbeheersing. Alle aspecten van nanotechnologie (en quantumtechnologie) kunnen worden verstoord door aanwezigheid van nanodeeltjes of laagjes vervuiling zo dun als een paar atoomlagen. Deze verstoringen moeten worden voorkomen of verwijderd. Hiervoor is kennis nodig van ontstaan, transport, detectie, en verwijdering van deze vervuilingen.	Nanofabrication, Nanomaterial, Biomaterial, Nanoelectronics, Nanolithography, Self-assembly, Nano metrology and inspection, Materials by design, bio-nano devices for healthcare, defectivity, Contamination control, Deposition and coating technologies, Nanoscopy, Nano characterization, Nano inspection.
Nanomaterials	Nanomaterials zijn chemische stoffen of materialen die bestaan uit zeer kleine deeltjes van verschillende vorm en grootte (< 100nm, evenals 2D-materialen). Ze komen voor in de natuur, kunnen een incidenteel product van menselijke activiteit zijn (bv. lasrook) of doelbewust worden vervaardigd en gemanipuleerd om nieuwe kenmerken te vertonen of een specifieke structuur aan oppervlakten te geven. Voorbeelden zijn een grotere sterkte, chemische reactiviteit of geleidingsvermogen in vergelijking met hetzelfde materiaal zonder nanoschaalkenmerken ¹⁴ . De vervaardiging van dergelijke materialen en nanogestructureerde oppervlakten vereist instrumenten en methodes om deze te maken of te laten groeien en om het resultaat daarvan op nanoschaal te inspecteren en karakteriseren (zie ook Nanomanufacturing). Bij het ontwikkelen van nieuwe Nanomaterials worden computational methodes steeds meer ingezet, bijvoorbeeld ten behoeve van 'materials by design', waarin gewenste eigenschappen van de Nanomaterials het vertrekpunt vormen.	2D materials, Nano-coatings, Nanostructured (functional) surfaces, Nanoparticles, Nanotube, Nanosheets, Nanofluids, Nanorods, Nanofibers, Quantum dots, Electromagnetic functionality (quantum materials), Nanocomposites, Nanocrystalline materials, Nanostructured films, Membranes, Bio-nano materials, Computational materials synthesis, High entropy alloys, Designer materials, Materials by design, Nanoscale meta-materials, Nano materials for neuromorphics, Nanotribological coating and structures, Colloids.
Functional devices and structures (on nanoscale)	Functional devices and structures (on nanoscale) omvat het combineren en integreren van elektronische, magnetische, nano-mechanische, optische, bio of quantum principes in componenten of apparaten die materie op atomaire of moleculaire schaal kunnen manipuleren. De nanodimensies en materiaaleigenschappen maken complexe schakelingen en arrays mogelijk.	Nanoelectronics, Spintronics, Nano-photonics, Nanoelectromechanical devices, Quantum-nanodevices, Semiconductor devices, Logic devices, Microelectronics, Micro- and nano mechanics, Molecular motors, Transistors, Nanoelectromechanical oscillators, Nanolithography, Neuromorphic nanodevices, Nanotribological coatings and structures.

¹³ <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/nanomanufacturing-system>

¹⁴ https://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/index_en.htm

Nanotechnology (2)

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Micro- and nanofluidics	Micro- and nanofluidics omvat de technieken voor het bestuderen, waarnemen en controleren van het transport en de reactie van vloeistoffen in structuren met een micro- of nanometerschaal ¹⁵ . Vloeistoffen in deze structuren gedragen zich anders dan in macrostructuren.	Nanofluidics Chips, Lab on a Chip, Organ-on-a-chip, Point-of-care bioanalysis, Nanofluidic devices, Bio-MEMS, Biosensors, Nanochannels, Nanoreactors, In-chip Nanocooling, Nanolithography.
Nanobiotechnology/ Bionanotechnology	Nanobiotechnology/Bionanotechnology omvat de toepassing van nanotechnologie op het bestuderen van het leven de nanoschaal om inzichten te krijgen in bijvoorbeeld cellen en virussen. Die inzichten zijn onder andere van belang in medische toepassingen, sensoren, life-inspired materialen, synthetische cellen. Bionanotechnology is de toepassing van moleculaire biologie op nanotechnologie waarbij materialen en apparaten op nanoschaal worden vervaardigd. ¹⁶	Drug Delivery, Tissue Engineering, Biocompatibility, Biosensors, Nanobiotechnology, Protein, Nanoscale, Nanoparticle, Nanomaterial, Biosensing, Cellular Biophysics, Biophysical Processes, Molecular biophysics, Nanoscale biomimicry, Biomimetic antibacterial surfaces, Biomolecule characterization, Vaccine technology, Synthetic cell technology, Artificial meat.

¹⁵ Gebaseerd op: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/nanofluidics>

¹⁶ <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bionanotechnology>

7.7 Life science and biotechnologies

Definitie

Life sciences richten zich op de bestudering van organismen (dier, plant, humaan, microbe enz) en onderdelen daarvan (weefsels, cellen, moleculen zoals DNA, RNA en metaboliëten), en hun relatie tot de leefomgeving. Biotechnologie ontwikkelt en gebruikt kennis en gereedschappen uit de life sciences voor praktische doeleinden in de industrie (witte biotech), landbouw en voeding (groene biotech), gezondheid (medische of rode biotech) en voor marine en milieutoepassingen (blauwe biotech). Bij al deze toepassingen gaat het vaak om de interactie van organismen met de buitenwereld in ecosystemen (bijvoorbeeld microbiom en exposoom in de bodem, water of atmosfeer) en om uitkomsten op macro- en systeemniveau.

Biotechnologie omvat een groot aantal tools en technieken die in drie brede sleuteltechnologieën gevat kunnen worden namelijk:

1. Biomolecular technologies, waaronder Gene editing/Precise genetic engineering, Stem cell technology, Synthetic cell technology en X-omics;
2. Biosystems en organoïden, waaronder bijvoorbeeld Organoids, Organ-on-a-chip, in vitro plant tissue culture, Biochips and biosensors, Nanomedicine, Microbial consortia en Symbiotic systems;
3. Biomanufacturing, waaronder Industrial biotechnology/Bioprocess technology, Biomassaproductie, Biocatalysis en Biofabrication.

