

Nationale Agenda Materialen

Accelerating
Materials
Technologies

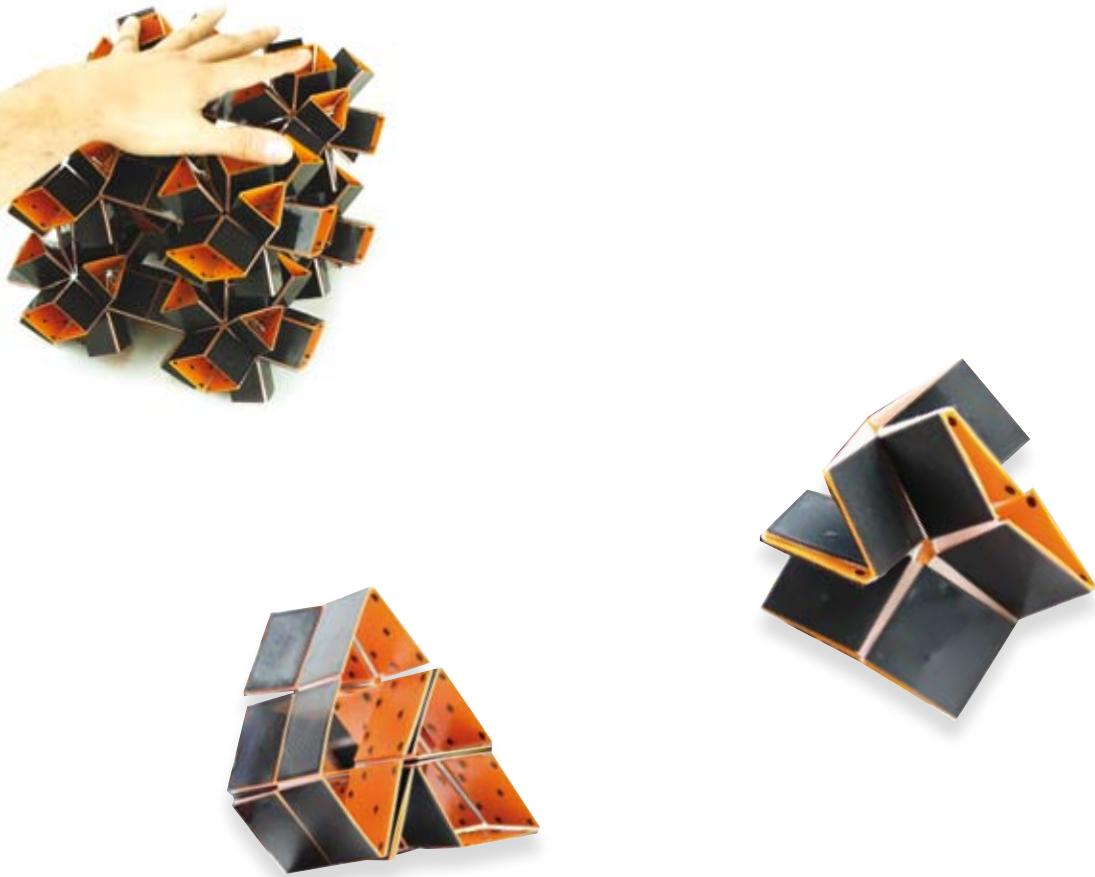


Foto omslag: Agustin Iniguez-Rabago, Soft Robotic Matter Group
(Bas Overvelde, NWO-Instituut AMOLF)

METAMATERIAAL GEMAAKT MET 3D-PRINTING
Metamaterialen hebben bijzondere mechanische, akoestische en optische eigenschappen die niet voorkomen in natuurlijke materialen. Ze vormen de bouwstenen van nieuwe robotica, adaptieve zonnepanelen, materialen die werken als computers, en meer. (Nature Comm. 10, 5577 (2019))

Inhoud

Samenvatting en doel	4
① Materialen op maat	6
② Innovaties en maatschappelijke impact van materialen	8
2.1 Materialen voor energietransitie en duurzaamheid	8
2.2 Materialen voor landbouw, water en voedsel	8
2.3 Materialen voor gezondheid en zorg	8
2.4 Materialen en veiligheid	10
2.5 Materialen als sleuteltechnologie	11
③ Economische impact van materialen	12
3.1 Bijdrage van materialen aan de Nederlandse economie	14
3.2 Investerings voor verdere groei van de Nederlandse economie	14
3.3 Materiaalonderzoek voor duurzame-ontwikkelingsdoelen	14
④ Onderzoekthema’s van de Nationale Agenda Materialen	18
⑤ Nederlands ecosysteem voor materiaalonderzoek	20
5.1 Universiteiten, NWO-Instituten en hogescholen	20
5.2 Technologische onderzoeksorganisaties en instituten	20
5.3 Nederlandse materialenindustrie	20
5.4 Nederlandse faciliteiten voor materiaalonderzoek	24
5.5 Nederlands materiaalonderzoek in een internationale context	24
⑥ Financiering van de Nationale Agenda Materialen	26
Appendix ① Materials research Focus Areas & Enabling Themes	27
Focus Area 1 Energy materials	27
2 Electronic materials	28
3 Construction materials	29
4 Soft/biomaterials	30
5 Coating/film materials	31
Enabling Theme 1 Metamaterials	32
2 Info-materials	33
3 Making and characterizing materials	34
4 Circular economy and resource efficiency	35
Appendix ② Leden MaterialenNL Platform, NWO Themacommissie Materialen en bestuur NWA Route Materialen	36
Appendix ③ Geraadpleegde literatuur	38

Samenvatting en doel

van de Nationale Agenda Materialen - Accelerating Materials Technologies

Materialen...

Nieuwe en verbeterde materialen hebben een enorme impact op ons leven, iedere dag weer. Elektrische auto's komen op de markt dankzij nieuwe accumaterialen, mobiele telefoons worden krachtiger dankzij nieuwe halfgeleiders, windturbines worden steeds effectiever dankzij nieuwe composieten en magneten. **Het materiaalonderzoekveld maakt een stormachtige ontwikkeling door!**

Kunnen we straks kunstmatige hartkleppen maken met een 3D-printer? Of brandstoffen maken uit zonlicht met nieuwe katalysatoren? Hoe kunnen we materialen volledig duurzaam fabriceren en recyclen? Voor de oplossing van onze enorme uitdagingen op het gebied van energie, duurzaamheid en high-tech apparaten zijn nieuwe ontwikkelingen in het materialenveld onmisbaar.

...onze economie,

De Nederlandse economie draait voor een groot deel op materialen. Jaarlijks wordt door ons land **meer dan 75 miljard euro omgezet** in de productie en export van machines, instrumenten, metalen, en kunststoffen die voor een belangrijk deel zijn gebaseerd op materiaalinnovaties. Meer dan **honderdduizend mensen hebben een baan in deze industrie**. En ieder jaar leiden we duizenden onderzoekers op; zij worden experts in het materialenveld in binnen- en buitenland.

...ons ecosysteem,

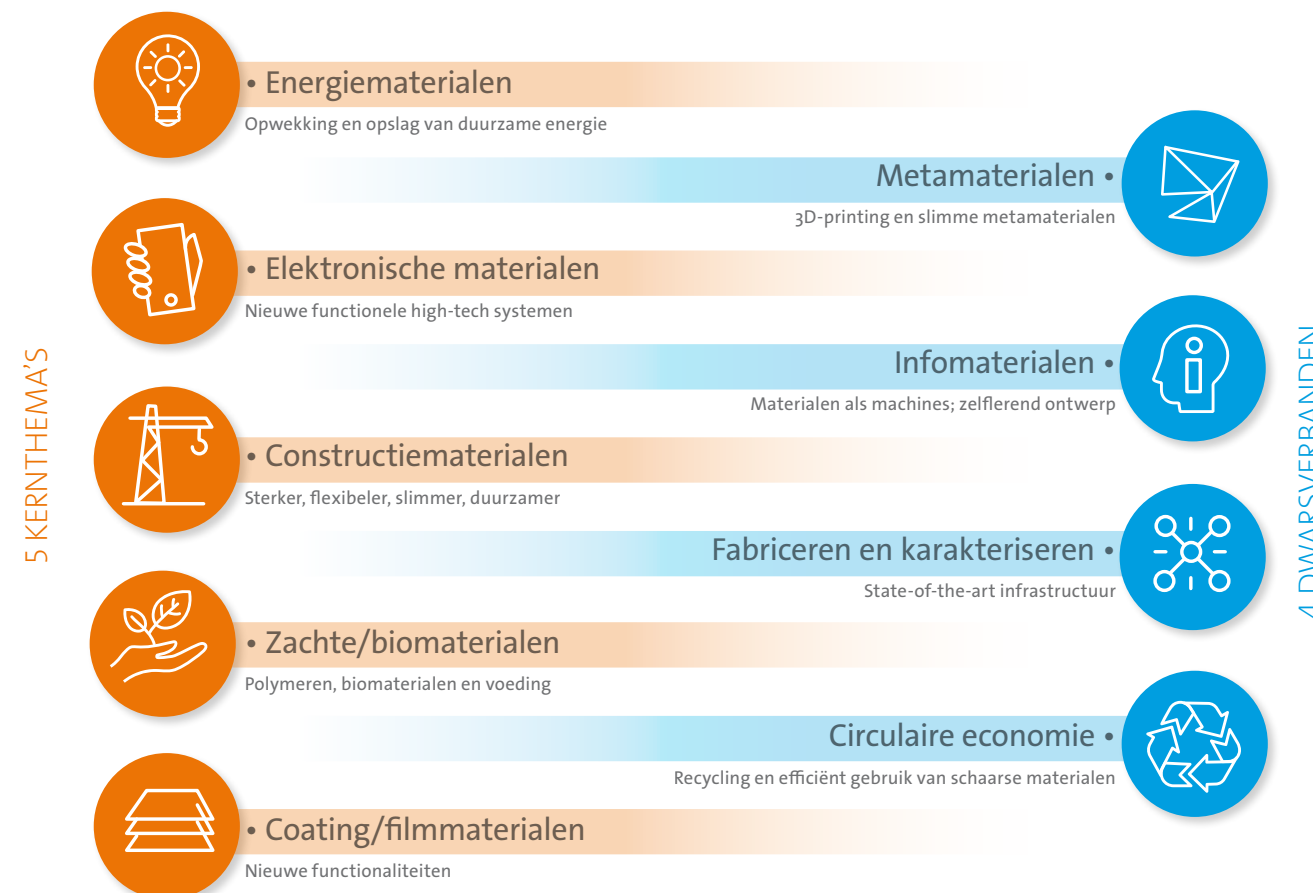
Waarom zijn we in Nederland zo succesvol met materialen? Ons land kent een uitzonderlijk ecosysteem waarin universiteiten, onderzoeks- en technologie-instituten en de materialenindustrie **op hoogstaand niveau effectief samenwerken** aan kansen van nu en morgen. Daarom behoort Nederland tot de wereldtop met het ontwerp en de productie van innovatieve materialen en producten. Daarom leveren materialen zo'n grote bijdrage aan onze economie.

...en onze maatschappelijke uitdagingen.

Materialen vormen het hart van de oplossing van uitdagingen binnen de

- **energietransitie en duurzaamheid**
- **landbouw, water en voedsel**
- **gezondheid en zorg**
- **veiligheid**
- **sleuteltechnologieën**.

Deze Agenda presenteert materiaalkundige oplossingen voor deze maatschappelijke uitdagingen die tevens het verdienvermogen van de Nederlandse industrie versterken. Zo kunnen we onze kennis- en economische voorsprong houden én de grote problemen waar onze maatschappij mee te maken heeft effectief aanpakken. De Agenda maakt keuzes binnen vijf kernthema's met vier dwarsverbanden waarin Nederland uitblinkt en waarbij we daadkrachtig voortbouwen op ons sterke materialen-ecosysteem van onderzoek en industrie.



Een breed gedragen Agenda

Deze Agenda is samengesteld door het MaterialenNL Platform, de bundeling van academische partijen, organisaties voor toegepast onderzoek, hogescholen en industriële partijen en branche-organisaties in opdracht van de Topsectoren Chemie, Energie en High Tech Systemen & Materialen, en beschrijft de onderzoeksrichtingen waarbinnen deze partijen willen samenwerken.

Concreet: wat willen we bereiken?

Het uitvoeren van deze ambitieuze agenda is urgent en vereist een aanzienlijk budget. Met deze Agenda in de hand kan het materialenveld een geïntegreerd nationaal onderzoeksplan **Accelerating Materials Technologies** samenstellen. De Agenda sluit aan op de missiegedreven innovatieprogramma's van de overheid en vormt tevens de opmaat voor een aanvraag binnen het Nationaal Groeifonds in 2021.

① Materialen op maat

Materialen vormen de fysieke basis voor bijna alles wat we om ons heen waarnemen. Waar zouden smartphones, elektrische auto's, of energiezuinige gebouwen zijn zonder de juiste materialen? Nieuwe geavanceerde materialen bieden oplossingen voor belangrijke maatschappelijke en technologische uitdagingen op het gebied van duurzame energie-opwekking, circulaire economie, gezondheid en zorg, veiligheid en nieuwe technologieën die de economie van ons land versterken.

Materiaalkunde is het vakgebied dat zich bezighoudt met het ontwerpen, maken, bestuderen en (her)gebruiken van materialen, in een breed scala aan afmetingen: van de atomaire schaal, via nano en micro tot aan de menselijke schaal van de voorwerpen om ons heen. Het is een multidisciplinair gebied dat onder meer natuurkunde, scheikunde en technologie met elkaar verbindt.

Materiaalkunde leert ons welke invloed microstructuur – dus de structuur op de kleinste schaal – heeft op de eigenschappen van een materiaal, en daardoor op de toepassingen. Met die inzichten wordt het mogelijk de eigenschappen van een materiaal – en dus van een product – te verbeteren en hele nieuwe geavanceerde eigenschappen te creëren. Materiaalkundigen hebben de afgelopen jaren de relatie tussen de structuur van materialen en hun eigenschappen verder ontrafeld. Tegelijkertijd zijn daarvoor ook uiterst krachtige microscopische technieken ontwikkeld om individuele atomen en moleculen te kunnen zien en manipuleren én controleren. Daarbij ontwikkelen materiaalkundigen nieuwe (circulaire) routes om materialen te maken. En nieuwe materiaalcombinaties en geometrieën creëren nieuwe eigenschappen die totaal anders zijn dan die van de samenstellende materialen. Dit alles biedt mogelijkheden om compleet nieuwe materialen op maat te maken.

Dit document beschrijft de unieke kansen die materiaalonderzoek ons biedt om onze maatschappelijke problemen op te lossen en tegelijkertijd compleet nieuwe economische bedrijvigheid te realiseren.



