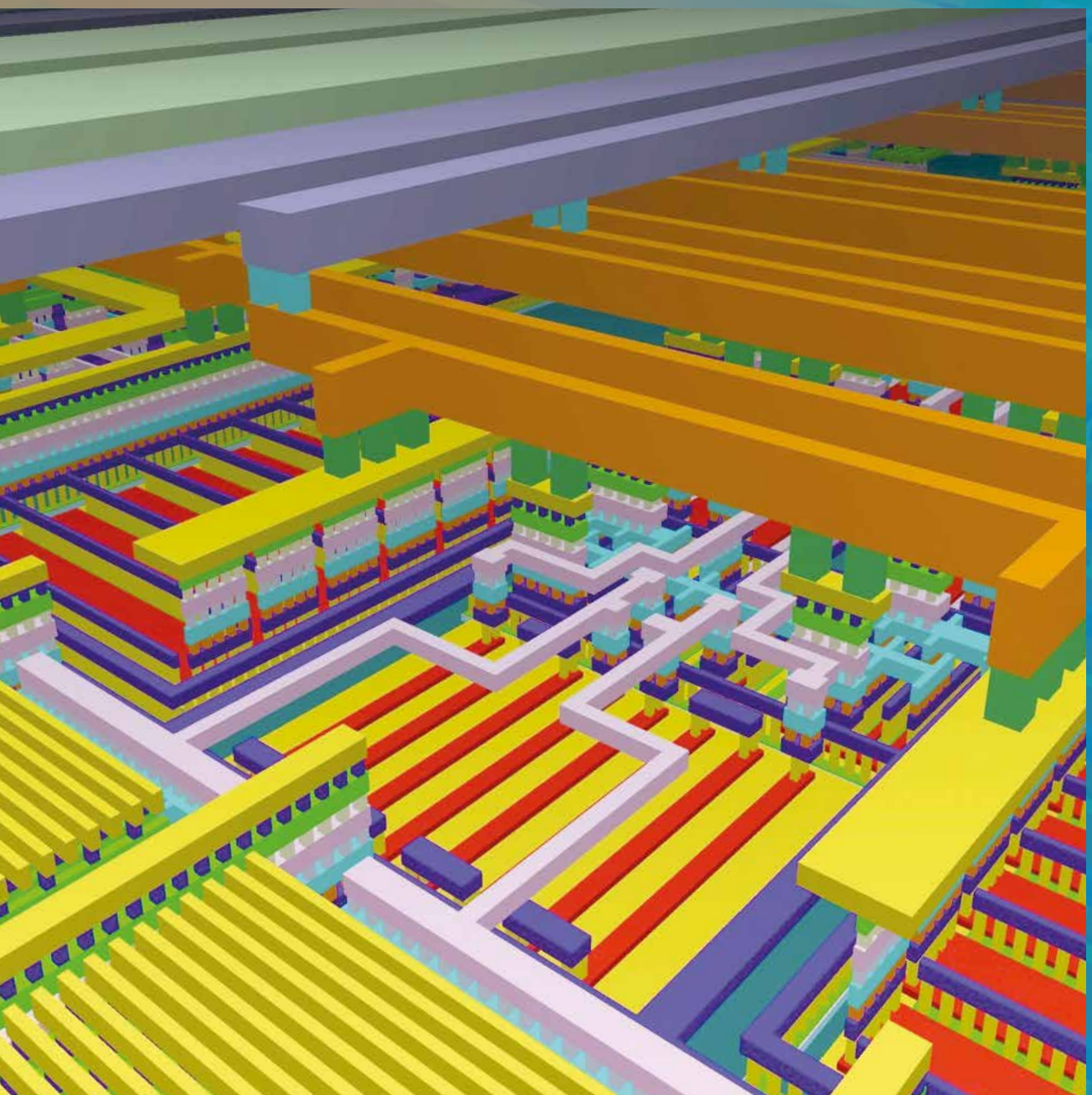
Een nieuw fundament: beeld van de techniekssector



De afbeelding op het omslag biedt een inkijk in het hart van een chip op nanoschaal.
Credits: Bram Nauta (UT)

Een nieuw fundament: beeld van de technieksector

Inhoud

	Ten geleide	7
1	Introductie	8
1.1	Een enthousiaste start	8
1.2	Aanleiding en doel van de sectorbeelden	9
1.3	De opbouw van de sectorbeelden	13
1.4	Hoe kwamen de sectorbeelden tot stand?	13
2	De uitgangspunten van de sectorbeelden	15
2.1	Wat is bèta en wat is techniek?	15
2.2	Gedeelde problematiek en een gedeelde oplossing	16
2.3	Inhoudelijke verdeling van en binnen de bèta en techniek	17
2.4	Kengetallen van de bèta en techniek	18
2.5	Middelenverdeling over de bèta en techniek	19
2.6	Inzet van de middelen	21
3	Specifieke aandachts-punten voor de techniekssector	23
3.1	Belang en kenmerken van de technische wetenschappen	23
3.2	Disciplinaire basis en scherpe keuzes	25
3.3	Integrale versterking van de disciplines	27
4	De geprioriteerde disciplines in de technische wetenschappen	30
4.1	Inleiding	30
4.2	Werktuigbouwkunde	31
4.3	Elektrotechniek	39
4.4	Civiele Techniek	45
5	Overige disciplines in de techniekssector	53
5.1	Ruimtelijk Ontwerp	53
5.2	Industrial Design Engineering (IDE)	55
5.3	Technische Bedrijfs- en Bestuurskunde – Industrial Engineering	56
6	De ambities van de universiteiten	59
6.1	Technische Universiteit Delft	59
6.2	Technische Universiteit Eindhoven	64
6.3	Universiteit Twente	68
6.4	Rijksuniversiteit Groningen	71
6.5	Wageningen University & Research	73
7	Wisselwerking eerste en tweede geldstroom	77
7.1	Eerste geldstroom voor nieuwe posities	77
7.2	Tweede geldstroom voor infrastructuur en tijdelijke staf	78

7.3 Een eerste investering in infrastructuur 78
7.4 Projecten voor nieuwe onderzoekers 79
7.5 Versterking van het zelforganiserend vermogen 80

8 Hoe verder naar sectorplannen 81
8.1 Van een sectorbeeld naar het sectorplan 81
8.2 Wat wordt verwacht van de universiteiten? 82
8.3 Richtlijnen voor een universitair profileringsplan 83

9 Conclusie 86
9.1 Sectorplannen als investeringsmechanisme 86
9.2 Sectorplannen als middel om de sectoren te organiseren 87

Ten geleide

Het regeerakkoord 2017 bevatte de aankondiging van significante investeringen in wetenschap en onderzoek. Deze aankondiging en de uitwerking hiervan door de minister van OCW, waarbij een belangrijke impuls van M€ 60 in de basis van de bèta- en technische wetenschappen is voorzien, zijn door de bèta- en techniekssectoren met groot enthousiasme ontvangen. Er is veel vertrouwen in het hiervoor gekozen instrument 'sectorplannen', waarbij wordt voortgebouwd op het succes van het eerdere *Sectorplan Natuur- en Scheikunde (SNS)* onder de Commissie Breimer. Consoliderend op het werk van disciplinaire raden, zoals de Raad voor de Natuur- en Scheikunde en de Wiskunderaad, heeft het veld eensgezind een kwartiermaker aangewezen om de noodzakelijke voorbereidingen voor de sectorplannen bèta en techniek te treffen. Ondergetekende nam de uitdaging aan om samen met de decanen en faculteiten twee concrete sectorbeelden te presenteren. Deze zullen de basis vormen van de sectorplannen waarlangs de beoogde versterking van de kennisinfrastructuur aan de Nederlandse universiteiten zal plaatsvinden. Uitgangspunt voor deze sectorbeelden is het kader van het ministerie van OCW dat op 12 juli 2018 is overhandigd aan de kwartiermaker. Dit sectorbeeld techniek is vastgesteld in het techniekdecanenoverleg en wordt voor advies voorgelegd aan de Commissie Sectorplan Bèta en Techniek, met Hans van Duijn als beoogd voorzitter. De minister van OCW zal medio januari op basis van dit advies besluiten over de volgende stappen.

Het was mij als kwartiermaker een eer en genoegen om de voorliggende sectorbeelden met en namens het veld op te mogen stellen. Ik heb hierbij veel hulp gekregen van decanen, onderzoekers, docenten en stafmedewerkers van universiteiten, en NWO. Graag wil ik een paar mensen speciaal bedanken. Allereerst is de deskundigheid, de passie en de grote betrokkenheid van de beide secretarissen Mark Boneschanscher en Rob Olthof onontbeerlijk geweest in het opstellen van deze sectorbeelden. Naast hun gewone werk bij NWO hebben ze mij de mogelijkheid gegeven om samen met hen deze tocht tot hopelijk ieders tevredenheid af te sluiten. Tot slot wil ik Jasper Knoester en Geert Dewulf, respectievelijk de voorzitter van het bètadecanenoverleg en van het recent opgerichte techniekdecanenoverleg, bedanken voor hun onuitputtelijk geduld en voortdurende positieve inbreng. Gegeven hun enthousiasme en inzet heb ik het volste vertrouwen dat de sectoren met de aankomende sectorplannen een mooie toekomst tegemoet gaan.

Bert Meijer, Eindhoven, 30 november 2018

1 Introductie

1.1 Een enthousiaste start

Het opstellen van de sectorbeelden en de voorbereidingen voor de sectorplannen hebben binnen het Nederlands universitair onderzoek een nieuwe dynamiek en een hernieuwd elan veroorzaakt. Primair binnen de betrokken instellingen en disciplines, maar in steeds sterkere mate ook tussen de instellingen en disciplines onderling. Alle betrokkenen hebben in grote eensgezindheid gewerkt aan het gezamenlijk formuleren van de doelen die met de sectorplannen worden beoogd. Dit enthousiasme wordt verder versterkt door de grote maatschappelijke interesse in de bèta- en technische wetenschappen, zich uitend in studentenaantallen die hoger zijn dan ooit tevoren, een centrale rol in de maatschappelijke uitdagingen zoals onder andere beschreven in de Nationale Wetenschapsagenda (NWA) en een sterke betrokkenheid bij en vanuit het bedrijfsleven – variërend van het mkb tot wereldspelers als ASML en Shell.

Met het opstellen van deze sectorbeelden en de daarvoor benodigde voorbereidingen, zijn feitelijk al concrete en belangrijke stappen gezet voor de implementatie van de komende sectorplannen:

- In goed overleg is een scherpe en gemotiveerde afbakening gemaakt van de disciplines en instellingen die met de komende sectorplannen zullen worden versterkt;
- De betrokken disciplines en instellingen hebben een nulmeting aangeleverd die weergeeft waar ze nu staan en op basis van een omgevingsanalyse een heldere toekomstvisie geformuleerd;
- Bestaande nationale disciplinaire overlegorganen zijn versterkt en waar deze nog niet bestonden is de oprichting ervan in gang gezet, waarbij actief is ingezet op het koppelen van strategie en beleid binnen de eerste en tweede geldstroom;
- Het bètadecanenoverleg heeft nog meer een nationale regierol toebedeeld gekregen en parallel is met veel succes eenzelfde overleg voor de techniekdecanen opgezet;
- Er is een (door)start gemaakt met het op nationaal niveau uitwisselen van best practices op gebied van onderzoek, onderwijs en de inzet vanuit de sectoren voor maatschappelijke doelen;
- Alle betrokkenen zijn druk bezig met het voorbereiden van de werving van topwetenschappers, vooruitlopend op het via de sectorplannen beschikbaar komen van de financiële middelen, die een omvang hebben die sinds de FES-gelden (aardgasbaten) niet meer gezien is.

De kwartiermaker heeft het enthousiasme aan den lijve ondervonden bij de rondgang langs alle Nederlandse bèta- en technische faculteiten ter voorbereiding op de voorliggende sectorbeelden. Uit deze rondgang werd ook duidelijk dat er een diepgevoelde noodzaak is om de basiswerkzaamheden van de universiteiten - onderzoek doen, onderwijs geven en bijdragen aan maatschappelijke doelstellingen - vanuit een integrale aanpak te versterken.
De sectorplannen worden hierbij gezien als kansrijk middel om dit vanuit een nationaal gecoördineerde inspanning te verwezenlijken en tegelijkertijd de werk- en regeldruk te verminderen. Hierbij is het van wezenlijk belang dat ook de middelen die via de tweede geldstroom

voor de sectorplannen beschikbaar komen, daadwerkelijk ten goede komen aan de door de disciplines geselecteerde profileringsgebieden, om zodoende versnippering te voorkomen.

Onderwijs en onderzoek zijn met elkaar verweven, in een lab van de RUG.
Foto: Sylvia Germes

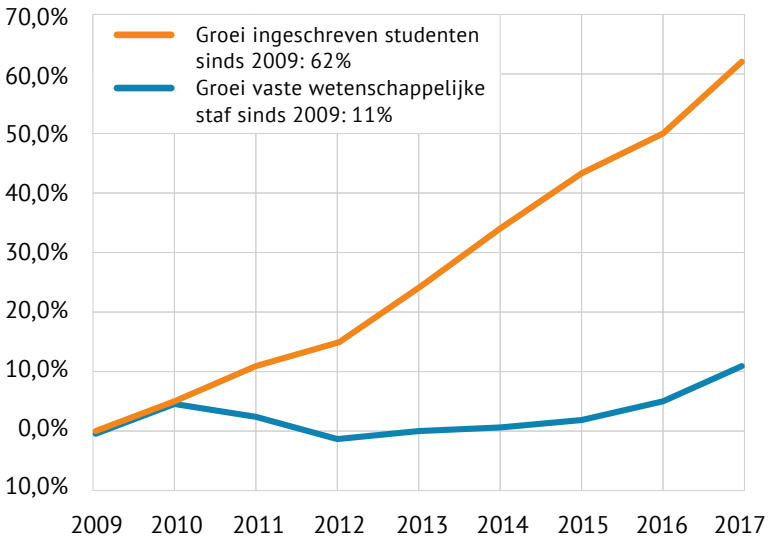
Na het formuleren van de plannen en ambities, zoals beschreven in deze sectorbeelden en de hierop volgende profileringsplannen van de universiteiten, zal nog een verdere tijd van implementatie en doorontwikkeling nodig zijn onder leiding van de Commissie Van Duijn. Dit te meer omdat het met de nu beschikbare middelen niet mogelijk is om alle disciplines binnen de bèta- en techniekssector te versterken en tegelijkertijd impact daarin te hebben. Dit laat echter onverlet dat er met de start van de komende sectorplannen bèta en techniek een betekenisvolle stap voor deze sectoren wordt gezet. Deze zal zich vertalen in een verbetering van de kwaliteit van het onderwijs en het vergroten van de impact van het onderzoek, zowel het vrije onderzoek als dat voor maatschappelijke of industriële doelen.

1.2 Aanleiding en doel van de sectorbeelden

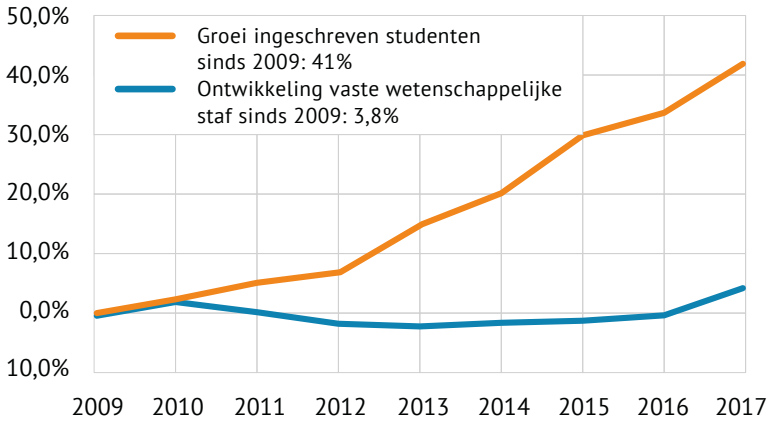
In het afgelopen decennium heeft in Nederland een enorme herwaardering plaatsgevonden van de bèta- en techniekssector als basis van de maakindustrie en de digitalisering van de samenleving, en in het hart van de maatschappelijke uitdagingen op thema's als voedsel, gezondheid, veiligheid, klimaat en energie. Hoewel de sectoren deze ontwikkelingen van harte toejuichen en zelf mede in gang hebben gezet door sterk in te zetten op *outreach* en samenwerkingsverbanden voor industrie en samenleving, vond er geen navenante stijging plaats in de hoeveelheid onderwijzend of ondersteunend personeel (figuur 1). Gecombineerd met de 'focus en massa acties' in een achterliggende tijd van bezuinigingen, dreigen bepaalde activiteiten subkritisch te worden en onderwijs en onderzoek steeds meer van elkaar gescheiden te raken. Ook komt hiermee de innovatie in (en de kwaliteit van) het onderwijs en onderzoek onder druk te staan.

Verder vertoont de vaste wetenschappelijke staf voor vele disciplines een onevenwichtige leeftijdsopbouw en zijn vrouwen en minderheden daarin ondervertegenwoordigd. Door de grote vraag vanuit industrie en samenleving naar goed opgeleid bèta- en technisch geschoold personeel komt het academisch loopbaanperspectief verder onder druk te staan. Intussen hebben zowel gevestigde als opkomende economieën sterk ingezet op R&D-inspanningen in de bèta en techniek, terwijl de inzet op deze gebieden in Nederland juist achterblijft. Dit alles heeft zich dan ook gemanifesteerd in een sterke neergang en ondervertegenwoordiging van de bèta- en techniekssector in de Nederlandse onderzoeksportfolio bezien vanuit internationaal perspectief, met alle nodige risico's vandien voor de impact daarvan (figuur 2).

Figuur 1a – Ontwikkeling student-stafratio in de bèta

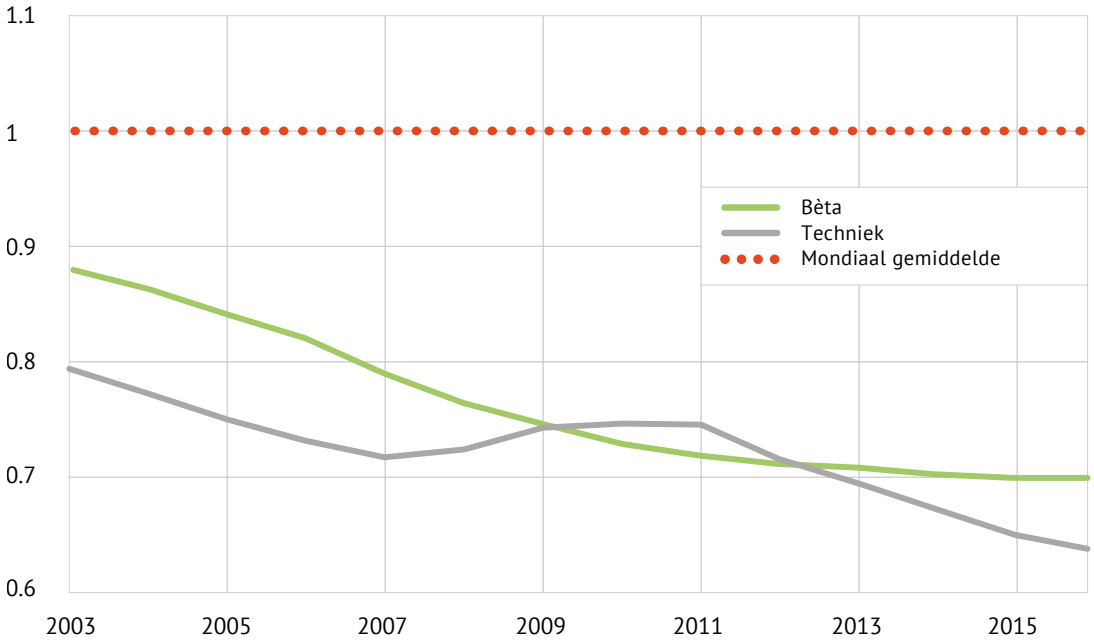


Figuur 1b – Ontwikkeling student-stafratio in de techniek

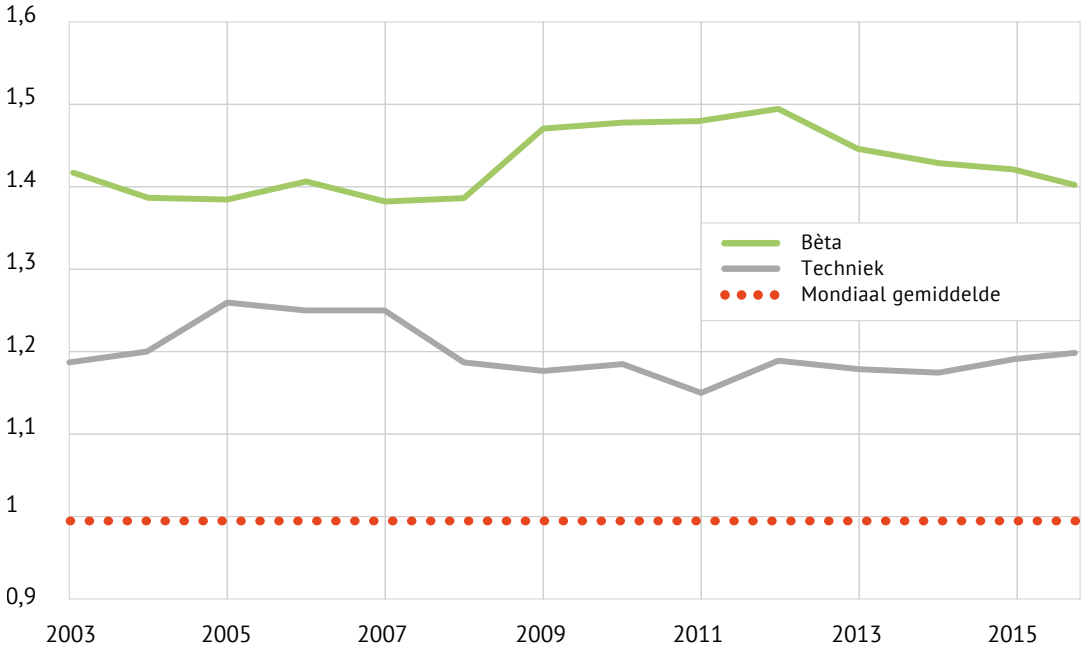


De groei van het aantal ingeschreven studenten en vaste wetenschappelijke staf vanaf het ijkpunt 2009 voor de bèta (figuur 1a) en de techniek (figuur 1b).
Bron: VSNU

Figuur 2a – Onderzoekspecialisatie (OSI) van Nederland in de bèta- en techniekssector



Figuur 2b – Citatie-impact (CI) van Nederland in de bèta- en techniekssector



De relatieve omvang van de bèta en techniek in Nederland zoals gemeten met de OSI is de afgelopen jaren sterk teruggelopen tot 60 à 70% van het gemiddelde (figuur 2a). De citatie-impact van de gebieden is echter nog steeds hoog, respectievelijk 20 en 40% boven het gemiddelde. Wel is er, met name bij bèta, recent een teruggang te zien (figuur 2b). De gepresenteerde getallen zijn gebaseerd op de HOOP gebieden Natuur en Techniek, die de gehele bèta- respectievelijk techniekssector zoals beschreven in paragraaf 2.1 omvatten.
Bron: CWTS/Rathenau

Om de steeds verdere achteruitgang te keren, heeft het ministerie van OCW in de periode 2009-2016 een sectorplan ingesteld voor twee disciplines uit het midden van de bètasector, de natuur- en scheikunde. De implementatie van dit sectorplan onder de Commissie Breimer was een groot succes en heeft mede gezorgd voor de grote stijging in het aantal studenten over de afgelopen jaren en het afremmen van de daling in de onderzoekspecialisatie (OSI) voor de disciplines. Hiermee is een belangrijke eerste stap gezet. De Commissie Breimer heeft echter ook aangegeven dat de beschikbare middelen niet voldoende zijn om de problematiek voor deze disciplines ten volle op te lossen - laat staan dat dit zou gelden voor de gehele bèta- en techniekssector. De minister van OCW onderkende dit en verzocht de Commissie Breimer in haar *Wetenschapsvisie 2025: keuzes voor de toekomst* aanbevelingen op te stellen voor de versterking van de bètadisciplines, terwijl zij tevens aankondigde wetenschap en technologie via het Techniekpact te willen verankeren in het onderwijs.