Daarnaast zijn Bio-informatics/Biocomputing snel opkomende technologieën die toepassing vinden binnen de biotechnologie (bijvoorbeeld voor de analyse van genomics en fenotyperingsdata, of het voorspellen van structuur-activiteitsrelaties), onder andere door de toepassing van AI die de mogelijkheid biedt om betekenisvolle verbanden uit zeer grote datasets te leggen.

Raakvlakken met andere sleuteltechnologieën

Chemical technologies (onder andere (Advanced) Reactor engineering), Catalysis, Analytical technologies), Nanotechnology (Nanobiotechnology/Bionanotechnology), Digital and Information Technologies (onder andere Data science, data analytics and data spaces, Artificial Intelligence), Engineering and fabrication technologies.

Mogelijke toepassingen (niet uitputtend)

Gezondheid, Medische technologie, Medical devices, Personalized medicine, Digital Health, Farma en medicijnen, Diagnostics, Vaccins, Antibodies, antibiotics drug development, regenerative medicine, forensic detection, functional and medical foods, Plantenteelt, Plantenveredeling, Fokkerij, Plantaardige en dierlijke uitgangsmaterialen, Land- en tuinbouw in vollegrond en bedekte teelten, Voedselprocessing, Water purification and clean water, Eitwittransitie, bio-based material and products, biopolymers, biochemicals, biosensoren en biochips.

Life science and biotechnologies (1)

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Biomolecular and cell technologies	In den brede omvatten biomoleculaire technologieën het in kaart brengen, meten en gebruiken van moleculen zoals DNA, RNA, en eiwitten/metabolieten. Een belangrijke groep technologieën wordt gevormd door de X-omics (Genomics/transcriptomics/proteomics/metabolomics/glycomics, microbiomics, exposomics) die tot doel hebben het geheel van biologische entiteiten van een bepaald type, zoals het genoom, het proteoom, het metaboloom, het microbiom of het exposoom van een organisme te kwantificeren en te karakteriseren. Zo kunnen tot op het individu toegespitste therapeutische of ziektevoorkomende strategieën worden ontwikkeld (personalized medicine), of kan een gewas of dier worden ontwikkeld dat bestand is tegen abiotische stress (bijvoorbeeld als gevolg van extreme klimaatomstandigheden) en biotische stress (als gevolg van aantasting door ziekten en plagen). Een tweede groep betreft gene editing/precise genetic engineering technieken die de mogelijkheid bieden het DNA van een organisme (humaan, dier, plant, microbe) op zeer specifieke plaatsen te veranderen. Een derde groep omvat stamceltechnologie (ook bekend als regeneratieve geneeskunde), bevordert de herstelreactie van ziek, disfunctioneel of beschadigd weefsel met behulp van stamcellen. Regeneratie bij gewassen is ook een vorm van stamceltechnologie, waarbij uit een enkele cel een volledig nieuwe plant ontstaat (ten behoeve van vermeerdering maar ook eliminatie van plantenvirusziekten). Synthetische celtechnologie is in opkomst als een techniek die de structuur en functie van levende cellen vanaf nul nabootsen (minimal cell) met doel de opbrengst en kwaliteit van het product te verhogen en bijproducten te voorkomen wat de veiligheid verhoogt. Ook organoïden zijn sterk in opkomst: drie- dimensionale miniaturversies van organen die gekweekt worden uit stamcellen.	Genome analysis, Genomic engineering, Multi-omics, Integrated omics, Biomarkers, Metabolomics, Transcriptomics, Proteomics, Glycomics High-throughput sequencing, Next generation sequencing, Machine learning, gen-functie voorspelling, Proteome/ Genome/Metabolome analysis, Analytical chemistry, Exposome, Microbiome, Molecules by design, Cell Surface Display Techniques, Biomarker discovery. CRISPR-Cas, Single gene disorders, Ethics, DNA repair, Gene therapy, Genome editing, New Genomic Techniques, Precision Breeding, Synthetic Biology, Genetic Modification, Personalized medicine., Personalized food, Biofortification. Regenerative medicine, Organ transplantation, Tissue repair, Gene therapy, Targeted gene repair, Induced Pluripotent Stem Cells, In vitro Regeneration, Artificial cells, Minimal cells, Cell therapy, Synthetic biology, Metabolic Engineering, Organoids, Synthetic stem cells.
Biosystems and organoids	Biosystemen omvat een aantal verschillende componenten. In vitro systemen en met name organoïden spelen in de medische sector een steeds belangrijker rol. Nanomedicine betreft de toepassing van nanotechnologie ten behoeve van gezondheid. Die toepassingen vinden vooral plaats in biochips en biosensoren voor diagnose of functionele karakterisatie van complexe (voedings) mengsels. Ook speelt nanotechnologie een belangrijke rol in organen-op-chips (OoC's): systemen met gemodificeerde of natuurlijke miniaturweefsels die in microfluidische chips zijn gekweekt die representatief zijn voor gezonde of ongezonde humane weefsels. Andere biosysteemtechnologieën zijn van belang in de industrie en voor milieutoepassingen zoals bioremediation. Het gaat hier om biosystemen als microbiële consortia (darm, bodem enz), waterplanten, biofilms, symbiotische systemen, en voor productie via planten (vertical farms, algen).	Nanotechnology, Nanomaterials, Nanoelectronics, Nanofluids, Metabolic engineering, Bioreceptor, transducer, Analytes, Microfluidics, Biosensing, Lab-on-a-chip, Organ-on-a-chip, Microfluidics, Biosensors, Glucose Sensors, Immunosensors, Analytic Equipment. Organoids, Primary Cell Culture, Tissue Scaffolds, Bioprinting, stem cell technology, Microelectronics, Microfabrication, Organ and/or disease models, Personalized medicine, Patient-specific Modeling, Microbial consortia, Biofilms, Symbiotic systems.