Marc Hendrikse
Topsector HTSM



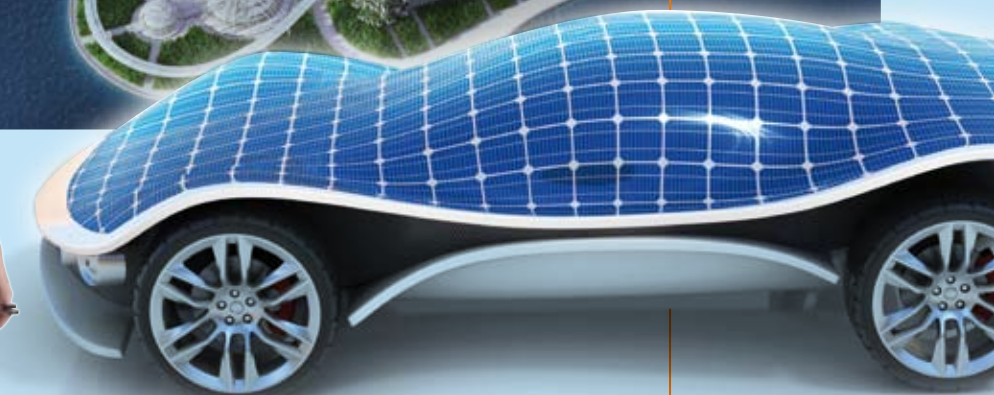
Emmo Meijer
Topsector Chemie



Manon Janssen
Topsector Energie



Albert Polman
NWO Themacommissie Materialen
NWA Route Materialen



2035: Dromen worden werkelijkheid

Het is 2035. Je rijdt door de stad in je elektrische auto, draadloos opgeladen met energie die volledig door de zon is opgewekt. De stad heeft een enorme transitie doorgemaakt; gebouwen en infrastructuur zijn van volledig hergebruikte materialen gemaakt die zichzelf repareren. Op je werk gebruik

je neuromorfe computers; slimmer dan onze hersenen, en veel energiezuiniger dan ouderwetse pc's. Je draagt kleding, volledig geïntegreerd met sensoren die je lichaamsfuncties in de gaten houden, zoals de conditie van je nieuwe hartklep die met een 3D-printer op maat is gemaakt.

Materiaalkundigen zijn in een ideale positie om oplossingen te realiseren voor de grote uitdagingen in onze maatschappij op het gebied van energie, grondstoffen, veiligheid, gezondheid en werkgelegenheid. In 2035 hebben nieuw ontwikkelde materialen geleid tot doorbraken op het gebied van:

KLIMAAT

een duurzame energievoorziening uit zon en wind

DUURZAAMHEID

een gesloten kringloop in materiaalgebruik

GEZONDHEID

kunstmatige weefsels en medische sensoren voor een vergrijzende bevolking

ECONOMIE

een nieuwe maakindustrie maakt smart products – made in the Netherlands

② Innovaties en maatschappelijke impact van materialen

2.1 Materialen voor energietransitie en duurzaamheid

Hoe maken we onze maatschappij CO₂-neutraal en creëren we een circulair gebruik van grondstoffen?

Het Klimaatakkoord stelt dat we in 2030 de uitstoot van broeikasgassen terugdringen met 49% ten opzichte van het niveau van 1990; in 2050 willen we een terugdringing van 95% realiseren. Daarvoor zullen we in 2050 een volledig CO₂-vrij elektriciteitssysteem moeten realiseren. Dat vereist een veel effectievere inzet van zonne-energie en windenergie. Volledig nieuwe materialen zijn vereist om het omzettingsrendement van zonnepanelen verder te verbeteren en om ze onzichtbaar in te passen in de gebouwde omgeving. Grotere windturbines vereisen nieuwe vezelversterkte composietmaterialen die licht, sterk en vermoeiingsbestendig zijn. Nieuwe corrosiebestendige materialen verlengen de levensduur en verminderen het onderhoud van windturbines op zee.

Daarnaast is het essentieel dat we nieuwe systemen voor energie-opslag ontwikkelen. Hoe zetten we de energie uit zon en wind efficiënt om in chemische energie in de vorm vloeibare brandstoffen of waterstof, en hoe verhogen we de opslagcapaciteit van batterijen, en beperken we daarbij het gebruik van niet-schaarse materialen? Welke materialen maken dit mogelijk? Ook supercondensatoren en energie-opslag in de vorm van samengeperste of vloeibare lucht of warmte bieden unieke mogelijkheden, maar vereisen volstrekt nieuwe materialen om praktische toepassing mogelijk te maken.

In 2050 willen we ook beschikken over een emissie-loze mobiliteit voor mensen en goederen. Dat vereist voor elektrisch vervoer de ontwikkeling van batterijen met grotere capaciteit en sneller oplaadvermogen, en tegelijkertijd een lager gewicht en fabricage uit niet-schaarse materialen. Voor alle mobiliteitstoepassingen geldt dat lichtere metalen en composietmaterialen van groot belang zijn om energieverbruik terug te dringen. De bouwindustrie is traditioneel een grote

uitstoter van CO₂. Nieuwe samenstellingen of combinaties van traditionele bouwmaterialen als hout, staal, beton en glas voor gebouwen kunnen de CO₂-uitstoot aanzienlijk verlagen. Een speciale uitdaging is om CO₂ uit de atmosfeer halen en om te zetten in nuttige koolwaterstoffen via elektrochemische conversie. Dat vereist de ontwikkeling van hoogselectieve katalysatoren in elektrochemische cellen.

Om materialen en producten op een duurzamere manier te produceren moeten we de keten grondstoffen-componenten-producten op een effectievere manier inrichten. Beter gebruik van duurzame energie bij productie, het gebruikmaken van niet-schaarse materialen, en duurzamere productiemethodes (smart industry) zijn daarbij essentieel. In een duurzaam gedreven, volledig circulaire economie bestaat het concept 'afval' niet meer: afgedankte eindproducten worden omgezet in grondstoffen voor nieuwe producten.

We willen in Nederland in 2030 50% minder primaire grondstoffen (mineraal, fossiel en metalen) gebruiken. Design, hergebruik en recycling zijn dan essentieel om leveringszekerheid van materialen te garanderen, zeker in Europa dat traditioneel sterk afhankelijk is van de import van grondstoffen. Het sluiten van materialenkringlopen vereist slimme innovaties in ontwerp en (her)gebruik van bouwmaterialen. Nieuwe zelfherstellende materialen gaan langer mee en vergen minder onderhoud, en functionele coatings verbeteren de duurzaamheid van materialen.



2.2 Materialen voor landbouw, water en voedsel

Hoe kunnen we een duurzame, toereikende en veilige voedselvoorziening creëren en veilig omgaan met water?

Nederland heeft in landbouw, voedsel, en watertech-nologie een wereldfaam; we kennen een zeer efficiënte en rendabele landbouw en voedselproductie. Maar tegelijkertijd plegen we daarmee een enorme aanslag op onze bodem, water, lucht en biodiversiteit. Het is een grote uitdaging om een verantwoord en klimaatneutraal landbouw- en natuursysteem te realiseren. De ontwikkeling van nieuwe materialen speelt daarbij een belangrijke rol.

Kunnen we nieuwe materialen en architecturen voor led-verlichting ontwikkelen met een kleurspectrum waarbij planten nog beter groeien? En nog slimmere sensoren om landbouwproducten effectiever te bemesten of te oogsten? En kunnen we uit landbouwproducten zoals zetmeel nog beter afbreekbare (bio-)materialen vormen en zo een circulaire economie versterken?

Voeding zelf is een zeer interessant materiaal, waarvan de structuur en samenstelling de smaak en voedings-waarde bepalen. Nederlandse voedingsbedrijven en onderzoekers zijn voortdurend op zoek naar nieuwe voedingsmaterialen en emulsies met de beste smaak, textuur en houdbaarheid, dat is pure materiaalkunde! Kunnen we efficiëntere biologisch-afbreekbare verpak-kingsmaterialen ontwikkelen, met sensoren om de



voedselkwaliteit in de tijd te blijven volgen en zo voedsel-verspilling voorkomen? Hoe ontwikkelen we antimicro-biële coatingmaterialen om zo voedselbereiding veiliger te maken? Innovatieve hoogselectieve membranen helpen om water te zuiveren om het drinkbaar te maken, en medicijnresten en andere stoffen uit afvalwater te halen voordat het op het oppervlaktewater kan worden geloosd.

2.3 Materialen voor gezondheid en zorg

Hoe kunnen we langer en gezonder leven?

We hebben ons tot doel gesteld dat alle Nederlanders in 2040 tenminste vijf jaar langer in goede gezondheid leven, en dat de gezondheidsverschillen tussen de laagste en hoogste sociaal-economische groepen met 30% zijn afgenomen. De ontwikkeling van nieuwe materialen en toepassingen daarvan spelen hierbij een essentiële rol. Slimme biosensoren kunnen fysiologische parameters meten om belangrijke aspecten van de lichaamsconditie te bepalen. Dit vereist nieuwe materialen die selectief biomoleculen aan zich binden in combinatie met effectieve detectiemethodes. Deze technologie staat nog in de kinderschoenen en heeft een enorm potentieel.

Ook in het lichaam kunnen intelligente materialen diag-nostiek verrichten of gedoseerd medicijnen toedienen. Kunnen we nanodeeltjes selectief aan kankercellen binden om die te detecteren en die cellen vervolgens met laserbestraling elimineren? Kunnen we medicijncapsules



programmeren zodat ze op de juiste tijd en plaats medicijnen afleveren? En hoe maken we sensoren die informatie uit het lichaam aan de buitenwereld doorgeven, en daarbij in hun eigen energie voorzien? Deze nieuwe mogelijkheden vereisen totaal nieuwe materiaalcombinaties, vaak op nano- of microschaal gestructureerd, die verschillende functionaliteiten combineren.

Materialen spelen een kernrol in het vervaardigen van kunstmatige lichaamsdelen. 3D-printen is een revolutionaire techniek waarmee lokaal en op maat biomaterialen voor kunstmatig weefsel in organen kunnen worden gemaakt. Dit biedt geweldige nieuwe mogelijkheden. Kunnen we met een 3D-printer een hartklep op maat maken? Door de samenstelling en structuur van een materiaal slim te ontwerpen kan het beter en sneller in het lichaam worden geïntegreerd. Kunnen we zo de levensduur van een kunstmatig heupgewricht verder verlengen? De uitbraak van COVID-19 heeft laten zien dat het cruciaal is snel in te kunnen spelen op een acute behoefte aan medische essentiële hulpmiddelen zoals ademhalingsapparatuur en mondklappers. Een sterke materialeninfrastructuur en -industrie is daarvoor essentieel.

2.4 Materialen en veiligheid

Hoe garanderen we de veiligheid van ons bestaan en van onze essentiële goederenvoorzieningen?

Veiligheid is in onze 21^{ste}-eeuwse maatschappij geen vanzelfsprekendheid. We hebben te maken met voortdurende dreigingen van terrorisme, militaire spanningen in de wereld en het in stand houden van essentiële transport- en handelsroutes voor de goederen die onmisbaar zijn voor ons bestaan.

Als lid van de NAVO heeft Nederland toegang tot de modernste middelen voor oorlogsvoering en terrorismepreventie. De ontwikkeling en fabricage van deze middelen vindt vaak plaats bij gespecialiseerde bedrijven en bouwt daarbij voort op een essentiële kennisbasis die door materiaalonderzoekers wordt geleverd. Kunnen we metamaterialen ontwikkelen met 'stealth'-eigenschap-

pen en zo militaire objecten onzichtbaar maken? Lichtere materialen maken voer- en vaartuigen wendbaarder en energie-efficiënter. Met geavanceerde 3D-print-technologie wordt het mogelijk ter plekke materialen op maat te maken en reparaties uit te voeren door beschadigde onderdelen te vervangen. Kleding gemaakt van composieten op basis van supervezels geeft militairen en hulpverleners een betere bescherming en meer comfort.

Slimme sensoren kunnen worden ingebed in pantserconstructies gemaakt van keramische matrixcomposieten om zo de staat van voer- en vaartuigen te bepalen, en onderhoudstaken te voorspellen. Kunnen we zelfherstellende materialen ontwikkelen die impact op militaire objecten beperken? Ook nieuwe batterijtechnologie en slimme sensoren op basis van nieuwe nanomaterialen kunnen belangrijke toepassingen vinden in militaire infrastructuur.

Om de aanwezigheid van zeer lage concentraties aan drugs, explosieven of gevaarlijke stoffen te kunnen detecteren zijn nauwkeurige en specifieke sensoren nodig, die met een hogere gevoeligheid in real-time resultaat geven. Lab-on-a-chip schakelingen kunnen met microkanaaltjes lucht- of watermonsters nemen en testen op ziekteverwekkende micro-organismen of giftige stoffen. Sensitieve en selectieve nieuwe materialen spelen hier een belangrijke rol.

Ruimtevaarttechnologie is volledig afhankelijk van hightech materialen. Voor de fabricage van satellieten zijn



- 2019 • lithium-ion-batterijen
- 2017 • cryo-elektronenmicroscopie
- 2016 • moleculaire machines
- 2014 • superresolutie-microscopie
- 2011 • quasikristallen

• SCHEIKUNDE



Figuur 1
NOBELPRIJZEN
in materiaalkunde sinds 2010

• NATUURKUNDE

- 2016 • topologische materialen
- 2014 • licht-emitterende diodes
- 2010 • 2D-materiaal grafeen

lichte, sterke, stijve materialen met een geringe thermische uitzetting nodig. De instrumenten die communicatie met de aarde verzorgen en die metingen van aard-atmosfeer en de ruimte uitvoeren zijn volledig gebaseerd op geavanceerde materialen die uiterst gevoelig signalen detecteren en analyseren.

2.5 Materialen als sleuteltechnologie

De voorgaande paragrafen beschreven kansen in het materiaalonderzoek voor doorbraken in de maatschappelijke missies Energietransitie en duurzaamheid; Landbouw, water en voedsel; Gezondheid en zorg; en Veiligheid. Daarnaast spelen materialen een cruciale rol in generieke en gespecialiseerde Sleuteltechnologieën die van fundamenteel belang zijn voor het oplossen van maatschappelijke uitdagingen en het versterken van onze economie. Sleuteltechnologieën ontstaan vaak bottom-up vanuit academisch onderzoek en vinden dan belangrijke toepassingen die door niemand waren voorzien. Ze leiden tot spectaculaire nieuwe wetenschappelijke ontdekkingen, zoals een voortdurende stroom Nobelprijzen laat zien (figuur 1).

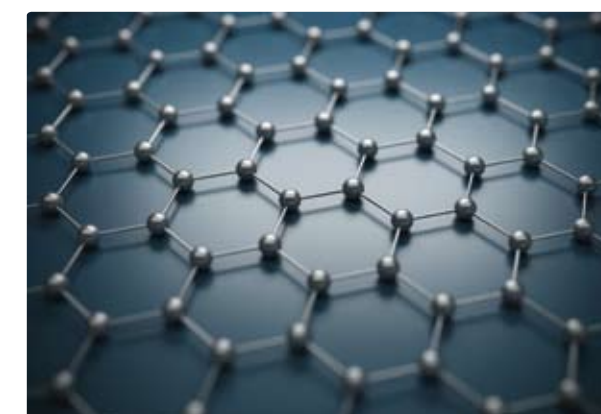
Vele Nederlandse bedrijven hebben een miljoenen- of soms zelf miljardenomzet uit sleuteltechnologieën die zich op de markt hebben bewezen. Daarnaast kent Nederland een groot aantal start-ups die zijn ontstaan uit ontdekkingen die in het lab zijn gedaan en vervolgens tot commerciële producten leiden. De voortdurende ontwikkelingen binnen de sleutelgebieden maken totaal nieuwe technologie mogelijk die van groot economisch belang is voor ons land. Er zijn teveel voorbeelden om hier te noemen; we beperken ons hieronder tot een aantal, ter illustratie.

Fotonica en lichttechnologieën

Optische 'metamaterialen', dunne coatings met een speciaal gevormde microstructuur, kunnen op een unieke manier lichtsignalen verwerken. Dat maakt nieuwe vormen van beeldverwerking mogelijk voor toepassingen in zelfsturende auto's of een snellere analyse van medische beelden. Met twee-dimensionale materialen, slechts een paar atoomlagen dik, kunnen extreem gevoelige sensoren worden gemaakt voor medische toepassingen, en optische schakelingen die werken met de snelheid van het licht. Zo kan de snelheid van telecommunicatienetwerken worden verhoogd en kunnen verlichtingssystemen worden gerealiseerd die minder energie verbruiken.