Bij het verschijnen van de aanbevelingen van de Commissie Breimer in het rapport *Koersvast* aan het einde van 2015, was duidelijk dat een eventuele opvolging hiervan niet meer onder het toen regerend kabinet zou plaatsvinden. Hetzelfde ging op voor de aanbevelingen voor verdere versterking van de wiskunde, volgend uit het kort daarvoor verschenen *Deltaplan voor de Nederlandse wiskunde*. Op advies van de minister van OCW zijn toen een Wiskunderaad en een Raad voor de Natuur- en Scheikunde in het leven geroepen onder de bezielende leiding van respectievelijk Frank van der Duyn Schouten en Robbert Dijkgraaf. Deze raden hadden als opdracht het gedachtegoed van de sectorplannen levend te houden en uit te zien naar kansen voor verdere versterking van de betreffende disciplines. Al gauw vonden de raden elkaar in deze opdracht en hebben ze zich gezamenlijk ingezet om het belang van de bèta- en techniekssectoren in hun volle breedte te bepleiten. Hierin werden zij bijgestaan door de technische universiteiten die zowel afzonderlijk als via de 4TU federatie een sterke oproep deden uitgaan om de basis van de techniek te versterken. Ook het bedrijfsleven heeft, onder andere gekanaliseerd in VNO-NCW, de noodzaak bepleit van het versterken van het bèta- en technisch onderwijs en -onderzoek voor het behoud van een gezond ondernemings- en vestigingsklimaat. Dit brede pleidooi kreeg navolging in het besluit van de minister van OCW om M€ 60 van de in het regeerakkoord beoogde investeringen in wetenschap en onderzoek te investeren in de basis van de bèta- en techniekwetenschappen. Hoewel de Raad voor de Natuur- en Scheikunde alleen voor die twee disciplines al een investering van M€ 120 per jaar noodzakelijk vond, betreft het hier toch de meest significante investering die de bèta- en techniekssector in lange tijd heeft gezien.

Met de investering van M€ 60 wordt ingezet op een integrale aanpak over doelen op het gebied van onderzoek, onderwijs en maatschappij, bezien vanuit het perspectief van de basis-disciplines binnen de sector. Er zijn namelijk vele, met elkaar verbonden, zaken die aangepakt moeten worden, zoals: een goede opleiding geven aan de stijgende studentenaantallen, aandacht besteden aan succesvolle privaat-publieke samenwerkingen, het aantal vrouwelijke hoogleraren verhogen, de interdisciplinaire maatschappelijke uitdagingen bewerken, de internationale concurrentiepositie voor het aantrekken van toptalent en het behouden van toponderzoekers versterken, en het verbeteren van de lerarenopleidingen om te zorgen voor de noodzakelijke verhoging van het aantal academisch opgeleide docenten in het voortgezet onderwijs en het hbo. Het dienen van al deze doelen is financieel en technisch alleen haalbaar als dit op een alles omvattende verbindende manier plaatsvindt. Omdat onderwijs en onderzoek zo sterk

verweven zijn, biedt versterking via de disciplines de beste mogelijkheid voor succes; zo worden mensen op een herkenbare manier opgeleid en starten ze met een representatieve *toolbox* hun actieve werkzame leven. Het opleiden van kwalitatief goede werktuigbouwkundig ingenieurs, wiskundigen of fysici brengt vervolgens weer een enorme stimulans in de interdisciplinaire onderzoeksprojecten. Daarin zetten zij zich namelijk elk vanuit hun eigen expertise in voor een duurzame samenleving en een hoge kwaliteit van leven. Spankracht en draagkracht gaan op deze wijze hand in hand, interdisciplinaire samenwerkingen zijn immers gebaseerd op goed toegeruste disciplinaire wetenschappelijke opleidingen.

Tegen deze achtergrond aanvaardde de kwartiermaker de opdracht om namens en met de bèta- en techniekssector een beeld op te stellen van de huidige stand van zaken binnen de disciplines in die sectoren. Daarbij bleken scherpe en beargumenteerde keuzes noodzakelijk, over hoe de beschikbare middelen met maximaal rendement tot besteding kunnen worden gebracht.

1.3 De opbouw van de sectorbeelden

De sectorbeelden bèta en techniek bevatten elk negen hoofdstukken, waarbij de eerste twee hoofdstukken voor bèta en techniek identiek zijn om de sterke samenhang tussen deze sectoren, zowel qua inhoud als qua problematiek, te benadrukken. In hoofdstuk 2 wordt beschreven wat in deze sectorbeelden onder bèta dan wel techniek wordt verstaan en waar de wisselwerking tussen deze twee sectoren plaatsvindt. In hoofdstuk 3 zijn de scherpe keuzes binnen de sector opgenomen en is aangegeven op welke gronden ze zijn gebaseerd. In hoofdstuk 4 zijn voor de uitgekozen disciplines zowel de huidige stand van zaken, als de uitdagingen die zij zien voor de toekomst beschreven. Deze uitdagingen zijn beschreven in een beperkt aantal landelijk gedragen focusgebieden per discipline. In hoofdstuk 5 wordt een korte beschrijving gegeven van de disciplines die niet zullen participeren in de sectorplannen, maar wel integraal deel uitmaken van de sector bèta of techniek. In hoofdstuk 6 volgt een beschrijving en motivatie van de taakverdeling over de universiteiten die aan de focusgebieden kunnen bijdragen vanuit hun lokale zwaartepunten. Hoofdstuk 7 beschrijft hoe de middelen het beste kunnen worden ingezet en wat de gewenste wisselwerking tussen eerste en tweede geldstroom is. In hoofdstuk 8 staat aangegeven welke vervolgstappen zijn voorzien om tot sectorplannen te komen, welke doelen met de sectorplannen worden gediend en hoe dit zich laat vertalen in SMART criteria voor de plannen van de universiteiten. Tot slot eindigt het sectorbeeld met een conclusie in hoofdstuk 9.

1.4 Hoe kwamen de sectorbeelden tot stand?

De sectorbeelden bèta en techniek zijn opgesteld in nauwe samenwerking tussen de kwartiermaker en de (vertegenwoordigende) decanen van de bèta- en techniekfaculteiten, waarbij het kader van het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap (OCW) leidend was. In navolging van uitgangspunten van de kaderbrief zijn de NWO- en KNAW-instituten niet meegenomen in het proces, alsook die universiteiten die geen bèta- en/of techniekfaculteit(en) kennen. Tijdens een twee weken durende rondgang door het land is uitvoerig gesproken met de decanen, wetenschappelijk en onderwijsdirecteuren, alsook leidende hoogleraren van de bèta- en techniekfaculteiten van de universiteiten in Delft (TUD), Eindhoven (TU/e), Groningen

(RUG), Leiden (LEI), Maastricht (UM), Nijmegen (RU), Twente (UT), Utrecht (UU), Wageningen (WUR) en de UvA en VU van Amsterdam. Alle elf universiteiten kennen al lang een vruchtbare samenwerking in het bètadecanenoverleg onder leiding van Jasper Knoester die dan ook functioneerde als primair aanspreekpunt voor het bètadomein. Binnen het techniekdomein is een techniekdecanenoverleg opgestart met vertegenwoordigers van Delft, Eindhoven, Groningen, Twente en Wageningen onder leiding van Geert Dewulf. De vertegenwoordigers in dit overleg komen momenteel uit de construerende ingenieurswetenschappen, in overeenstemming met de gemaakte keuzes (vide infra) en hebben zich in goede samenwerking en korte tijd de principes van de sectorale aanpak meester gemaakt. Naast intensief contact met deze decanenoverleggen en (de voorzitters van) nationale disciplineplatforms en -overleggen is er regelmatig gesproken met de relevante adviestafels en besturen van NWO, de technologiecommissie van VNO-NCW, alsook vele individuele belanghebbenden in de wetenschap en maatschappij.

Om te komen tot een breed gedragen beeld van de bèta- en techniekssector en gegeven de korte tijd die de kwartiermaker hiervoor ter beschikking stond, zijn delen van dit sectorbeeld opgesteld door de nationale disciplinaire overlegorganen (met name delen van hoofdstuk 4 en 5) of door de faculteiten zelf (hoofdstuk 6). Deze delen zijn vervolgens in goed overleg met de auteurs en onder regie en redactie van de kwartiermaker samengevoegd in het voorliggende sectorbeeld. Dit beeld is zowel tijdens het opstellen voor commentaar, als aan het eind ter goedkeuring, voorgelegd aan respectievelijk het bèta- dan wel techniekdecanenoverleg en aan Hans van Duijn, beoogd voorzitter van de Commissie Sectorplan Bèta en Techniek.

2 De uitgangspunten van de sectorbeelden

2.1 Wat is bèta en wat is techniek?

De uitersten van de bèta en techniek zijn eenvoudig tegenover elkaar te stellen door de stereotypen hieruit over te nemen. We vinden dan aan de bètakant een Albert Einstein of John Charles Fields en aan de kant van de techniek een Elon Musk of Simon Stevin. De werkelijkheid is uiteraard genuanceerder. Door de toenemende vraag naar multidisciplinaire teams om complexe wetenschappelijke of maatschappelijke vraagstukken aan te pakken, zijn disciplinegrenzen aan het vervagen. Door de toenemende aandacht voor valorisatie en kennisbenutting is menig bètawetenschapper naar de techniek geschoven, terwijl anderzijds het innoverend vermogen van precisie-instrumentatie en -fabricatie de bètawetenschapper in menig technicus naar boven heeft gehaald.

Om toch een helder onderscheid tussen beide sectoren aan te brengen wordt de volgende definitie gehanteerd: het onderzoek binnen de bètawetenschappen richt zich op het verleggen van de grenzen van onze kennis van de natuur. Dit omvat zowel de empirische wetenschap waar met behulp van proefondervindelijke methodes gezocht wordt naar natuurwetten en verklaringen van natuurverschijnselen, alsook de delen van de formele wetenschappen waar men ditzelfde probeert te doen op basis van deductie en logica. Dit vertaalt zich in zowel nieuwsgierigheidsgedreven fundamenteel onderzoek, als in toepassingsgericht onderzoek waarbij op voorhand al bedacht is hoe de ontwikkelde kennis van nut kan zijn. Het onderzoek binnen de technische wetenschappen vertaalt nieuwe (natuurwetenschappelijke) kennis naar kunde, gericht op de ontwikkeling van (technische) producten, systemen en processen. De technische wetenschappen richten zich dus op kennisontwikkeling voor het creëren van concrete ontwerpen. Dit is ongeacht of deze ontwerpen hun toepassing vinden in het nieuwsgierigheidsgedreven fundamenteel onderzoek (bijvoorbeeld detectoren voor zwaartekrachtsgolven of nieuwe vormen van regeltechniek voor een fusiereactor) of in commercieel gerichte toepassingen (bijvoorbeeld nieuwe vliegtuigmotoren of machines om computerchips mee te fabriceren).

Met deze definitie vallen de disciplines in het bètatechnisch domein als volgt in te delen:
de bètawetenschappen omvatten de aard- en milieuwetenschappen, astronomie, biologie, farmacie, informatica, natuurkunde, scheikunde en wiskunde. Hiermee wordt ook recht gedaan aan de indeling van de brede bètafaculteiten (gecoördineerd door het bètadecanenoverleg) waar deze disciplines al jaren worden bewerkt en onderwezen. De technische wetenschappen omvatten de bouwkunde, civiele techniek, elektrotechniek, industrieel ontwerpen, luchtvaart- en ruimtevaarttechniek, levensmiddelen- en landbouw-technologie, technische bedrijfswetenschappen, transport-, vervoers- en maritieme techniek

en werktuigbouwkunde. Deze zijn primair geconcentreerd in faculteiten van de 4TU, al is er een groeiende aandacht voor deze onderwerpen bij enkele algemene universiteiten – in het bijzonder de RUG.

Met nadruk wordt gewezen op de sterk inhoudelijke wisselwerking tussen de bèta- en techniekdisciplines in het realiseren van wetenschappelijke, maatschappelijke en industriële uitdagingen. Enkele treffende voorbeelden in de wetenschap zijn te vinden in het maken en gebruiken van apparatuur zoals telescopen, satellieten en versnellers, maar ook in spectrometers, scanners en microscopen. Voor bijdragen aan maatschappelijke uitdagingen kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de energietransitie, waar nieuwe wetenschappelijke kennis wordt ontwikkeld om elektriciteit efficiënt in CO_2-neutrale brandstoffen om te zetten, maar waar de vooruitgang in de techniek bepaalt of het uiteindelijk deze brandstoffen zullen zijn of wellicht de elektriciteit zelf die onze voertuigen zal aandrijven. Ook in de industrie is deze samenhang duidelijk, bijvoorbeeld in het samenspel van de ontwikkelingen in robotica (techniek) en de vooruitgang in kunstmatige intelligentie (bèta) die vervolgens samen leiden tot vernieuwing in fabricageprocessen.

Deze inhoudelijke wisselwerking is gebaseerd op sterke (sub)disciplines die traditioneel de basis vormen van de wetenschap en de techniek. Het zijn dan ook deze basis-(sub)disciplines die borg staan voor een gedegen opleiding in zowel de bachelor-, de master- en promotieopleidingen.

Hoogleraar Ming Cao (RUG) werkt met studenten aan de synchronisatie van robotarmen.
Foto: Bram Belloni

2.2 Gedeelde problematiek en een gedeelde oplossing

Naast de sterke inhoudelijke wisselwerking tussen de bèta en techniek is er ook sprake van een gedeelde problematiek die beide sectoren ondervinden, die in alle gevallen heeft geleid tot

een verhoogde werkdruk van de huidige wetenschappelijke staf. Zoals in het vorige hoofdstuk beschreven hebben zowel de bèta- als techniekfaculteiten de laatste jaren te maken gehad met een grote toestroom van studenten en daarbij achterblijvende omvang van de wetenschappelijke staf. Ook hebben beide te maken met een variërende personeelsopbouw, zowel qua leeftijd, gender, als nationaliteit. Daarnaast worden bèta en techniek geconfronteerd met een toenemende inzet op de sector in zowel gevestigde als opkomende economieën en een achterblijvende inzet vanuit Nederland hierop, met duidelijke gevolgen voor de internationale concurrentiekracht. Tot slot hebben beide sectoren nu nog steeds een zeer hoge wetenschappelijke impact met een citatiescore die voor de bèta veertig procent en voor de techniek twintig procent boven het mondiaal gemiddelde ligt, maar deze impact neemt de laatste jaren langzaam af.

Het ligt dan ook voor de hand om voor bèta en techniek een soortgelijke oplossingsrichting te zoeken, waarbij voortgebouwd kan worden op de succesvolle koers van de Commissie Breimer om via een integrale aanpak de met elkaar vervlochten problematiek in beide sectoren aan te pakken. Anders dan binnen de bèta, waar de natuur-, schei- en wiskunde al enige ervaring hebben met een sectorplan, is dit voor de techniek geheel nieuw. Bij de totstandkoming van beide sectorbeelden heeft de techniekssector echter bewezen deze uitdaging snel en adequaat op te kunnen pakken. Daarbij zijn wanneer dat mogelijk en wenselijk was vanuit de bètasector enige handreikingen gedaan.

2.3 Inhoudelijke verdeling van en binnen de bèta en techniek

De opdeling van bèta en techniek volgens bovenstaande definitie, ondanks de beschreven nauwe verwevenheid in zowel onderzoek als onderwijs, is gemaakt op basis van de kaderbrief en na onderling overleg van de decanen en de nationaal georganiseerde disciplinaire overlegorganen. Hierin is besloten om de bètadisciplines van de technische universiteiten (technische natuurkunde, chemische technologie, et cetera) te betrekken bij de bètadisciplines van de algemene universiteiten. Deze keuze werd ingegeven door de bewezen samenwerking in het bètadecanenoverleg en de wens om tot een nationale strategie per discipline te komen. Hier geldt ook dat de traditionele grenzen, tussen de meer toegepaste of technische bètawetenschappen en de bètawetenschappen zoals gedoceerd en onderzocht aan de algemene universiteiten, aan het vervagen zijn. Deze verschuiving heeft ook gevolgen voor de verdeling van middelen, zoals beschreven in paragraaf 2.5.

Wat de keuzes binnen de sectoren betreft, heeft OCW voor de bètasector al aangegeven dat deze beperkt moesten worden tot de disciplines informatica, natuurkunde, scheikunde en wiskunde. Voor de sector techniek was een dergelijke inperking op voorhand niet gemaakt, maar werd wel gevraagd om scherpe keuzes. Na consultatie van externe partners (VNO-NCW en enkele bedrijven) en het bestuderen van de noden in de technische wetenschappen aan de universiteiten, is voor de sector techniek gekozen voor de construerende ingenieurswetenschappen. Deze keuze is ingegeven door het grote belang van deze ingenieurswetenschappen voor de Nederlandse (maak)industrie en de grote maatschappelijke uitdagingen, alsmede de grote druk waaronder deze – meer nog dan de ontwerpende ingenieurswetenschappen – zijn komen te staan door de toegenomen studentenaantallen en de achtergebleven investeringen in onderzoeksapparatuur

en -infrastructuur. De keuze beperkt zich tot de disciplines elektrotechniek, civiele techniek en werktuigbouwkunde, die de basis vormen van de construerende technische wetenschappen. Ook worden hierin die delen van de luchtvaart- en ruimtevaarttechniek (TUD) meegenomen, die onder de werktuigbouwkunde te scharen zijn. Een nadere beschrijving en motivatie van de gekozen disciplines is voor bèta en techniek apart opgenomen in hoofdstuk 3 van het betreffende sectorbeeld.

2.4 Kengetallen van de bèta en techniek

Bij het opstellen van de sectorbeelden zijn de bèta- en techniekfaculteiten gevraagd om een beeld te schetsen voor de uitgekozen disciplines met daarin een beschrijving van de huidige situatie en hun visie op de toekomst. Voor dat laatste zijn landelijke afspraken gemaakt over de voorziene ontwikkelingen en hieruit voortvloeiende groeiverwachtingen en investeringen via de sectorplannen. Deze inventarisatie heeft ook geleid tot het verkrijgen van cijfermateriaal over de aantallen bachelor- en masterstudenten en over vaste (hoogleraren, UHDs en UDs) en tijdelijke (promovendi en postdocs) staf. Deze afzonderlijke cijfers zijn per sector samengebracht in tabel 1. Tabel 1 kent eveneens een voorspelling van de gewenste omvang in 2024; het moment waarop deze sectorplannen structureel moeten worden binnen de faculteiten. De cijfers zijn richtinggevend voor de ambities die de faculteiten zullen formuleren in hun profileringsplannen. Een nadere uitsplitsing van deze cijfers per discipline kan gevonden worden in hoofdstuk 4. Opgemerkt moet worden dat de cijfers hier een indicatie geven, maar in de profileringsplannen van faculteiten een meer definitieve status krijgen. De tijd waarin dit sectorbeeld tot stand moest komen was te kort om tot een volledige overeenstemming over de wijze van rapporteren te komen, alsook tot een gedetailleerde inschatting voor 2024.

Studenten van de TUD wandelen over de campus in de richting van het oude stadscentrum.
Foto: TUD

Uit de cijfers blijkt een blijvende ambitie om de studentenaantallen verder te laten toenemen, conform de vraag vanuit maatschappij en bedrijfsleven om meer hoogopgeleid bèta en technisch personeel. Gezien de discussie rondom numerus fixi en de student-stafverhouding wordt deze ambitie alleen mogelijk gemaakt door de investeringen in vaste wetenschappelijke staf uit de sectorplannen. Ook voor het aandeel vrouwelijke studenten en staf is groei voorzien. Als de verbetering in de genderverhouding wellicht klein lijkt, moet de lezer zich realiseren dat de voorziene verhoging van het percentage vrouwen in de vaste wetenschappelijke staf alleen mogelijk is door het voornemen om een bijna gelijk aantal mannen en vrouwen aan te nemen voor de nieuwe stafposities. Met dit voornemen tonen de domeinen hun uiteindelijke streefdoel aan van een vergelijkbare verhouding man/vrouw over de gehele linie van bachelor, master, promovendus, tenure track en hoogleraar. Hierbij moet uiteraard wel de tijdsvertraging in ogenschouw genomen worden als gevolg van de zittingsduur van al aangestelde staf.

Tabel 1 – Aantallen studenten en stafleden*

	Bèta				Techniek			
	2016 (%V)	2017 (%V)	2018 (%V)	2024 (%V)	2016 (%V)	2017 (%V)	2018 (%V)	2024 (%V)
Instroom Bsc	6.694 (27)	7.118 (27)	7.703 (29)	9.522 (34)	3.162 (18)	3.309 (18)	3.409 (20)	4.169 (25)
Totaal Bsc	17.834 (25)	19.534 (26)	21.249 (28)	27.470 (33)	9.329 (17)	9.560 (18)	9.866 (18)	12.057 (22)
Instroom Msc	3.901 (28)	4.263 (28)	4.672 (29)	6.652 (34)	2.757 (20)	2.979 (20)	3.042 (20)	3.858 (25)
Totaal Msc	9.461 (28)	10.633 (27)	11.789 (27)	15.554 (33)	7.864 (18)	8.374 (19)	8.850 (19)	10.853 (24)
WP vast (fte)	1.427 (15)	1.456 (15)	1.539 (16)	1.901 (24)	630 (14)	666 (13)	692 (14)	878 (19)
WP tijdelijk (fte)	4.331 (28)	4.428 (29)	4.482 (29)	5.503 (33)	2.150 (25)	2.415 (23)	2.442 (23)	2.762 (27)

** Deze getallen zijn de som van de aantallen opgegeven door de faculteiten en gebaseerd op de door hen geregistreerde en in 2024 verwachte studenten- en stafaantallen in de gekozen disciplines.*

2.5 Middelenverdeling over de bèta en techniek

In het door OCW aan de kwartiermaker meegegeven kader staan de uitgangspunten voor de verdeling van middelen over de bèta en techniek, waarbij in eerste instantie een gelijke verdeling over beide sectoren is aangehouden met een marge van circa 25%. De kwartiermaker heeft echter het benodigde mandaat ontvangen om in goed overleg met het veld tot een andere indeling van deze sectoren te komen, met gevolgen van dien voor de middelenverdeling. De beschreven opdeling van wat tot bèta en wat tot techniek wordt gerekend en de keuze om de bètadisciplines van de technische universiteiten integraal onderdeel te laten zijn van het sectorplan bèta, vraagt om een dergelijke aanpassing. In samenspraak met de decanen is gekozen om M€ 40 aan het sectorplan bèta en M€ 20 aan het sectorplan techniek toe te wijzen.

Deze verdeling is goed te rechtvaardigen op basis van de kengetallen in tabel 1, die een

verhouding van circa 2:1 laten zien voor de studenten- en stafaantallen van de disciplines gerekend tot respectievelijk het sectorplan bèta en het sectorplan techniek. De verdeling wordt verder ondersteund door het inzicht dat het toerekenen van de technische informatica, natuur-, schei-, en wiskunde aan het techniekplan een verhouding in deze kengetallen van circa 2:3 voor de algemene versus de technische universiteiten zou opleveren. Naast het feit dat hiermee het inhoudelijke werk van de bètadecanen over de afgelopen tien jaar teniet zou worden gedaan, zal een dergelijke indeling bij gelijke budgetten voor beide plannen veel druk zetten op het budget voor de geprioriteerde techniekdisciplines, en ook een scheve verhouding tussen de algemene en de technische informatica, natuur-, schei-, en wiskunde veroorzaken.

Met de nu gekozen indeling is dus jaarlijks M€ 40 beschikbaar voor de vier bètadisciplines, inclusief die van de technische universiteiten, en M€ 20 voor de drie techniekdisciplines. Een verdere uitwerking van dit budget over de betreffende disciplines is beschreven in hoofdstuk 3. Van dit budget is conform de kaderbrief tachtig procent rechtstreeks beschikbaar voor de eerste geldstroom, te verdelen op basis van de profileringsplannen van de universiteiten door de Commissie Van Duijn. De overige twintig procent zal via NWO worden ingezet ter versterking van de universitaire plannen, zoals beschreven in hoofdstuk 7. Verder is er sprake van een aanloopperiode over 2018 en 2019, waarbij al M€ 47 aan de eerste geldstroom en M€ 30 aan de tweede geldstroom ter beschikking is gesteld. Deze keuze heeft tot gevolg dat er over de rest van de looptijd van het sectorplan (2020-2024) jaarlijks M€ 51,4 binnen de eerste geldstroom en M€ 8,6 binnen de tweede geldstroom beschikbaar is. Conform de 2:1 verhouding zal van het eerste-geldstroomdeel M€ 34,4 tot besteding worden gebracht in het sectorplan bèta en M€ 17 in het sectorplan techniek. Vergelijkbaar zal van het tweede-geldstroomdeel M€ 5,6 via het NWO ENW-domein en M€ 3 via het NWO TTW-domein beschikbaar worden gesteld voor de versterking van respectievelijk het sectorplan bèta dan wel techniek. Voor de middelen van de aanloopperiode geldt een soortgelijke verdeling, zoals ook weergegeven in tabel 2.