Life science and biotechnologies (2)

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Biomanufacturing and bioprocessing	Biomanufacturing en bioprocestechnologie zijn onder meer van belang in de industriële- en de voedsel- biotechnologie die gebruik maakt van enzymen en micro-organismen om bio-gebaseerde producten te maken: sectoren als chemie, medicijnproductie, levensmiddelen en diervoeder, gezondheidszorg, papier en pulp, textiel biopolymeren en bio-energie. Een voorname rol in deze bioprocestechnologie wordt gespeeld door biokatalyse: het gebruik van natuurlijke stoffen, waaronder enzymen uit biologische bronnen of hele cellen, om chemische reacties te versnellen. Veel aandacht is er voor het optimaliseren van (industriële) productiecondities zoals teeltcellen, kweeksystemen en fermentoren. Bioprocessing heeft ook belangrijke milieutoepassingen van afvalwaterzuivering (en andere biologische zuiveringstechnieken). Een zich snel ontwikkelende high-tech tak van bioproductie is biofabrication: de productie van complexe biologische producten uit grondstoffen zoals levende cellen, matrices, plantaardige biomassa (inclusief reststromen), biomassa uit schimmels (bijvoorbeeld mycelium van paddenstoel-vormende schimmels), biomaterialen en moleculen mede gestimuleerd door de ontwikkeling van 3D-fabricagetechnologieën.	Microorganisms, Bio-based products, Bio-Based Building blocks, Biopolymer fibres, Biodegradable plastics, Biofuels, Lubricants, Industrial enzymes, Antibiotics, Vitamins, Amino acids and other fine chemicals, Pharmaceuticals, Vaccines or vaccine components, Diagnostics, Greenhouse gas emissions, Synthetic Biology, Metabolic engineering, Bio process technology. Protein Engineering, Organic solvents, Microorganism Biocatalyst, Superoxide Reductase. Biomaterials, fabrication, bioprinting, Tissue Scaffolds Tissue Engineering, Artificial organs, Patient-specific Modeling, Cell Engineering, 3D biofabrication, 3D reconstruction, tissue constructs, biological models, regenerative medicine.
Bio-informatics	Bio informatica is de toepassing van informatiewetenschappen op biologische processen. Recent heeft de bio-informatica een belangrijke impuls gekregen door ontwikkelingen in machine learning en AI die het mogelijk maken betekenisvolle verbanden te leggen uit zeer grote datasets. AI maakt het mogelijk veel sneller inzicht te krijgen in bijvoorbeeld de 3D-structuur van eiwitten, complexe multigen processen in organismen, de risicofactoren en oorzaken van ziekten of de verwachte respons op medische ingrepen of medicatie bij dier of mens of van een gewas onder biotisch/ abiotische stres. Belangrijk is ook het verkrijgen van een overzicht van de allelische variatie en de variatie in fenotypes, en de analyse van complexe netwerken, inclusief niet-biologische- en omgevingsdata (ecosysteem).	Functional genomics, Structural genomics, Genome analysis, Genome-wide association studies, DNA Microarrays, Metabolome analysis, Medical Informatics, Systems biology, Artificial Intelligence, Machine learning, DNA/RNA/protein sequencing, Computational biology, Personalized medicine, Genetic diversity, Directed evolution.

7.8 Engineering and fabrication technologies

Definitie

Bij Engineering and fabrication technologies gaat het om geavanceerde ontwerp- en productietechnologieën die zich richten op de verbetering van producten of productieprocessen. Ze omvatten een breed scala van technologieën die gericht zijn op de ontwikkeling, de kwalificatie en validatie van geavanceerde productieprocessen, -machines en -apparatuur en op de (digitale) monitoring en control hiervan door middel van sensoren, digitale technologieën en andere apparatuur¹⁷. De ontwerpkant (Design & Engineering) omvat systems engineering, imaging technologies, mechatronics en optomechatronics, sensor en actuator technologie en Semiconductor technologies. De productiekant (inclusief service en onderhoud) omvat additive manufacturing, digital manufacturing technologies, Semiconductor technologies en robotics.

Raakvlakken met andere sleuteltechnologieën

Digital and Information technologies (onder andere Digital Twinning and Immersive technologies, Artificial Intelligence), Nanotechnology, Advanced materials (onder andere Thin films and coatings), Photonics and optical technologies (onder andere Photovoltaics), Life sciences and biotechnologies, Quantum technologies (onder andere Quantum computing).

Mogelijke toepassingen (niet uitputtend)

Smart Industry, zero defect manufacturing, predictive maintenance, Medical devices, wearables, sensor networks, advanced Instrumentation, autonomous and cooperative driving, (medical) imaging and devices, high-tech equipment, Internet of Things.

¹⁷ <https://ati.ec.europa.eu/technologies/advanced-manufacturing-technology>

Engineering and fabrication technologies (1)