Nanotechnologieën

Nanotechnologie is een generieke technologie om materialen laag voor laag op te bouwen en te structureren. Het vormt de basis van bijna alle toepassingen die in de missie-hoofdstukken hierboven zijn beschreven: nano-



deeltjes voor het selectief afgeven van medicijnen in ons lichaam of in bacteriedodende coatings voor veilig voedsel, of nieuwe nanogestructureerde katalysatoren voor het efficiënt genereren van zonnebrandstof of zichzelf reparerende materialen. Zo'n voortdurende stroom van nieuwe toepassingen ontstaat omdat we steeds meer fundamenteel begrip ontwikkelen van de groei en synthese van nanomaterialen.

Quantumtechnologieën

Met quantumtechnologie kunnen bepaalde computerberekeningen extreem snel worden uitgevoerd en wordt vrijwel onkraakbare encryptie van gegevens mogelijk. Voor de technische realisatie hiervan zijn bijzondere materialen nodig waarmee lichtdeeltjes één voor één worden gegenereerd of de draairichting van elektronen voor lange tijd wordt behouden. Dat vereist een bijzondere integratie van materiaalkunde, optica en elektronica. Omgekeerd wordt het met een quantumcomputer wellicht mogelijk nieuwe materialen te ontwerpen die kunnen leiden tot totaal nieuwe toepassingen.

Digitale technologieën

De groeiende trend van *big data* vereist een steeds grotere capaciteit van onze datanetwerken en opslag-systemen. Met nieuwe optische technologieën, nieuwe halfgeleiders en magnetische materialen kunnen de informatiesnelheid en datacapaciteit sterk worden vergroot. Nu datacenters een aanzienlijk deel van ons energieverbruik voor hun rekening nemen zijn

“Materialen zijn de fysieke
bouwstenen waarmee we
onze maatschappij
duurzaam en circulair
kunnen maken.”

Hans van der Weijde | director programmes | Tata Steel

nieuwe materialen en concepten voor energiezuinige informatieverwerking essentieel. Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van kunstmatige intelligentie zijn afhankelijk van de nieuwste vormen van beeldwerking en snelle informatieverwerking die fotonica, nano- en quantum-technologie bieden.

Geavanceerde materialen

De ontwikkeling van nieuwe materialen met bijzondere mechanische eigenschappen maakt een stormachtige ontwikkeling door. Tata Steel ontwikkelt (ultra)hoge-sterktestaal dat veel sterker is dan conventioneel staal en tegelijkertijd een veel lager gewicht heeft. Vezelversterkt composietmateriaal is een mechanisch wonder dat zowel trek- als drukbelasting aan kan. Met hoogwaardig thermoplastcomposietmateriaal van Toray-TCAC maken Nederlandse bedrijven als DTC en GKN-Fokker vliegtuigonderdelen. In bouwmaterialen als beton verbeteren nieuwe innovaties de mechanische eigenschappen en verlagen ze CO₂-uitstoot. Nederlandse materiaalbedrijven zijn met hun innovaties en toepassingen wereldleidend.

Chemische technologieën

Chemische reacties staan aan de basis van de samenstelling van materialen. Chemici kunnen op moleculaire schaal de structuur en functie van moleculen controleren (Nobelprijs voor Scheikunde voor Ben Feringa e.a., 2016). De grote uitdaging is om atomaire en moleculaire assemblage zo te sturen dat materialen met de gewenste eigenschappen ontstaan. Nieuwe geavanceerde coatings, de nieuwe 2D (meta-)materialen, de synthese van nano-deeltjes voor medische toepassingen, om een paar voorbeelden te noemen, worden allen gedreven door nieuwe ontwikkelingen in chemische technologie. Een grote uitdaging is het terugdringen van broeikasgasemissies door inzet van nieuwe technologieën zoals plasmaproces-sing en chemisch recyclen. De circulaire economie vereist nieuwe methodes voor mechanisch of chemisch recyclen en het optimaliseren van materialen daarvoor.

Life science-technologieën

Zoals in paragraaf 2.3 is beschreven creëren materiaal-innovaties een enorme verbetering van onze gezondheid. Kunstmatig gegroeide of geprinte weefsels dienen als vervanging in ons lichaam, biosensoren monitoren onze lichaamsfuncties, en nanodeeltjes worden gebruikt voor diagnostische en therapeutische toepassingen. Al deze ontwikkelingen staan nog maar in de kinderschoenen, en hebben een potentieel dat nog veel groter is dan we nu voorzien. De grootste successen worden geboekt daar waar materiaalkundigen en medici op een directe manier met elkaar samenwerken.

Engineering- en fabricagetechnologieën

In het materiaalonderzoek zijn *state-of-the-art* (cleanroom) fabricagetechnieken en karakterisatie-technieken van groot belang. Een hoogwaardige maak-technologie is essentieel om succesvolle materiaal-innovaties op de markt te brengen. Nederland is wereldwijd een koploper in deze technologie. 3D-printing is een revolutionaire opkomende techniek waarbij steeds complexere materiaalverbindingen worden gemaakt; soft-imprint technologie maakt nanopa-tronering mogelijk op grote oppervlakken en nieuwe (roll-to-roll) processen genereren dunne lagen en coatings voor een groot aantal toepassingen. Compleet nieuwe vormen van elektronenmicroscopie maken het mogelijk biologische weefsel in detail af te beelden (Nobelprijs Scheikunde 2017). Innovaties in materiaal-analyse leiden vaak tot nieuwe Nederlandse start-ups, waarvan sommigen tot multinationals uitgroeien.

“Deze agenda heeft mij sterk
geholpen om mijn netwerk in
materiaalonderzoek binnen
Nederland op te bouwen!”

Monica Morales-Masis | associate professor of materials science | UT



3 Economische impact van materialen

3.1 Bijdrage van materialen aan de Nederlandse economie

De fabricage van materiaalproducten vormt een belangrijk deel van de Nederlandse economie. De fabricage van metaal en metaalproducten, machines en tools, en hoogwaardige kunststoffen genereerden in 2018 een **omzet van ruim 75 miljard euro** (figuur 2). In de top-5 van Nederlandse exportproducten met de hoogste toegevoegde waarde staan dezelfde drie materialen-gerelateerde gebieden. In totaal voegden zij in 2018 27 miljard aan waarde toe aan export, en daarmee aan ons bruto binnenlands product. De voortdurende innovaties in nieuwe materialen leiden tot een jaarlijks groeiende economie: zo steeg de omzet in materiaalproducten van 2015-2018 met 18% en zijn er in de metaalindustrie alleen al meer dan 100.000 banen. Tegelijkertijd zijn materialen een fundamenteel onderdeel van de hele Nederlandse industrie en de bijna 800.000 banen in 2018 in de industrie.

3.2 Investerings voor verdere groei van de Nederlandse economie

Succesvolle voorbeelden uit het verleden laten zien dat Nederlandse materiaalinnovaties jarenlang een voortdurende stroom aan economische opbrengsten opleveren. Zoals figuur 3 laat zien profiteert de Nederlandse economie vandaag nog steeds van uitvindingen die in de jaren '70 en '80 zijn gedaan (hoge-sterkte vezels, com-

posieten, optica). Zo is het te verwachten dat ook nieuwe investeringen in materiaalonderzoek in de komende jaren **zullen leiden tot miljarden-opbrengsten gedurende vele decennia in de komende eeuw**.

Als voorbeeld presenteert kader 1 een studie van Roland Berger naar het effect van verdere investeringen in materiaalonderzoek voor de coating-industrie. Investerings in coatingonderzoek kunnen in 2030 een **extra jaarlijkse omzet opleveren van zo'n 4 miljard euro**.

3.3 Materiaalonderzoek voor duurzame-ontwikkelingsdoelen

Nederland streeft naar een bijna volledig CO₂-neutrale economie in 2050. Figuur 4 geeft een overzicht van de jaarlijkse CO₂-uitstoot van de verschillende sectoren van onze maatschappij. De primaire opwekking van energie, industrie, transport, landbouw en de gebouwde omgeving dragen allen voor een aanzienlijk deel bij aan de 180 megaton CO₂ die we jaarlijks in ons land genereren.

Innovaties in materiaalonderzoek dragen bij aan een sterke reductie van CO₂-emissie in al deze sectoren. Deze Nationale Agenda (appendix A) biedt een handvat voor investeringen in onderzoek om onze doelstellingen voor 2050 te halen. Het verduurzamen van primaire-energieopwekking met zon- en

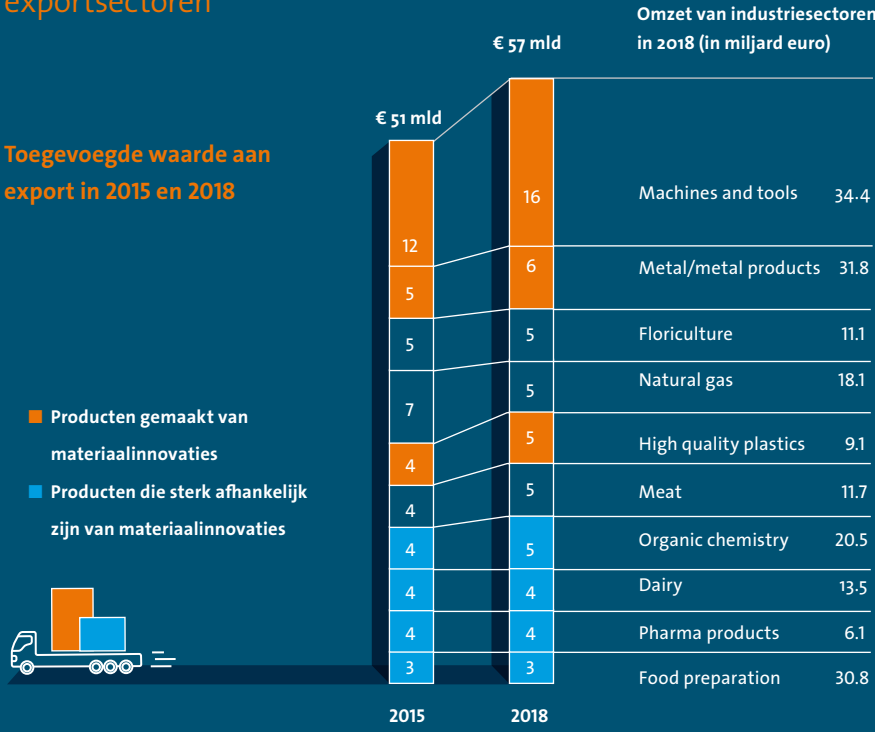
Kader 1 | Groeipotentieel van de Nederlandse coatingindustrie

De coatingsector heeft in Nederland een jaarlijkse omzet van zo'n 3 miljard euro, biedt werk aan zo'n 6.000 mensen, en groeit jaarlijks met zo'n 6%. Zoals in hoofdstuk 2 is beschreven maken specialistische coatings nieuwe toepassingen mogelijk in de medische en voedsel technologie, in bouwmaterialen, in nieuwe systemen voor de opwekking van duurzame energie, en veel meer. Door jarenlange investeringen in coatingonderzoek staat Nederland vooraan in het academisch onderzoek: Nederland staat in het coatingonderzoek op de tweede plaats van de citatie-impact van de top-10 grootste Europese landen in coatingonderzoek.

Verdere investeringen in het coating-materiaalonderzoek zullen leiden tot een groot aantal nieuwe innovaties en nieuwe producten: anti-corrosiecoatings, coatings die zich aanpassen aan hun omgeving, afbreekbare coatings, folies om zonnepanelen te verbeteren, en meer. Deze Nationale Agenda (appendix A) beschrijft de nieuwe onderzoeksrichtingen om deze doelen te bereiken. Zo behoudt Nederland zijn vooraanstaande positie in coatingtechnologie.

Een intensivering van verdere investeringen in coatinginnovaties en onderzoeksinfrastructuur kan de jaarlijkse groei van de coating-industrie verhogen tot zo'n 7%. **Dat levert in 2030 een omzet van de coating-industrie op die 4 miljard euro hoger is dan in 2018.**

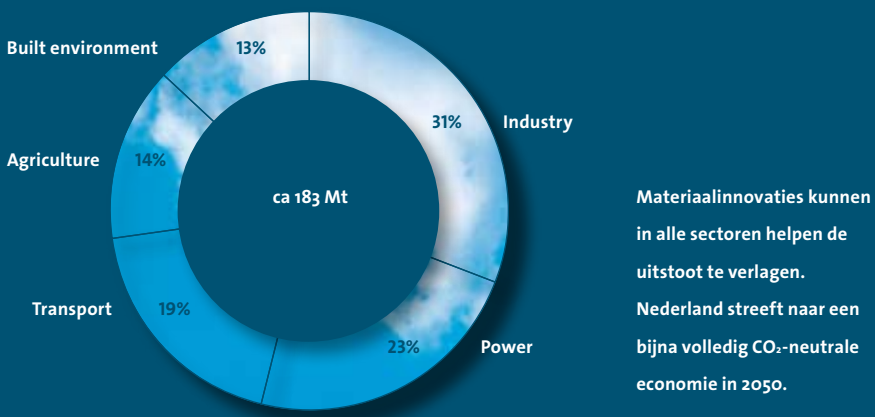
Figuur 2 | Top-10 Nederlandse exportsectoren



Figuur 3 | Materiaalinnovaties leveren vele jaren na de eerste uitvinding een voortdurende opbrengst op

Uitvinding	Product	Bedrijf	Omzet 2019 (miljoen €)
1970s	Synthetische vezels, para-Amid	AkzoNobel/Teijin Aramid	>1.000
1980s	Aluminium/glas composiet	AkzoNobel/Fokker/GKN	771
1980s	Lithografie-technologie	Philips/ASML	3.700
1990s	Thermoplastische vezels, Dyneema	DSM	338

Figuur 4 | Jaarlijkse CO₂-uitstoot per sector



windenergie in combinatie met nieuwe energieopslag-systemen is beschreven in paragraaf 2.1. Als voorbeeld presenteert kader 2 een analyse voor het versterken van de Nederlandse industrie voor zonnepanelen. Nieuwe investeringen in onder meer materiaalonderzoek hebben de potentie een industrie op te zetten met een **jaaromzet van meer dan 1 miljard euro, die de jaarlijkse CO₂-uitstoot verlaagt met meer dan 4 miljoen ton CO₂.**

Daarnaast wordt de komende jaren een groeiende verlaging in CO₂-emissie behaald door het elektrificeren van transport, mede dankzij nieuwe batterijmaterialen. De uitstoot in de gebouwde omgeving zal verlagen, enerzijds door het gebruik van duurzamere primaire energiebronnen en anderzijds door de ontwikkeling van nieuwe bouwmaterialen en technieken die minder CO₂ uitstoten (zie paragraaf 2.5). **Het is een grote uitdaging om industriële processen zo aan te passen dat hun CO₂-emissies sterk dalen.** Als voorbeeld presenteert kader 3 een analyse van de duurzame fabricage van staal.

“Nieuwe materialen en nieuwe materiaaltechnologieën zijn essentieel om met onze industrie voorop te blijven lopen in innovatie.”