Tabel 2 – Verdeling van middelen over bèta en techniek en over de eerste en tweede geldstroom gedurende de looptijd van de sectorplannen.

	Sectorplan bèta (M€)		Sectorplan techniek (M€)	
	Eerste geldstroom (universiteiten)	Tweede geldstroom (ENW)	Eerste geldstroom (universiteiten)	Tweede geldstroom (TTW)
2018	0	19	0	11
2019	31,3	0	15,7	0
2020	34,4	5,6	17	3
2021	34,4	5,6	17	3
2022	34,4	5,6	17	3
2023	34,4	5,6	17	3
2024	34,4	5,6	17	3

2.6 Inzet van de middelen

Om het hoofd te kunnen bieden aan de beschreven problematiek in de sectoren zullen de middelen voornamelijk moeten worden ingezet om posities voor nieuwe vaste wetenschappelijke stafleden te creëren. Deze moeten immers de meeste ambities op de gebieden van onderzoek, onderwijs en maatschappelijke doelen waarmaken, alsook de meer specifieke doelen per sector en discipline zoals beschreven in de volgende hoofdstukken. Om te komen tot een doelgerichte investering met de nodige kritische massa zullen deze posities worden ingezet binnen een geselecteerd aantal focusgebieden in de geprioriteerde disciplines binnen bèta en techniek. De focusgebieden zijn geselecteerd op basis van hun belang voor de toekomstige wetenschappelijke en maatschappelijke uitdagingen én de mogelijkheid van de Nederlandse universiteiten om zich hierin internationaal te onderscheiden.

Bij de invulling van deze nieuwe posities wordt gestreefd naar een goede balans van invulling op senior hoogleraar niveau en het meer junior *tenure track* niveau, en het verbeteren van de genderbalans. De sectoren bèta en techniek kennen experimentele en theoretische stafleden. Om talent te behouden en aan te trekken is er grote behoefte om deze injectie in de vaste staf gepaard te laten gaan met een investering in startpakketten. Hiermee wordt de wervingskracht voor de nieuwe posities vergroot. De nieuw aangestelde stafleden kunnen een vliegende start maken in het opbouwen van hun groep en het focusgebied waarin ze zijn aangesteld versterken. Bij de startpakketten gaat het om middelen voor gebruiksartikelen, reis en publicatiefondsen, apparatuur, infrastructuur en waar mogelijk tijdelijke wetenschappelijke posities (promovendi en postdocs). Bovenstaande overwegingen hebben geleid tot het instellen van een viertal tarieven die de integrale kosten van de posities goed benaderen, en die door de universiteiten gehanteerd zullen worden in de in te dienen plannen:

- Experimentele posities in de bèta en de techniek:
  - senior hoogleraar positie: 250.000 euro per jaar structureel;
  - junior *tenure track* positie: 150.000 euro per jaar structureel.
- Theoretische posities in de bèta en de techniek:
  - senior hoogleraar positie: 180.000 euro per jaar structureel;
  - junior *tenure track* positie: 120.000 euro per jaar structureel.

De posities zullen door de universiteiten in hun plannen worden aangevraagd op basis van landelijke afspraken over zwaartepuntvorming binnen de focusgebieden. De Commissie Van Duijn zal deze plannen beoordelen op basis van de ambitie die eruit spreekt en de kracht (omvang en kwaliteit) van de betreffende faculteit in de aangegeven focusgebieden. De bedragen zijn al beschikbaar per 1 januari 2019 en worden in de zomer van 2019 door de minister van OCW met terugwerkende kracht beschikbaar gesteld op basis van de prioritering door de commissie. De daarop volgende periode van monitoring gedurende zes jaar met een sterke tussentijdse- en eindevaluatie zal de faculteiten scherp houden op de zelf gekozen prioriteiten. Als de uitvoering aan het einde van deze periode volgens de commissie naar ieders wens is verlopen, zal deze de minister van OCW adviseren om de toezeggingen structureel in te laten dalen in de reguliere bekostiging middels de eerste geldstroom. Daarbij zullen de betrokken universiteiten zich er wel aan moeten committeren dat de middelen ten goede komen aan de structurele versterkingen van de geprioriteerde focusgebieden.

Naast de hoofdzakelijke inzet op nieuwe vaste stafposities is het raadzaam om een deel van de middelen centraal te gebruiken voor doelen als *outreach* naar het primair en voortgezet onderwijs of het verbeteren van de opzet en vergroten van de werfkracht van de lerarenopleiding (voor vwo en hbo). Hiertoe zullen de decanenoverleggen naast de plannen vanuit de eigen instelling ook een gezamenlijk plan voor de gehele bèta- respectievelijk techniekssector aanleveren bij de commissie. Het plan moet een concrete aanpak voor deze gezamenlijke doelen omvatten met een daarbij passende begroting. Deze vervolgstappen zijn meer in detail uitgewerkt in hoofdstuk 8. De nu volgende hoofdstukken zijn specifiek voor het sectorbeeld techniek, en gaan dieper in op de gemaakte keuzes binnen dit domein. De keuzes voor bèta zijn in een apart sectorbeeld opgenomen.

Wageningen University & Research doet onderzoek naar innovatieve spuittechnieken.
Foto: WUR

3 Specifieke aandachts-punten voor de techniek-sector

3.1 Belang en kenmerken van de technische wetenschappen

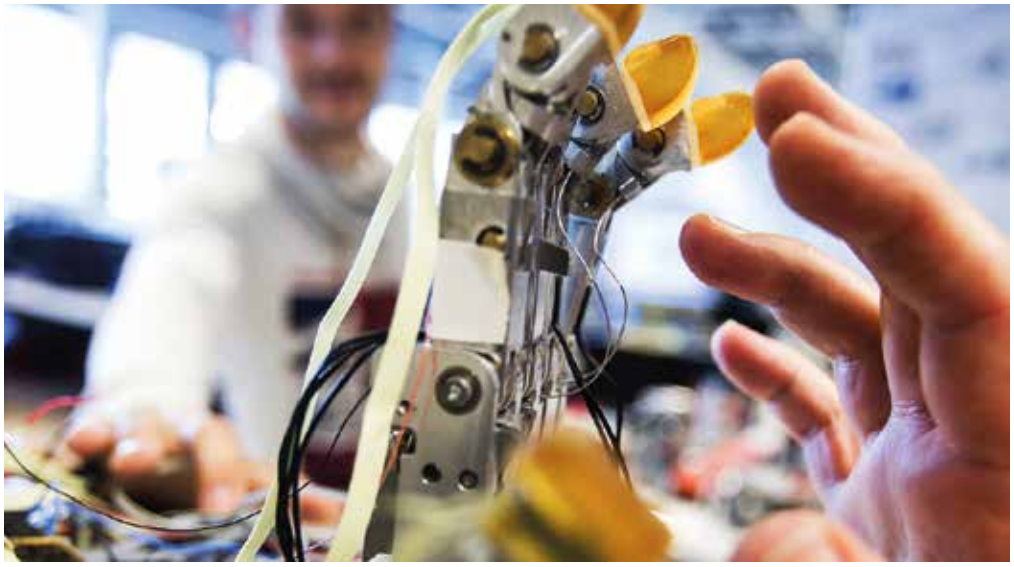
De traditionele basis van de technische wetenschappen wordt in Nederland gevormd door disciplines op het gebied van civiele techniek, bouw, werktuigbouw en scheepsbouw. In de loop van de tijd zijn deze aangevuld met disciplines als elektrotechniek en materiaalkunde, en diverse interdisciplinaire vakgebieden zoals agrotechniek, levensmiddelentechnologie, industrieel ontwerpen en technische bedrijfs- en bestuurskunde. De technische wetenschappen vormen een onmisbare schakel in de ketens naar oplossingen voor de grootste maatschappelijke uitdagingen van onze tijd. Ze zijn tevens een belangrijke leverancier van kennis en hoogopgeleide professionals voor de industrie en een aantal maatschappelijke sectoren. Daarbij zal het aantal baanopeningen tot 2022 naar verwachting circa tweemaal zo hoog liggen als de uitstroom uit de technisch wetenschappelijke opleidingen. Dit ondanks de sterk stijgende studenteninstroom van de laatste jaren (bron: *Ruimte voor investeringen en talen*t, VSNU).

Tabel 3 – Arbeidsmarktvraag naar universitair geschoolden (bron VSNU)

Opleidingscategorie	Baanopeningen t/m 2022	Instroom t/m 2022	Tekorten t/m 2022
Onderwijs	14.300	12.800	1.500
Taal en cultuur	30.900	36.300	-5.400
Economie en recht	73.200	86.000	-12.800
Techniek	61.700	29.500	32.200
Natuur en landbouw	19.500	21.600	-2.100
Gezondheid	43.400	34.600	8.800
Gedrag en maatschappij	35.400	27.400	8.000

Het technisch-wetenschappelijk domein is koploper in onderzoeksamenwerking met het bedrijfsleven. Daarnaast wordt het onderzoek (buiten de eerste geldstroom) gefinancierd vanuit de tweede geldstroom en het Europese Horizon 2020 programma. Deze geldstromen richten zich in toenemende mate op de bijdrage van het onderzoek aan het oplossen van maatschappelijke uitdagingen of aan versterking van de economische topsectoren. Deze tendens heeft er toe bijgedragen dat de discipline-oriëntatie in onderwijs, onderzoek en organisatie binnen de technische wetenschappen is gekanteld naar de huidige primaire oriëntatie op maatschappelijke

toepassing. Tezamen met de sterke groei in het aantal studenten en de matchingseisen in de tweede en derde geldstroom, zorgt dit ervoor dat universiteiten slechts beperkte mogelijkheden hebben om eerste geldstroommiddelen in het basisonderzoek te kunnen investeren. Hierdoor staat vooral het meer funderende technisch wetenschappelijk onderzoek onder druk. Dit onderzoek is echter noodzakelijk voor de kwaliteit en de vernieuwing van de basisdisciplines, en daarmee voor de ontwikkeling van de toepassingen en sleuteltechnologieën van morgen. De voorgenomen investeringen in de basisdisciplines zijn daarmee van het grootste belang voor de toekomst van onderwijs, topsectoren en de maatschappelijke uitdagingen (NWA).



Robothand.
Foto: UT

Kenmerkend voor de technische wetenschappen is de grote verwevenheid van wetenschappelijk onderwijs en onderzoek en de samenwerking met de industrie en maatschappelijke organisaties. Vaak worden studenten al vanaf de bachelorfase betrokken bij onderzoek en de samenwerking met derde partijen. In de master- en PhD-fase ontstaat in toenemende mate een meester-gezelrelatie tussen docent en student, waarbij het onderwijs voor een groot deel bestaat uit het gezamenlijk opzetten en uitvoeren van onderzoek. Hierbij krijgt de student hands-on uitleg en begeleiding van de docent/onderzoeker, terwijl deze op zijn beurt deeltaken kan uitbesteden aan de student en inspiratie kan opdoen. Deze integratie van onderwijs en onderzoek stelt hoge eisen aan de getalsmatige verhouding tussen studenten en stafleden. In de afgelopen jaren is deze verhouding steeds verder onder druk komen te staan.

In groeiende mate wordt binnen de technische wetenschappen ook belang gehecht aan de samenwerking met het hoger beroepsonderwijs. Met de introductie aan het begin van dit decennium van de lectoraten en het praktijkgericht onderzoek in het hbo, vervullen de hogescholen steeds meer een schakelfunctie in de toepassing van innovaties en nieuwe technologieën in tal van sectoren en beroepsomgevingen. Samenwerking tussen hogescholen en universiteiten biedt tevens mogelijkheden voor de professionalisering in het hoger beroepsonderwijs en voor de betrokkenheid van wetenschappelijk onderzoek bij toepassingen van innovaties in de praktijk (Living Labs).

Tot slot ontwikkelen zich binnen de technische wetenschappen steeds sterkere vormen van samenwerking. Zo heeft 4TU, het samenwerkingsverband tussen de vier technische universiteiten, zich stevig geïnstitutionaliseerd en wordt er in de sector op disciplinair niveau samengewerkt in onderzoekscholen of rond een gezamenlijke infrastructuur, bijvoorbeeld op het gebied van nanotechnologie. Overigens is er voor de technische wetenschappen nog veel te winnen door de verdere structurering van disciplinaire samenwerkingsvormen en door de inzet op het verwerven en financieren van een gezamenlijke, grootschalige onderzoekinfrastructuur. Het is een van de doelstellingen van dit *Sectorbeeld Technische wetenschappen* om hieraan een verdere impuls te geven.

3.2 Disciplinaire basis en scherpe keuzes

De sectorplanmiddelen zijn niet toereikend om de gesignaleerde knelpunten over de volle breedte van de techniek weg te nemen. Daarom worden er in dit sectorbeeld scherpe keuzes gemaakt om de onderzoekbasis op een beperkt aantal focusgebieden betekenisvol te versterken. Deze gebieden zijn gekozen op grond van hun betekenis voor het onderwijs en de wetenschappelijke en maatschappelijke impact van het onderzoek. Dit heeft, in samenspraak met het wetenschappelijke veld, geleid tot de keuze in dit sectorbeeld om de versterking te richten op de nationale kwaliteiten in de construerende technische wetenschappen. De motivering voor deze keuze is ingegeven door het belang van onderzoek en onderwijs in de construerende technische wetenschappen voor de Nederlandse (maak)industrie, en voor de technologische innovaties die nodig zijn voor het oplossen van de grote maatschappelijke uitdagingen. Deze keuze heeft tevens de steun van het Nederlandse bedrijfsleven bij monde van VNO-NCW, met als kanttekening dat voor hen – gegeven de beperkte hoeveelheid beschikbare middelen - nog scherpere keuzes gemaakt hadden mogen worden. Tevens geldt voor de construerende ingenieurswetenschappen, meer dan voor de ontwerpende disciplines, dat met de grote druk op de eerste geldstroommiddelen en de wijze van bekostiging van de technische wetenschappen, ook de investeringen in up-to-date onderzoeksapparatuur en –infrastructuur onder druk zijn komen te staan.

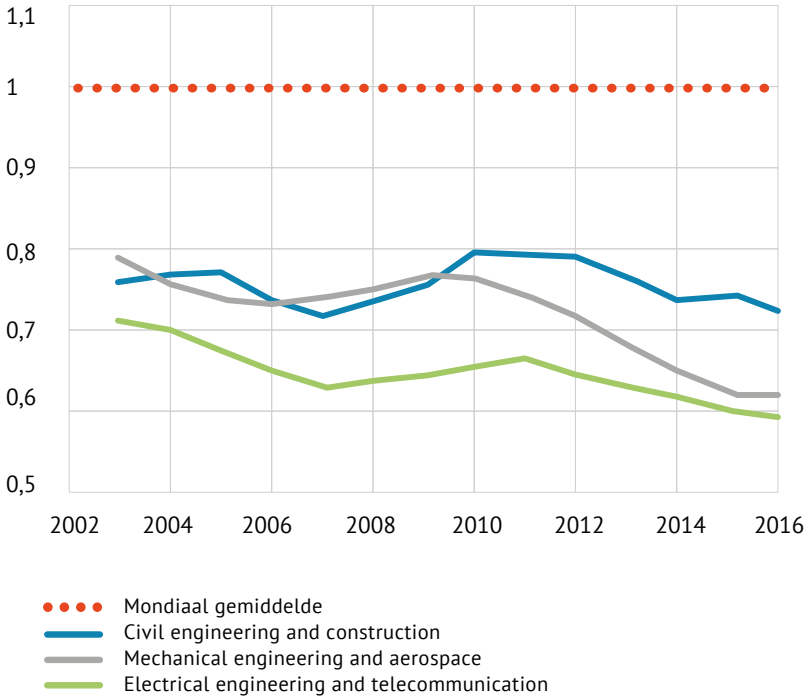
De disciplinaire basis voor de construerende technische wetenschappen vinden we in de werktuigbouwkunde (*mechanical engineering*), elektrotechniek (*electrical engineering*) en civiele techniek (*civil engineering*). Daarbij wordt het onderzoeksveld van de luchtvaart- en ruimtevaarttechniek (TUD-AE) in dit sectorbeeld meegenomen binnen de werktuigbouwkunde. Deze keuze wordt gerechtvaardigd door de internationaal onderscheidende kwaliteit en positie van het onderzoek, en de nauwe aansluiting ervan op het veld van werktuigbouwkunde. De onderzoekgroepen binnen de lucht- en ruimtevaart die zich in belangrijke mate richten op assessments, transport, design en milieueffecten worden hiervan uitgesloten.

Daarnaast is een aantal wetenschapsgebieden met naam genoemd die buiten de financiering van de sectorplannen zijn gehouden, ondanks dat ze kenmerken dragen van de construerende technische wetenschappen en eveneens van betekenis zijn voor onderwijs, industrie en maatschappelijke uitdagingen. Zo blijft het onderzoek in de biomechanica buiten dit sectorbeeld voor de techniek, met uitzondering van die onderzoeksgroepen die zich richten op de constructie van materialen of mechanica die een functie hebben buiten het lichaam.

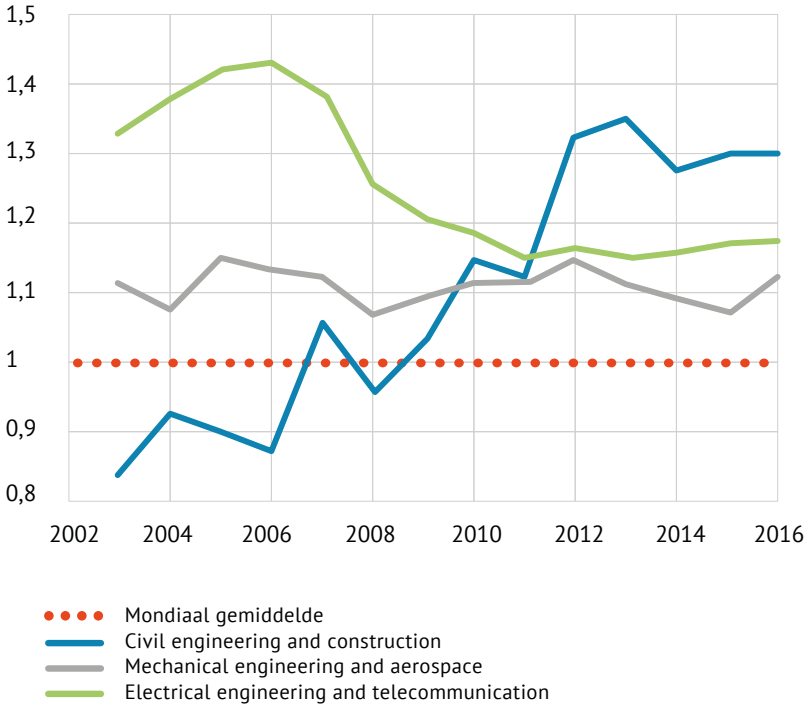
Hetzelfde geldt voor de onderzoeksvelden die zich richten op toepassingen in de automotive, bouw, landbouw, scheepvaart en offshore en op gebieden als technische bedrijfskunde of *design engineering*. Dit met uitzondering van het basis technologisch onderzoek naar materialen, mechanica, componenten en regeltechniek binnen deze disciplines, waar dit direct aansluit op de kerndisciplines waarop het sectorbeeld zich richt. Een beschrijving van de deelnemende construerende ingenieurswetenschappen is gegeven in hoofdstuk 4. De niet-deelnemende technische wetenschappen presenteren zich met hun belangrijke bijdragen aan het totale techniekonderzoek en -onderwijs in hoofdstuk 5. Hun noodzaak voor versterking wordt aangegeven.

De sectorale investeringen beogen het uitbreiden van de onderzoekscapaciteit in de construerende wetenschappen en het aantrekken en behouden van (nieuw) onderzoektalent. Het sectorplan richt zich daarbij tevens op een aantal overkoepelende doelen, zoals strategische samenwerking tussen de instellingen op het gebied van onderzoek, onderwijs en maatschappelijke doelen. De grafieken hieronder laten op basis van gegevens van het Rathenau Instituut zien dat de relatieve aandacht voor het wetenschappelijk onderzoek in Nederland voor deze disciplines sterk achter blijft bij het mondiaal gemiddelde en bovendien een structureel dalende tendens kent. Tevens laten de gegevens zien dat, ondanks de dalende inzet op onderzoek in deze velden, het Nederlandse onderzoek nog steeds een bovengemiddelde impact heeft. Kwaliteit dus, die onder druk staat en het versterken meer dan waard is.

Figuur 3a – Onderzoekspecialisatie (OSI) van Nederland in de geselecteerde techniekdisciplines



Figuur 3b – Citatie-impact (CI) van Nederland in de geselecteerde techniekdisciplines



De relatieve omvang van het Nederlandse onderzoek in werktuigbouw, elektrotechniek en civiele techniek, zoals gemeten met de OSI, is de afgelopen jaren sterk teruggelopen (3a).
De citatie-impact van de gebieden is echter nog steeds zeer hoog (3b). Bron: CWTS/Rathenau.

Voor een succesvolle sectorale aanpak op de geprioriteerde wetenschapsgebieden is sectorale samenwerking, afstemming en taakverdeling cruciaal. In navolging van het bètadecanenoverleg, zijn de techniekdecanen een techniekoverleg gestart, waarin de technische faculteiten van de 4TU's en de Rijksuniversiteit Groningen deelnemen. Dit overleg, waarin de sectorplandisciplines domineren, heeft zich ondertussen ook tot doel gesteld om de samenwerking binnen de brede technische wetenschappen structureel te gaan versterken.

3.3 Integrale versterking van de disciplines

De gedeelde problematiek van de geprioriteerde basisdisciplines van de technische wetenschappen, zoals beschreven in paragrafen 2.2 en 3.2, biedt de kans om gezamenlijk te werken aan oplossingen terwijl de disciplines nieuwe inzichten en *best practices* met elkaar delen.

Als eerste stap hiertoe hebben de disciplines elk hun wetenschappelijke uitdagingen en ambities voor de toekomst beschreven en deze focusgebieden met elkaar gedeeld. Deze zijn beschreven in hoofdstuk 4. Dit draagt bij aan de versterking van de nationale taakverdeling over en concentratie van onderzoek in zwaartepunten aan de individuele instellingen. Door het creëren van nieuwe stafposities in de zwaartepunten wordt de basis van de disciplines toekomstbestendig gemaakt en een sterke uitgangspositie voor verdere interdisciplinaire samenwerkingsverbanden gecreëerd. Hierbij wordt met de financiering per positie ruimte

gecreëerd voor competitieve startpakketten om de internationale concurrentiepositie van de disciplines te versterken; in andere woorden: een budget per staflid dat richting integrale kosten gaat. Aanpalend zullen de budgetten in de tweede geldstroom worden verhoogd voor de gekozen focusgebieden en de aan te stellen wetenschappers, zoals in hoofdstuk 7 is beschreven.

Daarnaast wordt ingezet op het versterken van de verbinding van onderzoek en onderwijs. Dit geldt in het bijzonder voor de koppeling van de gedefinieerde zwaartepunten in onderzoek met het aanbod aan masteropleidingen of *master tracks*, zodat een 'Universiteit van Nederland' ontstaat. Verder zullen de sectorplanmiddelen worden aangewend voor de noodzakelijke *outreach* naar het primair en voortgezet onderwijs, om zo het aantal studenten in de techniek verder te verhogen. Specifieke maatregelen moeten bijdragen aan het verbeteren van het aandeel vrouwen en minderheden in de studentenpopulatie. Ook wordt ingezet op een verbetering van de opzet en vergroting van de werfkracht van de lerarenopleiding, met name voor het hbo, zodat het aantal academisch geschoolde docenten in het hbo significant stijgt.

Science LinX, onderdeel van de Faculty of Science and Engineering bij RUG, coördineert programma's om scholieren, docenten, non-profit organisaties en het algemeen publiek te informeren over en te betrekken bij onderzoek van de faculteit.
Foto: Bram Belloni

Tot slot zullen de versterkingen in de basis van de zwaartepunten van onderzoek worden ingezet om een sterk fundament te creëren voor de participatie in de strategische programmering voor maatschappij en innovatie overeenkomstig de NWA. Ook de publiek-private samenwerkingen zullen worden versterkt om verder bij te dragen aan het missiegedreven innovatiebeleid en de topsectoren.