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Sensor and actuator technologies	Sensor and actuator technologies omvat zowel sensoren als actuatoren. Een sensor zet bepaalde fysieke gebeurtenissen om in signalen (elektrisch, optisch). Een actuator werkt in de tegenovergestelde richting van een sensor en neemt bepaalde elektrische, thermische of optische signalen als input en zet die om in fysieke actie, bijvoorbeeld het inschakelen of positioneren van een apparaat. ¹⁸	Sensor networks, Actuator Networks, Optical fibre sensors, Ultrasonic sensors, Digital sensing, Internet of Things, Cyber-Physical Systems, Embedded Systems, Internet of Things, Digital Twin, Transducers, Molecular machinery; CRISPR-cas9 technology; Biotechnology; Bioengineering, Synthetic biology, Remote sensing, Plasmonics.
Imaging technologies	Imaging Technologies houdt zich bezig met het genereren, verzamelen, dupliceren, analyseren, wijzigen en visualiseren van beelden (optisch en niet-optisch). Het betreft de integrale keten van beeldvorming, waarvoor zowel hardware als software nodig is.	3D imaging, Vision in the loop (visual servo), THz and far-infrared imaging, Radio imaging, X-ray imaging, Optical and infrared, Medical imaging, Molecular imaging, Image-guided intervention, Tomography, Image reconstruction, Image processing, Image analysis, Machine learning, Plasmonics, Electron microscopy, Magnetic resonance, Astro imaging.
Mechatronics and Optomechatronics	Mechatronica betreft het integraal ontwerpen van mechanische systemen en bijbehorende besturings- en regelsystemen en combineert werktuigbouw, natuurkunde, elektrotechniek en ICT. Optomechatronica behelst de integratie van optische technologie in mechatronische systemen. Optomechatronische systemen spelen een belangrijke rol in de productie van halfgeleiders, wetenschappelijke instrumenten, 3D printen, medische apparatuur, ruimtevaart waaronder laser satelliete communication en robotica.	Active and Adaptive optics, Multivariable and Robust Control, Adaptive algorithms/ Smart Optics, Free-form optics, Wavefront sensing, Telescopes, Cameras, Spectrometers, Cryogenic temperatures, Computational optics, Topology optimisation for optics and mechanics, Plasmonics, Flat-optics for new imaging systems.
Additive manufacturing	Additive manufacturing is het proces waarbij een product wordt gemaakt door het laag voor laag op te bouwen (3D printing). Het is het tegenovergestelde van subtractieve productie, waarbij een voorwerp wordt gemaakt door een blok materiaal wordt weggesneden. (bijv. verspanen) ¹⁹ . Het omvat onder meer materiaal-ontwikkeling, procesontwikkeling en equipmentontwikkeling	Bioprinting, Selective Laser Sintering, Stereolithography, Biofabrication, Computer Aided Manufacturing, prototyping, 3D metal printing, Print process qualification, 3D printing for bio-degradables, for food and pharma.
Robotics	Robotics is een interdisciplinaire integratie van informatica en engineering. Het doel van Robotics is het creëren van intelligente machines die de mens op verschillende manieren kunnen bijstaan. ²⁰	Autonomous assembly and disassembly, Unstructured environment, Human-robot interaction, Self-configuration, Series of one, Customisation, Artificial intelligence, Autonomous systems, Soft robotic matter. Medical: Medical robotics, Surgical robots, Hospital robots, Rehabilitation robotics, Collaborative robots, Exoskeleton, Agro-food application, Pick and place, Drone systems, Social robotics.

¹⁸ Based on: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/sensors-and-actuator>

¹⁹ <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained>

²⁰ <https://www.techtarget.com/whatis/definition/robotics>

Engineering and fabrication technologies (2)

Sleuteltechnologie en toepassing	Definitie	Keywords (selectie)
Digital manufacturing technologies	Digital manufacturing technologies zijn een belangrijke driver van productiviteitsgroei in de industrie. Het bouwt op systemen en technologieën als cyber-physical systems, digital twins, ERP systemen, robotica en AI en machine learning. In de industrie omvatten deze een digitale representatie van fysieke processen en systemen ten behoeve van digitale, schaalbare en flexibele productie. Digital twins ontwikkelen zich mede door toepassing van AI verder tot meer autonome, interactieve en dynamische productiesystemen. B2B platforms en data spaces zijn hier van belang alsmede (predictive maintenance).	Industry 4.0, Digital Technical intelligence, Real-time and Embedded Systems, Viable System Model, Embedded Systems, Cyber-Physical Systems (CPS), Cybernetics, Autonomous Systems, Computer Architecture, Predictive modeling, AR/VR, digital data spaces, Agent-based manufacturing, Predictive maintenance.
Semiconductor technologies	Semiconductor technologies betreft halfgeleidercomponenten en/of sterk geminiaturiseerde elektronische subsystemen en de integratie daarvan in grotere producten en systemen. Zij omvatten fabricage (inclusief metrologie en karakterisatie), het ontwerp, de verpakking en het testen van halfgeleidercomponenten tot systemen op microschaal die meerdere functies op een chip integreren (semiconductor devices) en de ontwikkeling en bouw van de machines om deze activiteiten uit te voeren. Onder deze technologie vallen ook High-Frequency and Mixed-Signal Technologies (combineren van digitale en analoge signalen uit verschillende bronnen in een geïntegreerd systeem).	Electronic Transistors, Microchips, Semiconductor Diodes, Semiconductor Manufacturing, Semiconductor Detectors, Sensor electronics, Internet of Things, Medical electronics, Computing hardware, Signal processing hardware, 5G/6G, Biomedical biochemical sensors, GPS, communication, Radar, LIDAR.
Systems engineering	Systems engineering is een methodische, multidisciplinaire aanpak voor het ontwerp, de realisatie, het technisch beheer, de exploitatie en de buitengebruikstelling (design for recycling) van een systeem gedurende de levenscyclus. Het gaat om een (complex) systeem dat alle elementen omvat die nodig zijn om (optimaal) te kunnen produceren en oplossingen te realiseren: hardware, software, uitrusting, faciliteiten, personeel, processen en procedures. ²¹	Complex systems, AI, Machine learning, Industrial engineering, Production Systems Engineering, Process systems engineering, Mechanical engineering, Software engineering, Electrical engineering, Cybernetics, Organizational studies, Project management, Power electronics, Knowledge Based Engineering, Multi-disciplinary Optimization.

²¹ Gebaseerd op <https://www.nasa.gov/seh/2-fundamentals>

Bijlagen

1. Overzicht van de belangrijkste doorgevoerde wijzigingen 2018-2023

Onderstaande tabel geeft naast elkaar de sleuteltechnologielijsten van 2018 en 2023, met een korte beschrijving van de belangrijkste wijzigingen.