Rolf van Benthem | corporate science fellow DSM | professor of coatings technology | TUE



Kader 2 | Een sterkere Nederlandse industrie voor zonnepanelen

Wereldwijd draagt zonne-energie nog slechts 1% aan de totale energieopwekking bij. Om de internationale doelstellingen te halen moet de jaarlijkse wereldwijde productie van zonnepanelen met een factor 30 stijgen; een enorme uitdaging. Dit biedt unieke economische kansen voor Nederland. Nu al verschaft de zonne-energiesector in Nederland 22.000 banen. Wereldwijd bedraagt de omzet in zonne-energie-gerelateerde technologie meer dan 100 miljard euro. Het Nederlandse klimaatakkoord stelt dat in 2030 70% van onze

elektriciteit uit hernieuwbare bronnen wordt opgewekt. Daarin is een belangrijk aandeel voorzien voor zonne-energie, waarin ons land een sterk ecosysteem heeft. Nederlandse onderzoeksinstituten ontwikkelen nieuwe concepten en hebben een toppositie (2e plaats in de Europese citatiestatistiek). Diverse bedrijven in Nederland en andere Europese landen fabriceren apparatuur voor het maken en testen van zonnecellen, zonnepanelen, systemen en installaties. Echter, de fabricage van zonnecellen, panelen en andere componenten gebeurt in Europa slechts

op kleine schaal. Dit is een groot strategisch risico en een gemiste kans. Het maakt ons voor zo'n essentieel deel van de energie-infrastructuur afhankelijk van andere landen buiten Europa. Daarnaast gaat het enorme economisch potentieel van een wereldwijde markt van ruim 100 miljard euro die de komende jaren meer dan een factor tien gaat groeien, grotendeels aan ons voorbij. Recente ontwikkelingen geven een nieuw perspectief voor Nederland en Europa. Door verdere automatisering wordt productie van zonnecel-technologie ook in de westerse

wereld competitief. Lokale productie leidt tot lagere transportkosten, wat bij de steeds lagere prijzen van de zonnecel/paneeltechnologie relevant wordt. Deze trend wordt nog versterkt door de komst van geïntegreerde zonne-energiecomponenten en -systemen, zoals stroomproducerende bouwelementen, die bij uitstek lokaal kunnen worden gemaakt. Nederland speelt op dat gebied internationaal een voortrekkersrol. Daarnaast creëren onze sterke positie in geavanceerde technologie en de komst van strenge Europese normen op het gebied van integrale

kwaliteit en milieu kansen om hoogwaardige, duurzame producten op de markt te brengen. Al deze nieuwe ontwikkelingen bieden unieke mogelijkheden om juist in Europa nieuwe zonnecel/paneel-technologie op te zetten. Europese initiatieven zijn samengebracht in de Solar Manufacturing Accelerator, met daarin bedrijven als Meyer Burger Technology (Duitsland), ENEL Green Power (Italië), en consortia zoals Genuine European Solar en 5GW+ Green Fab, waarin bijvoorbeeld ook het Nederlandse Energyra en TNO deelnemen.

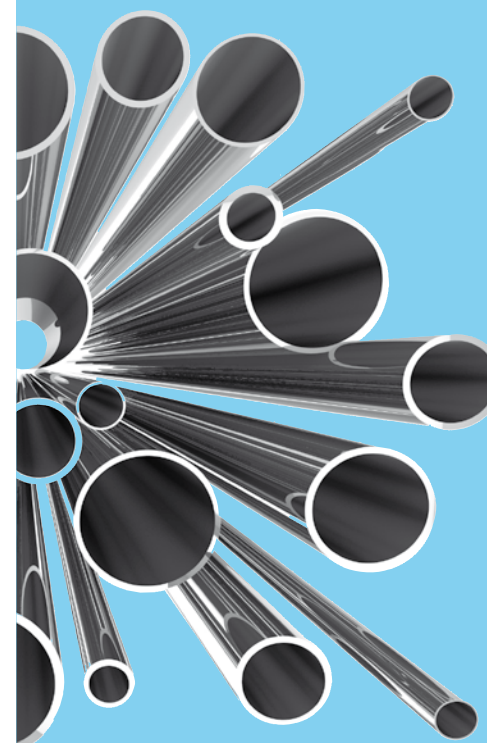
Roland Berger stelt dat het binnen dit Europese verband ook in Nederland mogelijk zou moeten zijn om, met de juiste investeringen, een competitieve Nederlandse zonnepaneel-industrie op te zetten met een jaarlijkse omzet van meer dan 1 miljard euro. De zonnestroom uit deze panelen verlaagt de jaarlijkse CO₂-uitstoot met meer dan 4 miljoen ton CO₂. Deze Nationale Agenda (appendix A) beschrijft benodigde investeringen in het materiaalonderzoek waarmee de Nederlandse zonneceltechnologie aan het internationale voorfront kan blijven.

Kader 3 | Een toekomstbestendige Nederlandse staal- en metaalproductenindustrie

van de 10 grootste landen in staalonderzoek in Europa). Metaalonderzoekers werken nauw samen, met een sterke coördinerende rol van het Materials Innovation Institute M2i. De wereldwijde staal- en metaalindustrie is extreem competitief en voor Nederland zijn voortdurende innovaties essentieel om in deze competitie te overleven. Met de ontwikkeling van speciale staal-soorten en op staal gebaseerde producten weet Nederland tot nu toe steeds een goede positie te houden. Door de invoering van Europese regels voor de handel van CO₂-emissierechten zullen staalproducten de komende jaren sterk in prijs stijgen. De Nederlandse staalindustrie moet dus zijn koers verleggen om zijn economische sterkte voor ons land te behouden. Zonder innovaties zal deze industrie niet kunnen overleven. Op de korte termijn biedt het invangen, omzetten en opslaan van de uitgestoten CO₂ die bij het

productieproces vrijkomt een oplossing. Parallel worden revolutionair nieuwe productiemethodes ontwikkeld waarbij grootschalig gebruik wordt gemaakt van duurzaam opgewekte elektrische verwarming, al dan niet in combinatie met het gebruik van waterstof. Zo kan de CO₂-emissie mogelijk met 40% worden verlaagd. Daarnaast zal een nog grotere recycling van staalproducten (nu wordt al meer dan 85% gerecycled) het energieverbruik in deze sector verder verlagen. Nieuwe innovaties in de fabricage van staal en staalproducten bieden geweldige economische kansen. Roland Berger voorspelt een grote groeipotentie als Nederland een technologische voorsprong creëert in deze nieuwe technologie, met mogelijk een miljardenopbrengst en een groot aantal nieuwe banen. Omgekeerd betekent achterblijven dat deze industrie in Nederland uiteindelijk niet kan overleven.

De fabricage van staal en metaalproducten vormt één van de grootste industrietakken in Nederland en is een cruciaal onderdeel van de Nederlandse economie. Meer dan 100.000 mensen vinden een baan in deze sector, die in Nederland jaarlijks meer dan 30 miljard euro omzet. Nederland heeft een toppositie in het materiaalonderzoek (2^e in de citatiestatistiek voor staal-gerelateerde publicaties



4 Onderzoeksthema's van de Nationale Agenda Materialen

Deze Nationale Agenda is samengesteld in opdracht van het MaterialenNL Platform dat in 2019 is opgericht. Doel van het platform is om de onderzoekers van universiteiten, NWO-Instituten, organisaties voor toegepaste technologie, hogescholen, bedrijven en andere materiaalorganisaties verder samen te brengen om de samenwerking en technologieoverdracht op het gebied van materialen verder te versterken. Het platform is opgericht door de Topsectoren Chemie, Energie en HTSM. De namen van de leden van het MaterialenNL Platform zijn vermeld in appendix B. Eén van de eerste initiatieven van het Platform was het samenstellen van deze Nationale Agenda.

De sterke synergie in het materialenveld is onder andere het gevolg van coördinatie die al in 2015 is gestart onder initiatief van de voormalige afdelingen Fysica (FOM) en Chemie (CW) van NWO en met ondersteuning van de Technologiestichting STW, waarbij de themacommissie

Materialen werd opgericht als adviescommissie van NWO. Dit resulteerde in de publicatie van het eerste strategische-visierapport *Dutch Materials – Challenges for Materials Science in the Netherlands* in 2016. De themacommissie van NWO initieerde tevens de route *Materialen - made in Holland* van de Nationale Wetenschapsagenda (NWA) en vormt daarvan het management. Eerder was de oprichting van technologische topinstituten als NIMR/M2i, DPI en TIFN van groot belang om het materialenveld te organiseren op deelgebieden.

Onder leiding van dit breed samengestelde MaterialenNL Platform zijn meerdere workshops gehouden om input te krijgen van de Nederlandse materialengemeenschap voor deze Nationale Agenda en om verdere samenwerking tussen materialenwetenschappers en bedrijven te stimuleren. In totaal hebben zo'n 250 materiaalwetenschappers bijgedragen aan de inhoud van deze Nationale Agenda.



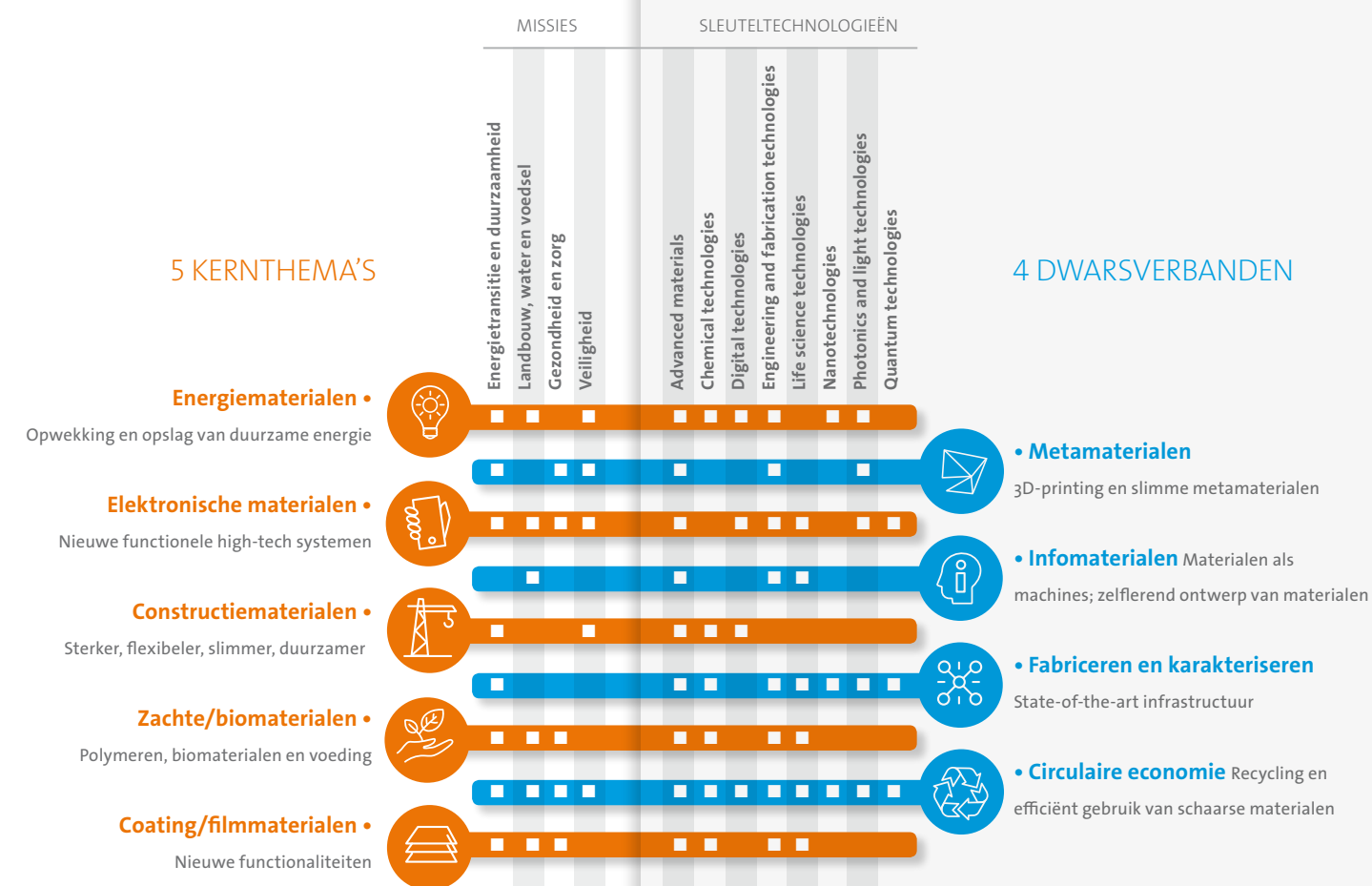
Figuur 5 | Workshop *Materials - made in Holland*, 26-11-2019

De Nederlandse materialengemeenschap is daarmee dus zeer goed georganiseerd en de onderzoeksthema's uit deze Nationale Agenda worden ondersteund door deze materialengemeenschap. In hoofdstuk 2 is beschreven hoe materiaalonderzoek oplossingen kan leveren voor maatschappelijke problemen binnen de missies Energietransitie en Duurzaamheid; Landbouw, water en voedsel; Gezondheid en zorg; Veiligheid; en de sleuteltechnologieën. Daarbij zijn er veel dwarsverbanden

tussen al deze uitdagingen. De Nederlandse materialengemeenschap wil de uitdagingen aanpakken met een gecoördineerd onderzoekplan dat is opgebouwd uit vijf kernthema's (figuur 6). De doorsnede van deze thema's en vier dwarsverbanden met de missies en Sleuteltechnologieën is de figuur weergegeven. Appendix A geeft een gedetailleerde beschrijving van de wetenschappelijke uitdagingen binnen de thema's en hoe deze worden aangepakt.

Figuur 6 | Kernthema's en dwarsverbanden van deze Nationale Agenda

...en de doorsnede met de maatschappelijke missies en sleuteltechnologieën



“Voor ons succes als scale-up zijn sterke verbindingen met het materialenveld essentieel.”

Mattijn Dekkers | CTO | Solmates

5 Nederlands ecosysteem voor materiaalonderzoek

5.1 Universiteiten, NWO-Instituten en hogescholen

Het Nederlandse materiaalonderzoek wordt uitgevoerd bij onderzoeksgroepen van bijna alle universiteiten en de NWO-Instituten AMOLF, ARCNL en DIFFER. In totaal leiden zo'n 200 universitair (hoofd)docenten en hoogleraren aan universiteiten en zo'n 30 onderzoeksgroepeliders aan de NWO-Instituten programma's voor materiaalonderzoek. Samen begeleiden zij meer dan 1.000 promovendi en postdocs in het materiaalonderzoek. Daarnaast worden jaarlijks honderden masterstudenten opgeleid in materiaalkunde aan de materialen-gerelateerde masteropleidingen. Velen van hen vinden een baan in de Nederlandse materialenindustrie. Zeven hogescholen voeren praktijkgericht onderzoek uit onder leiding van lectoren materiaalkunde. Het Nederlandse materiaalonderzoek behoort al decennia lang tot de wereldtop, zoals internationale citatieanalyses laten zien.