Om al deze ambities ten volle waar te maken, is het beschikbare budget onvoldoende. Toch zal met globaal M€ 20 per jaar voor de geselecteerde disciplines een aanzienlijke stap in de goede richting kunnen worden gemaakt als alle betrokkenen zich voor de bovenstaande doelen inspannen. Om de universiteiten hiervoor een helder kader te bieden bij het opstellen van de plannen, is in tabel 4 hieronder al een verdeling van het budget over de disciplines gemaakt. Deze onderverdeling is een afspiegeling van vele factoren. Denk aan de hierboven beschreven problematiek en ambities, de voorziene uitdagingen voor de toekomst, het experimentele dan wel theoretische karakter van de disciplines met de al dan niet bijbehorende behoefte aan

infrastructuur, de huidige aantallen staf en studenten en de daarin voorziene groei, en tenslotte een inschatting van de mogelijkheid om de beschikbare posities de komende jaren op adequate wijze in te vullen. Bij de verdeling is uitgegaan van het jaarlijkse eerste geldstroombudget in de periode 2020-2024 (M€ 17 – zie tabel 2 in hoofdstuk 2). Na advies van de Commissie Van Duijn zullen de middelen vanaf 2025 in de eerste en tweede geldstroom indalen.

Tabel 4 – Middelenverdeling over de drie technische disciplines

Discipline	Jaarlijks beschikbaar in eerste geldstroom
Werktuigbouw	€ 8.500.000,=
Elektrotechniek	€ 5.000.000,=
Civiele Techniek	€ 3.500.000,=
Totaal per jaar 2020-2024	**€ 17.000.000,=**
Opstartjaar (begrotingsjaar 2019)	**€ 15.600.000,=**

De in tabel 4 genoemde budgetten zijn totalen per discipline en bevatten zowel de middelen voor posities als voor de centrale doelen zoals beschreven in paragraaf 2.6. Daarnaast zullen tweede geldstroommiddelen worden ingezet voor flankerend beleid, zoals beschreven in hoofdstuk 7.

Opstelling voor onderzoek naar hoogspanning bij Faculteit van Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica van TU Delft.
Foto: EWI TUD

4 De geprioriteerde disciplines in de technische wetenschappen

4.1 Inleiding

Het voorliggende sectorbeeld richt zich op de versterking van de disciplinaire onderzoekbasis van de construerende technische wetenschappen. Deze vinden we in de disciplines van achtereenvolgens de werktuigbouwkunde *(mechanical engineering)*, elektrotechniek *(electrical engineering)* en civiele techniek *(civil engineering)*. Om te borgen dat de betrokken financiële injectie voor de betreffende disciplines van substantiële betekenis is, zijn scherpe keuzes gemaakt. Het sectorbeeld richt zich op de kerndisciplines van de genoemde technische wetenschapsvelden. Verwante gebieden in de transport, scheepsbouw en bouwkunde worden buiten beschouwing gelaten omdat ze geen deel uitmaken van de gekozen kerndisciplines, ook al kunnen ze technisch of construerend van aard zijn.

Voor dit hoofdstuk hebben landelijke schrijfteams van vooraanstaande onderzoekers uit de betrokken universiteiten een actuele schets gegeven van hun wetenschapsdiscipline. In de beschrijving wordt ingegaan op het huidige universitaire landschap rond de drie of vier vakgebieden of kerndisciplines binnen de werktuigbouwkunde, elektrotechniek en civiele techniek waarop het onderzoek in Nederland zich onderscheidt. Vervolgens wordt voor ieder van de drie basisdisciplines in een omgevingsanalyse beschreven welke maatschappelijke en wetenschappelijke ontwikkelingen en uitdagingen voor de betreffende discipline van belang zijn. Tot slot worden voor de onderscheidende vakgebieden of kerndisciplines in de werktuigbouwkunde, elektrotechniek en civiele techniek een beperkt aantal focusgebieden geselecteerd die bij uitstek van belang zijn voor de verdere ontwikkeling van het wetenschappelijk onderzoek in deze disciplines. De focusgebieden beschouwen we als de kern van dit sectorbeeld. Het is een beperkt aantal afgebakende onderzoeksrichtingen waarvoor geldt dat:

- het onderzoek in Nederland relatief sterk is en zich mondiaal kwalitatief onderscheidt;
- ze tot de onderzoekbasis behoren die van groot belang is voor de toekomstige wetenschappelijke en maatschappelijke impact van het betreffende onderzoekveld;
- ze in de gezamenlijke visie van onderzoekers versterking behoeven om de kwaliteit van onderzoek en onderwijs te kunnen behouden.

Aan het slot van ieder van de drie disciplinebeelden wordt in een tabel door middel van sterretjes aangegeven welke universiteiten kunnen participeren in de versterking van de geïdentificeerde

focusgebieden. Een sterretje dat voor een universiteit (faculteit) bij een specifiek focusgebied is geplaatst, betekent dat (i) die universiteit (faculteit) een erkende sterkte op dat gebied heeft opgebouwd, (ii) het de strategie en ambitie van die faculteit is om die sterkte verder uit te bouwen, en (iii) het een gezamenlijke conclusie van 'het veld' is dat de betreffende faculteit met de versterking van haar profiel bijdraagt aan de beoogde nationale versterking van het onderzoek op het betreffende focusgebied. Vervolgens wordt in een tweede tabel weergegeven wat voor de betreffende discipline de ontwikkeling is van de aantallen studenten en omvang van de betrokken wetenschappelijke staf.

4.2 Werktuigbouwkunde

Het vakgebied van de construerende werktuigbouwkunde houdt zich bezig met drie aspecten: (i) het beschikbaar maken van energie in verschillende vormen (denk aan warmte, elektriciteit en chemische energie). (ii) het ontwerpen van werktuigkundige systemen en materialen om energie om te zetten in arbeid en zo processen uit te voeren of producten te maken. (iii) de regeltechniek waarmee processen efficiënt, duurzaam en betrouwbaar worden gemaakt.

Vakgebieden binnen de werktuigbouwkunde:

(i) Thermodynamica, stromingsleer
(ii) Mechanica, statica, dynamica, materiaalkunde
(iii) Meet- en regeltechnieken

4.2.1 Universitair landschap

De drie funderende subdisciplines van de moderne werktuigbouwkunde zijn, in lijn met de hierboven geschetste onderverdeling: (i) *thermo-fluids engineering*, (ii) *mechanical & materials engineering* en (iii) *systems & control engineering*. Hierbinnen hebben de universiteiten focus aangebracht in onderscheidende deelgebieden. Afstemming vindt met name plaats via de landelijke onderzoeksscholen J.M. Burgerscentrum (JMBC), Graduate School on Engineering Mechanics (EM) en Dutch Institute of Systems and Control (DISC). Daarnaast zijn er binnen de subdisciplines competentiegebieden, elk met een eigen overleg- cq. afstemorgaan, waaronder het Materials innovation institute (M2i), het 4TU Research Centre High-Tech Materials, het 4TU Research Centre Energy en Holland Robotics. Er is ook afstemming met de relevante TO2-instituten.

Voorbeelden van maatschappelijke bijdragen per subdiscipline:

(i) Machines voor opwekking van elektriciteit op basis van hernieuwbare brandstoffen. Energieopslagapparaten, bijvoorbeeld waterstof en batterijen.
(ii) Instrumenten voor minimaal invasieve operaties. Sterkere en lichtere materialen voor vliegtuigen, schepen en medische prothesen.
(iii) Geautomatiseerde warehouses en coöperatieve machines en tools voor de hightechindustrie. Zelfrijdend vervoer.

Het universitaire landschap voor de werktuigbouwkunde wordt gevormd door een viertal middelgrote onderzoekscapaciteiten met een vaste wetenschappelijke staf in de orde van 100 fte, bestaande uit grote delen van de faculteiten Werktuigbouwkunde, Maritieme Techniek & Technische Materiaalwetenschappen (3mE) en Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek (AE) van de TUD, de Faculteit Mechanical Engineering van de TU/e en een deel van de Faculteit Engineering Technology in Twente. Daarnaast zijn kleinere onderzoekscapaciteiten op dit gebied te vinden binnen Wageningen University & Research (WUR) en de Faculty of Science and Engineering van de Rijksuniversiteit Groningen (RUG), met een maximale omvang van de vaste wetenschappelijke staf in de orde van grootte van 25 fte.

Onderwijs

Aan de drie technische universiteiten van Delft (TUD), Eindhoven (TU/e) en Twente (UT) worden vergelijkbare brede bacheloropleidingen Werktuigbouwkunde gegeven, terwijl de Rijksuniversiteit Groningen (RUG) een masteropleiding verzorgt en Wageningen University & Research (WUR) multidisciplinaire opleidingen op het gebied van *agro & food technology*. Het landelijk aanbieden van een bacheloropleiding Werktuigbouwkunde, verspreid over Nederland, is nodig om te voldoen aan de grote en toenemende vraag vanuit industrie en maatschappij. Naast deze brede opleidingen kent Nederland een aantal specialistische werktuigbouwkundige bachelors, onder andere voor de werkvelden luchtvaart- en ruimtevaarttechniek en maritieme techniek. Ook worden er ingenieursopleidingen aangeboden met een sterke werktuigbouwkundige component in Groningen en voor de *agro & food technology* in Wageningen. Dit is aantrekkelijk voor de instroom van studenten met een specifieke interesse en komt ook de landelijke spreiding ten goede. Van recente datum is de samenwerking tussen de Vrije Universiteit Amsterdam (VU) en UT om een gezamenlijke werktuigbouwkundige opleiding te starten in Amsterdam.

Na de brede bachelor kunnen studenten zich specialiseren via een divers palet aan masterprogramma's. Deze passen bij de specifieke onderzoeksterktes van de onderzoeksgroepen van de TUD, TU/e, UT, RUG en WUR en komen tegemoet aan de vraag vanuit de industrie naar hoog opgeleide ingenieurs. Het 4TU-samenwerkingsverband biedt ook gezamenlijke masteropleidingen aan, waaronder de master Sustainable Energy Technology (SET). Tot slot verzorgen de eerder genoemde landelijke onderzoeksscholen disciplinespecifiek onderwijs voor promovendi, en zijn er bij de Professional Doctorate in Engineering (PDEng) programma's binnen de discipline.

Onderzoek

Het onderzoek binnen de werktuigbouwkunde in Nederland is van hoog niveau. Diverse groepen zijn wereldleider en de sterke positie wordt internationaal erkend. De werktuigbouwkunde binnen Nederland scoort hoog in internationale rankings. De gebieden waarbinnen de verschillende universiteiten uitstekend onderzoek doen, zijn samengevat in onderstaande tabel voor de drie subdisciplines zoals boven weergegeven.

Tabel 5 – Huidige profilering van de werktuigbouwkunde in Nederland binnen de drie subdisciplines

Thermofluids Engineering	Mechanical & Materials Engineering	Systems & Control Engineering
Energieopslag en -conversie (hernieuwbare brandstoffen) Schone systemen/voertuigen (incl. vliegtuigen en schepen) Specifieke onderwerpen zijn: *fuel cells*, waterstof, hernieuwbare brandstoffen Optimalisatie van alternatieve bronnen, materialen en systemen voor het gebruik en transport van warmte (incl. geothermie)	Multifunctionele hybride materiaalsystemen Synthese, analyse en modelleren van materialen en materiaalgedrag: microstructuren en grensvlakken Micro-, macro-, mega- en multi-schaalsystemen: van modelvorming tot productie Biomechatronica	Coöperatieve/interacterende geautomatiseerde en complexe genetwerkte systemen Zelf-lerende en data-driven regelsystemen, computationele methodes voor grootschalige systemen, cyberveiligheid Multi-agent, cyber-fysische systemen, systemen van systemen

Een hoge temperatuur brandstofcel bij TUD, voor onderzoek naar efficiënte en emissievrije omzetting van brandstof in elektriciteit. De brandstofcel kan ook in reversed mode worden gebruikt om brandstof uit elektriciteit te maken met een hogere energiedichtheid dan bijvoorbeeld batterijen.
Foto: TUD/Frank Auperlé

4.2.2 Omgevingsanalyse

De drie genoemde subdisciplines (i) *thermo-fluids engineering*, (ii) *mechanical & materials engineering* en (iii) *systems & control engineering* worden algemeen gezien als de kerndisciplines van de werktuigbouwkunde. In de ontwikkeling van de werktuigbouwkunde naar complexe geïntegreerde systemen is er steeds meer interactie tussen de disciplines. Ook ontwikkelingen binnen andere disciplines, waaronder biologie, natuurkunde, informatica, elektrotechniek en geneeskunde, spelen een rol. Tot slot zijn er ook grote maatschappelijke veranderingen die van invloed zijn, denk aan:

- De transitie naar een CO_2-arme energievoorziening en de vervanging van fossiele basisbrandstoffen door hernieuwbare vormen van energie;
- De trend naar zowel kleinere als grotere (materiaal- en productie)systemen met hogere prestaties onder extremere condities en met hoge eisen aan duurzaamheid, personalisering en grondstofefficiënt gebruik van materialen;
- De opkomst van big data en kunstmatige intelligentie maken de control- en regeltechniek van genetwerkte mechanische systemen mogelijk. Dit is een grote stap naar meer autonoom functionerende systemen en een betere interactie met elkaar en met de menselijke omgeving.

Bovengenoemde veranderingen en de sterktes binnen de universiteiten leveren een zeer relevante bijdrage aan de maatschappelijke uitdagingen binnen ten minste tien NWA-routes (zie kader).

NWA-routes waar werktuigbouwkunde een essentiële bijdrage heeft:

1. Blauwe route: water als weg naar innovatieve en duurzame groei
2. Circulaire economie en grondstoffenefficiëntie: duurzame circulaire impact
3. Duurzame productie van gezond en veilig voedsel
4. Energietransitie
5. Gezondheidszorgonderzoek, preventie en behandeling
6. Logistiek en transport in een energieke, innovatieve en duurzame samenleving
7. Materialen - Made in Holland
8. Meten en detecteren: altijd, alles en overal
9. Smart industry
10. Sport en bewegen

Bij de UT wordt een schaatspak getest in een windtunnel.
Foto: UT

Investeren in deze subdisciplines zal dan ook een grote impact hebben op het behoud en de verdere versterking van de internationale (economische) concurrentiepositie van Nederland, en de internationale allure van het werktuigbouwkundig academisch onderzoek in Nederland.

Naast hoogstaand wetenschappelijk onderzoek zien de universiteiten het als een gezamenlijke kerntaak om zoveel mogelijk goede werktuigbouwkundige ingenieurs op te leiden. De industrie staat te springen om hoogopgeleid technisch personeel. Beroepen binnen de discipline werktuigbouwkunde worden gezien als zogeheten kansrijke beroepen. De afgelopen jaren kennen de universiteiten dan ook een flinke groei in het aantal bachelorstudenten binnen deze discipline. Dit leidt, in combinatie met een verhoogde zijinstroom, ook tot een sterke aanwas van het aantal masterstudenten. Deze groei is een succes, maar zorgt ook voor uitdagingen voor nu en de komende jaren, zoals een aanzienlijke werkdruk onder het wetenschappelijk personeel. Het gevolg is dat de onderzoekscapaciteit toenemend onder druk staat. Daarbij leiden de beperkte middelen in nationale financieringsinstrumenten, speciaal voor het wetenschappelijk onderzoek in het techniekdomein, tot een hoge aanvraagdruk. Samen met de hoge inzet in het onderwijs heeft dit een negatief effect op de werkdruk van het wetenschappelijk personeel.

De uitstekende internationale reputatie van de Nederlandse werktuigbouwkunde wordt, naast de hoge kwaliteit van de wetenschappers, ook bepaald door uitstekende laboratoria en de geavanceerde onderzoekinfrastructuur voor de combinatie van experimenteel werk en theoretische studies. Deze opgebouwde infrastructuur is toe aan vernieuwing, maar staat eveneens onder druk. De universiteiten hebben de laatste decennia te weinig eerste geldstroommiddelen beschikbaar om grote onderzoeksfaciliteiten te financieren. Nationale middelen uit de investeringsprogramma's van NWO zijn veelal niet toegesneden op de aard van investeringen die de werktuigbouwkundige discipline vraagt. Dit geldt ook voor techniekgeoriënteerde fundamentele onderzoeksprogramma's op de lange termijn.

Door bovengenoemde drie ontwikkelingen dreigt een afname van wetenschappelijke vernieuwingskracht in het zeer belangrijke veld van de werktuigbouwkunde. Dit vormt inmiddels een serieus risico voor de technologisch sterke positie van Nederland in de wereld. Een aanzienlijke investering via het sectorplan ziet de sector als een goed initiatief van de Nederlandse overheid om mitigerend op te treden en te investeren in de toekomst van Nederland als kennisland.

4.2.3 Focusgebieden voor de toekomst

Het is de gemeenschappelijke ambitie om de organisatie van werktuigbouwkunde als discipline te versterken via een nog te vormen nationaal platform werktuigbouwkunde. Via een dergelijk platform kan de discipline zich sterk maken voor de beschikbaarheid van een nationale onderzoekinfrastructuur en afstemming vinden over investeringen voor de toekomst. Dit zal de gezamenlijke impact binnen Nederland en de rest van de wereld verder versterken.

De universiteiten hebben de ambitie om de opgelopen werkdruk te verlagen door de onderzoekscapaciteit te versterken. Door voort te bouwen op de sterktes die nu al aanwezig zijn binnen de universiteiten, kunnen masterstudenten op adequate wijze worden begeleid in een onderzoeksomgeving van hoge internationale kwaliteit. Gezamenlijke inzet op enerzijds het stimuleren van hoge kwaliteit en de interactie tussen de subdisciplines, en anderzijds het in lijn brengen van de capaciteit met de wereldwijde trends, zal de Nederlandse werktuigbouwkunde verder versterken. Hieronder een overzicht van de trends per subdiscipline waaraan de Nederlandse werktuigbouwkunde een significante bijdrage kan leveren:

1 **Thermo-fluids engineering**

De energietransitie van de komende decennia is een stimulans voor grote technisch-wetenschappelijke vernieuwingen binnen de discipline. Deze stellen ons in staat om nieuwe wegen te bewandelen om te voldoen aan de enorm toenemende vraag naar elektrische energie, hernieuwbare brandstoffen en warmte. Na intensief landelijk overleg zijn er twee focusgebieden gedefinieerd en zijn de activiteiten van de verschillende universiteiten opnieuw gepositioneerd voor een transparante en overzichtelijke landelijke afbakening:

a Stromingsleer voor de transitie naar een CO_2-arme energievoorziening

Voor het bufferen van het toenemende aanbod aan zonne- en windenergie zijn (grootschalige) opslagsystemen, gebaseerd op synthetische brandstoffen, nodig. Deze brandstoffen kunnen worden gemaakt uit CO_2, van rookgassen of *air capture*, en uit waterstof. Ook andere hernieuwbare synthetische brandstoffen, zoals metaalpoeders, zijn een optie. Het optimaliseren van de conversie van biomassa en fossiele brandstoffen, in combinatie met methoden voor de opslag en hergebruik van CO_2, is een belangrijk middel om aan de energievraag te kunnen blijven voldoen. In de transportsector neemt de druk toe om fossiele brandstoffen uit te faseren. De technische uitdagingen liggen bij het ontwikkelen van nieuwe methoden en systemen voor de grootschalige omzetting van elektriciteit in brandstof en vice versa. Dit kan bijvoorbeeld door middel van brandstofcellen, electrolysers, nieuwe verbrandingssystemen, -turbines en –motoren en nieuwe hernieuwbare brandstofproductiemethoden. Wetenschappelijke uitdagingen liggen in het bemeten, beschrijven en het fundamentele begrip van de onderliggende processen: reagerende meerfasenstromingen in velerlei vormen. Een krachtige wisselwerking met de chemische technologie is voorzien.

b Transportverschijnselen bij transport en opslag van warmte

Voor de vraag naar warmte zal het gebruik en de optimalisatie van alternatieve warmtebronnen belangrijker worden. Denk hierbij aan geothermische en zonthermische warmtebronnen, en de warmte uit (hernieuwbare) brandstoffen en warmtepompen. Voor de compacte opslag van warmte in nieuwe materialen (o.a. *thermochemical materials* en *phase change materials)* en het efficiënte transport daarvan, zijn nieuwe methoden en systemen nodig. De ontwikkeling daarvan vereist een beter begrip van stroming en warmteoverdracht op de kleinste schaal. Hierbij kan worden gedacht aan massatransport, warmtetransport en chemische reacties in poreuze systemen, vaak in combinatie met faseovergangen (verdampen en condenseren) en volumetrische verwarming van systemen door toevoeging van (nano)deeltjes.

2 **Mechanical & materials engineering**

Het ontwerp en de constructie van werktuigen en hulpmiddelen ondergaat de komende jaren grote veranderingen door de opkomst van *additive manufacturing*, de toenemende aandacht voor interactieve en hybride materialen, de behoefte aan schaalvergroting en -verkleining en het streven naar herbruikbare en duurzame materialen en structuren. Deze veranderingen leiden tot nieuwe multifunctionele en robuuste materialen en structuren. Ze hebben betrekking op mechanische en biologische systemen en spelen op uiteenlopende schaalniveaus een rol, van mega- tot nanostructuren. Binnen deze subdiscipline zijn twee focusgebieden gedefinieerd:

a Functie-integraties in materiaalsystemen

Er is een sterke ontwikkeling gaande naar materiaalsystemen die steeds meer bepaald worden

door de structuur ervan, zoals de configuratie en structuur van eenheden in mechanische hiërarchische opbouw op nano- en microschaal. Hiermee worden de materiaalstructuren interactief (sensorisch en actief zoals in geminiaturiseerde multifunctionele systemen) en daardoor multifysisch responsief. Ook fysische eigenschappen als stijfheid of gewicht kunnen beïnvloed worden. Voor de ontwikkeling van deze materiaalsystemen zijn computerondersteunde ontwerp- en fabricagemethoden (integratie additief-subtractief) nodig. Daarnaast zijn diepgaand begrip en modellering belangrijk van de vaste stof- en vloeistofmechanica en interfaces daartussen op diverse schaalgroottes. Hetzelfde geldt voor de interactie tussen technische en biologische systemen en weefsels. Op deze wijze kunnen enerzijds hogere prestaties worden gerealiseerd met een sterk verminderd materiaalgebruik zoals in lichtgewicht constructies, componenten en protheses. Anderzijds zal een complexe functie-integratie bepalend zijn voor de ontwikkeling van materialen voor biologische toepassingen met een hoge manipuleerbare compatibiliteit.

b Ontwikkeling, optimalisatie en gedrag van nieuwe geavanceerde materialen

Ontwikkelingen als schaalverandering en intensievere interactie met interactieve materialen leiden tot een geheel nieuwe klasse van materialen met ongekende eigenschappen. Materialen worden in veel toepassingen blootgesteld aan extreme condities. Denk bijvoorbeeld aan hoge of lage temperatuur (energieconversie, arctische en cryogeen toepassingen), interactie met omgeving (chemische systemen, het menselijk lichaam), hoge mechanische en dynamische belasting (structurele toepassingen, *deep sea mining)*, of straling (fusiereactoren). Omdat de beperkingen van de materialen in veel gevallen de grenzen van de technologie bepalen, is het nodig om de eigenschappen, functionaliteit en de levensduur van materialen steeds verder te optimaliseren. Tegelijkertijd is het belangrijk de materialen efficiënter te produceren en verwerken in termen van grondstofgebruik, energie en ecologische footprint. Meer inzicht in de structuur(ontwikkeling) en het gedrag van materialen op verschillende lengteschalen via karakterisering en modelvorming is daarom essentieel voor de verdere ontwikkeling van technologisch ontwerpen. Het is ook de sleutel voor de ontwikkeling van de opkomende generatie metamaterialen, met nieuwe innovatieve toepassingen in bijvoorbeeld *soft robotics*.