ST-lijs 2018	Herijkte ST-Lijst 2023	Belangrijkste wijzigingen
Advanced materials 1. Energy storage materials 2. Energy conversion materials 3. Optical/electronic/magnetic materials (incl. 2D and graphene) 4. Designer- and meta materials 5. Soft/Bio materials 6. Thin Films and coatings 7. Smart, Self-healing, self-organizing materials 8. Composites and ceramics 9. Structural materials	Advanced materials 1. Energy materials 2. Optical, electronic, magnetic and nanomechanical materials 3. Meta materials 4. Soft/bio materials 5. Thin films and coatings 6. Construction and Structural materials 7. Smart materials	• Ordening van materialen langs hun functioneel-technische eigenschappen (welke op nano-, micro- en macro-schaal kunnen worden ingezet). • Samenvoeging van Energy storage materials en Energy Conversion materials. • Samenvoeging van Composites and ceramics met Structural materials. • Inhoudelijke aanscherpingen en naamswijzigingen van ST.
Photonics and light technologies 1. Photovoltaics 2. Integrated photonics 3. Photonic detection 4. Photon generation technologies	Photonics and optical technologies 1. Photovoltaics 2. Optical systems and Integrated photonics 3. Photonic/Optical detection and processing 4. Photon generation technologies	• Naamswijzigingen van het cluster en sleutel-technologieën om ook 'optical' mee te nemen. • Inhoudelijke aanscherpingen.
Quantum technologies 1. Quantum computing 2. Quantum communication 3. Quantum sensors and metrology	Quantum technologies 1. Quantum computing 2. Quantum communication 3. Quantum Sensing	• Naamswijzigingen van quantum sensors and metrology om deze categorie meer omvattend te maken en gericht op sensing. • Inhoudelijke aanscherpingen.
Digital technologies 1. Artificial intelligence 2. Big Data & data analytics 3. Encryption technologies/digital security 4. Block chain 5. Cloud Computing, Grid computing, High Performance Computing	Digital and information technologies 1. Artificial intelligence 2. Data science, data analytics and data spaces 3. Cybersecurity technologies 4. Software technologies and computing 5. Digital Connectivity Technologies 6. Digital Twinning and Immersive technologies 7. Neuromorphic technologies	• Naamgeving cluster verbreed. • Data spaces toegevoegd aan Data science & data analytics. • Blockchain en dergelijke omgevormd naar Software Technologies and computing, waaronder ook xComputing gevat is. • Digital Connectivity Technologies apart benoemd. • Digital twin, brede toepassing verplaatst naar dit cluster vanuit Engineering and Fabrication technologies en uitgebreid met Immersive technologies. • Inhoudelijke aanscherpingen. • Neuromorphic technologies toegevoegd.

ST-lijst 2018	Herijkte ST-Lijst 2023	Belangrijkste wijzigingen
Chemical technologies 1. (Bio)Procestechonology, including process intensification 2. Microreactors 3. Separation technology 4. Catalysis 5. Analytical technologies 6. Electrification/Hydrogen technology/Power-to-gas	Chemical technologies 1. Process technology, including process intensification 2. (Advanced) Reactor engineering 3. Separation technology 4. Catalysis 5. Analytical technologies 6. Electricity-driven chemical reaction technologies	- Inhoudelijke aanscherpingen in naamgeving van sleuteltechnologieën, definities en keywords. - Reactor technologie nu breder getrokken. - Elektrificatie breder, inclusief plasma en fotochemische technologie.
Nanotechnology 1. Nanomanufacturing 2. Nanomaterials 3. Nanoscale devices 4. Semiconductor devices 5. Micro- and nanofluidics 6. Bionanotechnology	Nanotechnology 1. Nanomanufacturing 2. Nanomaterials 3. Functional devices and structures (on nanoscale) 4. Micro- and nanofluidics 5. Nanobiotechnology/Bionanotechnology	- Nieuwe categorie 'Functional devices and structures (on nanoscale)' als samenvoeging van nanoscale devices en elementen uit semiconductor devices. - Semicon is verplaatst naar Semiconductor technologies (cluster Engineering & Fabrication technologies). - Inhoudelijke aanscherpingen (onder andere vervuilsbeheersing onder nanomanufacturing).
Life science technologies 1. Industrial biotechnology (white) 2. Gene editing/precise genetic engineering 3. Organ-on-a-chip 4. Nanomedicine 5. Stem cell technology 6. Synthetic cell technology 7. Biochips and biosensors 8. Biocatalysis 9. Genomics/proteomics/metabolomics/glycomics/X-omics) 10. Biofabrication	Life science and biotechnologies 1. Biomolecular and cell technologies 2. Biosystems and organoids 3. Biomanufacturing and bioprocessing 4. Bio-informatics	- Op basis van input experts geconsolideerd in vier bredere ST. - Bio-informatica toegevoegd vanwege snelle opkomst AI in Life sciences.
Engineering and fabrication technologies 1. Sensors and actuators 2. Imaging technologies 3. Mechatronics and Optomechatronics 4. Additive manufacturing/3D printing 5. Robotics 6. Cyber-physical/embedded systems 7. High frequency & mixed signal technologies	Engineering and fabrication technologies 1. Sensor and actuator technologies 2. Imaging technologies 3. Mechatronics and optomechatronics 4. Additive manufacturing 5. Robotics 6. Digital manufacturing technologies 7. Semiconductor technologies 8. Systems engineering	- Cyber-physical systems is vervangen door de brede categorie Digital Manufacturing Technologies. (industrial) Digital twins en CPS zijn daaronder geschaard. - Semiconductor technologies toegevoegd als nieuwe ST. High Frequency and Mixed Signal technology is daar ondergebracht. - Systems engineering toegevoegd. - Inhoudelijke aanscherpingen.

2. Lijst van experts die deelnamen aan (online) discussiebijeenkomsten

Deelnemers online discussiesessies met break-outs in parallelsessies (23-25 november 2022).