5.2 Technologische onderzoeksorganisaties en instituten

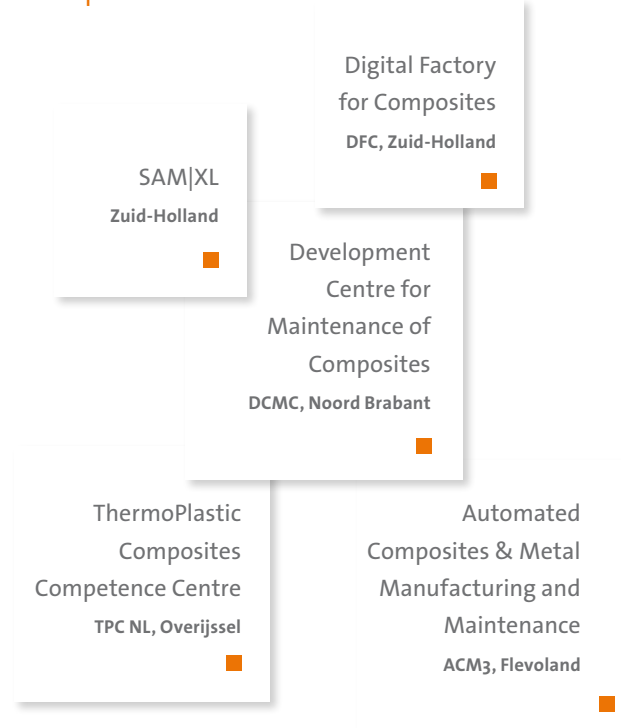
Nederland kent een groot aantal organisaties en instituten die zich richten op de technische aspecten en toepassingen van materiaalonderzoek: het Brightlands Materials Center, Brightsite, het Deltares instituut voor onderzoek op het gebied van water en ondergrond, het Polymer Research Platform (DPI), het Institute for Sustainable Process Technology (ISPT), het Materials Innovation Institute (Mzi), het Nationaal Instituut voor Lucht- en Ruimtevaart (NLR), de Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO), het Top Institute Food and Nutrition (TIFN), en het Wetsus European centre of excellence for sustainable water technology. Daarnaast spelen Fieldlabs en Open Innovatie Centra een belangrijke rol in samenwerking met het midden- en kleinbedrijf. De laatste jaren zijn ook diverse publiek-private samenwerkingsprojecten op regionaal niveau uitgevoerd (figuur 7).

5.3 Nederlandse materialenindustrie

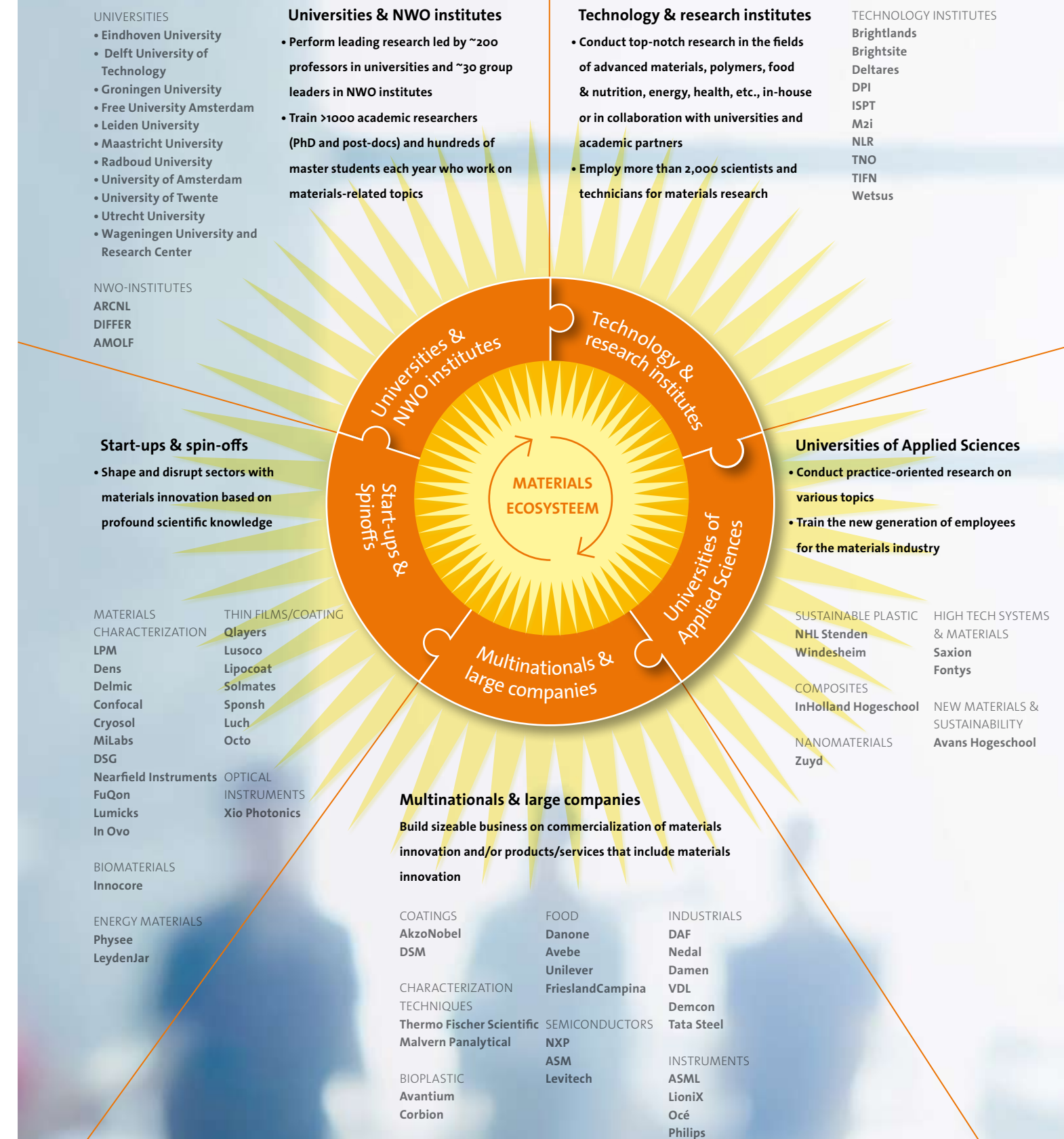
In Nederland is een groot aantal kennisintensieve materialenindustrieën gevestigd (figuur 9). De grote multinationals AkzoNobel, ASML, Dow, DSM, Philips, Shell, Tata Steel en Unilever hebben grote R&D-laboratoria in Nederland. Deze laboratoria hebben een lange geschiedenis in het omzetten van wetenschap in technologie, en er bestaan sterke relaties tussen deze laboratoria en universiteiten en onderzoeksinstituten in Nederland. Veel andere kleine en grote bedrijven brengen een breed scala aan materialen-gerelateerde producten op de markt. Daarnaast is er een sterke maakindustrie die optreedt als toeleverancier voor de materialenindustrie of als fabrikant van analyseapparatuur voor de industrie en de academische wereld. Nederlandse materiaalbedrijven werken nauw samen met academische partners en veel van het langetermijnonderzoek wordt uitgevoerd in publiek-private samenwerkingsverbanden.

Het gebied van de materiaalkunde is ook een uitstekende voedingsbodem voor start-ups die voortkomen uit academische onderzoeksgroepen en technologie-instituten (figuur 10).

Figuur 7 | Voorbeelden van Fieldlabs en Open Innovatie Centra



Figuur 8 | Materialen-ecosysteem in Nederland



Figuur 9 | Bedrijven die betrokken zijn bij materiaalonderzoek in Nederland

...en die gevestigd zijn in Nederland, of elders gevestigd zijn maar een significante onderzoek-/productieactiviteit hebben in Nederland (niet-volledige lijst), met de missies en/of de sleuteltechnologieën waaraan het bedrijf bijdraagt.

BEDRIJVEN	PRODUCTEN	MISSIES				SLEUTELTECHNOLOGIEËN						
		Energietransitie en duurzaamheid	Landbouw, water en voedsel	Gezondheid en zorg	Veiligheid	Advanced materials	Chemical technologies	Digital technologies	Engineering & fabrication technologies	Life science technologies	Nanotechnologies	Photonics and light technologies
AkzoNobel	verf, coatings	■				■	■					
ASMI	halfgeleider-apparatuur								■		■	■
ASML	EUV-lithografie							■	■		■	■
Avantium	bioplastics	■	■			■	■				■	
Avebe	zetmeelproducten	■	■			■	■					
BASF	katalysatoren, coatings	■	■	■		■	■			■	■	
Bronkhorst High-Tech	flowmeting en -regeling		■	■					■			
CRH	bouwmaterialen	■				■	■					
Corbion	voeding en biochemicals	■	■			■	■			■		
Danone	voedingsmiddelen		■	■		■	■			■		
Damen	scheepsbouw	■				■			■			
DAF	trucks	■						■	■			
Demcon	machinebouw			■					■		■	■
DSM	functionele polymere materialen	■	■	■	■	■	■			■		
Dow Benelux	polymeren	■	■	■	■	■	■			■		
DTC	aerospace					■	■		■			
Dura Vermeer	bouw & infra	■				■	■		■			
GKN Fokker	systemen voor aerospace					■		■	■			
Friesland Campina	voedingsmiddelen		■	■		■	■			■		
Fujifilm	coatings					■	■				■	■
Heijmans	bouw	■				■			■			
Kingspan	isolatiematerialen	■				■						
Lanxess	polymeren	■				■	■					
Lionix	optische instrumenten					■					■	■
Malvern Panalytical	materiaalkarakterisering					■			■	■	■	■
Medtronic	biomedical			■					■	■	■	■
Micronit Microfluidics	microfluidic instrumenten					■			■		■	■
Nedal	aluminiumextrusie	■				■			■			
Nouryon	specialty chemicals	■	■	■		■	■			■		
Nyrstar	metalen	■				■	■					
NTS	machineonderdelen	■		■	■	■		■	■	■	■	■
NXP	halfgeleider-componenten	■							■		■	■
Océ/Canon	printers, kopieerapparaten					■	■	■	■	■	■	■
Paques	recycling, afvalbehandeling	■				■	■			■		
Pervatech	membranen		■			■					■	
Philips	biomedische technologie			■		■		■	■	■	■	■
Photonis	fotodetectoren				■	■						■
PPG	coatings	■				■	■					
Prorail	treintransport	■				■						
QCP	polymeren	■				■	■					
RWS	vervoer	■				■			■			
Sabic	polymeren	■	■	■		■	■			■		
Shell	olie- en gastecnologie	■				■	■					
Signify	verlichting	■				■		■	■			■
SKF	lagers	■				■	■		■			
Synbra	verpakkingen	■				■	■					
Tata Steel	staal & metaalproducten	■				■	■		■			
Teijin Aramid	high-performance vezels	■				■	■					
Tempress	ovens	■							■			
Thales	sensorsystemen				■	■			■		■	■
Thermo Fisher	microscopen, reagentia		■	■					■	■	■	■
Toraytech	composieten	■				■	■		■			
Unilever	voeding, biopolymeren		■	■		■	■			■	■	
VDL	metaal, kunststof, hightech	■				■			■			■

Figuur 10 | Materialen-gerelateerde start-ups in Nederland

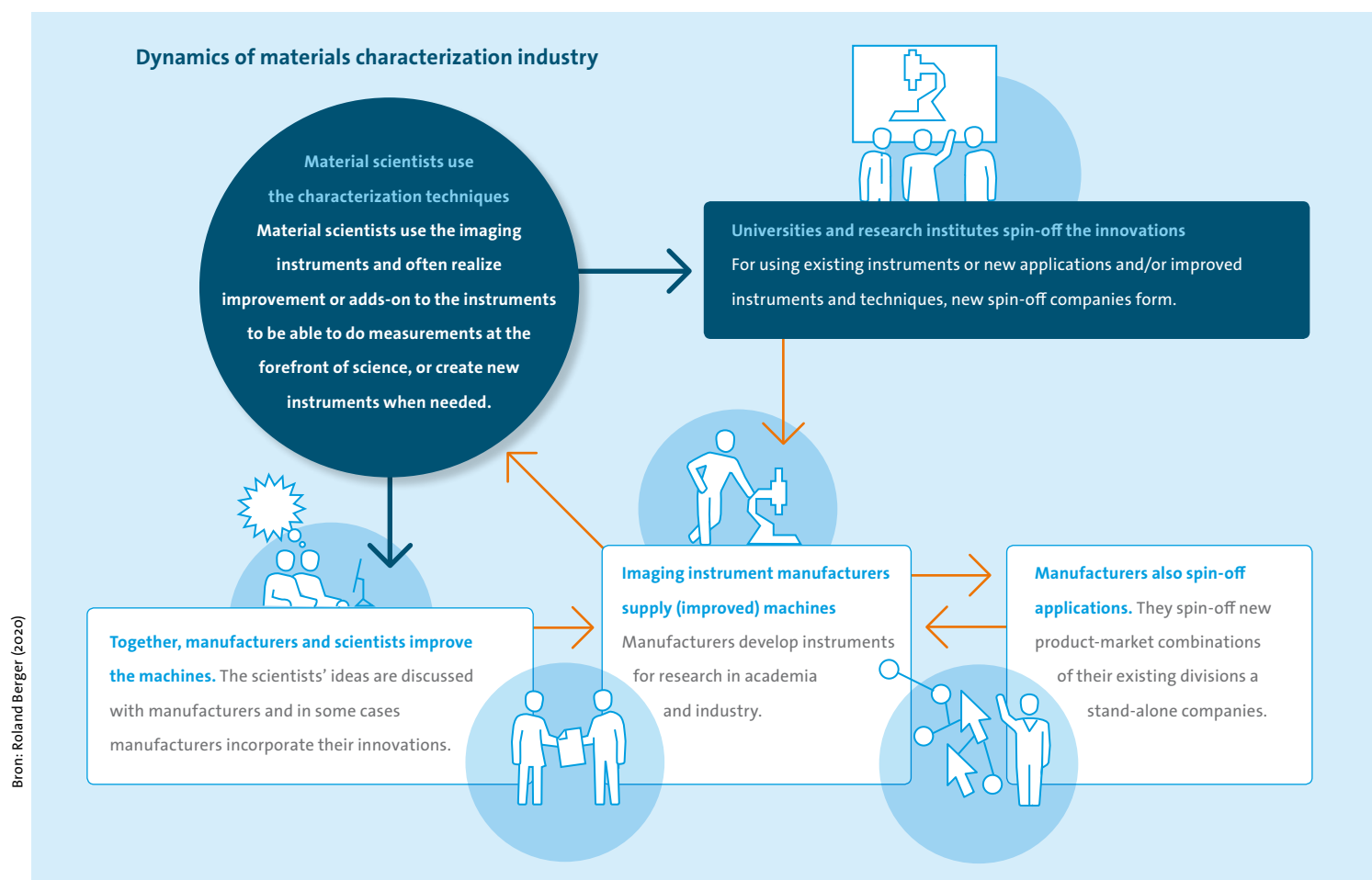
...en de missies en/of de sleuteltechnologieën waaraan het bedrijf bijdraagt (niet-volledige lijst).