Metamaterialen verkrijgen hun eigenschappen door hun precieze microstructuur (in plaats van door hun chemische samenstelling). Een manier om structuur aan een materiaal toe te kennen is met origami, de vouwkunst uit Japan: complexe vormen kunnen op heel kleine schaal geproduceerd worden via een 2D-naar-3D fabricageproces.
Foto: TUD

3 Systems & control engineering

De maatschappij staat voor grote uitdagingen op het gebied van vergrijzing, transport en economie. In de toekomst zullen robots steeds vaker worden ingezet als hulpmiddel in complexe en open omgevingen, zoals in zorgcentra, op de weg, in de landbouw en in de industrie. In de maatschappij vindt mede hierdoor ook een enorme vlucht plaats rond automatisering en 'autonomisering'. Deze wordt gevoed door grote technische vernieuwingen binnen de discipline. Nieuwe actuatie- en sensortechnologieën vormen de basis voor de vraag naar geavanceerde regelstrategieën in een omvang en context die ongekend is. Een tweetal prominente voorbeelden daarvan zijn:

a Interactieve, slimme en autonome systemen

In distributiecentra, maakfabrieken, de agro- en foodsector, de luchtvaart en de hightech-industrie is een grote en verregaande vraag naar automatisering. Hierbij gaat het niet alleen om het ontwikkelen van slimmere (autonome) machines, voertuigen en robots, maar ook om de interactie en samenwerking die tussen machines onderling en met mensen plaatsvindt. In beide gevallen zijn er grote regeltechnische uitdagingen om de automatisering op een veilige, energie-efficiënte en betrouwbare manier te realiseren. De wetenschappelijke uitdagingen liggen in het efficiënt verkrijgen van procesdata, het ontwikkelen van slimme zelflerende datagebaseerde regelaars, en het ontwikkelen van gedistribueerde regelingen voor multi-agent mens-machinesystemen. Cyber security van het regelsysteem is hierbij essentieel.

b Ontwerp en ontwikkeling van interacterende geregelde robotsystemen

Een nieuwe industriële revolutie vindt plaats in de robotica. Robots worden niet alleen in de industriële omgeving gebruikt, maar ontwikkelen zich meer en meer tot volledig autonome systemen met toepassingen in bijvoorbeeld *care & cure* en *agro & food*. De technische uitdagingen liggen hier in de ontwikkeling van energie-efficiënte, flexibele, *high precision* robots die naadloos kunnen interacteren met biologische systemen en mensen. De wetenschappelijke uitdagingen liggen in het ontwikkelen van nauwkeurige geregelde (haptische) robotsystemen en het ontwerpen van robots die op een veilige manier taken kunnen uitvoeren in interactie met de mens en zijn omgeving.

Tabel 6 – De universiteiten die willen en kunnen bijdragen aan de versterking van de focusgebieden. Deze landelijke afspraken krijgen verder vorm in een nationaal platform voor de werktuigbouwkunde.

Focusgebied		TUD 3mE*	TUD AE*	TU/e	UT	RUG	WUR
Thermo-fluids	CO_2-arme energievoorziening	•	•	•			
	Warmtetransport en -opslag	•			•		
Mechanical & materials	Materiaalsystemen		•	•	•		
	Geavanceerde materialen	•		•	•	•	
Systems & control	Autonome systemen	•	•	•			•
	Interacterende robotsystemen		•		•	•	•

** betreft de TUD faculteiten voor mechanical (3mE) en aerospace (AE) engineering.*

Onderstaande tabel toont de aantallen studenten en wetenschappelijk staf van de laatste jaren en de ambities voor 2024. Deze getallen zijn de optelsom van de de door de universiteiten aangeleverde voorlopige cijfers. In de uiteindelijke sectorplannen zullen deze getallen met duidelijke aanwijzingen worden weergegeven per universiteit.

Tabel 7 – Ontwikkeling en prognose van student- en stafgegevens voor de discipline werktuigbouwkunde

Werktuigbouwkunde	2016	2017	2018	2024
aantallen ingeschreven studenten % vrouwelijke studenten	10.727 14%	11.092 15%	11.583 15%	13.931 20%
vast wetenschappelijk personeel in fte % vrouwelijk vast personeel	336 13%	355 12%	375 13%	483 17%
tijdelijk wetenschappelijk personeel in fte % vrouwelijk tijdelijk personeel	1.059 24%	1.289 21%	1.306 21%	1.511 27%

4.3 Elektrotechniek

De elektrotechniek behoort tot de toegepaste wetenschap, met veel aspecten van construerende technische wetenschappen en de fundamentele wetenschap. Het is de technische discipline die zich bezighoudt met de studie en toepassing van elektriciteit en elektromagnetische velden. Binnen de elektrotechniek worden drie kerndisciplines onderscheiden (zie kader).

Kerndisciplines binnen elektrotechniek:

(i) Communicatie en signaalbewerking

(ii) Elektronische componenten, circuits en systemen

(iii) Elektrische energieconversie

4.3.1 Universitair landschap

Het wetenschappelijke werk op het vakgebied van elektrotechniek vindt plaats aan de technische universiteiten van Twente (UT), Eindhoven (TU/e) en Delft (TUD) en aan Wageningen Universiteit & Research (WUR). Meer specifiek bij de afdeling Electrical Engineering van de Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science van de UT; de Faculteit Electrical Engineering van de TU/e; en de afdeling Electrical Engineering van de Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde & Informatica van de TUD. Vanuit WUR is de leerstoelgroep Environmental Technology bij het vakgebied betrokken. De onderzoekscapaciteiten op het gebied van de elektrotechniek omvatten in Eindhoven, Delft en Twente een vaste wetenschappelijke staf in de orde van grootte van 50 tot 100 fte. Die van WUR is met een maximale vaste staf van 5 fte kleiner.

De drie kerndisciplines binnen de elektrotechniek zijn: (i) de communicatie en signaalbewerking, met activiteiten in de geïntegreerde fotonica en optische communicatie, draadloze communicatie en signaalbewerking voor medische toepassingen; (ii) de elektronische compo-

nenten, circuits en systemen met activiteiten in analoge en RF elektronica, digitale elektronica en systemen en More than Moore-technologieën; en (iii) de elektrische energieconversie met de onderdelen actuatoren met hoge snelheid- en precisie- en energietechniek. Het vakgebied leunt sterk op de disciplines wiskunde, informatica en natuurkunde, in het bijzonder op het domein elektromagnetisme. Op zijn beurt draagt de elektrotechniek bij aan fundamentele ontwikkelingen op het vlak van regeltechniek, signaalbewerking, informatie- en communicatietheorie en materiaalkunde. Aan de toepassingsgerichte kant is het scala aan onderwerpen bijzonder breed, omdat toepassingen op basis van elektriciteit en magnetisme (inclusief licht) vaak doorslaggevende voordelen hebben. Er is dan ook een direct verband met negen van de twaalf zogenaamde *disruptive technologies*, benoemd door McKinsey in 2013. Ook is er nauwe samenwerking met zowel Nederlandse als internationale industrie en universiteiten en is men erg succesvol in het verwerven van nationale en internationale fondsen. Elektrotechniek is wereldwijd een bloeiend en invloedrijk vakgebied, verenigd in de grootste technisch-wetenschappelijke non-profitvakvereniging in de wereld, namelijk het Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

De maatschappelijke behoefte aan elektrotechnische kennis en de sterke onderlinge synergie van de kerndisciplines maakt dat elk van de drie universiteiten het vakgebied in grote mate compleet wenst af te dekken. Desondanks zijn er per universiteit focusgebieden ontstaan op het gebied van onderzoek. Enkele voorbeelden van afgesproken verdelingen zijn:

- In de fotonica werkt de TU/e aan InP-geïntegreerde optica en systemen, terwijl de UT zich richt op silicium geïntegreerde optica.
- Voor de signaalbewerking zijn focusgebieden in medische toepassingen te vinden bij de TU/e en biosensorsystemen bij de UT. De TUD bestudeert radar.
- Tenslotte zijn ook de afbakeningen op het gebied van computeronderzoek helder verdeeld met *quantum computing* bij de TUD, *embedded systems* bij de TU/e en energie-efficiënte architecturen bij de UT.

De drie organisaties stemmen op regelmatige basis af, zowel formeel (EE-kamer, gezamenlijke symposia en projecten en gezamenlijke onderwijs- en onderzoekvisitaties in 2016 en 2017) als informeel op basis van persoonlijke contacten. Verder is er ook binnen de kerndisciplines een uitstekende gezamenlijke samenwerking en afstemming.

4.3.2 Omgevingsanalyse

Voor belangrijke maatschappelijke thema's, zoals duurzame energievoorziening, gezondheid en communicatie, wordt een steeds sterker beroep gedaan op de elektrotechniek. De technische universiteiten leiden daartoe breed inzetbare ingenieurs op met kennis van het hele vakgebied. Ook doen ze met behulp van ruim zeshonderd promovendi onderzoek dat deze thema's adresseert. Nieuwe ontwikkelingen waarbij elektrotechniek een hoofdrol zal spelen zijn er legio: denk bijvoorbeeld aan fotonica, autonoom lerende systemen, quantumcomputers, complexiteit in systemen, ontwikkeling van duurzame energiesystemen en medische diagnostiek.

Onderwijs

TUD, UT en TU/e bieden alle drie een brede bacheloropleiding in de elektrotechniek aan. Na de bachelor kunnen studenten de master Elektrotechniek met diverse specialisaties volgen,

of kiezen uit een aantal andere masteropleidingen waarin de drie faculteiten participeren, waaronder de door 4TU aangeboden master Embedded Systems en de Europese *joint masters* SENSE en SELECT. Verder participeren de elektrotechniekfaculteiten in onderzoekscholen gericht op het PhD-onderwijs. Voorbeelden hiervan zijn COBRA, DISC en MESA+. De instroom aan studenten is de afgelopen jaren weliswaar sterk gestegen (met een factor drie t.o.v. 2010), maar niet genoeg om in de grote behoefte aan elektrotechnisch ingenieurs te kunnen voorzien. Daarom is er de afgelopen jaren structureel nieuw personeel aangetrokken (ook vervanging vanwege pensioen). Dit zal de komende tijd in een versneld tempo doorgaan. Maar de krapte op de arbeidsmarkt laat zich ook hier voelen: het verkrijgen en behouden van talent is moeilijk. De ambitie van de drie faculteiten is dan ook om een verdere groei te faciliteren met behoud van de huidige zeer hoge kwaliteit van de Nederlandse elektrotechnisch ingenieur.

Onderzoek, financiering en samenwerking
Het structurele tekort aan eerste geldstroombudget van de afgelopen jaren heeft geleid tot een sterke inzet op het binnenhalen van derde geldstroomprojecten. Hierdoor kreeg toegepast onderzoek extra nadruk, waardoor er op lokaal niveau zwakke plekken zijn ontstaan in het meer fundamentele onderzoek en in de onderzoekinfrastructuur. Dit bedreigt momenteel de samenhang en het meer fundamentele onderzoek binnen het vakgebied, en zal op de lange termijn ook de rest van het onderzoek en het onderwijs aantasten. Er zijn dwarsverbanden die een sterkere rol zullen gaan spelen, bijvoorbeeld met de vakgebieden informatica, biomedische technologie en werktuigbouwkunde. Voor een groot deel zijn deze geformaliseerd binnen het 4TU-verband. Vooral de samenwerking met informatica zal verder toenemen in de komende jaren, bijvoorbeeld op het vlak van autonome (gedistribueerde) systemen en kunstmatige intelligentie.

Binnen het vakgebied is er veel formele (inter)nationale samenwerking. Een voorbeeld hiervan is de nationale samenwerking op het gebied van ICT, verenigd binnen het NIRICT, PRoRISC, SAFE en PROGRESS. Binnen NanolabNL werkt men samen op het gebied van *cleanrooms* en JePPIX is uitgegroeid tot een Europees samenwerkingverband op het gebied van geïntegreerde fotonica, geleid vanuit Nederland. Ook binnen 4TU-verband zijn er een aantal grote gezamenlijke projecten, zoals Plantenna en DeSIRE. Verder zijn de stafleden van de drie faculteiten erg actief in de internationale organisaties IEEE en URSI, die veel conferenties organiseren en wetenschappelijke tijdschriften uitgeven. Overwogen wordt om een nationaal platform voor elektrotechniek op te richten.

4.3.3 Focusgebieden voor de toekomst

De elektrotechniek wil zichzelf de komende decennia ontwikkelen in de drie genoemde kerndisciplines, met extra staf en nieuwe infrastructuur. De nadruk zal hierbij liggen op de fundamentele kanten die de afgelopen jaren te weinig aandacht hebben gekregen. Tegelijkertijd willen de universiteiten recht blijven doen aan de maatschappelijke vraag en het toepassingsgerichte karakter van het vakgebied. Ook zullen er meer gezamenlijke programma's worden ingericht voor het opleiden van promovendi, gekoppeld aan de sterktes per universiteit.

Nederland heeft internationaal gezien een sterke wetenschappelijke reputatie binnen de drie kerndisciplines van de elektrotechniek die in dit sectorbeeld centraal staan. Onderstaande tabel geeft aan wat de investeringsgebieden zijn waarin de universiteiten zich verder willen

versterken. Investeringen zijn voorzien in zowel staf als laboratoria en sluiten aan bij de sterktes van de Nederlandse elektrotechniek. De investerings- of focusgebieden zijn weliswaar ondergebracht bij één kerndiscipline, maar hebben meestal ook directe en sterke verbanden met de overige twee. Alle onderwerpen dragen bij aan de synergie en de fundamenten van het vakgebied en zullen in de toekomst een belangrijke bijdrage leveren aan internationaal erkende uitdagingen zoals het streven naar More than Moore, de *fully connected world*, honderd procent duurzame energie, het bestrijden van kanker en een circulaire economie.

Tabel 8 – Investeringsgebieden in de elektrotechniek

Kerndiscipline	Investeringsgebied	Gerelateerde sterktes
Communicatie en signaalbewerking	Convergentie radio en fotonica	Fotonica, draadloze en optische communicatie, More-than-Moore technologie
	Elektromagnetische signaalopwekking en –ontvangst en signaal bewerking	Draadloze communicatie, signaalbewerking, More-than-Moore technologie, analoge elektronica
Elektronische componenten, circuits en systemen	Ontwerpmethodieken voor elektronica en systemen	Analoge elektronica, More-than-Moore technologie, digitale elektronica en systemen
	More-than-Moore technologieën	Analoge elektronica, More-than-Moore technologie
Elektrische energieconversie	Gedistribueerde elektrische Energievoorziening	Energietechniek
	Elektromechanische systemen en vermogenselektronica	Actuatoren, regelsystemen

De zes genoemde focusgebieden gaan de fundamenten van elektrotechniek op de volgende aspecten versterken:

1 **Convergentie radio en fotonica.** Onze samenleving wordt meer en meer afhankelijk van een alom aanwezige, betrouwbare en veilige ICT-infrastructuur. In de voorbije decennia is de behoefte aan data en communicatiesnelheid exponentieel gegroeid, en deze zal in de toekomst sterk blijven stijgen. Om die groei te faciliteren is een radicale omslag nodig, waarin optische communicatiesystemen hand in hand gaan met (traditionele) elektronische systemen. Hybride geïntegreerde optisch-elektronische circuits (gebaseerd op indium phosphide- en/of siliciumtechnologieën) en de convergentie van optische en radiogebaseerde systemen zijn hierin zeer belangrijk. Denk bijvoorbeeld aan optische signaalroutering, radio over fiber en *free space optics*. Nederland neemt hierbij wereldwijd al een vooraanstaande rol in (onder andere via PhotonDelta en IPI).

2 **Elektromagnetische signaalopwekking en –ontvangst en signaalbewerking.** In de toekomst zal elektromagnetische communicatie en *sensing* via tientallen geïntegreerde antennes gebeuren. Zo kunnen bijvoorbeeld auto's autonoom rijden door het synchroon combineren van informatie uit tientallen sensoren (onder andere radar en lidar) uit de omgeving. De fundamentele uitdaging bestaat uit het efficiënt 'netwerken' van grote gedistribueerde datastromen om hieruit nuttige informatie te kunnen extraheren. De te ontwikkelen technologie bestrijkt een breed scala van expertises, variërend van elektromagnetische modellen voor grootschalige

antennestelsels tot aan de benodigde realtime signaalprocessing (o.a. datagebaseerd op basis van *machine learning*) in combinatie met statistische modelvorming. Soortgelijke uitdagingen vinden we ook bij signaalbewerking voor medische toepassingen, waar een veelvoud van hoge resolutie sensordata nieuwe diagnostische technieken en beeldvormende modaliteiten mogelijk maakt op een niveau dat de menselijke capaciteiten ontstijgt.

3 **Ontwerpmethodieken voor elektronica en systemen.** Steeds meer functies worden samengepakt op een geïntegreerd circuit (IC), waardoor analoge en digitale elektronica steeds hogere prestaties bieden bij dalende kosten. Miljarden componenten vormen een zeer complex netwerk van analoge, radiofrequente en digitale schakelingen die samen de hardware van een complex systeem vormen. Het elektronica-ontwerp wordt aan de ene kant bepaald door de gewenste functionaliteit en aan de andere kant door de gebruikte IC-technologie. Het onderzoek naar ontwerpmethodieken maakt het mogelijk optimale keuzes te maken, en nieuwe architecturen te ontwikkelen voor toekomstige elektronische systemen. Bij een afvlakkende miniaturisatietrend wordt de technologie op zichzelf minder onderscheidend en wordt er vooral vooruitgang geboekt op het gebied van ontwerpmethodieken voor elektronica en systemen. De toepassingen zijn legio, zoals nieuwe energiezuinige rekenarchitecturen, hardware voor het efficiënt toepassen van *machine learning* en neuraal rekenen en complexe sensorsystemen.

4 **More than Moore-technologieën.** De miniaturisatie van CMOS-technologie loopt ten einde. De fabricagetechnologie voor elektronische (micro)systemen ontwikkelt zich nu verder volgens het More than Moore-paradigma, waarbij nieuwe functies worden toegevoegd aan het bestaande platform. In de chip van de toekomst zijn, naast elektronische, ook andere functies geïntegreerd, zoals *sensing*, actuatie, quantumelektronica en neuraal rekenen. Dit biedt mogelijkheden voor nieuwe toepassingsgebieden als biomedische elektronica, *electroceuticals, organs-on-chips, non Von Neumann computing* en het *internet of things*. Hiermee wordt verder gebouwd op de huidige sterktes op de terreinen sensortechnologie, 3D-integratie en analoge circuits. De breed uitgeruste laboratoria lenen zich zeer goed voor de onderliggende technologieontwikkeling van materiaal tot *device*.

5 **Gedistribueerde elektrische energievoorziening.** Het toekomstige energiesysteem, gebaseerd op duurzame energieopwekking uit hernieuwbare energiebronnen, elektrificatie van nieuwe sectoren en marktliberalisering, biedt mogelijkheden om een bottom-up gedecentraliseerd energiesysteem te bouwen. Hiervoor zijn nieuwe efficiënte technologieën, componenten en systemen om duurzame elektriciteit op te wekken en nieuwe processen nodig. Voorbeelden zijn *photo-voltatronics* en intelligente DC *microgrids*. De besturing van gedecentraliseerde systemen is gebaseerd op communicatie en slimme beslissingen. Dit vereist nauwe integratie met digitale technologieën zoals ICT en *blockchain*, leidend tot een gedigitaliseerd energiesysteem. Gedistribueerde elektrische energievoorziening is een nieuw opkomend onderzoeksgebied met een multidisciplinair karakter.

6 **Elektromechanische systemen en vermogenselektronica.** Alleen met vergaande automatisering en robotisering kan Europa kosteneffectieve en kwalitatief hoogwaardige producten produceren, waarmee het de wereldwijde concurrentie aan kan. Elektromechanische systemen vormen het hart van deze hoogwaardige industrie 4.0 innovaties. Door multi-disciplinaire optimalisatie van de elektromechanica, regelsystemen en vermogenselektronica

kunnen in de toekomst efficiënte systeemoplossingen worden gerealiseerd. Hiervoor zijn nieuwe datagebaseerde modellen nodig, met bijbehorende optimalisatieconcepten voor de regeltechniek. Verder kunnen geavanceerde analytische hogere-ordemodellen een doorbraak leveren voor het toepassen van supergeleidende en piëzo-elektrische actuatoren. Vermogenselektronica en modelgestuurde regeltechniek spelen bovendien een sleutelrol in de realisatie van de energietransitie, waarbij elektriciteit de rol van energiedrager gaat overnemen van olie en gas. Onderzoek is nodig voor een significante verbetering van de prestaties en betrouwbaarheid. Nieuwe *wide-bandgap* transistoren, met lage verliezen en hoog temperatuurbereik, kunnen mogelijk helpen deze doelen te halen. Voor het toepassen van hoogfrequente concepten zijn nieuwe designmethodologieën, regelstrategieën en meettechnieken nodig.

Promovendi Ioannis Proimadis (groep Control Systems) en Coen Custers (groep Electromechanics and Power Electronics) bij hun Nanometer-Accurate Planar Actation System NAPAS, TU/e Electrical Engineering.
Foto: Bart van Overbeeke

Tabel 9 – De universiteiten die willen en kunnen bijdragen aan de beoogde versterking van de focusgebieden in de elektrotechniek

Focusgebied		TUD	TU/e	UT	WUR
Communicatie en signaalverwerking	Convergentie radio en fotonica		•		
	Elektromagnetische signaal-opwekking, ontvangst en signaalbewerking	•	•	•	
Elektrische componenten, circuits en systemen	Ontwerpmethodieken voor elektronica en systemen	•	•	•	
	More-than-Moore technologieën	•		•	
Elektrische energieconversie	Gedistribueerde elektrische Energievoorziening	•			•
	Elektromechanische systemen en vermogenselektronica		•	•	

Onderstaande tabel toont de aantallen studenten en wetenschappelijke staf van de laatste jaren en de ambities voor 2024. Deze getallen zijn de optelsom van de door de universiteiten aangeleverde voorlopige cijfers. In de uiteindelijke sectorplannen zullen deze getallen met duidelijke aanwijzingen per universiteit worden weergegeven.

Tabel 10 – Ontwikkeling en prognose van student- en stafgegevens voor de elektrotechniek

Elektrotechniek	2016	2017	2018	2024
aantallen ingeschreven studenten % vrouwelijke studenten	3.098 18%	3.305 18%	3.430 18%	4.640 21%
vast wetenschappelijk personeel in fte % vrouwelijk vast personeel	175 15%	190 13%	197 12%	239 17%
tijdelijk wetenschappelijk personeel in fte % vrouwelijk tijdelijk personeel	679 23%	702 23%	731 22%	802 23%

4.4 Civiele Techniek

Het vakgebied civiele techniek (weg-, waterbouwkunde en utiliteitsbouw) gaat over ingrepen in de civiele infrastructuur en ruimtelijke omgeving met als doel om de functies van deze infrastructuren op land, zee en in de diepe ondergrond optimaal af te stemmen op wat de maatschappij nodig heeft. Civiele techniek (CiT) omvat een aantal kerndisciplines: waterbouwkunde, waterbeheer en hydrologie, milieutechniek, geotechniek, verkeer/transport, materiaalkunde, bouwfysica, constructieleer en bouwprocessen. In dit sectorbeeld staan de funderende civieltechnische vakgebieden centraal. Zij vormen de basis voor de bovengenoemde kerndisciplines van de civiele techniek.

Funderende civieltechnische vakgebieden van de civiele techniek:

(i) Vloeistofmechanica voor CiT constructies
(ii) Fysica van CiT materialen
(iii) Mechanica van CiT constructies
(iv) Grondmechanica

4.4.1 Universitair landschap

De universitaire bacheloropleiding Civiele Techniek wordt verzorgd aan de technische universiteiten van Delft (TUD) en Twente (UT). De Technische Universiteit in Eindhoven (TU/e) biedt de opleiding Architecture, Urbanism and Building Sciences aan en Wageningen University (WUR) de opleiding Landschapsarchitectuur en Ruimtelijke Planning. Delen van deze opleidingen richten zich ook op civieltechnische constructies en materialen. Na de bachelorfase kunnen studenten zich verder specialiseren via diverse masterprogramma's en -tracks. In dit plan worden, waar relevant, de technisch bouwkundige en civieltechnische onderzoekactiviteiten van de TU/e, TUD en WUR meegenomen, voor zover hun onderzoek inhoudelijk bij de civiele techniek past. De onderzoekscapaciteiten op het geprioriteerde deel van de civiele techniek

verschillen sterk in omvang. Ruim de helft van de landelijke onderzoekscapaciteit vinden we in Delft binnen de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, waar een vaste wetenschappelijke staf in de orde van grootte van 65 fte zich op dit veld richt. Twee kleinere groepen zijn gevestigd aan de UT en de TU/e met een vaste staf in de orde van grootte van 25 fte. Een nog kleinere capaciteit is verspreid over een aantal leerstoelgroepen binnen de WUR.

Voor de universitaire opleidingen Civiele Techniek stemt het landelijk overlegorgaan OCIB (Stichting Opleiding Civiel-Ingenieurs) af met het veld over curriculum, werving en kwaliteit. De onderzoeksgroepen participeren in drie 4TU Research Centres: (1) Bouw (2) Resilience (3) Fluid & Solid Mechanics. Afstemming van waterbouwkundig onderzoek met het veld vindt ook plaats in het NCR (Nederlands Centrum voor Rivierkunde) en NCK (Nederlands Centrum voor Kustonderzoek). Het onderwijs van de PhD-opleidingen wordt onder andere verzorgd via de door de KNAW erkende onderzoekscholen: J.M. Burgerscentrum (waterbouwgroepen), Engineering Mechanics (vaste-stoffen mechanica groepen) en Trail (verkeer).