Digital and information technologies en Engineering and fabrication technologies	
Digital technologies	dr.ir. Omar Niamut
Digital technologies	prof.dr.ir. Kees Vuijk
Digital technologies	prof.dr.ir. Maarten van Steen
Digital technologies	prof.dr. Johan Lukkien
Digital technologies	prof.dr.ir. Hajo Reijers
Digital technologies	prof.dr. Patricia Lago
Digital technologies	dr. Willem Jan Knibbe
Engineering and fabrication technologies	prof.dr.ir. Egbert-Jan Sol
Engineering and fabrication technologies	ir. Gregor van Baars
Engineering and fabrication technologies	prof.dr.ir. Bart Koopman
Engineering and fabrication technologies	prof.dr. Davide Ianuzzi
Engineering and fabrication technologies	dr. Stefan Baumer
Engineering and fabrication technologies	prof.dr.ir. Bram Nauta
Engineering and fabrication technologies	prof.dr. Eugenio Cantatore

Advanced materials en Photonics and optical technologies	
Advanced materials	prof.dr. Thom Palstra
Advanced materials	prof.dr. Jan aarts
Advanced materials	dr. Rolf van Benthem
Photonics and light technologies	ir. Bart Snijders
Photonics and light technologies	dr.ir. Peter Harmsma
Photonics and light technologies	prof.dr. Paul Urbach
Photonics and light technologies	prof.dr. Kobus Kuipers
Photonics and light technologies	ir. Benno Oderkerk
Photonics and light technologies	prof.dr. René Janssen
Advanced materials	prof.dr.ir. Arjan Mol
Advanced materials	prof.dr.ir. Hans Hilgenkamp
Advanced materials	prof.dr. Beatriz Noheda
Photonics and light technologies	dr. Steven van den Berg
Photonics and light technologies	prof.dr. Sjoerd Stallinga

Chemical technologies en Life science technologies	
Chemical technologies	dr. Reinier Grimbergen
Chemical technologies	dr.ir. Frank Wubbolts
Chemical technologies	prof.dr. Isabel Arends
Chemical technologies	prof.dr.ir. Paulien Herder
Chemical technologies	prof.dr.ir. Peter Schoenmakers
Chemical technologies	ir. André van Linden
Chemical technologies	dr. Willem Sederel
Chemical technologies	dr. Tjeerd Jongsma
Life science technologies	prof.dr. Peter van Tienderen
Life science technologies	prof.dr.ir. Karin Schroën
Life science technologies	prof.dr.ir. Ton van der Steen
Life science technologies	prof.dr. Pascal Jonkheijm
Life science technologies	prof.dr.ir. Vitor Martins dos Santos
Life science technologies	prof.dr. Han de Wilde
Life science technologies	prof.dr. Gilles van Wezel
Life science technologies	Annemiek Verkamman
Life science technologies	dr. René Smulders
Life science technologies	dr.ir. Ernst van den Ende
Life science technologies	prof.dr.ir. Albert van den Berg
Life science technologies	prof.dr.ir. Remko Boom

Nanotechnology en Quantum technologies	
Nanotechnology	prof.dr.ir. John van Noort
Nanotechnology	prof.dr. Joost Frenken
Nanotechnology	prof.dr.ing. Guus Rijnders
Nanotechnology	dr. Frank de Jong
Nanotechnology	prof.dr.ir. Dave Blank
Nanotechnology	dr. Martin Bennink
Nanotechnology	prof.dr. Marileen Dogterom
Nanotechnology	prof.dr. Peter Steeneken
Quantum technologies	dr. Rogier Verberk
Quantum technologies	ing. Jesse Robbers
Quantum technologies	prof.dr.ir. Caspar van der Wal
Quantum technologies	dr.ir. Christa Hooijer
Quantum technologies	prof.dr. Servaas Kokkelmans

Deelnemers plenaire fysieke bijeenkomst op het Ministerie van EZK,
16 december 2022, 9:00-12:30u

Chemical technologies	prof.dr. Isabel Arends
Digital technologies	prof.dr.ir. Kees Vuik
Digital technologies	prof.dr. Inald Lagendijk
Engineering and fabrication technologies	prof.dr.ir. Egbert-Jan Sol
Engineering and fabrication technologies	dr.ir. Christa Hooijer
Engineering and fabrication technologies	dr. Stefan Baumer
Life science technologies	prof.dr. Peter van Tienderen
Life science technologies	dr. Carmen van Vilsteren
Nanotechnology	prof.dr.ing. Guus Rijnders
Nanotechnology	prof.dr. Joost Frenken
Photonics and light technologies	dr.ir. Peter Harmsma
Quantum technologies	dr. Rogier Verberk
Quantum technologies	prof.dr. Servaas Kokkelmans

Deelnemers plenaire fysieke bijeenkomst op het Ministerie van EZK,
16 december 2022, 13:30-17:00

Advanced materials	prof.dr. Thom Palstra
Advanced materials	ir. André van Linden
Chemical technologies	dr. Robert Terorde
Chemical technologies	dr. Willem Sederel
Digital technologies	prof. dr. Andy Pimentel
Digital technologies	prof. dr. Johan Jeuring
Engineering and fabrication Technologies	prof.dr.ir. Fred van Keulen
Engineering and fabrication Technologies	prof.dr. Henri Werij
Engineering and fabrication Technologies	ir. Mark Courage MBA
Engineering and fabrication Technologies	ir. Miriam Luizink
Life science technologies	prof.dr.ir. Ton van der Steen
Life science technologies	prof.dr.ir. Gabriëlle Tuijthof
Life science technologies	prof.dr.ir. Loes Segerink
Nanotechnology	prof.dr.ir. Erwin Kessels
Nanotechnology	prof.dr.ir. Bram Nauta
Photonics and light technologies	dr. Jos van Haaren
Photonics and light technologies	prof.dr. Kobus Kuipers
Quantum technologies	ing. Jesse Robbers

3. Toelichting wijzigingen 2023-2024

TNO en NWO hebben een bijdrage geleverd aan de Nationale Technologiestrategie (NTS) door voor de 9 door EZK geprioriteerde sleuteltechnologieën agenda's te schrijven. Het betreft de volgende sleuteltechnologieën: Artificial intelligence (AI), Data science, data analytics and data spaces, (Bio) Process technology, Biomolecular and cell technologies, Energy materials, Imaging technology, Mechatronics and Optomechatronics, Microelectronics, Optical Systems and integrated photonics.