START-UPS	PRODUCTEN	MISSIES				SLEUTELTECHNOLOGIEËN						
		Energietransitie en duurzaamheid	Landbouw, water en voedsel	Gezondheid en zorg	Veiligheid	Advanced materials	Chemical technologies	Digital technologies	Engineering & fabrication technologies	Life science technologies	Nanotechnologies	Photonics and light technologies
3DPPM	recycling 3D-printmateriaal	■				■						
Admatec	3D-printen keramiek, metaal	■				■			■			
Airborne	composietstructuren	■				■			■			
Allotropica	engineering plastics	■		■		■	■					
Amsterdam Scientific Instruments	pixeldetectoren								■		■	■
Applied Nanolayers	grafeenlagen					■			■			
Concr3DE	3D-printen materialen	■				■			■			
Cristal Therapeutics	nanomedicijnen			■			■			■	■	
Cumapol	recycling	■				■	■					
Cure	recycling	■				■	■					
Delmic	correlatieve microscopie		■	■				■	■			■
Encapson	coatings voor medische instr.			■		■	■			■		
Ingell technologies	hydrogel-syst. voor medicijnen			■		■	■			■		
InnoCore Pharmaceuticals	polymere syst. voor medicijnen			■		■	■			■		
Ioniqua	polymeren	■				■	■					
Heros	recycling	■				■						
HQGraphene	grafeen op 2D-materialen					■					■	
Leiden Probe Microscopy	materiaalkarakterisering										■	■
Levitech	groei/depositie dunne lagen					■	■		■			
Lightmotif	laser-oppervlaktebeh.								■			
Mattech	loodvrije soldeermaterialen					■			■			
Materiomics	biocompatibele oppervlakken			■		■						
Mineralz	recycling	■				■	■					
MX3D	3D-printen metaal	■				■			■			
Octopolus	polymere syst. voor medicijnen			■		■				■		
Omics2Image	moleculaire imaging			■								■
PMC Recycling	recycling	■				■	■					
Qlayers	coatingmachines					■	■					
Ramlab	3D-printen metaal	■				■	■					
SCIL	nanoimprinting	■				■			■		■	■
Shapeways	3D-printmaterialen					■						
Single Quantum	lichtdetectoren										■	■
Solmates	groei en depositie dunne lagen					■	■					
Spinnoation Analytical	materiaalanalyse met NMR								■		■	
Surface Preparation Laboratory	oppervlaktepreparatie					■			■			
Surfix	nanocoatings			■		■	■				■	
SyMO-Chem	materiaalsynthese op maat					■						
Triboform	simulaties					■						
XIO Photonics	optische instrumenten											■
VSParticle	synthese van nanodeeltjes					■	■				■	



Figuur 11 | Innovatiecyclus voor start-ups in materiaalanalyse

Onderzoekers bij academische of technologische instituten ontwikkelen nieuwe concepten waaruit spin-offs ontstaan. Sommigen groeien uit tot multinationals (figuur 12).



Samen zorgen deze kleine bedrijven voor werkgelegenheid voor enkele honderden werknemers, en hun bestaan toont de grote vitaliteit van het Nederlandse materialen-ecosysteem aan. Hun groei is vaak sterk afhankelijk van de samenwerking met academische partners en technologie-instituten en er is een effectieve innovatiecyclus waar al deze partijen van profiteren (figuur 11). Sommige Nederlandse start-ups groeien uit tot multinationals met een miljoenen- of miljardenomzet, zoals bijvoorbeeld FEI/ThermoFisher, Malvern Panalytical, en ASML (figuur 12). Voortdurende investeringen in materiaalonderzoek zullen in de toekomst in Nederland weer nieuwe start-ups opleveren waaruit nieuwe multinationals voortkomen die een grote bijdrage aan de Nederlandse economie kunnen leveren.

5.4 Nederlandse faciliteiten voor materiaalonderzoek

State-of-the-art materiaalonderzoek vereist een hoogwaardige infrastructuur. Nederland kent bij alle materiaalorganisaties een moderne verzameling gespecialiseerde apparaten voor het uitvoeren van onderzoek. Een aantal grote en dure faciliteiten is opgezet als gebruikers-faciliteit: de cleanroomfaciliteiten van Nanolab, het elektronenmicroscopieconsortium NEMI, het hoogmagneetveldlaboratorium HFML, de vrije-elektronenlaser FELIX, en de neutronen- & positronentechnieken van RID. Daarnaast ontwikkelen universiteiten en instituten specialistische apparatuur die soms ook als faciliteit voor externe gebruikers wordt ingezet. Nederlandse onderzoe-

kers maken tevens met succes gebruik van grote Europese materiaalanalyse-faciliteiten zoals ESRF (Grenoble) voor röntgenanalyse en ESS (Lund) voor neutronen-analyse. Het inzetten en opleiden van hooggekwalificeerd technisch en wetenschappelijk ondersteunend personeel is essentieel om de technische infrastructuur te beheren en te onderhouden. Voortdurende investeringen in infrastructuur zijn essentieel opdat Nederland aan het voorfront kan blijven meedoen.

5.5 Nederlands materiaalonderzoek in een internationale context

Het Nederlandse onderzoek is sterk verweven met de programmering van het lopende Europese onderzoeks-programma Horizon 2020. Hierin is materiaalkunde ingebed in de Europese sleuteltechnologieën (Key Enabling Technologies, KETs), die de Europese industrieën in staat stellen om hun concurrentiepositie te behouden en uit te bouwen naar nieuwe markten. Binnen Horizon 2020 zijn nanotechnologie, geavanceerde materialen, geavanceerde productieprocessen en biotechnologie technologieën die sterk overlappen met deze Nationale Agenda. Horizon Europe, het nieuwe programma voor onderzoek en innovatie van de Europese Unie (2021-2027) heeft een voorgestelde begroting van 100 miljard euro en richt zich op wereldwijde uitdagingen en het Europese industriële concurrentievermogen. Industriële technologieën, geavanceerde materialen, circulaire industrie, en

“Nieuwe investeringen in onderzoeks-infrastructuur zijn essentieel om doorbraken in het materiaalonderzoek te verwezenlijken.”

Jilt Sietsma | professor of materials science and engineering | TUD

CO₂-vrije en schone industrieën zijn hoofdthema's net als in deze Nationale Agenda. Het is van groot belang dat Nederlandse onderzoekers deelnemen aan de komende grote Europese onderzoeksprogramma's die gericht zijn op materiaalkundig onderzoek en innovatie. Deze Nationale Agenda beschrijft de onderzoeksthema's waarin Nederland sterk is, en kan zo helpen een belangrijk deel van de Horizon-gelden voor Nederlandse onderzoekers te verwerven.

De Europese Unie heeft het voornemen om in 2050 klimaatneutraal te zijn. Om daartoe te komen wordt door de Europese Commissie de 'Europese Green Deal' opgesteld, een plan van aanpak om over te schakelen op een schone, circulaire economie, biodiversiteit te herstellen en vervuiling terug te dringen. De Green Deal zal de komende jaren worden vormgegeven en heeft een directe relatie met het thema Energietransitie en duurzaamheid in paragraaf 2.1. Nederlandse onderzoekers zijn dus goed voorgesorteerd om aan de Green Deal-initiatieven deel te nemen en gelden daarvan in Nederland te besteden.

Figuur 12 | Materiaalanalyse en fabricage Drie start-ups die uitgroeiden tot multinationals in Nederland.

FEI/Thermo Fisher Elektronenmicroscopen voor materiaalanalyse	Malvern Panalytical Röntgen- en microscopie-instru- menten voor materiaalanalyse	ASML Wafersteppers voor lithografie voor chipproductie
>700 medewerkers in Nederland	1.000 medewerkers in Nederland	>6.000 medewerkers in Nederland
jaaromzet in Nederland 264 miljoen euro (2018)	wereldwijde omzet 448 miljoen euro (2019)	wereldwijde omzet 11.8 miljard euro (2019)

Bron: Roland Berger (2020)

6 Financiering van de Nationale Agenda Materialen

Dit rapport beschrijft de materiaal-onderzoeksvragen binnen de maatschappelijke missies Energietransitie en duurzaamheid; Landbouw, water en voedsel; Gezondheid en zorg; Veiligheid; en de Sleuteltechnologieën. Het beschrijft de Focusgebieden waarin Nederlandse onderzoekers sterk zijn en hun krachten willen bundelen. Samen zijn deze onderzoekers in staat om succesvol grote gecoördineerde onderzoekprojecten te formuleren en uit te voeren. Als we onze welvaart willen behouden en tegelijkertijd de maatschappelijke uitdagingen het hoofd willen bieden zijn nieuwe baanbrekende technologieën essentieel.

“Het sterke Nederlandse materialen ecosysteem is dankzij deze agenda uitzonderlijk goed georganiseerd om nieuwe innovaties te genereren.”

Christa Hooijer | director of science, unit industry | TNO

NWO – programmering Kennis- en Innovatieconvenant (KIC): NWO stelt jaarlijks een bedrag van ongeveer 120 miljoen euro beschikbaar binnen het KIC 2020-23 voor onderzoek dat past binnen de strategische keuzes van het missiegedreven topsectoren- en innovatiebeleid. Deze Nationale Agenda beschrijft materiaalonderzoek in het hart van de drie Topsectoren Energie, Chemie en HTSM en dwars door de 4 maatschappelijke missies en dient als inbreng voor de jaarlijkse strategische programmering binnen de MISSIE-lijn van het KIC. Jaarlijks kunnen binnen de thema's die in deze Nationale Agenda worden beschreven (appendix A) calls worden uitgeschreven voor grote gerichte materiaalprogramma's. Ook kan deze Nationale Agenda dienen als basis voor voorstellen binnen de VRAAG en STRATEGIE-lijn van het KIC.

Topsectoren Chemie, Energie en HTSM: De Nationale Agenda kan dienen als leidraad voor de Topsectoren om uit eigen middelen gerichte onderzoeksprogramma's te starten.

Maatschappelijke missies: de missiegedreven aanpak voor de 4 grote maatschappelijke uitdagingen zorgt voor een verbindende impuls voor het materiaalonderzoek in Nederland via separate project-calls zoals MOOI en inzet van departementale middelen.

Vrije programma's NWO, Nationale Wetenschapsagenda (NWA): De samenstelling van deze Nationale Agenda heeft Nederlandse materiaalonderzoekers bij elkaar gebracht en daarmee geïnspireerd tot het opzetten van gezamenlijke onderzoeksaanvragen bij NWO en NWA. Ook in de toekomst zal deze Nationale Agenda die rol vervullen. Deze Nationale Agenda kan tevens ook dienen als basis binnen actielijn 2 van de NWA. Binnen de NWA heeft Materialen een aparte route, naast de relevante routes Energietransitie, Circulaire Economie, en Meten & Detecteren. Tussen het MaterialenNL Platform en deze NWA-routes bestaan nauwe verbindingen.

Nationaal Groeifonds: Deze Nationale Agenda zal als basis fungeren voor een geïntegreerd voorstel voor het Nationaal Groeifonds, waarin de impact van materiaalonderzoek op maatschappelijke thema's en versterking van de Nederlandse economie centraal staat. Hiervoor zal in overleg met alle betrokken partijen een Nationaal programma Materialen – Accelerating Materials Technologies worden samengesteld, dat zich richt op nationaal gedragen investeringen in fundamenteel onderzoek, technologieontwikkeling en product-ontwikkeling.

Materials Research Focus Areas & Enabling Themes

This appendix describes 9 Focus Areas that each address the societal challenges, building on the strengths of the Dutch materials ecosystem. Each Focus Area covers the entire chain from fundamental research through technological development to industrial applications. All 9 Focus Areas will lead to important scientific discoveries and breakthrough innovations; key research directions are described in each Focus Area description. An important element in all topics is that they require multidisciplinary integration of physics, chemistry and engineering. Moreover, each of them requires a combination of experimental methods and theoretical/computational modelling. The Focus Areas and Enabling Themes concern medium-term (2-5 years) and long-term (5-10 years) goals: research that is typically not carried out by industry (alone).

FOCUS AREA 1



Energy materials

The mitigation of climate change is one of the largest societal challenges today, and it involves the transition of a fossil fuel based society to one based on renewable energy to minimize CO₂ emissions into our atmosphere. Such a transition requires efficient harvesting of renewable energy, efficient storage at different timescales and for stationary as well as mobile applications, and efficient conversion. Presently, several key technologies have put us on the right path towards large-scale renewable energy applications, which can be well-integrated in various environments of use, ranging from the built environment to agricultural landscapes and waterbodies.

Photovoltaic (PV) panels convert sunlight directly into electricity, wind turbines convert the wind's kinetic energy into electricity, and geothermal energy can be harvested and used for heating purposes or can be converted into electricity. Electricity can be stored in solid-state batteries for (mostly) short-term use or mobile application, and flow batteries offer large-scale storage. Electro-catalysis uses electricity to form hydrogen or other chemical fuels that can be used to alleviate the intermittency



of solar and wind power by (long-term) energy storage and to enable the use of clean fuels in transportation. To combat climate change, we need to rapidly apply the existing technologies at large scale and we need to further develop technologies that should lead to increased efficiencies, lower costs, and (enhanced) sustainability, and therefore major breakthroughs in materials design and fabrication are essential, with the circular use of materials as a boundary condition. Below, a few key examples are described.

Harvesting Today, commercial photovoltaic systems are limited to an energy conversion efficiency of only 20%. If this could be increased to 30 or 40% it would strongly reduce the land area needed for large-scale utilization of PV (which is at least hundred thousands of

square kilometers all over the world). Higher efficiencies will also lower the costs to the desired 0.01-0.02 €/kWh. In addition, novel semi-transparent colored and flexible PV materials are needed to efficiently and invisibly integrate PV into buildings, landscapes and infrastructure, and thus PV materials should be customized by design features such as transparency and coloring. To reach these ambitious goals, a broad range of novel materials and concepts must be explored, including flexible perovskite films, earth-abundant semiconductors, tandem cell designs, transparent conductors, hybrid materials, two-dimensional materials, selective contact layers, inexpensive III-V semiconductors, light management architectures, and ultrafast low-cost and customizable manufacturing. In wind energy, major materials breakthroughs have already led to large-scale implementation of multi-MW wind turbines. At these very large scales, novel materials with extreme strength at low mass, and with very high wear and corrosion resistance are needed. Materials design for geothermal energy production is needed to arrive at cost-effective solutions.



Storage In battery technology, a further increase in energy density (J/kg) is needed for wide-spread application in electric transportation, including aviation. Lithium ion batteries have enabled a booming electric vehicle market but suffer from high costs and the use of scarce materials. Key research areas are for example the replacement of lithium as an energy carrier by sodium or magnesium, and the development of carbon- and silicon-based electrode materials and new (nanostructured) separators and electrolytes to improve battery performance, or the replacement of liquid electrolytes by solid-state battery materials to increase the energy density, lifespan and safety. Polymer supercapacitors are promising for short time storage, but require novel lamination technology and improved electrical break-

down resistance. Flow batteries offer large scale storage with minimal material use, but do require improved electrodes, membranes and electrolyte materials. Heat storage can become important, but is currently associated with challenges for materials design including corrosion resistance and cost-effective insulation. Novel materials for more efficient hydrogen storage under high pressure are also needed. These materials could be applied in compressed air storage systems for large-scale grid applications.

Conversion Electrolysis to use electricity to generate hydrogen is currently in scale-up phase. In electrocatalysis the best solar-to-fuel efficiency (PV electrolysis) demonstrated so far is 20%, leaving much room for improvement. In

electrocatalysis, the key challenge is to create new selective and durable (molecular) catalyst materials, made from earth-abundant materials or minimum amounts of rare elements, that produce methanol or ammonia from carbon dioxide/nitrogen and water or that generate hydrogen and oxygen from water. The generation of high-end chemicals can also be realized with electrocatalysis, which may become an integrated part of the system. Practical realization of solar fuel generators requires the complex integration of materials, liquids and gases in one system, together with electronic circuitry and light. Using similar technology, the conversion of CO₂ to liquid or solid materials is a key new upcoming technology that requires novel dedicated catalysis and CO₂ capturing concepts.

hybrid material systems (organic/inorganic or semiconductor/superconductor) and fabrication methods, such as printing, have to be explored to open new regimes. The acceptance and implementation of many of these new materials and device concepts in large-scale technological applications would benefit enormously from compatibility and integration with existing Si CMOS technology. In all these new technologies consideration of materials scarcity, refurbishment and recycling is essential.