Internationaal is Nederland wereldleider op het gebied van *hydraulic engineering*. Dit blijkt uit de leiding van grote onderzoeksprogramma's (denk aan het TTW-perspectief Multi-Functional Flood defences, NatureCoast, RiverCare en AllRisk), prijzen zoals de Simon Stevin-prijs, sterk competitieve persoonlijke beurzen (Veni/Vidi/Vici) en de eerste plaats op de Shanghai Ranking (TUD). Ook een aantal groepen die actief zijn op het gebied van CiT materialen en constructies nemen internationaal een toppositie in. Dit blijkt onder andere uit de aansturing van grote onderzoeksprogramma's (zoals het TTW-perspectief IS2C-Integral Solutions for Sustainable Construction, BioGeoCivil-Biobased Geo & Civil Engineering for a Sustainable Society, EUROS-Excellence in Uncertainty Reduction of Offshore Wind Systems), persoonlijke beurzen (ERC, Veni/Vidi/Vici) en hoge citatiescores van een aantal wetenschappers. Het baanbrekende onderzoek op het gebied van 3D-betonprinten en *wind engineering* heeft mondiaal de toonaangevende media gehaald (BBC, CNN, Reuters NOS, Wall Street Journal, etc.). Een wetenschapper actief op het gebied van windbelasting op constructies staat wereldwijd in de top-150 van meest geciteerde onderzoekers in het vakgebied Civil Engineering volgens de Shanghai Ranking en Elsevier.

4.4.2 Omgevingsanalyse

Klimaatveranderingen, urbanisatie en de energietransitie zorgen de komende jaren voor uitdagingen. Dit raakt vrijwel alle kerndisciplines van de civiele techniek. Zo moet er gezocht worden naar oplossingen voor waterveiligheid bij zeespiegelstijging, extremere rivier-afvoeren en neerslagpatronen. Temperatuurstijgingen zorgen voor belastingveranderingen op constructies. Door de urbanisatie komt er steeds meer druk op de beschikbare ruimte, wat vraagt om oplossingen op maat. Daarbij legt ook de energietransitie beslag op de beschikbare ruimte. We lopen tegen de grenzen aan van de beschikbare grondstoffen voor bouwmaterialen en staan voor grote uitdagingen om te voldoen aan de functies die vanuit de maatschappij aan de civieltechnische infrastructuur gesteld worden. De master- en PhD-studenten Civiele Techniek zijn zeer gewild bij ingenieursbureaus, onderzoeksinstellingen (Deltares en TNO) en bij RWS. Het aantal bachelor- en vooral masterstudenten is de laatste jaren fors gegroeid (> 50% bij alle instellingen). Inmiddels lopen we hier tegen onze grenzen aan: de TUD overweegt een numerus fixus en de TU/e heeft deze net ingesteld.

Drinkwaterkwaliteit na Thermal Energy Recovery. Je kunt kou onttrekken uit drinkwater om gebouwen te koelen. Maar wat doet dat met de kwaliteit van drinkwater? Promovendus Jawairia Imitiazn onderzoekt dat in het Waterlab van de TUD.
Foto: Frank Auperlé

De watergroepen zijn aangesloten bij de Topsector Water, de materiaalgroepen vinden aansluiting bij de Topsector HTSM. De constructiegroepen participeren, samen met de bouwkundefaculteiten, in de Nationale Bouwagenda en InfraQuest (een samenwerkingsverband van de TUD, TNO en Rijkswaterstaat) en zullen in de nabije toekomst aansluiting vinden bij het BTIC (Bouw Techniek en Innovatiecentrum). Via de onderzoekscholen wordt er al veel samengewerkt met andere disciplines, zoals werktuigbouwkunde, wiskunde, informatica, natuurkunde en scheikunde. De discipline onderscheidt zich in de specifieke kennis die nodig is op de ruimte- en tijdschalen voor civiel technische werken, zoals waterkeringen, bruggen, wegen en utiliteitsbouw. Verder zijn er veel mogelijkheden om de diversiteit van de discipline verder te laten groeien, zowel op het gebied van gender en etniciteit als door inbreng vanuit, en samenwerking met, andere vakgebieden.

4.4.3 Focusgebieden voor de toekomst

Vanuit de bewezen sterktes en de maatschappelijke uitdagingen voor de civiele techniek onderscheiden we vier fundamentele focusgebieden voor verdere versterking. Deze vormen de basis voor de kerndisciplines van de civiele techniek.

1 **Vloeistofmechanica voor CiT constructies.** In voorbereiding op de toenemende urbanisatie en klimaatverandering moeten er maatregelen genomen worden voor de waterveiligheid. Water zal in de stad anders gebruikt en afgevoerd moeten gaan worden. Hiervoor zijn rekenmodellen en experimentele kennis nodig over hoe de waterbeweging (stroming, golven) is in rivieren, kanalen, meren, aan de kust en in ondiepe zeeën. De fundamenten van de (vrije oppervlak) vloeistofmechanica zijn daarbij van eminent belang, waarbij speciale aandacht is voor turbulentie, sedimenttransport, bodemerosie en dichtheidsstromen. Deze fundamentele kennis is de basis voor de waterbouwkunde en waterkwaliteitsproblematiek.

Door mechanismen verder te doorgronden (zowel experimenteel als modelmatig), is het mogelijk betere waterveiligheidsoplossingen te ontwerpen. Denk bijvoorbeeld aan de optimale afmetingen van een dijk, het bepalen van de juiste toplaag (ruwheid genereert turbulentie), hoe begroeide vooroevers een rol kunnen spelen om dijken te verlagen en de verdere ontwikkeling van op de natuur gebaseerde waterbouwkundige oplossingen (zoals de zandmotor). Daarnaast is het van belang om de interacties van waterbewegingsediment te kennen, zodat bijvoorbeeld de golfaanval op en erosie rond waterkeringen (dijken en duinen) voorspeld kan worden. Dit geldt ook voor de stabiliteit van offshore windmolens en pijpleidingen, en het transport van plastic in rivieren. Verder is de vloeistofmechanica de basis voor het begrijpen van de stroming bij zoutindringing en van geconcentreerd afvalwater om te komen tot nieuwe sanitatieconcepten.

Nederland is wereldleider op het gebied van waterbouw en stedelijk waterbeheer. Investeringen in kennisontwikkeling op het gebied van specifieke rekenmodellen voor de ruimte- en tijdschalen van civieltechnische vraagstukken zijn nodig om te kunnen voldoen aan toekomstige vragen en om het niveau van het onderzoek en onderwijs onverminderd hoog te houden. Daarnaast zijn ook dringend investeringen nodig in experimenteel werk in laboratoria en in het veld. Met de beschreven uitbreiding kunnen we gerichter voldoen aan de vraag om Nederland (en de rest van de wereld) te beschermen tegen de zeespiegelstijging, de extremere afvoeren in de rivieren en de toenemende waterstromen in de stad.

2 **Fysica van CiT materialen.** CiT materialen spelen een zeer belangrijke rol in de grote maatschappelijke uitdagingen op de gebieden veiligheid, duurzaamheid en bescherming van het milieu. Nieuwe, geavanceerde materialen bieden oplossingen voor maatschappelijke en technologische vraagstukken. Een investering in kennisontwikkeling op het gebied van CiT materialen helpt om deze vragen te beantwoorden, waarbij het van groot belang is dat het fundamentele materiaalonderzoek toepassing blijft krijgen in de civiele praktijk.

Er zijn technologische ontwikkelingen die bijdragen aan het materialenonderzoek. Materialen worden meer 'maakbaar' en kunnen via *additive manufacturing* (inclusief 3D-printing), nieuwe assemblagetechnieken en andersoortige materiaalmanipulatie *on demand* worden geproduceerd, afhankelijk van de functie van het materiaal. Koppeling van deze technieken aan nieuwe kennis van complexe, hybride materialen biedt mogelijkheden om volledig nieuwe materiaalconcepten met zeer specifieke (mechanische, thermische, hygrische, chemische, akoestische) eigenschappen te ontwerpen. Denk bijvoorbeeld aan geprint beton en metamaterialen met extreme explosiebestendigheid door manipulatie van de dwarscontractie.
Er zijn ook maatschappelijke ontwikkelingen die bijdragen aan het materialenonderzoek. Materialen moeten duurzaam, milieuvriendelijk en circulair zijn. Hiervoor is onderzoek nodig naar veroudering, (zelf)reparatietechnieken en scheidingstechnologie voor hergebruik. Voorbeelden zijn de analyse van hybride, gelaagde constructies (ook coatings, nieuw-aan-oud modellen) en hechtingskarakteristieken. Geavanceerde scheidingstechnieken (o.a. laser geassisteerd) zijn ook een belangrijk onderdeel in de circulaire keten. En tot slot is er onderzoek nodig naar de mate waarin *biobased* materialen bestaande materialen op termijn kunnen vervangen.
De civiele groepen in Nederland hebben een zeer sterke internationale positie op het gebied van materiaalontwikkeling (denk aan innovatieve materiaalsystemen zoals zelfherstellende materialen, hogesterktebeton, (ultradun) glas, geopolymeren, geprint beton en micro-

structuren, betonmortels op basis van recyclingmaterialen) en numerieke mechanica (zoals geavanceerde breukmodellen en multischaalconcepten). Om deze positie te behouden en te versterken, moet het onderzoek worden uitgevoerd in hoogwaardige materiaallaboratoria. Daarnaast zijn geavanceerde numerieke simulaties cruciaal voor bovengenoemd onderzoek. Numerieke multischaal- en multifysische modelleringen, en de daarbij behorende rekenfaciliteiten, zijn nodig om alle gekoppelde niet-lineaire fysische processen te beschrijven over de verschillende tijd- en lengteschalen. Het virtueel produceren en testen van materiaalconcepten is een belangrijk onderdeel voor de bovengenoemde ontwikkeling van nieuwe materialen.

3 **Mechanica van CiT constructies.** Doorgaande verstedelijking en de transitie in energievoorziening vergroten de noodzaak voor een veilige en duurzame ondersteunende infrastructuur in de samenleving. De toekomstige generatie van civieltechnische constructies (zoals bruggen, tunnels, gebouwen, windmolens, (spoor-)wegen en rioleringssystemen) zal daarom sterker, stijver, lichter en betrouwbaarder moeten zijn om aan alle constructieve en functionele eisen onder complexe milieu- en belastingcondities te kunnen voldoen. Dit vraagt om fundamenteel wetenschappelijk onderzoek ten behoeve van een optimaal constructief ontwerp, een efficiënt en arbeidsvriendelijk bouwproces, een hoogwaardig gebruik en een goedkoop onderhoud van de constructie.

Verhoogde eisen aan de veiligheid en de betrouwbaarheid van constructies worden gedreven vanuit de vermindering van de omvang van de risico's (bijvoorbeeld bij aardbevingsbestendig bouwen) en door de toenemende vraag naar een modern constructief ontwerp. Hierbij wordt rekening gehouden met limieten in omvang, kosten, gewicht, multifunctionaliteit en duurzaamheid evenals de groeiende milieurisicofactoren ten gevolge van klimaatveranderingen. Met behulp van automatisering kunnen civieltechnische constructies snel, nauwkeurig en autonoom worden gemaakt. Dit verhoogt de kwaliteit van de constructie en reduceert de bouwkosten, de milieubelasting en de fysieke arbeidsinspanning. Verschillende bouwtechnieken die gebruikmaken van geautomatiseerde regelsystemen zijn: 3D-printing van beton- en staalconstructies, 3D-printing van bekistingconstructies, automatische assemblage van zware constructiecomponenten in het bouwproces, de toepassing van *morphing interfaces* op constructies, *smart structures*, digitale fabricage en drones die muren metselen.

Duurzaamheid stelt specifieke eisen aan het vermogen van constructies om slijtage-, scheur- en degradatiemechanismen te weerstaan. Deze kunnen worden geïntroduceerd door verschillende fysische processen, zoals mechanische processen (denk aan golfvoortplanting, trillingen, impact, vermoeiing, contact en slijtage), chemische processen (zoals corrosie door vocht, sulfaataanval of oppervlaktebesmetting, of een rottingsproces veroorzaakt door biologische afbraak of chemische ontbinding), thermische processen (brand en verwarming) en vochtprocessen (waterpenetratie en condensatie). Ook het hergebruik van constructies draagt bij aan een langere levensduur (denk aan ontwerpen in demontabele bouwstenen en modules). De verdere ontwikkeling van multifysische rekenmodellen om het gedrag van constructies en constructiecomponenten te voorspellen is noodzakelijk, en de civieltechnische onderzoeksgroepen hebben hierin een uitstekende internationale reputatie. Vanwege de vele vrijheidsgraden is de modellering van gekoppelde fysische processen op constructieniveau

veelal rekenintensief. Dit vraagt om de ontwikkeling van efficiënte algoritmes die zijn afgestemd op het gebruik van parallel rekenen. De bewaking van duurzaamheid en milieuprestaties vereist de ontwikkeling van geavanceerde *structural health monitoring* technieken.

Behalve het gedrag van de constructie zelf, speelt ook de complexiteit van de belasting een grote rol in veiligheid- en duurzaamheidaspecten, bijvoorbeeld bij winddynamica (zoals wind op bruggen, hoogbouw en windmolens en ventilatie in tunnels). Door klimaatverandering zullen de sterkte en de frequentie van extreme weer- en windcondities naar verwachting toenemen, met als gevolg een grotere windbelasting op constructies. Recente ontwikkelingen en de toepassing van *nature based engineering* principes in de civiele techniek, een belangrijke innovatie waarin Nederland wereldwijd voorop loopt, vereisen geschikte rekenmodellen voor een gedegen inzicht in de fysica van luchtstroming en zandverplaatsing rond zeewaterkeringen. Om voorop te blijven lopen in de ontwikkeling van civieltechnische constructies en de opleiding van civieltechnische ingenieurs, is het dringend nodig om te investeren in kennisontwikkeling. Hierbij gaat het zowel om de ontwikkeling van rekenmodellen die specifiek geschikt zijn voor de ruimte- en tijdschalen voor civieltechnische constructies, als om experimenteel werk in laboratoria en het veld, ter kalibratie en validatie van de modellen.

4 **Grondmechanica.** Grondmechanica richt zich op de uitdagingen die het bouwen met, in, en op slappe grond in een dichtbebouwde delta met zich meebrengt. Onderzoek richt zich op het bepalen en modelleren van het korte- en langetermijngedrag van de ondiepe ondergrond, in het bijzonder het gedrag van slappe lagen bestaande uit organische kleien, veen en losgepakte verzadigde zandlagen. Er is veel aandacht voor de invloed van heterogeniteit van de ondergrond en het complexe modelleren van de interactie tussen constructies, grond, water en natuur. Doorgaande verstedelijking, waardoor er minder vrije ruimte is en minder acceptatie van hinder, levert in toenemende mate beperkingen op bij nieuwbouw, verbouw en renovatie van infrastructuur. Een nauwkeurigere bepaling van de grondconstructie-interactie is van groot belang om ontwikkelingen in de bebouwde omgeving te kunnen realiseren met minimale verstoring.

Een ander aandachtspunt is de invloed van klimaatverandering op het gedrag van grond. Afwisselende perioden van droogte en extreme neerslag hebben hun weerslag op het gedrag van grond en grondconstructies, en daardoor op de stabiliteit van dijken (waterveiligheid) en wegconstructies (denk aan *sink holes*). De grondmechanische analyse van instabiliteiten in dijken en de ondiepe ondergrond (bijvoorbeeld *liquefaction*) is een belangrijk onderzoeksthema, gekoppeld aan de ontwikkeling van grondverstevigingstechnieken, zoals bacteriegebaseerde grondstabilisatie, het toepassen van wapeningssystemen (geotextielen) en versterking via dynamische verdichting.

De toenemende omvang en complexiteit van civieltechnische projecten enerzijds, en de bewustwording dat beheersing van geotechnische risico's van primair belang is voor het technisch en economisch slagen van projecten anderzijds, zorgt ook voor een toenemende vraag naar geotechnisch opgeleide ingenieurs, zowel bij opdrachtgevers, ingenieursbureaus en aannemers. Om het bovengenoemde fundamentele onderzoek te versterken en om aan de capaciteitsvraag te voldoen is uitbreiding van de opleidings- en onderzoekscapaciteit noodzakelijk.

Met een enorme tank onderzoekt promovendus Arash Maghsoudloo (TUD) de zeebodem bij de Oosterscheldekering. Door erosie kunnen gaten en hellingen in de zeebodem ontstaan. Wanneer treedt het fenomeen 'statische liquefactie' op en zal de helling gaan schuiven?
Foto: Frank Auperlé

De speerpunten zijn in overleg tot stand gekomen en geven uitdrukking aan de gezamenlijke inzet om scherpe keuzes te maken voor de versterking van de landelijke en internationaal toonaangevende focusgebieden. Bij een aantal faculteiten, die relatief bescheiden zijn in omvang van wetenschappelijke staf of aanwezige expertises, is ervoor gekozen om de versterking op een kleiner aantal focusgebieden te concentreren.

Tabel 11 – De universiteiten die willen en kunnen bijdragen aan de beoogde versterking van de focusgebieden in de civiele techniek

Focusgebied	TUD	TU/e	UT	WUR
Vloeistofmechanica voor CiT constructies	•		•	•
Fysica van CiT materialen	•	•		
Mechanica van CiT constructies	•	•	•	
Grondmechanica	•		•	

Onderstaande tabel toont de aantallen studenten en wetenschappelijk staf van de laatste jaren en de ambities voor 2024. Deze getallen zijn de optelsom van de door de universiteiten aangeleverde voorlopige cijfers. In de uiteindelijke sectorplannen zullen deze getallen met duidelijke aanwijzingen worden weergegeven per universiteit.

Tabel 12 – Ontwikkeling en prognose van student- en stafgegevens in de civiele techniek

Civiele Techniek	2016	2017	2018	2024
aantallen ingeschreven studenten % vrouwelijke studenten	3.368 28%	3.538 29%	3.703 29%	4.339 35%
vast wetenschappelijk personeel in fte % vrouwelijk vast personeel	119 15%	122 17%	121 19%	156 27%
tijdelijk wetenschappelijk personeel in fte % vrouwelijk tijdelijk personeel	412 30%	423 30%	405 30%	449 36%

5 Overige disciplines in de techniekssector

Dit sectorbeeld richt zich op de kerndisciplines van de construerende technische wetenschappen. Scherpe keuzes zijn gemaakt om met de eindige beschikbare middelen een betekenisvolle versterking van de funderende onderzoekbasis te realiseren. Prioriteit is daarbij gegeven aan het construerend technisch-wetenschappelijk onderzoek, waaraan vanuit zowel het onderwijs en de industrie als de maatschappelijke kennisagenda's groot belang wordt gehecht. Door deze keuzes blijft een aantal disciplines in deze ronde buiten beschouwing, die eveneens van grote betekenis zijn voor het onderwijs en de maatschappelijke en economische ontwikkeling van Nederland. Vanwege het grote belang van deze disciplines en een mogelijke toekomstige versterking ervan, wordt in dit hoofdstuk een korte schets gegeven van het belang en de stand van zaken van een drietal disciplines binnen de technische wetenschappen, te weten ruimtelijk ontwerp, *industrial design engineering* en technische bedrijfs- en bestuurskunde.

5.1 Ruimtelijk Ontwerp

Mondiale en nationale trends en ontwikkelingen hebben een grote impact op het beheer en de inrichting van de fysieke leefomgeving. Er zijn veel transitievraagstukken op het gebied van water, klimaat, mobiliteit, migratie, verstedelijking en energie, maar ook in sectoren als zorg en onderwijs. Ruimtelijk ontwerp kan een belangrijke bijdrage leveren bij de aanpak van deze vraagstukken, aldus de *Actieagenda Ruimtelijk Ontwerp 2017-2020 Samen Werken aan Ontwerpkracht* van de ministeries van Infrastructuur en Milieu en Onderwijs.

Ruimtelijk ontwerp is het verzamelbegrip voor de disciplines architectuur, stedenbouw, ruimtelijke ordening en landschapsarchitectuur. Ruimtelijk ontwerp geeft de ruimtelijke omgeving vorm en draagt sterk bij aan de leefbaarheid, de culturele identiteit en de maatschappelijke cohesie van onze samenleving. Architectuur houdt zich daarbij bezig met de processen, programmering, technieken en vormgeving van het bouwen. Stedenbouw richt haar focus op de configuratie van de stad, de ensembles van gebouwen in samenhang met openbare ruimte, infrastructuur, het stedelijke programma en de bijbehorende *governance*. Landschapsarchitectuur ontwerpt vanuit de werking van het landschap stedelijke en ruimtelijke omgevingen.

Het onderzoek aan de Faculteit Bouwkunde in Eindhoven (TU/e) kenmerkt zich door de innovatiekracht van nieuwe bouwtechnologieën en ICT voor onderzoek, planning, ontwerp, realisatie en management van de gebouwde omgeving. Het Smart City Program is daar het overkoepelende platform voor, met De Bouwagenda als uitvoeringsprogramma (slimme verduurzaming en circulariteit, 3D-printing, *urban physics*, mobiliteit, *placemaking* en gezondheid). De landschapsarchitectuurgroep van Wageningen University (WUR) is

internationaal bekend om haar hoge wetenschappelijk niveau van ontwerpend onderzoek. De groep heeft een thematische focus op klimaatadaptatie, energietransitie en beleving van de ruimtelijke omgeving. De Faculteit Bouwkunde in Delft (TUD) is vooraanstaand op het terrein van woningbouw, energietransitie, circulariteit, klimaatadaptatie, gevels, glas, erfgoed, virtual reality en geo-informatie. Nationaal wordt samengewerkt in 4TU.Bouw-verband en in het Bouw en Technologie Innovatiecentrum (BTIC). Internationaal ranken alle drie de instellingen hoog in hun specifieke velden.

Het domein ruimtelijk ontwerpen is sterk onderhevig aan conjuncturele schommelingen. De wereldwijde financiële crisis heeft de sector onevenredig hard geraakt. Op dit moment is er sprake van een robuuste vraag naar experts en een sterke instroom van (internationale) studenten. De vraag naar renovatie, vervanging en nieuwbouw is groter dan ooit. Daaraan gepaard groeit de behoefte aan nieuwe kennis, producten en strategieën, evenals de vraag naar goed opgeleide ontwerpers om deze maatschappelijke vragen het hoofd te bieden. Tevens is er sprake van een groeiend bewustzijn in de bouwindustrie, de advies- en de ontwerpwereld dat de traditionele terughoudendheid op het gebied van innovatie moet veranderen.

De nabije toekomst brengt grote uitdagingen voor het ontwerp van steden. Denk aan de noodzaak om steden klimaatadaptief te maken, de veranderingen door de energietransitie in te passen en de *smart city*-ontwikkelingen en nieuwe mobiliteitssystemen. Landschappen, vooral kust- en rivierlandschappen, moeten op grote schaal ruimte voor water en energiewinning creëren.

Vanuit het bedrijfsleven en de overheid is er een fundamentele vraag naar nieuwe kennis, producten en strategieën. Tenslotte verschuift ook in het onderzoeksveld zelf de aandacht meer en meer naar de maatschappelijke impact: zowel nationale als Europese onderzoekfondsen hechten steeds meer waarde aan valorisatie, ook bij het uitschrijven van wat traditioneel zuiver fundamentele onderzoeksprogramma's waren. In veel opzichten past deze trend bij wat een *spatial turn* genoemd kan worden in veel van de aanpalende wetenschappen: in de sociale, economische en gezondheidswetenschappen groeit het bewustzijn dat de ruimtelijke inrichting ertoe doet. Er wordt gezocht naar crossdisciplinaire samenwerking. Gecombineerd met de verknoping van fundamenteel en toegepast onderzoek in zogenaamde *demonstrator projects, living labs* of ontwerpend onderzoek, betekent dit ook een toenemende behoefte aan transdisciplinair onderzoek.

Er is, kortom, een groeiende behoefte aan fundamenteel en toegepast onderzoek in het ruimtelijk ontwerpdomein, zowel vanuit de wetenschap, de bouwpraktijk en de beleidswereld als de samenleving. Stimulering hiervan door de Nederlandse en Europese onderzoekfondsen zou zeer welkom zijn, maar ontbreekt tot op heden goeddeels. Een zeer bescheiden aanzet hiertoe vormde het programma Research Through Design van NWO/TTW. Echter, wil de benodigde cultuur en systeemverandering versneld vorm krijgen, dan is een robuuste uitbreiding van op het ruimtelijk ontwerpdomein gerichte onderzoeksprogramma's dringend nodig.