EZK draagt de eindverantwoordelijkheid voor de definitieve inhoud van de agenda's van de NTS. De agenda's zijn geschreven door TNO-medewerkers, in nauw overleg met TNO- en NWO-deskundigen, met experts uit kennisinstellingen, bedrijfsleven en andere organisaties en dossierhouders van EZK. TNO en NWO hebben de inhoud op hoofdlijnen ingebracht en zoveel mogelijk consistent gemaakt. Op verzoek van EZK en op basis van de inbreng van experts zijn inhoudelijke keuzes gemaakt.¹

Van september tot december 2023 werden er rondetafelgesprekken gehouden om een breed scala aan deskundigen te betrekken bij de totstandkoming van de

agenda's voor de NTS. Om consistente agenda's te creëren, is gebruikgemaakt van een sjabloon ontwikkeld door TNO/ NWO in samenwerking met F&IS en de TU Delft. Dit sjabloon dient als basis voor gestructureerde en samenhangende agenda's en zorgt voor uniformiteit en diepgang. De agenda's bestaan uit 3 delen: 1. een nadere definiëring van de sleuteltechnologie, 2. een beschrijving van de huidige positie en de sterktes en zwaktes, en 3. de ambitie. Per gekozen sleuteltechnologie hebben er rondetafelgesprekken plaatsgevonden waar deze agenda is besproken.²

In de eerste rondetafelsessies kwam deel 1 van de agenda aan bod, waarin de gebruikte definities van sleuteltechnologieën uit de herijking van maart 2023 werden besproken en geëvalueerd. Deze rondetafelsessies hebben geleid tot enkele wijzigingen in de beschrijving of benaming van sleuteltechnologieën. Deze wijzigingen zijn terug te vinden in bijlage 4.

¹ [De Nationale Technologiestrategie | Beleidsnota | Rijksoverheid.nl](#)

² M.u.v. Artificial intelligence (AI), Data science, data analytics and data spaces. Deze sleuteltechnologieën zijn gezamenlijk besproken.

4. Overzicht van de belangrijkste doorgevoerde wijzigingen 2023-2024

Onderstaande tabel geeft de wijzigingen van de namen en definities tussen 2023 en 2024 weer.

Naam en definitie 2023	Naam en definitie 2024 met doorgevoerde wijzigingen
Artificial intelligence (AI) is een systeemtechnologie die erop gericht is om gedrag door machines te realiseren dat lijkt op natuurlijke intelligentie. Artificial intelligence omvat verschillende leerstrategieën. Bij supervised machine learning is het model/ algoritme in staat classificatie of predictie te doen op basis van een test dataset en bijbehorende labels. Bij unsupervised learning maakt het algoritme deze categorisatie zonder gebruik te maken van bestaande labels. Bij reinforcement learning leert het algoritme over de beste strategie op basis van interactie met de omgeving. Deep learning staat toe problemen van hogere complexiteit en abstractie op te lossen. In toenemende mate worden voor AI hybride vormen ontwikkeld waarin mens en AI samenwerken.	Artificial Intelligence (AI) is een systeemtechnologie die erop gericht is om gedrag door machines te realiseren dat lijkt op natuurlijke intelligentie. AI omvat verschillende leerstrategieën, namelijk supervised machine learning, unsupervised learning, reinforcement learning en deep learning . In toenemende mate worden voor AI hybride vormen ontwikkeld waarin mens en AI samenwerken of kennis gedreven modellen met data-gedreven machine learning. Veel aandacht is er het afgelopen jaar voor generatieve AI, waarbij teksten, afbeeldingen, audio en andere content automatisch gegenereerd kunnen worden op basis van invoer van gebruikers.
Data science, analytics en data spaces (data ecosystems) betreft alle aspecten van het verzamelen, beheren, ontsluiten, delen en analyseren van data om waarde te creëren. Het data ecosysteem bevat gecentraliseerde en gedistribueerde data bases als ook federatieve oplossingen voor data delen. Voor analyse en waarde creatie moet deze data FAIR zijn, als ook moeten er afspraken stelsels bestaan over gebruik, toegang, en waarde van de data. Gegevens kunnen gestructureerd of ongestructureerd zijn, statisch of dynamisch, en gegevens kunnen zeer heterogeen zijn. De geëxtraheerde waarde kan de vorm hebben van voorspellingen, geautomatiseerde beslissingen, modellen die zijn geleerd uit gegevens of visualisaties die inzicht geven in de gegevens.	Data science, data analytics and data spaces betreft alle aspecten van het verzamelen, beheren, ontsluiten, delen, verwerken en analyseren van data middels dataverwerkingstechnologieën om waarde te creëren. Data science heeft betrekking op wetenschappelijke methoden, processen en systemen om kennis en inzichten te onttrekken uit data. Data analytics richt zich op het interpreteren van gegevens om waardevolle inzichten te verkrijgen. Een dataspace is een gedecentraliseerde, op standaarden gebaseerde structuur om vrijwillig en met vertrouwen federatief data te kunnen delen/hergebruiken. Vele verschillende vormen van data zijn voor de hedendaagse AI de bron voor het leren (trainen) van AI modellen.
(Bio)Process technology, including process intensification richten zich op het optimaal, stabiel en veilig inrichten van (groene) chemische productieprocessen. Hieronder vallen zaken als: schaalbaarheid, warmte-integratie, veiligheid, optimale downstream processing, ruimtebeslag en kostenefficiëntie. Synthese is naast separation technologies een essentieel onderdeel van chemische productieprocessen. Een belangrijke trend is om in productieprocessen meer gebruik te maken van groene (duurzame) grondstoffen, bijproducten en afvalstromen te beperken en deze zoveel mogelijk te hergebruiken en recylen.	Process technology , including process intensification richten zich op het optimaal, stabiel en veilig ontwerpen van (groene) chemische productieprocessen. Een belangrijke trend is om in productieprocessen meer gebruik te maken van groene (duurzame) grondstoffen, bijproducten en reststromen te beperken en deze zoveel mogelijk te hergebruiken en recylen. Hieronder vallen zaken als: schaalbaarheid, warmte-integratie, veiligheid, optimale downstream processing, ruimtebeslag en kostenefficiëntie. Conversietechnologie is naast separation technologies een essentieel onderdeel van chemische productieprocessen. We gaan hier uit van op koolstof gebaseerde grondstoffen en laten voorsnog metalen en mineralen grondstoffen buiten beschouwing. Procestechnologie kan ook voor de omzetting en zuivering van mineralen en metalen worden ingezet.
Imaging technology houdt zich bezig met het genereren, verzamelen, dupliceren, analyseren, wijzigen en visualiseren van beelden (optisch en niet-optisch). In de industriële context worden beeldvormingstechnologieën vooral gebruikt voor kwaliteitscontrole, en in combinatie met kunstmatige intelligentie kunnen problemen sneller worden opgespoord op basis van zelflerende systemen. Imaging technology speelt ook een grote rol in de medische technologie.	Imaging Technologies (onderdeel van Engineering and Fabrication Technologies) houdt zich bezig met het genereren, verzamelen, dupliceren, analyseren, wijzigen en visualiseren van beelden (optisch en niet-optisch). Het betreft de integrale keten van beeldvorming, waarvoor zowel hardware als software nodig is.