Opto-electronics Analog optical computing is an exciting upcoming technology in which optical metasurfaces and metamaterials are

designed to perform mathematical operations on optical signals with very low energy use. All the novel computing and data storage concepts require novel materials and geometries that do not exist today. New opto-electronic materials are required to further enhance the efficiency of light sources (LED and lasers) including hybrid solutions with semiconductors and phosphors. These light-emitting materials are important for applications such as large-scale lighting and quantum information distribution.

Sensors and actuators, internet of things Extreme efficiency also makes it possible for devices to harvest energy from their environment:

phones or biosensors that are charged by body heat or movement, or medical implants that are powered by conversion of ATP. The development of novel sensors and actuators creates a bottom-up network of energy-harvesting devices that can also communicate with each other (internet of things). Many applications lie ahead, such as optical, mechanical, and electrical sensors for autonomous mobility or sensors to monitor water quality or food packaging or health. Opto-mechanical circuits that integrate light and mechanical motion enable extremely sensitive measurements. To enable stable operation under extreme conditions, reliable packaging is essential for all these devices.

FOCUS AREA 2



Electronic materials

A major part of our economy is driven by industry that turns materials into high-tech electronic systems with a practical functionality such as computing, data storage, internet and mobile communications, or sensing and actuating. In the past decades, continued miniaturization of computer chip design has led to a tremendous increase in computing power and data storage density. In parallel, long-distance optical communication technology has brought about the internet, and novel micro- and millimeter-wave technology has created mobile communication networks. Yet, major challenges lie ahead to further drive innovation and keep this important industry sector healthy.



Energy efficient computing and data storage

The continued miniaturization in recent decades following Moore's law is coming to an end as the atomic scale comes near. In parallel, due to the increasing information processing density, power consumption has now become a major limitation in computer design. Therefore, alternative methods to process and store information in a more energy efficient way are highly desired (*green ICT*). One revolution-

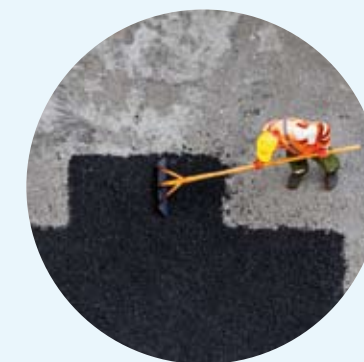
nary new approach is inspired by the operation of the human brain, in which reconfigurable neuromorphic materials are developed in which controllable and dynamically adjustable electrical conductivity or magnetic properties emulate neurons and synapses. Another emerging revolution is quantum computation, which based on quantum mechanical principles would enable enhanced scaling of the computational power with the number of bits. These new technologies require new, extreme materials with yet unexplored (quantum) properties. One new family consists of functional 2D-materials that have recently emerged, involves transition-metal di-chalcogenides with unique optical and electrical properties that can find applications in ultra-fast and ultra-compact data processing. New

FOCUS AREA 3



Construction materials

Construction materials can be defined as the set of materials that primarily serve load bearing functions under thermal, mechanical, chemical or physical loads for longer periods of time. This poses special requirements on the structure of the material, the way it is processed and methods to monitor its performance over time. Construction materials are an important class of materials, both in terms of volume and economic value. As an example, the building and construction sector uses 50% of all raw materials, accounts for 40% of the total energy consumption and 30% of total water consumption in the Netherlands. As a result, construction has been selected by the Dutch government as one of the first value chains to switch to a circular economy. By 2050, buildings and other structures in the Netherlands must be built, (re)used, maintained and demolished sustainably, be energy neutral and circular.



Key material classes are:

Metals continue to develop in two main directions: higher functionality (e.g. strength or fatigue) and circularity. As an example, ultra-high-strength steels are becoming more common and there is a strong need to further mechanical properties while ensuring that other properties remain favorable. This requires in-depth understanding of the evolution of nano- and micro-structure and their effect on (recycling) properties.

Concrete needs more efficient use of the binder (cement), resulting in higher eco-efficiency and strength, and to create lighter structures that can follow both modern design rules and consume less resources and energy. Concrete materials and cement can be based on recycled materials or waste streams of industries (like steel) thus reducing the CO₂ footprint.

Fiber-reinforced materials (composites) are relevant for aircraft, windmills, automotive, buildings and bridges. Composites generally have a positive impact during the use phase: a long service life, low-maintenance, partly thanks to its lightweight applications, and a low CO₂ footprint. Material development is needed for further performance improvement to reduce weight, for knowledge on performance of the material when in use (e.g. repair, life time prediction) as well as recycling options.



Wood is seen as a natural and environmentally friendly material. Challenges are related to quality assurance and durability when exposed to moisture or wood-deteriorating termites. Creep under load can be a problem leading to failure.

Other materials like glass, asphalt and stone are continuously undergoing improvements and changes based on in-depth understanding of structure-property relations. Also in these areas, circularity and use of non-primary resources is an essential topic. Examples are load-bearing glass structures, stones which absorb CO₂, or asphalt with optimized particle packing which features less resources and energy consumption, lower vehicle fuel consumption and long lifetime.

For construction materials, innovations at all TRL levels are essential in:

Optimizing the design of new material compositions and structures, reducing material intensity and using materials with the longest life-span produced with environmentally benign production processes. New design rules, smart solutions such as optimum particle packing, 3D-printed structures and self-healing materials will reduce material consumption and increase the time to failure.

Extension of the safe life of structures and devices reduces the need for new materials and related CO₂ footprint. A far better understanding of aging processes has to be developed to allow for timely maintenance. The challenge is to predict and control degradation, such as fatigue and corrosion. Combining degradation-prediction models and monitoring data of the degradation states is key. Sensors with multiple-decade lifetimes have to be developed to monitor the condition of structures and

loads. A related field is to investigate the degradation mechanisms that arise when structures are used beyond their intended lifetime. Another related field is that of life extension by suitable protective layers or coatings, like corrosion- or sunlight-protective coatings.

Re-using or recycling of end-of-life materials and components to the maximum extent. Separating combined constituents is required for optimum re-use, e.g. separating reinforced concrete to its ingredients steel, cement (paste) and aggregates.

Material combinations are increasingly applied in constructions using the strength of different materials. Classic examples are reinforced concrete and steel sandwich panels. In those cases, specific attention has to be paid to the design of constructions to enable easy dismantling and/or recycling.

materials. Durable adhesives that work in aqueous environments are inspired by mussels, self-repairing polymer materials are inspired by living tissues, and biocompatible smart materials are templated on the cellular cytoskeleton and serve as metamaterials with programmable mechanical performance. Anti-bacterial surfaces for packaging and processing are an important field. Biophysical concepts provide novel pathways to control the self-assembly of (patchy) colloids and nanoparticles using DNA and designer peptides in combination with novel colloidal building blocks for directed self-assembly.

Hierarchical self-assembly Our understanding of the basic principles of hierarchical self-assembly in biology also inspires new man-made materials based on inorganic chemistry. A better insight in the

laws and possibilities of hierarchical self-assembly will enable us to structure matter over multiple length scales and to add new properties and functionalities at each self-assembly step. If we gain control over self-assembly we can make smart materials to order, and we can use raw materials more efficiently.

Active materials The physics and chemistry of out-of-equilibrium processes in living matter inspires entirely new possibilities for materials science. For example, the combination of synthetic building blocks with biological motors can enable small, soft robots. By combining insights from systems biophysics and synthetic biology with materials engineering we can create stimuli-responsive biofilms, and materials with genetically programmed properties. At the boundary between materials and devices, new biomedical

cal soft materials can autonomously perform diagnostic or therapeutic actions, such as biosensors or drug delivery.

Self-healing and recyclable materials In nature, living systems (plants, organs) last surprisingly long, because they are capable of repairing themselves. Once they have served their purpose, they may be re-used in other materials. Inspired by this, self-healing and recyclable materials have been developed that repair themselves with the help of bacteria or can be degraded into the building blocks from which they were made. Extending these concepts to other materials such as synthetic polymers, ceramics and metals, will enable us to make self-repairing turbine engines, wind turbines, coatings or highways and recyclable high-performance plastics.

FOCUS AREA 4



Soft/biomaterials

The Netherlands has a strong community in soft materials research with many world-leading academic groups. The soft matter community has strong relations with industry in HTSM, agrofood, chemistry, TNO and Wetsus. Soft materials, like (bio-) polymers, colloids, and emulsions, are increasingly present in our everyday lives. Characterized by low binding energies and structural disorder, the mesoscopic components of soft materials may arrange spontaneously into highly complex structures that permit targeted and unusual mechanical, optical, electronic, catalytic, or biological properties. Soft matter is an amalgamation of distinct research fields and technologies and is intimately linked



and of vital importance to many of the other Focus Areas: coatings (structural color, adhesives, self-healing), energy materials (electrodes, supercapacitors, membranes, batteries, catalysts), electronic materials (self-assembled nanostructures), 3D-printing, and information materials. A large group of soft materials that we interact with are

plastics and composites. Soft materials also make up our own body: complex materials systems whose mechanical and biological functioning is dictated by biopolymer meshworks and regulatory biochemical networks. The last decade has seen tremendous advances in the understanding of the structure-function relation for both natural and synthetic soft matter, but we are still far from a truly multi-scale understanding of their performance.

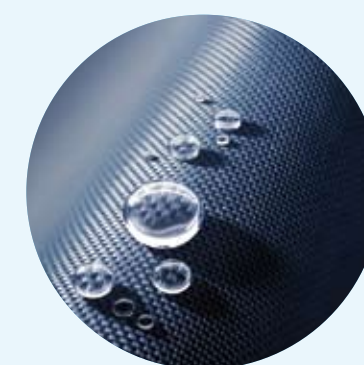
Bio-inspired materials design There are excellent opportunities at the interface between biophysics and supramolecular chemistry to produce new types of bio-inspired

FOCUS AREA 5



Coating/film materials

Coating technology is a stronghold of the Dutch knowledge landscape with leading academic groups and internationally renowned and innovative companies including SME's. The key scientific questions in this field revolve around surface functionality, resulting from surface self-orientation and self-structuring during drying or processing. In comparison to structural (soft) materials, coatings and thin films have a far higher surface-to-bulk ratio. For reasons of (cost-) efficiency, it is therefore more attractive to apply surface-functionalized coatings on top of a structural material than to modify the entire structural material for surface functionality. Almost all industrially manufactured objects are combinations of structural and



superficial materials, separating surface functionality from bulk properties as defined by engineering constraints. For instance, the aluminum alloy used for aerospace hull construction is selected for its high strength at low weight, but needs corrosion prevention and cleanability from a coating layer. Similarly, a polyurethane material can be chosen as an inflatable cardiovascular

catheter balloon material based on its mechanical properties, but needs an ultra-low friction coating to operate safely when placing a stent.

Improved coating functionalities

While coatings are finding many applications already, many key functionalities require strong improvements whilst their sustainability need to be increased. The improvement of corrosion resistance of metals is still highly desired, with non-toxic solutions. Improved coating materials can help eliminate unwanted chemical reactions that reduce the performance and life in lithium-ion batteries.

Next-generation waterborne, radiation curing and powder coatings can offer lower carbon footprint



and improve indoor air quality. Optical coatings on solar panels, and aerodynamically optimized coatings on wind turbine blades can enhance renewable energy output. Increased durability of protective and decorative coatings is pivotal for many outdoor applications, and membranes for energy saving or water purification separation processes need increased service lifetimes as well. Increased insight in the mechanisms of all these degradation processes is essential to enable new technologies and expand their use.

Self-healing and responsive coatings

Responsive coatings can adapt to light, humidity or heat and can help make a building become energy-neutral and have a healthy climate. In the future, textile fiber coatings may integrate with wearable computers that respond to environmental

stimuli or monitor body functions. Self-cleaning coatings remove liquid or dust autonomously by their (super)hydrophilic/phobic properties, while anti-soiling coatings can prevent dusty solids to adhering on their surface. Self-healing capabilities can be incorporated into coatings to increase service lifetime by repairing damage, for example by transporting material from 'reservoirs' to the damaged area such as self-healing scratches in automotive paints. Active scavenging or (chemo)absorption of unwanted species in packaging films can help to establish the ideal atmosphere for safe storage of food and medicine. Sensing and signaling embedded in food packaging materials, to probe for example heat, oxidative stress, pH change, or microbial activity inside the packaging will help in the prevention of food waste.

Coating-biomaterial interactions

A special coating category deals with the interface between materials and biology: tissues and cells. Coatings can act as scaffolds to stimulate cell growth and tissue integration. For the future, 3D (printed), layer-on-layer deposition of material-cell combinations holds promise to grow artificial organs from a patient's own cells without immunogenic response. In contrast, negative coating-biomaterial interaction is desired in bactericidal surfaces to create hygienic conditions and sterile environments in hospitals, sanitary facilities, or food preparation facilities. There is a strong societal need for mechanically and chemically robust antimicrobial coatings that are not vulnerable to microbial adaptation, as are antibiotics. Most recently, anti-viral coatings have become highly relevant as well.

ENABLING THEME 1



Metamaterials

In our daily life all objects around us are 'materials'. Traditionally, materials were sourced from nature and exploited for their intrinsic material properties to suit the needs of society. Nowadays we more and more come into the situation in which we design materials based on combinations of various materials and morphologies. These combinations can be on the atomic, micro, macro, and mesoscopic scale. Enormous opportunities lie ahead, by developing techniques and concepts for designing and building materials which will have new, exiting, and predictable structure and properties. At the same time, designed materials should be manufactured in a sustainable way and enable the circular economy, which means that recyclability should be



considered already in the first stages of the material design stage. Within this focus, a multitude of material classes can be mentioned, from which we highlight metamaterials and high-performance materials.

Metamaterials are a class of artificially architected materials which are designed to generate material properties that go beyond those of the ingredient materials.

The (internally architected) shape therefore leads to behavior which the material itself (i.e. the material in a fully dense state) could never demonstrate. These 'materials' exhibit exotic functionalities, such as pattern and shape transformations in response to mechanical forces. The unprecedented properties offered by metamaterials have a myriad of applications in various areas of science and technology.

High-performance materials

The development of novel materials often starts with combinations of existing materials. This enables the creation of materials with new properties that do not exist today and with a wide range of applications. Metals can be tremendously improved by a

controlled micro/nano-structure. Fiber-reinforced polymer composites and thermoplastic composites are examples of macro-scale material combinations that combine strength and light weight. High-performance materials properties are high strength, high formability, low weight, high temperature resistance etc. and find applications in maritime, aviation, construction and automotive industry. For example, in offshore wind applications self-healing materials, materials with a high corrosion resistivity and new composites are required.

Additive manufacturing 3D-printing is a revolutionary new technology that opens the way to create new hybrid and graded materials with a controlled structure and superior properties. It can create structures that are otherwise impossible to manufacture, increasing manufacturing efficiency and reducing materials use. 3D-printing techniques are in their infancy, and only a limited range of suitable materials are available. New dedicated materials are required, suitable for 3D-printing, with the desired properties.

Cross-over Design of materials is an area with strong links to the other areas of this report. Atomic-scale modelling of properties of material combinations is essential to design thin-film coatings, electronic materials, steel etc. The toolbox that is developed for designed materials can be used in all these areas. Current and future digital technologies, including artificial intelligence, will allow generation of so-called digital twins, a virtual representation, which can be used to understand and predict the performance of designed materials.