Verstedelijking zal in de komende decennia een ongekend hoge vlucht nemen en daarmee beleidsmakers, bouwers, ontwerpers, burgers en kennisinstellingen confronteren met de noodzaak tot innovatie op het gebied van duurzame stedelijke ontwikkeling. Maatschappelijke transitievraagstukken rondom economische veerkracht en stedelijke innovatie, sociale

empowerment, inclusiviteit, volksgezondheid, circulariteit, ecologie en biodiversiteit zijn bij uitstek stedelijke opgaven waarin architectuur, stedelijke inrichting en landschappelijk ontwerp cruciale *(dis)enablers* zijn om tot innovatieve oplossingen te komen. Zulke innovaties dragen bij aan het behouden en uitbouwen van de internationale voorhoedepositie die de Nederlandse architectuur, stedenbouw en landschapskunde en de daarmee verbonden bouwindustrie en toeleveringsindustrie al innemen. Hier liggen ook belangrijke mogelijkheden om toegepast en fundamenteel onderzoek op deze terreinen nadrukkelijker te verbinden met het topsectorenbeleid van NWO en de Europese Onderzoekagenda's rondom duurzame stedelijke ontwikkeling. Duurzame verstedelijking vraagt om investeringen in onderzoek, innovatie en ontwikkeling, kortom: in de versterking van ruimtelijke ontwerpkracht.

5.2 Industrial Design Engineering (IDE)

Industrial design engineering (IDE, ook wel Industrieel Ontwerpen genoemd) is het wetenschapsveld dat zich richt op het ontwerpen van producten, diensten en systemen om gerealiseerd te worden en waarmee mensen interacteren. Het veld is van nature multidisciplinair: het integreert kennis over de mens met technologie en ontwerp- en innovatieprocessen. De kerndisciplines van IDE zijn:

- Mensgericht ontwerpen (denk aan ergonomie, psychologie, informatica, ethiek, esthetiek, sociologie en user experience);
- Technologie geïnspireerd ontwerpen (denk aan productietechnologie, informatica, *data science,* elektronica, mechatronica en nieuwe materialen);
- Ontwerp- en innovatiestrategie (denk aan *design thinking,* toekomstscenario's, ontwerpmethodologie, organisatie van innovatieprocessen en strategisch design).

Nederland is een internationaal zwaartepunt van IDE. Analyse van de onderzoeksresultaten in Web of Science (WoS) en SCOPUS van 2014-2018 laten zien dat *industrial design engineering* in Nederland behoort tot de mondiale kopgroep in aantallen wetenschappelijke publicaties en impact. Een analyse van de publicatiecategorieën laat zien dat het IDE-onderzoek sterk is gerelateerd aan multidisciplinaire ingenieurswetenschappen, materiaaltechnologie, productietechnologie, werktuigbouwkunde, informatica en kunstmatige intelligentie. Er is een hechte samenwerking met de andere techniekdisciplines, zowel binnen elke TU als tussen de TU's. Design United is het verband dat wordt gevormd door de IDE-faculteiten van Eindhoven, Delft en Twente en binnenkort ook Wageningen. IDE-onderzoekers dragen in sterke mate bij aan internationale netwerken (zoals Design Research Society, IASDR en Cumulus), conferenties (denk aan IASDR, DRS, ICED, CHI, DIS, TEI en RtD) en de Dutch Design Week.

Elke TU heeft een brede bacheloropleiding en een tot drie aansluitende masteropleidingen, met in totaal zo'n 4.000 studenten. De afgelopen jaren ligt de instroom van bachelorstudenten rond de 600, in de verhouding TUD 50%, UT 25% en TU/e 25%. Zowel de studenten als de medewerkers kennen een 50/50-genderbalans.

De hal van de Faculteit Industrieel Ontwerpen TUD.
Foto: Communication IO, TUD

Technologie wordt steeds complexer en meer verbonden en ingebed in het dagelijks leven van mensen: thuis, op het werk, onderweg, om ons heen en zelfs op en in het lichaam. Zij wordt daarbij ook steeds 'slimmer'. Hierdoor ontstaat een sterke behoefte aan ingenieurs die zien welke kansen technologie biedt, welke behoeften, verlangens en zorgen er leven bij mensen, en welke mogelijkheden benut kunnen worden voor creatieve en interdisciplinaire samenwerking. In de NWA is IDE zeer relevant om technologie dicht bij de mensen te brengen en maatschappelijke impact te realiseren binnen verschillende NWA-routes, zoals die voor Gezondheidszorgonderzoek, Sport en Bewegen, Circulaire Economie en Smart Industry. IDE is sterk verbonden met de topsectoren Creatieve Industrie, Life Sciences & Health en Hightech Systemen & Materialen. Toekomstige onderzoeksrichtingen zijn onder andere het ontwerpen van complexe hybride mens-technologiesystemen (autonome intelligentie), het ontwerpen met nieuwe materialen (fotonica, slimme materialen en biomaterialen), het ontwerpen van de interface tussen mensen en kunstmatige actoren en het ontwerpen met data.

5.3 Technische Bedrijfs- en Bestuurskunde – Industrial Engineering

Technische bedrijfskunde (TBK) houdt zich bezig met het ontwerp, de implementatie en de optimalisatie van processen en systemen in complexe organisaties en bedrijven, en in inter-organisatorische netwerken. Er wordt onderzoek gedaan in zowel de private als publieke sector. De wereldwijde context is hierbij van belang, evenals de dynamische netwerkvormen waarin organisaties waarde creëren. Binnen TBK worden *financial engineering* technieken ontwikkeld om complexe beslissingen rond waarde en risico te ondersteunen. TBK past wiskunde, informatica, modellering en technologische innovaties toe voor het optimaliseren van waarde.

Naast optimalisatie biedt de technische bedrijfskunde wetenschappelijke methoden voor creatie van geheel nieuwe bedrijfsmodellen en product-dienstcombinaties. De ontwerpbenadering en de kwantitatief analytische benadering van organisaties, processen en systemen is de kern van TBK. Wiskunde, informatica en de verschillende engineeringdisciplines (IDE, robotica en werktuigbouwkunde) zijn belangrijk vanwege de continue innovaties die geheel nieuwe organisatievormen en systemen mogelijk maken. De management- en sociale wetenschappen zijn van belang vanwege de rol van de mens in complexe systemen en processen. Denk hierbij aan vraagstukken over technologieacceptatie, de interactie tussen mens en machine en het ontwerp van effectieve en duurzame organisatievormen. TBK-onderzoek aan de 4TU en de Rijksuniversiteit Groningen (RUG) kent vier focusgebieden:

1 **Global supply chain and logistics.** Onderzoek naar verbetering van prestatie, technische innovaties en het verhogen van duurzaamheid in wereldwijde ketens. Dit gebeurt met onderzoeksmethoden als modellering, beslissingsondersteuning, simulatie, *data science* en speltheorie. Nieuwe modellen zoals deeleconomie en circulaire economie vergen geheel nieuwe processen, organisatievormen en systemen.
2 **Smart industry and sustainability.** Bestaande bedrijfsmodellen worden vervangen door digitale productie waarbij robotica, *internet of things,* 3D-printing en kunstmatige intelligentie, herontwerp van industriële processen en organisaties mogelijk maakt. Doel is het verhogen van duurzame productie, bij voorkeur circulair, waarbij toch aan hoge klantwensen wordt voldaan. Wendbaarheid van en ondernemerschap in productieketens is hierbij het streven.
3 **Health care operations management.** De zorg kent grote uitdagingen en specifieke kenmerken. Een optimale organisatie van zorgprocessen vraagt om aangepaste methoden. Medische technologie maakt een nieuwe organisatie van zorg mogelijk, waarbij effectiever met de beschikbare middelen wordt omgegaan.
4 **Vitale infrastructuren.** Vitale infrastructuren raken steeds meer onderling vervlochten en zijn aan sterke veranderingen onderhevig. Onderzoek naar de verbetering van prestaties van deze infrastructuren, waarbij zowel private als publieke waarden als prestatiecriteria gelden.

Landelijk wordt er nauw samengewerkt in de TKI Dinalog (topsector Logistiek) en in de onderzoeksscholen BETA en TRAIL. Samen verzorgen zij een PhD-programma op nationaal niveau. Het Nederlandse onderzoek op deze gebieden staat internationaal zeer hoog aangeschreven. Nederland bezet een zesde plaats in de World Bank Logistics Performance Index (waarbij een eerste plaats de ambitie is). Er is samenwerking met toonaangevende instituten in Europa, de Verenigde Staten en Azië. Global Supply Chain and Logistics is een thema bij UT, TU/e, WUR, TUD en RUG. Daarbij richt WUR zich vooral op agriketens, TUD op grensoverschrijdende en douaneprocessen en heeft RUG een focus op procesindustrie. TU/e en UT hebben veel kennis van servicelogistiek. *Smart industry* is een thema bij alle vijf de universiteiten. Op dit vlak wordt door UT samengewerkt met het Duitse Fraunhofer. *Healthcare operations* is tot slot een thema op UT en TU/e.

TBK mag zich verheugen in een grote en zelfs toenemende belangstelling van studenten. Ook is er een continue hoge vraag vanuit industrie en wetenschap. Het maatschappelijk belang van de discipline is enorm. Groeiende bevolkingsaantallen, stijgende welvaart en verstedelijking leiden tot een exploderende vraag naar goederen en diensten. De huidige organisaties, systemen en processen zijn onvoldoende duurzaam en maken nog nauwelijks gebruik van de technologische

mogelijkheden. Fundamenteel onderzoek is nodig naar hoe technologische doorbraken kunnen leiden tot fundamenteel andere manieren van organiseren, produceren en gebruiken van goederen en diensten. TBK heeft al een uitgebreide en langdurige samenwerking met de industrie. Het versterken van Europese en internationale samenwerking en de uitbreiding van de onderzoekscapaciteit voor het oppakken van fundamentele vragen is nodig om de vooraanstaande rol van Nederland in dit veld te behouden.

6 De ambities van de universiteiten

De vier technische universiteiten spelen een hoofdrol in het onderwijs en het onderzoek in de technische wetenschappen. Ze behoren tot de top van technische universiteiten wereldwijd en nemen leidende posities in op het gebied van onderzoek en onderwijs. Daarnaast profileert de Rijksuniversiteit Groningen zich in toenemende mate als nieuwe universitaire speler op het gebied van *science & technology*. Dit hoofdstuk schetst hoe de betrokken universiteiten van Delft, Wageningen, Eindhoven, Twente en Groningen aansluiten bij de sterktes en focusgebieden uit dit sectorbeeld. Het laat ook zien waar de kansen voor de afzonderlijke universiteiten liggen om bij te dragen aan de beoogde versterking van de betreffende disciplines in Nederland. De universitaire beelden en ambities zijn ingebracht door de universiteiten zelf, onder de verantwoordelijkheid van de betreffende penvoerende decaan. De afzonderlijke bijdragen zijn door de kwartiermaker becommentarieerd en door het techniekdecanenoverleg onderling gedeeld en uitgewisseld. De inhoud van de verschillende bijdragen is gezamenlijk gecoördineerd en gestuurd, maar valt primair onder de verantwoordelijkheid van de betreffende decaan. Met het gezamenlijke proces rond dit sectorbeeld is een unieke stap gezet in de onderlinge strategische afstemming en taakverdeling tussen de universiteiten. Het techniekdecanenoverleg is hierover uitermate tevreden en vast voornemend om deze vorm van afstemming en samenwerking verder voort te zetten en structureel vorm te geven. Het belang hiervan is in de achterliggende periode tevens bevestigd in dialoog met bestuur en directie van het NWO-domein voor de Toegepaste en Technische Wetenschappen (TTW). Daarop aansluitend heeft het NWO-domein TTW in zijn meerjarenvisie aandacht besteed aan zijn ondersteunende rol in dergelijke vormen van zelforganisatie in de technische wetenschappen.

6.1 Technische Universiteit Delft

De TUD wordt door MIT gebruikt als wereldwijde benchmark op onderwijsgebied en gezien als '*a global thought leader in engineering education*'. TUD leidt studenten binnen het techniekdomein op in zes brede bachelor- en elf specialistische masteropleidingen gekoppeld aan het onderzoek, waardoor ze alles in huis hebben om de mondiale uitdagingen (VN, NWA) het hoofd te bieden. De TUD ziet het als haar belangrijkste taak deze mondiale uitdagingen op te lossen en aan de vragen vanuit de maatschappij te voldoen, door nieuwe generaties maatschappelijk verantwoordelijke ingenieurs op te leiden en de grenzen van de technische wetenschappen te verleggen. De faculteiten 3mE en LR (werktuigbouwkunde), de faculteit EWI (elektrotechniek)

en de faculteit CiTG (civiele techniek) richten zich dan ook binnen het techniekdomein op de grote mondiale vraagstukken van klimaatverandering, energietransitie, verdergaande verstedelijking, circulariteit, industrie 5.0, *quantum computing* en robotica. De hiervoor cruciale interdisciplinaire samenwerking vindt plaats binnen de TUD en binnen en buiten Nederland met andere met andere leidende universiteiten en kennisinstellingen (in Nederland bijvoorbeeld binnen 4TU-verband). Ook met het (inter)nationale bedrijfsleven zijn er intensieve relaties. In dit kader heeft de TUD met bovengenoemde partijen ook grote centra opgezet zoals QuTech, RoboValley en het Smart Advanced Manufacturing XL Lab, gericht op geautomatiseerde vervaardiging van zeer grote lichtgewicht composiet onderdelen voor industriële toepassingen. De TUD heeft nadrukkelijk de ambitie het percentage vrouwelijke medewerkers en studenten te doen toenemen. Hiertoe wordt al het Delft Technology Fellowship voor vrouwelijk talent ingezet. Het sectorplan wordt gezien als instrument voor verbetering van diversiteit en voor waarborging van onderwijskwaliteit bij de enorme groei in studentenaantallen die de TUD al jarenlang meemaakt.

Onderzoek naar gedistribueerde en coöperatieve controlsystemen in het Networked Embedded Robotics Lab van Delft Centre of Systems and Control. Op de foto een iRobot Create, een platform om onder meer te experimenteren met een bekend probleem in de robotica: lokalisatie.
Foto: Marieke de Lorijn

6.1.1 Werktuigbouwkunde

Faculteit Werktuigbouwkunde, Maritieme Techniek & Technische Materiaalwetenschappen (3mE)

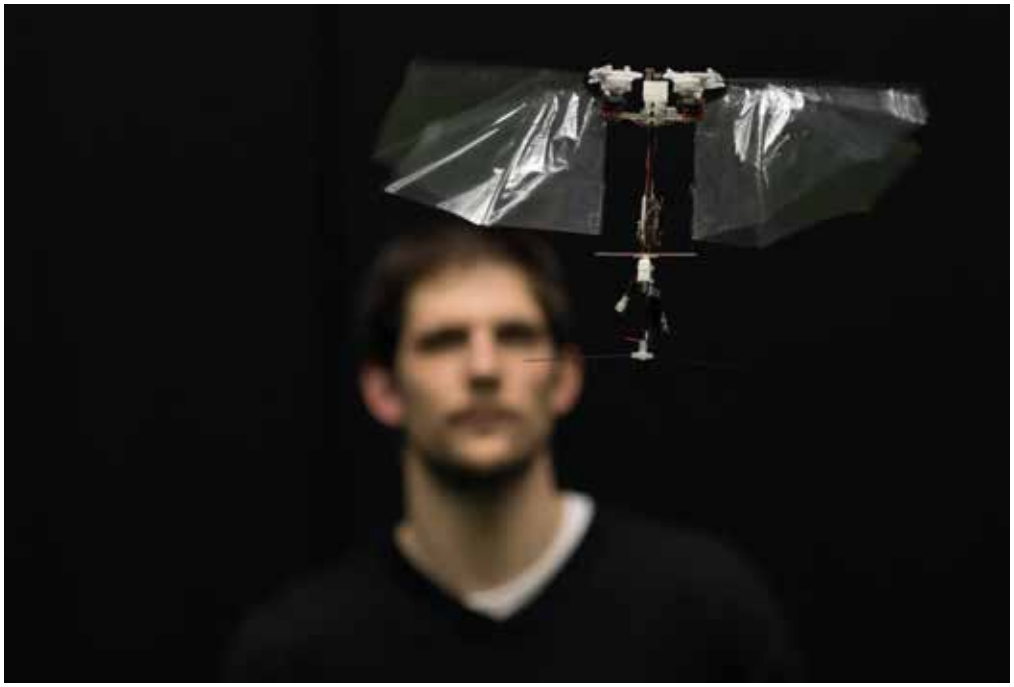
Binnen de faculteit 3mE liggen de werktuigbouwkunde-uitdagingen het komend decennium in de energietransitie, nieuwe (circulaire) productietechnologieën voor materialen met geheel nieuwe functionaliteiten en het vergroten van de maatschappelijke meerwaarde van robotica en 'autonomisering'. Vanuit haar sterkte, blijkend uit o.a. internationale rankings en prestigieuze *grants* (dertien ERC *grants* en vijftien uit de NWO Vernieuwingsimpuls), en conform het disciplinebeeld werktuigbouwkunde, kiest de faculteit 3mE voor versterking van een beperkt aantal focusgebieden binnen haar huidige excellenties: (i) stromingsleer voor de transitie naar een CO_2-arme energievoorziening; (ii) transportverschijnselen bij transport

en opslag van warmte; (iii) ontwikkeling, optimalisatie en gedrag van nieuwe geavanceerde materialen; en (iv) interactieve, slimme, autonome systemen. Nadruk zal hierbij komen te liggen op respectievelijk: (i) innovatieve energieconversie en -opslag technologieën (e-Refinery, brandstofcellen) en CO_2-arme vervoersmodaliteiten; (ii) optimaliseren van warmte-opslag, omzetting en warmtetransport; (iii) multifunctionele interactieve hybride materialen en slimme materiaaltechnologieën in een circulaire economie, en (iv) mens-robot- en robot-robotinteractie en *secure control* voor industrie 5.0. Nationaal zal samenwerking/afstemming hoofdzakelijk in 4TU-verband plaatsvinden, zowel binnen de discipline werktuigbouwkunde als andere disciplines, waaronder bèta en elektrotechniek, evenals, op onderdelen, met andere instellingen, waaronder DIFFER (e-Refinery). Het nieuw op te richten nationale platform werktuigbouwkunde zal gebruikt worden ter versterking van bestaande afstemmingsgremia voor de diverse subdisciplines.

Het is de ambitie van de faculteit 3mE om in de komende jaren de sterktes op bovenstaande gebieden verder uit te bouwen en op al deze gebieden nieuwe grote (internationale) projecten met het penvoerderschap in Delft te realiseren. Door het aantrekken van nieuw talent, dat ook een bijdrage in het onderwijs zal verzorgen, wordt verwacht dat de huidige onderwijsdruk met een student-stafverhouding van 36:1 verder kan worden verlaagd naar ongeveer 30:1. De sectorplanmiddelen zullen worden ingezet voor knelpunten in de opleidingscapaciteit van de opleiding Werktuigbouwkunde evenals de versterking van de onderzoeksbasis die, door bovengenoemde keuzes van kerncompetenties, zal bijdragen aan de huidige maatschappelijke vraagstukken.

Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek (Aerospace Engineering, AE)
De luchtvaart staat in het kader van klimaatimpact en energietransitie voor één van de grootste werktuigbouwkundige uitdagingen sinds haar bestaan. De noodzakelijke revolutionaire veranderingen vereisen fundamenteel en disruptief onderzoek en onderwijs op het gebied van energiedragers en energieconversie, (elektrische) voortstuwingssystemen, stromingsleer, aerodynamica, aero-akoestiek en materiaal- en productietechnologie. De faculteit AE heeft de ambitie om samen met andere faculteiten (3mE, EWI), andere toonaangevende kennisinstellingen en (inter)nationale industrie het voortouw te nemen om de luchtvaart in versneld tempo waarachtig te verduurzamen. De faculteit AE is de nummer 1 en tevens grootste Europese faculteit in zijn soort en de enige in de wereld top-10 van *aerospace engineering* faculteiten. Op onderwijsgebied is de faculteit leidend in diverse internationale netwerken door de innovatieve engineeringprogramma's, gebaseerd op diepgaande disciplinekennis gekoppeld aan een multidisciplinaire aanpak en een koppeling van theorie aan praktijk. Op grond hiervan, alsmede door de unieke faciliteiten, kan de faculteit dan ook acteren als *thought leader* in het veld. Gebaseerd op de behoefte uit de maatschappij vraagt, naast bemande luchtvaart, ook onbemande luchtvaart (drones) een stevige kennisimpuls, met name gericht op efficiëntie, autonomie en netwerktechnologie. Een derde gebied waarop de faculteit wil groeien is het ruimtevaartsegment, als antwoord op de toenemende behoefte van het (inter)nationale afnemende veld (werkgevers) aan *space engineers* en de spectaculaire toename van studenten met interesse in deze richting. Constellaties van kleine satellieten en lasersatellietcommunicatie zijn belangrijke speerpunten waarop de ruimtevaartafdeling zich richt, met miniaturisering en interactieve systemen als sleutelwoorden. De komst van SRON naar Zuid-Holland leidt hier tot een verdergaande samenwerking met SRON, Universiteit Leiden en TNO. De faculteit AE

zet in op een verdere kwaliteitsimpuls door middel van personele groei, waarbij de student-stafratio moet worden teruggebracht van 31:1 naar 25:1 in 2024. Het percentage vrouwen bij wetenschappelijk personeel en instromende studenten moet in dezelfde periode toenemen naar minimaal twintig procent.



Flapping wing drone met de ontwerper ervan, dr.ir. Matěj Karásek, van de faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaartechniek (TUD). Zijn onderzoek, samen met WUR, heeft geleid tot een coverartikel in Science in september 2018.
Foto: Henri Werij

6.1.2 Elektrotechniek

De discipline elektrotechniek is ondergebracht in de Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica (EWI) en wil bijdragen aan de zeventien duurzaamheidsdoelen van de VN. Het onderzoek omvat het quantumdomein, micro-elektronica en duurzame energieopwekking en -distributie. De internationale erkenning van het onderzoek blijkt uit het verwerven van een EU-Flagship project (*quantum communication*), zes ERC grants en het voorzitterschap van de Analog SubCom van IEEE-ISSCC. Op nationaal niveau uit de participatie zich in twee Zwaartekrachtprojecten (Quantum Software Consortium en Organ-on-Chip) en vijf grants uit de NWO Vernieuwingsimpuls. De staf heeft twee KNAW-leden en veertien IEEE fellows. Op het gebied van de micro-elektronica is het voornemen de volgende focusgebieden te versterken: ontwerpmethodieken voor elektronica en systemen met zeer laag energiegebruik ten behoeve van het *internet of things*; signaalopwekking, -ontvangst en -bewerking in verband met systemen van meerdere sensoren en grote datastromen, bijvoorbeeld MRI-scanners of de radarsystemen van zelfrijdende auto's en More than Moore-technologieën voor de realisatie van *organs-on-chip* en *biocompatibele packaging* van silicium chips. Ook wordt er, in nauwe samenwerking met QuTech, sterk ingezet op de realisatie van de nieuwe elektronische circuits, architecturen en systemen die *quantum computing* en communicatie mogelijk gaan maken. Op het gebied van elektrische energiesystemen zal de versterking zich richten op het focusgebied gedistribueerde elektrische energievoorziening. Hier wordt de nadruk gelegd op het integreren van duurzame

elektrische energie van hernieuwbare energiebronnen, het ontwerpen, modeleren en simuleren van de nodige combinaties van stabiele en robuuste hoogspanning en DC distributienetwerken. De discipline elektrotechniek werkt nauw samen met de andere techniekdisciplines (bijvoorbeeld op het gebied van ruimtetechnologie en autonome robots), (internationale) kennisinstellingen en bedrijven (tweede en derde geldstroom circa M€ 15/jaar). Onderzoek en onderwijs zijn uiteraard nauw verweven. Om te voldoen aan de vraag van de maatschappij wordt hierbij een toename in studenteninstroom nagestreefd van veertig tot vijftig procent in de periode tot 2024.