Naam en definitie 2023	Naam en definitie 2024 met doorgevoerde wijzigingen
Mechatronics and Optomechatronics omvat zowel Mechatronica als Optomechatronica. Mechatronica betreft het integraal ontwerpen van mechanische systemen en bijbehorende besturings- en regelsystemen en combineert werktuigbouw, elektrotechniek en ICT. Optomechatronica behelst de integratie van optische technologie in mechatronische systemen. Optomechatronische systemen spelen een belangrijke rol in de productie van halfgeleiders, wetenschappelijke instrumenten, medische apparatuur en robotica.	Mechatronica betreft het integraal ontwerpen van mechanische systemen en bijbehorende besturings- en regelsystemen en combineert werktuigbouw, natuurkunde, elektrotechniek en ICT. Optomechatronica behelst de integratie van optische technologie in mechatronische systemen. Optomechatronische systemen spelen een belangrijke rol in de productie van halfgeleiders, wetenschappelijke instrumenten, 3D printen, medische apparatuur, ruimtevaart waaronder laser satellite communication en robotica.
Microelectronics betreft halfgeleidercomponenten en/of sterk geminiaturiseerde elektronische subsystemen en de integratie daarvan in grotere producten en systemen. Zij omvatten de fabricage, het ontwerp, de verpakking en het testen van halfgeleidercomponenten tot systemen op microschaal die meerdere functies op een chip integreren (semicon devices). Onder deze technologie vallen ook High Frequency and Mixed Signal Technologies (combineren van digitale en analoge signalen uit verschillende bronnen in een geïntegreerd systeem).	Semiconductor technologies betreft halfgeleidercomponenten en/of sterk geminiaturiseerde elektronische subsystemen en de integratie daarvan in grotere producten en systemen. Zij omvatten fabricage (inclusief metrologie en karakterisatie), het ontwerp, de verpakking en het testen van halfgeleidercomponenten tot systemen op microschaal die meerdere functies op een chip integreren (semiconductor devices) en de ontwikkeling en bouw van de machines om deze activiteiten uit te voeren. Onder deze technologie vallen ook High-Frequency and Mixed-Signal Technologies (combineren van digitale en analoge signalen uit verschillende bronnen in een geïntegreerd systeem).
Optical Systems and integrated photonics zijn geconstrueerde systemen om licht te breken of te weerkaatsen om bepaalde optische functies te vervullen. Zo is bijvoorbeeld communicatie mogelijk met fotonen als informatiedrager. Geïntegreerde fotonica is de technologie die verschillende fotonische functies (genereren, moduleren, detecteren, etc.) integreert in een functionele fotonische chip. Systeemintegratie is een belangrijk element in de toepassing van geïntegreerde fotonica.	Optical systems zijn geconstrueerde systemen om licht te breken, te weerkaatsen of te manipuleren om bepaalde optische functies te vervullen. Zo is bijvoorbeeld communicatie mogelijk met fotonen als informatiedrager. Geïntegreerde fotonica is de technologie die verschillende fotonische functies (genereren, moduleren, detecteren, etc.) integreert in één functionele fotonische chip, op een zogenoeten Fotonisch Geïntegreerd Circuit. Systeemintegratie is een belangrijk element in de toepassing van geïntegreerde fotonica.
Cyber security technologies om relevante digitale risico's tot een aanvaardbaar niveau te reduceren. Dit omvat ook het omgaan met risico's op schade of uitval van digitale systemen en de beschikbaarheid, integriteit en vertrouwelijkheid van gegevens. Technologieën zijn gericht op het voorkomen van cyberincidenten en - wanneer cyberincidenten zich hebben voorgedaan - deze te ontdekken, schade te beperken en herstel eenvoudiger te maken.	Cybersecuritytechnologieën zijn de digitale technische toepassingen die bedoeld zijn om relevante digitale risico's te verkleinen. Dit omvat ook het omgaan met risico's op schade of uitval van digitale systemen en de beschikbaarheid, integriteit en vertrouwelijkheid van gegevens. Daarnaast zijn cybersecuritytechnologieën gericht op het voorkomen van cyberincidenten en, wanneer cyberincidenten zich hebben voorgedaan, deze te ontdekken, schade te beperken en herstel eenvoudiger te maken. Wat een aanvaardbaar niveau is, is veelal de uitkomst van een risico-afweging.

Auteurs

Thijmen van Bree (TNO)

✉ thijmen.vanbree@tno.nl

David Otto (TNO)

✉ david.otto@tno.nl

Emma Winkels (NWO)

✉ e.winkels@nwo.nl

Leon Gielgens (NWO)

✉ l.gielgens@nwo.nl

Govert Gijsbers (TNO)

✉ govert.gijsbers@tno.nl

Vera Janssen (NWO-TNO)

✉ vera.janssen@tno.nl

Marijn Goes (NWO)

✉ m.goes@nwo.nl

Tom van der Horst (TNO)

✉ tom.vanderhorst@tno.nl

TNO innovation
for life



Context

Het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) ontwikkelt een Nationale Technologiestrategie (NTS). Deze heeft tot doel om een visie te vormen als basis voor de inzet van middelen op (sleutel)technologieën en daarmee bij te dragen aan efficiëntere, gerichte investeringskeuzes. De NTS is daarmee richtinggevend voor de vormgeving van de ontwikkeling van sleuteltechnologieën en de prioriteiten die daarbinnen én daartussen worden gelegd. Dit rapport bestaat een herijking van de lijst van sleuteltechnologieën uit 2018.

tno.nl