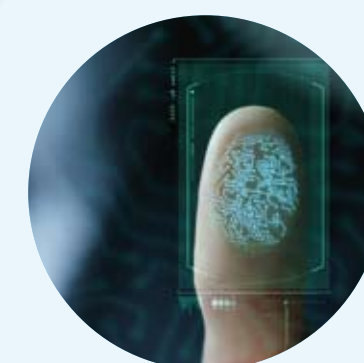
ENABLING THEME 2



Info-materials

The interface between materials scientists and machine learning (ML) is rapidly expanding, leading to completely new ways to understand materials and design new materials. Moreover, the processing of data in physical systems, living and non-living, is emerging as an important topic of research.

Machine Learning (ML) is the branch of artificial intelligence that, inspired by how the brain recognizes patterns, uses computers to analyze data without being explicitly programmed. ML algorithms learn by example, and ML has become a reality with the availability of big data - large datasets that allow the computer to classify or recognize patterns. In the past decade, ML has enabled self-driving cars, automated translation, speech recognition, effective web search, and a vastly improved understanding of the human genome. ML is becoming an important element in the toolbox of material scientists, just like computer simulations have become an important tool in the past decades. ML provides



many new opportunities for the analysis and classification of materials data, thus fueling the formation of a range of open-access large scale materials databases. ML techniques are being used to interpret data (e.g. recognize patterns in chemical reactivities or electronic properties), but also learn from data (e.g. extract rules), and predict new data through surrogate models. In addition, ML is emerging as a key platform for the design of materials, with key examples including the prediction of new chemical and metallic compounds, as well as the rational design of molecules and metamaterials. Hence, ML for materials may

lead to many tangible applications that may help the acceptance of ML in society.

Information processing As the continued miniaturization of silicon-based hardware is gradually reaching its limits, power consumption is becoming a major limitation for computing; the explosion of extremely large-scale computing in machine learning is compounding this challenge. Alternative methods to process and store information are highly desired. By using (non-)linear elements and network structures, a variety of complex materials are now able to process patterns of light, electrical signals, or mechanical stresses. Key developments include mechanical and acoustic computation suitable for extreme or low-energy (microscale robotics) environments, optical meta-surfaces for high speed optical signal processing, brain-inspired neuromorphic computing, hardware implementations of machine learning, and molecular computation using proteins and DNA. In this emerging research field, the conventional



boundaries between materials and devices are now dissolving, with the study and design of new forms of matter that can be programmed to store and process information.

Cross-over The tools developed in machine learning will impact many areas in this Agenda. Moreover, the

ENABLING THEME 3



Making and characterizing materials

Research for innovation of materials requires state-of-the-art experimental equipment for making and characterizing materials. This applies to all stages of materials research, from fundamental research all the way to industrial upscaling. Since equipment is often specialized and expensive, the academic infrastructure is also frequently used by industry and is therefore essential for the entire materials landscape. Dedicated technical and scientific support staff is essential to run and maintain such infrastructure. For materials science infrastructure, the following subdivision can be made:

Basic infrastructure Required in each materials science laboratory according to the local research lines, partly in situ to directly or indirectly observe dynamic processes in materials. Local researchers need easy access to such equipment. Examples are equipment for:

- manufacturing, like chemical reactors, furnaces, film deposition equipment, 3D-printers;
- materials processing, like forming, joining, recycling;
- structure and composition characterization, like optical and electron microscopy, X-ray diffraction, surface analysis, chemical analysis;

questions and solutions provided by information processing materials closely link to key challenges in the area of electronic materials.

Industry Machine learning is essential for all companies involved in materials research. In parallel, DNA-based and neuromorphic



- property and performance characterization, like mechanical testing, magnetic, optical, electrical, electrochemical and thermal characterization, durability testing.

Highly specialized equipment

Unique facilities which are, besides local use, also accessible for researchers from other institutions and which require dedicated scientists. Examples are Atom Probe Tomography (TUE), Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (UvA), Cathodoluminescence microscopy (AMOLF), Low-temperature Scanning Tunnelling Microscopy (LEI, ARCNL), and Rutherford Backscattering Spectrometry (TUE).

Large national infrastructure

operated as a user facility. External researchers can apply for measuring time and collaborate with dedicated scientists. Examples are High Field Magnet Laboratory HFML and free

computing are now rapidly being developed in industry as a novel route for massively parallel information processing. Info-materials can be game changers, providing major new business opportunities, even with yet non-existing products in so far non-existing markets.

electron lasers FELIX (RUN), NanoLab cleanrooms (AMOLF, RUG, TUD, TUE, UT), National facility for electron microscopy NEMI (RUG, TUD, UU), and Reactor Institute Delft for neutron- and positron-based materials research (TUD).

European user facilities that are financed by several European countries, such as the ESRF synchrotron facility (DUBBLE beamline) and the ESS (Lund) voor neutron-analysis. External researchers apply for beam time and are assisted by dedicated beam scientists. Travelling and accommodation costs are often provided.

Maintaining this infrastructure is essential for the Netherlands to stay upfront in materials research. Key challenges are to cover the running and maintenance costs for basic infrastructure and funds for replacement of basics instruments, and to secure continuity in the support for highly specialized equipment and large-scale national infrastructure.

Start-ups Dutch materials researchers have a strong tradition in developing novel instruments to carry out state-of-the-art research, and this often forms the basis to found spin-off companies.

ENABLING THEME 4



Circular economy and resource efficiency

Sustainable use of material resources is essential to accommodate the growth of the world's population. This requires a significant change of the current extract-make-use-waste-dispose economy, including the reduction of the related CO₂ footprint. The Dutch government targets 100% circularity in 2050 by 3 basic strategic directions:

1. Raw materials in existing supply chains must be used in a high-quality manner. This gain in efficiency can lead to a reduced need for raw materials in existing chains;
2. In case new raw materials are necessary, fossil-based, critical and non-sustainably produced raw materials must be replaced by sustainably produced, renewable and generally available raw materials. In this way, we make our economy not only more future-proof, but also less dependent on fossil sources and the import of these resources. We also retain our natural capital as a result;
3. We must develop new production methods, design new products, and restructure sectors. We must also promote new ways of consumption. This leads to other chains that give additional impetus to the desired reduction, replacement and utilization.

Focus is on 3 priority research lines:

1. design for circularity;
 2. circular value chains and processes;
 3. trust, behavior and acceptance.
- Each of these 3 research lines requires multi- and transdisciplinary materials innovations as outlined in the NWA route Circular Economy and Resource Efficiency, the Knowledge and Innovation Agenda Circular Eco-



nomy as well as the EC Action Plan on Circular Economy (March 2020).

Important topics include:

Replacement of fossil feedstocks by renewable feedstocks An increased use of renewable feedstocks in the production of polymeric materials is inevitable. On the mid to longer term the importance of producing and using bio-based materials will be of importance, such as modified natural biopolymers and bio-based monomers. Mechanical and chemical recycling processes (fed by energy from renewable resources as wind- or solar energy) will be important to obtain a truly circular use of carbon. Half-products of these new and existing chemical processes are converted into pure and 'virgin' organic materials. In addition, the chemical industry is continuously looking for obtaining full selectivity in multi-step and complex syntheses with lower materials and energy use. Many commodity materials with additives such as lubricants, heat stabilizers, or pigments require circular alternatives, as sorting, separation and recycling require less complex material formulations. We can make use of the natural (bio)degradability of materials or to specifically design

'triggered degradation concepts' enabling the development of materials with a short or long life span. If unintentionally released in the environment they will degrade in useful components such as nutrients to prevent accumulation of hazardous materials in the biosphere. All these developments will require new measuring and detection technologies for quality control.

Replacement and retrieval of scarce metals

Many economically important materials are based on elements that are scarce in the earth's crust (lithium, cobalt, nickel etc.). Novel strategies to replace these elements with less-rare counterparts, without loss of functionality, are required. Also, energy efficient and CO₂-neutral recycling of these components retrieved by for instance urban mining is a priority topic, as well as increased durability of devices, modular designs and refurbishment approaches. Measurement and detection and predictive modelling throughout the value chain must be developed. Synergies with smart industry, AI, business models and consumer behaviour must be found in digital twins for these new production routes and be an integral part of the materials research.

Cross-over Resource efficiency is crucial for all other areas in this Agenda and the materials and characterization techniques in the other areas are instrumental for achieving a true circular economy. Especially energy research will strengthen sustainable recovery and recycling of materials and vice versa.



ⓑ Leden MaterialenNL platform, NWO Themacommissie Materialen, Bestuur NWA Route Materialen

MaterialenNL Platform – Nationale organisatie van universiteiten, NWO-Instituten, hogescholen, technologische instituten, en bedrijven en organisaties, voor de nationale coördinatie van het materiaalonderzoek.

Kernteam

Emmo Meijer (Technisch voorzitter)	Boegbeeld Topsector Chemie, voorzitter namens Topsectoren Chemie, Energie en HTSM
Olaf Adan	Warmte/energie-opslag materialen
Matt Baker	Biomedische materialen
Christiaan Bolck	Circular and biobased performance materials (CBPM)
Jos Brouwers	Bouwmaterialen
Bert van Haastrecht	Materials Innovation Institute (M2i)
Ernst Jan van Klinken	Polymer Research Platform (DPI)
Marcus Kremers	Branchevereniging Nederlandse Composietindustrie (CompositesNL)
Katja Loos	Polymeer Technologie Nederland (PTN)
Tjeerd Jongasma	Institute for Sustainable Process Technology (ISPT)
Albert Polman	NWO comissie Materials Science; NWA
Joost Reek	Nederlands Instituut voor Onderzoek in de Katalyse (NIOK)
Guus Rijnders	Stichting NanoNextNL
Richard van de Sanden	Platform Electrochemische Conversie en Materialen (ECCM)
Abeer Hossain (secretaris)	Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO)
Ardi Dortmans (secretaris)	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuur-wetenschappelijk Onderzoek (TNO)

Klankbordgroep

Erik Bakkers	Technische Universiteit Eindhoven	Christa Hooijer	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO)
Daniel Bonn	Universiteit van Amsterdam	Mark Huijben	Universiteit Twente
Hans Bosch	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO)	Mark Koper	Universiteit Leiden
Marjolijn Dijkstra	Universiteit Utrecht	Peter Kortbeek	Fokker Technologies/GKF Aerospace company
Willem van Driel	Signify company	Elphi Nelissen	Bouw en Techniek Innovatie Centrum (BTIC)
Rudy Folkersma	Stenden Hogeschool	Amar Mavinkurve	NXP company
Joost Frenken	Advanced Research Center for Nanolithography (ARCNL), Universiteit van Amsterdam, Vrije Universiteit Amsterdam	Jan Post	Philips company
Kees de Gooijer	Bureau TKI Biobased Economy, Agri & Food	Sanjay Rastogi	Universiteit Maastricht
Jasper van der Gucht	Wageningen University and Research Center	Matthijs Ruitenbeek	DOW Chemical company
Marnix van Gorp	Brightlands Materials Center	Jilt Sietsma	Technische Universiteit Delft, 4TU Research Centre High-Tech Materials
Ferrie van Hattum	Saxion Hogeschool	Wim Sinke	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO)
Maarten ter Heerd	ASML company	Bert Thuis	Technische Universiteit Delft, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR), Development Centre for Maintenance of Composites (DCMC)
Geert Heideman	Windesheim Hogeschool	Ronald Visschers	Top Institute Food and Nutrition (TIFN)
Emiel Hensen	Technische Universiteit Eindhoven, Nederlands Instituut voor Onderzoek in de Katalyse (NIOK)	Hans van der Weijde	Tata Steel Europe company
Jan van Hest	Technische Universiteit Eindhoven, Polymeer Technologie Nederland (PTN)		

NWO-Themacommissie Materialen, Bestuur NWA Route Materialen

Adviescommissie van NWO voor de coördinatie van het materiaalonderzoek gericht op NWO-programma’s en -projecten. Tevens het bestuur van de route Materialen van de Nationale Wetenschapsagenda (NWA).

Albert Polman (voorzitter)	NWO-Instituut AMOLF, Universiteit van Amsterdam	Andries Meijerink	Universiteit Utrecht
Rolf van Benthem	DSM Europe company, Technische Universiteit Eindhoven	Guus Rijnders	Universiteit Twente
René Janssen	Technische Universiteit Eindhoven	Hans van der Weijde	Tata Steel Europe company
Katja Loos	Rijksuniversiteit Groningen	Abeer Hossain (secretaris)	Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO)

Geraadpleegde literatuur

1. Roadmap High Tech Materials, Topsector HTSM (2018)
2. Transitie-agenda's Biomassa en voedsel, Bouw, Consumptiegoederen, Kunststoffen, Maakindustrie, Transitie teams, E. Meijer, E.S.M. Nelissen, A.M. Rakhorst, J.T.F. Keurentjes, G.F. Kaanen (2018)
3. Programma Nederland Circulair, Ministerie van Infrastructuur en Milieu en Ministerie van Economische Zaken (2016)
4. Materialen – made in Holland, Nationale Wetenschapsagenda (2016)
5. Advies Elektrochemische conversie en materialen (ECCM), Adviescommissie ECCM, Klankbordgroep topsectoren en HBO, expertgroep governance & transitie, Topsectoren HTSM, Energie en Chemie (2017)
6. EuMat Strategic research agenda, European Technology Platform for Advanced Engineering Materials and Technologies (2017)
7. Een nieuw fundament: beeld van de bètasector, E.W. Meijer, decanen bèta- en techniekfaculteiten (2018)
8. Europese strategie voor kunststoffen in een circulaire economie, Europese Commissie (2018)
9. Roadmap Topsector Chemie (2016-2019)
10. Discussienota - Naar een duurzaam Europa in 2030, Europese Commissie (2019)
11. Advanced Materials for Clean and Sustainable Energy and Mobility - EMIRI key R&I priorities, Energy Materials Industrial Research Initiative (2019)
12. Nationale Samenwerkingsagenda Composiet, Brancheorganisatie CompositesNL (2019)
13. Onderzoeksinfrastructuur voor materialen in Nederland, J. van den Broek, J. Deuten, Rathenau Instituut (2019)
14. Kennis- en Innovatieconvenant 2020-2023 (2019)
15. Potential of breakthrough materials innovations in the Netherlands, Roland Berger (2020)

Colofon

Dit rapport is samengesteld onder verantwoordelijkheid van het MaterialenNL Platform. Het is tot stand gekomen na consultatie van de Nederlandse materialengemeenschap in workshops op 12-6-2018, 26-11-2019 en 22-1-2020, en via een online enquête in oktober 2019. *Focus Area* en *Enabling Theme* teksten zijn geschreven met bijdragen van meerdere auteurs, onder leiding van de NWO-themacommissie Materialen met aanvullingen vanuit het MaterialenNL Platform. De namen van de leden van deze commissies zijn vermeld in appendix B.

Als bijlage bij deze Agenda verscheen de analyse *Potential of breakthrough materials innovations in the Netherlands*, samengesteld door Roland Berger (2020). Deze analyse door Roland Berger is gefinancierd met bijdragen van de Nationale Wetenschapsagenda (NWA) uit het programma 'Ondersteuning NWA routes' en de Topsectoren Chemie, Energie, en HTSM.

Een elektronische versie van deze Agenda en de analyse van Roland Berger zijn beschikbaar op www.materialennl-platform.nl

Samenstelling en eindredactie Albert Polman (NWO-Instituut AMOLF)
Met tekstbijdragen van Eddy Brinkman (Betase)
Secretariaat Abeer Hossain (NWO)
 Ardi Dortmans (TNO)
secretariaat@materialennl-platform.nl



Vormgeving Petra Klerkx, Amsterdam
Druk Drukkerij Badoux, Houten
Afbeeldingen AMOLF, Philips, Shutterstock