Een technicus van de TUD gebruikt een wire bonding-machine om elektrische verbindingen te maken van een chip naar een printed circuit board.
Foto: Marieke de Lorijn

6.1.3 Civiele Techniek

Binnen de civiele techniek in de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen (CiTG) liggen de komende jaren grote uitdagingen door klimaatveranderingen, doorgaande verstedelijking en de energietransitie. Dit heeft invloed op de kerndisciplines van de civiele techniek. Oplossingen voor waterveiligheid bij zeespiegelstijging, veiligheid van duurzame constructies en extremere rivierafvoeren en neerslagpatronen zijn van cruciaal belang. Deze uitdagingen geven steeds meer druk op de beschikbare ruimte en vragen om civieltechnische oplossingen op maat. Vanuit de bewezen sterktes en de maatschappelijke en technologische uitdagingen voor de civiele techniek kiest de faculteit CiTG, conform het *Sectorbeeld Civiele Techniek*, de volgende fundamentele focusgebieden voor verdere versterking: (i) vloeistofmechanica voor CiT constructies; (ii) fysica van CiT materialen; (iii) mechanica van CiT constructies; en (iv) grondmechanica. Met deze keuze kunnen meer wetenschappelijke toptalenten worden aangetrokken, topingenieurs van de toekomst beter worden opgeleid en kan de internationale wetenschappelijke positie verder worden verbeterd. Voor het focusgebied vloeistofmechanica voor CiT constructies zal de nadruk liggen op sedimenttransport en dichtheidsstromen, onder andere ten behoeve van natuurgebaseerde waterbouwkundige werken voor de waterveiligheid. Voor fysica van CiT materialen kiest de faculteit voor versterking van

het onderzoek naar de experimentele en virtuele productie en analyse van innovatieve civieltechnische materiaalconcepten met een lage CO_2-uitstoot en een hoge hergebruikswaarde bij vervaardiging en recycling. Mechanica van CiT constructies richt zich op de nieuwe generatie *smart* civieltechnische constructies met *embedded sensing* en gebruikmakend van zelfherstellende en adaptieve materiaalconcepten. In grondmechanica zal de nadruk liggen op de interactie grond/constructie/vloeistof, met aandacht voor heterogeniteit en instabiliteiten. Nationaal zal samenwerking op het focusgebied vloeistofmechanica voor CiT constructies met de UT plaatsvinden op het gebied van modelleren en waarnemen van sediment transport en dichtheidsstromen bij waterbouwkundige constructies, en met de WUR op het gebied van waterstromen in de stad. Op de focusgebieden fysica van CiT materialen en mechanica van CiT constructies zal samenwerking plaatsvinden met de TU/e op de gebieden multi-schaal en multi-fysisch modelleren en 3D-printing.

Wat bepaalt de vorm van een rivier? Als je dat weet, kun je beter beslissingen nemen over steden en grond die aan de rivier liggen. In het Waterlab van de TUD onderzocht Andres Vargas Luna de invloed van de planten op de oevers op hoe rivieren gaan stromen.
Foto: Frank Auperlé

6.2 Technische Universiteit Eindhoven

TU/e technische universiteit eindhoven

De techniekssector is binnen de TU/e ondergebracht bij de faculteiten Werktuigbouwkunde en Electrical Engineering. Daarnaast is de civiele techniek ondergebracht bij de Faculteit Bouwkunde en vindt onderzoek op het gebied van materiaaltechnologie en signaalverwerking plaats aan de Faculteit Biomedische Technologie. Elk van de vier genoemde faculteiten organiseert een bacheloropleiding binnen de eigen discipline en een doorstroom-masterprogramma.

Daarnaast worden een bachelor- en masteropleiding Automotive Technology aangeboden, evenals masteropleidingen Sustainable Energy Technology en Systems & Control. Alle faculteiten participeren in landelijke onderzoeksscholen voor PhD-opleidingen. TU/e-techniek werkt intensief samen met TU/e-bèta, bijvoorbeeld in diverse Zwaartekrachtprogramma's. De techniekssector is uniek op de gebieden fotonica (Photon Delta), hightech systemen (High Tech Systems Center) en energie (Differ van NWO). Aan de TU/e worden zes *cross-disciplinary research themes* (CRT's) opgericht, samenwerkingsverbanden met als doel om fundamenteel onderzoek in diverse faculteiten bij elkaar te brengen. Deze CRT's zijn complementair aan de sectorplannen en bestrijken de onderwerpen *smart materials & processes, bioengineering health, complex high tech systems, renewable energy, human-centered systems and environments, en data-driven intelligent systems.* TU/e-techniek vormt het hart van Brainport. Met hightechbedrijven binnen Brainport en daarbuiten (zoals Philips, ASML, DAF, Océ, VDL en NXP) wordt nauw samengewerkt. De TU/e stimuleert ook samenwerking via het Impuls-programma (AIO's die samen met de industrie op fiftyfiftybasis worden gefinancierd). Daarnaast zijn er talloze NWO-TTW-programma's, TKI-contracten, Europese projecten en projecten met de industrie. Binnen de Eindhoven Engine werken Brainports industrieën, ziekenhuizen en kennisinstellingen samen om valorisatie te versterken. De arbeidsmarkt voor ingenieurs in de regio is overspannen. De opleidingen Werktuigbouwkunde, Biomedische Technologie en Bouwkunde kennen een numerus fixus omdat de uitbreiding van de staf geen gelijke tred houdt met de studentengroei. De groei als gevolg van sectorplannen zal mogelijkheden bieden deze limiet op te heffen.

6.2.1 Werktuigbouwkunde

De faculteit is georganiseerd langs de lijnen van de drie subdisciplines, en omvat derhalve drie divisies: Thermo-Fluids Engineering (TFE), Computational and Experimental Mechanics (CEM) en Dynamical Systems Design (DSD), tevens zwaartepunten van de faculteit. Het materialenonderzoek van de Faculteit Biomedische Technologie (BMT) is nauw verweven met CEM via het Materials Technology Instituut (MaTe). Laboratoria, apparatuur en ondersteunend personeel worden door de divisies gezamenlijk gebruikt. De laatste onderzoeksvisitaties hebben aangetoond dat het onderzoek in de subdisciplines van de werktuigbouwkunde van het allerhoogste niveau is. Diverse groepen zijn leidend in hun discipline en hebben excellente labs met internationale uitstraling. De discipline huisvest in totaal twee Simon Stevin Meesters, zeven ERC's (AdG/Cons/StG), twee Vici-, zes Vidi- en zes Veni-laureaten. Binnen het focusgebied *thermo-fluids engineering* concentreert de aandacht zich op energieopslag en -conversie (warmte en toekomstige brandstoffen, zoals waterstof, synthetisch methaan, metaalpoeders en *solar fuels*). Hierbij vindt disciplinaire verdieping plaats op het gebied van complexe reagerende meerfasenstromingen (onder andere via geavanceerde (laserdiagnostische) meetmethoden, directe numerieke simulaties en reactieve moleculaire dynamica simulaties) in onder andere reactoren, poreuze en granulaire media en dichte aerosolen (Darcy Centre en Zero-Emission Lab). In het focusgebied *mechanical & materials engineering* zijn multi-schaal vaste stof/vloeistofmechanica en microfysiologische modellen essentieel. De focus ligt op multifunctionele en hybride materialen. De interdisciplinaire ontwikkelingen op dit gebied richten zich op het integreren van meerdere materialen en op nieuwe functionaliteit, gekoppeld aan nieuwe productieprocessen (*additive manufacturing*). Dit moet leiden tot een nieuwe generatie hybride en multifunctionele materialen, voor zowel technische als biomechanische toepassingen. Tevens zal er aandacht komen voor geavanceerde materialen, zoals mechanische

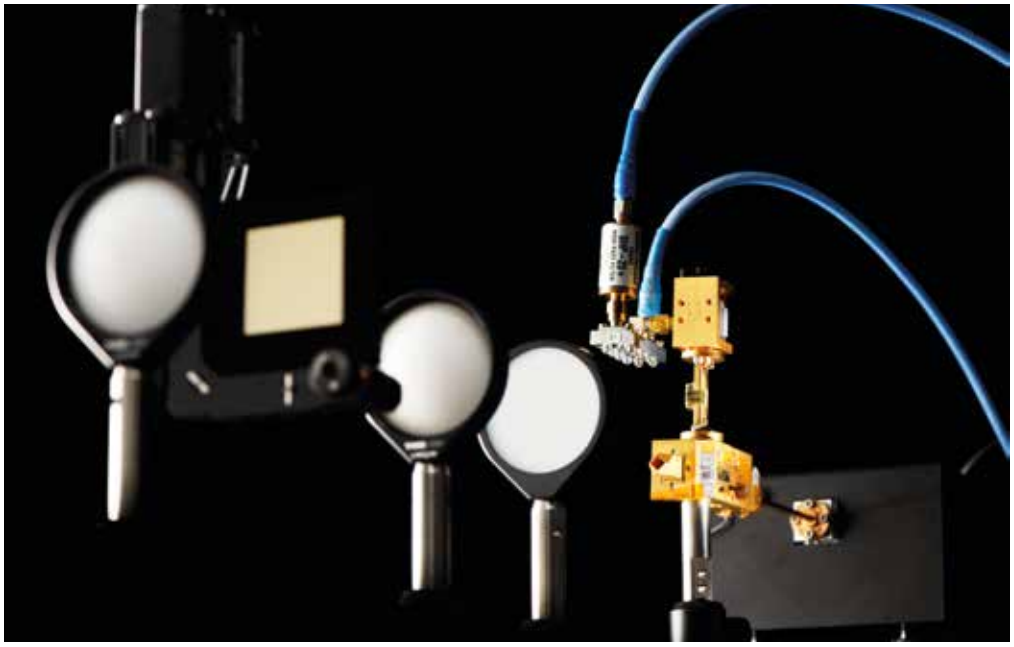
metamaterialen, responsieve materialen, superieure technische materialen, alsook mechanische systemen op heel kleine schaal (*lab-on-a-chip*). In *systems & control engineering* ligt de focus op geautomatiseerde en genetwerkte/autonome systemen, zoals robots voor de industrie en *care & cure* en geavanceerde regeltechiek voor complexe processen en machines in distributiecentra, de maakindustrie en de hightechindustrie.

RoBoSculpt, een prototype schedelboorrobot nabij de gehoorgang, een ontwerp van Jordan Bos, promovendus CST Mechanical Engineering, TU/e. Het verwijderen van schedelbot vereist dat chirurgen extreem nauwkeurig werken met beperkt zicht. Deze chirurgische robot voert sub-millimeter botverwijderingstaken uit in de schedel, op basis van CT-scans.
Foto: Bart van Overbeeke

6.2.2 Elektrotechniek

Vanwege de maatschappelijke behoefte aan elektrotechnische kennis en de sterke onderlinge synergie van de elektrotechnische kerndisciplines, wenst de faculteit het vakgebied elektrotechniek in grote mate compleet af te dekken. In de subdiscipline communicatie en signaalbewerking, elektronische componenten, circuits en die van systemen en elektrische energieconversie kent de faculteit zwaartepunten in communicatie (geïntegreerde optica op basis van InP, draadloze en optische systemen), signaalbewerking voor medische toepassingen, analoge/digitale elektronische systemen, energietechniek (midden/laagspanning), elektromechanische systemen en regeltechniek. De faculteit is de grootste elektrotechniekfaculteit in Nederland, zowel in onderzoek als in onderwijs, en is tevens een van de meest succesvolle faculteiten in Eindhoven in het binnenhalen van competitieve financiering (tweede en derde geldstroom). Het structurele tekort aan eerste geldstroombudget van de afgelopen jaren heeft wel tot gevolg gehad dat er lokaal zwakke plekken zijn ontstaan in het meer fundamentele onderzoek en in de onderzoekinfrastructuur. De discipline wil daarom op de volgende thema's de basis van het onderzoek verstevigen. In de convergentie radio en fotonica zal op het vlak van communicatie en meten (*sensing*) elektronische en fotonische technologieën met elkaar vervlochten moeten worden. Deze integratie bestrijkt onderzoek vanaf materiaalniveau via circuits tot aan complete systemen. Binnen de elektromagnetische signaalopwekking en -ontvangst en signaalbewerking

is de tweede ontwikkeling op het gebied van communicatie en meten (*sensing*), en wel die naar systemen van grote aantallen gekoppelde sensoren en signaalbronnen. Deze ontwikkeling vereist afstemming tussen uiteenlopende expertises als hardwareontwerp (onder andere antennes en biosensoren), realtime signaalbewerking, regeltechniek, lerende/autonome systemen en stochastische modellering. Nu miniaturisatie niet meer het belangrijkste facet is, zal het ontwerpen van efficiënte, geïntegreerde elektronische schakelingen en systemen binnen de ontwerpmethodieken voor elektronica en systemen zich richten op nieuwe dimensies, bijvoorbeeld alternatieve architecturen. Het beheersen van de daaruit voortkomende complexiteit is een fundamentele en urgente onderzoeksvraag. Ten slotte zal de elektromechanische systemen en vermogenselektronica zich richten op de toekomst van de energievoorziening. Deze vraagt om multidisciplinaire optimalisatie van systemen met zowel elektromechanische componenten en vermogenselektronica als regelsystemen. Deze optimalisatie strekt zich uit van de ontwikkeling van hardware (hoge schakelsnelheden met lage verliezen), via modelgestuurde regelstrategieën tot aan het vinden van algoritmes voor optimaal netwerkbeheer.



Onderzoek naar materiaaleigenschappen in de frequency range van 100 GHz tot 300 GHz – opstelling van Marion Matters, Center for Wireless Technology Eindhoven, TU/e.
Foto: Bart van Overbeeke

6.2.3 Civiele Techniek

Het deel van de Faculteit Bouwkunde van de TU/e dat onderzoek uitvoert binnen de civiele techniek, richt zich op twee subdisciplines: fysica van civieltechnische materialen en mechanica van civieltechnische constructies. Om de basis van het onderzoek van deze twee subdisciplines te versterken en de groepen de kans te geven de ingezette voorsprong op wetenschappelijk gebied te behouden en uit te breiden, zet de faculteit doelmatig in op de volgende vier onderzoeksgebieden. Binnen de fysica van civieltechnische materialen is dat het modelleren van complex materiaalgedrag. Hierbij worden hoogwaardige rekenmodellen ontwikkeld, die de complexe interacties tussen diverse fysische processen (mechanisch, thermisch, hygrisch, chemisch, akoestisch en magnetisch) in materialen en materiaalcomponenten beschrijven ter optimalisatie van functionele en constructieve eigenschappen. Ook zal worden ingezet op de circulariteit van materialen.

Kennis van mineralogie, chemie en korrelfysica moet leiden tot reductie van grondstofdelving en preventie van het storten van afvalmaterialen. Binnen de mechanica van civieltechnische constructies ligt de focus op 3D-betonprinten. Er is een ontwikkeling naar een *smart industry* met zelflerende printers, uitgerust met niet-destructieve meettechnieken en een printkop waarmee gericht wapening kan worden toegevoegd tijdens het printproces. Daarnaast zal de winddynamica extra aandacht vragen, waarbij de windbelasting op civieltechnische constructies (bruggen, masten, windmolens, *solar plants* en gebouwen) wordt gesimuleerd met geavanceerde CFD-berekeningen en experimenteel bepaald in de atmosferische grenslaagwindtunnel. Op landelijk niveau vindt binnen de twee subdisciplines samenwerking plaats met de TUD op de gebieden modelleren van complex materiaalgedrag en 3D-betonprinten. Deze onderzoeksgebieden zijn van groot belang om hoogwaardige ingenieurs op te blijven leiden, uitmuntende wetenschappers aan te trekken, en om wetenschappelijk voorop te blijven lopen. De discipline is zeer succesvol, met toonaangevende groepen in de twee subdisciplines en grote media-aandacht voor 3D-betonprinten en winddynamica.

6.3 Universiteit Twente

UNIVERSITY OF TWENTE.

De Universiteit Twente gelooft dat oplossingen en innovaties worden gecreëerd op het snijvlak van disciplines en dat deze samen met het bedrijfsleven en maatschappelijke partijen worden vormgegeven. Het onderwijs en onderzoek rondom techniek valt binnen de faculteiten Engineering Technology (civiele techniek en werktuigbouwkunde) en Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science (elektrotechniek). De techniekdisciplines van de UT dragen bij aan het oplossen van een aantal grote maatschappelijke uitdagingen zoals die door de NWA en de UN SDG zijn benoemd; de belangrijkste zijn de veerkrachtige samenleving, het slimmer maken van de industrie en de energietransitie. Hun kracht ligt in het toepassen en combineren van de relevante sleuteltechnologieën op deze terreinen. Disciplinaire excellentie is nodig om innovatie in de triple helix te bewerkstelligen. Dit komt tot uiting in de internationaal gerenommeerde centra die zich op de UT hebben gevestigd, zoals het ThermoPlastic Composites Research Center en het Fraunhofer Project Center for Complex High Tech Systems. De komende jaren zullen beide centra worden uitgebouwd en onderzoeksinhoudelijk worden versterkt. Bovendien biedt ons uitstekend geëquipeerde Nanolab een vruchtbare bodem voor materiaal- en fabricagetechnologie-onderzoek. Daarnaast biedt de ontwikkeling van Techbase Twente de mogelijkheid om de unieke propositie uit te bouwen voor het opzetten van grootschalige onderzoeksfaciliteiten. Daarbij richt de universiteit zich op centra voor *maintenance engineering, soft meta materials, smart materials, energy storage* en *power electronics*. In 2019 gaat werktuigbouwkunde van start met een bacheloropleiding in Amsterdam, in samenwerking met de Vrije Universiteit. De verwachting is dat er jaarlijks tweehonderd bachelorstudenten werktuigbouwkunde uit de provincie Noord-Holland en Flevoland zullen instromen. Belangrijke ambities zijn het opleiden van meer (vrouwelijke) ingenieurs, het verder uitbouwen van toonaangevend fundamenteel onderzoek en het aantrekken van toepassingscenters als innovatiemotor voor de industrie. Daarvoor is een versterking in personele zin van de wetenschappelijke fundamenten vereist, zoals hieronder wordt toegelicht.

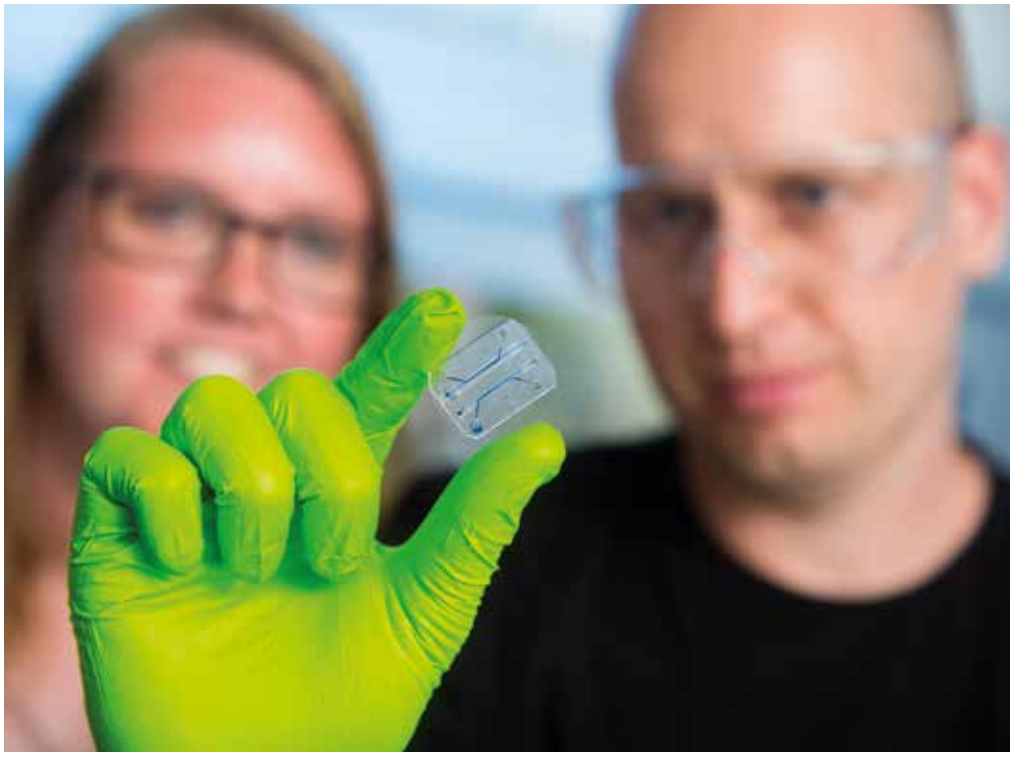
6.3.1 Werktuigbouwkunde

Binnen werktuigbouwkunde wordt gekozen voor versterking van de subdisciplines warmtetransport en opslag, geavanceerde materialen, materiaalsystemen en robotica. De sterkte blijkt uit het aantal Europese *personal grants* (ERC-SG (2), ERC-CG en ERC-AG (Verdonschot)), Vernieuwingsimpulsen (Veni (3), Vidi (4) en Vici (2), perspectiefprogramma's (Aim2XL, Wearable Robotics, Symbionics), en een groot aantal NWO-, TTW- en Europese projecten. Werktuigbouwkunde levert de wetenschappelijke directeuren voor het TPRC (prof. Akkerman) en het FPC@UT (prof. Gibson) en prof. van den Boogaard is president van ESAFORM. De hightech maakindustrie, van cruciaal belang voor de economische ontwikkeling van Nederland, vraagt om economisch haalbare kleinserieproductie, waaronder gepersonaliseerde consumentenproducten en patiëntspecifieke implantaten. Met het versterken van onderzoeksgroepen die werken aan het ontwikkelen van *additive manufacturing*, numeriek modelleren, materiaalkarakterisering en hoge precisie mechatronica heeft de UT een sterke basis om fundamenteel vooruitgang te boeken in het ontwikkelen van flexibele, efficiënte en nauwkeurige productiesystemen. Materialen op maat gaan ongekende mogelijkheden bieden, denk bijvoorbeeld aan slimme productie, efficiëntere energie-opslag en het ontwerpen van interacterende (biomechanische) robotsystemen. Daartoe wil werktuigbouwkunde zich versterken op het ontwikkelen van geavanceerde materialen en materiaalsystemen. De sterke positie op het gebied van *multiscale computational material science*, data-analyse en experimentele excellentie zal de UT verder uitbouwen voor het ontwerpen, produceren en verwerken van nieuwe materialen met buitengewone eigenschappen zoals nieuwe composieten, responsieve en programmeerbare metamaterialen, materialen voor energieopslag en -conversie en biocompatibele materialen voor robotische interactie. Werktuigbouwkunde zet in op een broodnodige groei van het aantal bachelor- en masterafgestudeerden. De Amsterdamse locatie zal ook leiden tot een toename van het aantal vrouwen in de techniek. Door deze groei neemt de onderwijsdruk fors toe en is het hard nodig te investeren in fundamenteel onderzoek om de internationale positie te versterken.

6.3.2 Elektrotechniek

De UT heeft een sterk trackrecord in het ontwerp en de realisatie van elektronische systemen. Focusgebieden hierbij zijn draadloze communicatie, robotica en biomedische systemen, met een sterke koppeling naar de grote maatschappelijke uitdagingen. De sterkte blijkt uit: KNAW-lidmaatschappen (V.d. Berg, Nauta), Spinozaprijs (V.d. Berg), Simon Stevin Meesters (V.d. Berg, Nauta), ERC-AG (2x V.d. Berg, Stramigioli), Veni (Zwanenburg, Odijk, Segerink), IEEE Fellows (Haverkort, Nauta, Stramigioli), het Zwaartekrachtprogramma Organs-on-Chip en het presidentschap van de IEEE Solid-State Circuits Society (Nauta). Met het afvlakken van de Wet van Moore moeten nieuwe technologieën verkend worden die bijvoorbeeld elektronica, sensoren en actuatoren combineren tot compacte geïntegreerde systemen. Daarnaast moet onderzoek worden uitgevoerd aan ontwerpmethodieken voor analoge en digitale elektronica. Dit voor de ontwikkeling van nieuwe architecturen voor toekomstige elektronische systemen, waarin signalen bewerkt worden volgens analoge, digitale en neurale paradigma's. Dit maakt het *internet of things* mogelijk en zal in bredere zin bijdragen aan veel energie-efficiëntere micro-elektronica. *Phased array* antennesystemen zijn van groot belang om hogere datasnelheden in draadloze communicatie te verkrijgen. Basistechnologieën voor *phased array* systemen zijn elektromagnetische signaalopwekking, ontvangst en signaalbewerking. Daarnaast groeit

in de context van robotica en biomedische systemen het belang van technieken voor snelle en efficiënte beeldanalyse en -bewerking. Gezien de opkomst van duurzame energie start de UT onderzoeksactiviteit op het gebied van vermogenselektronica. Ze richten zich hierbij op de 'lagere' vermogens en verdere integratie en miniaturisatie van vermogenselektronica. De ambitie is om betere, zuinigere energiesystemen rondom bijvoorbeeld batterijen te ontwerpen. Het bestaande onderzoek naar integratietechnologieën en elektromagnetische compatibiliteit zal hierbij nauwe aansluiting vinden. De UT wil de onderwijs- en onderzoekbasis in elektrotechniek versterken en een jaarlijkse groei van vijf procent in het aantal bachelor- en masterstudenten (waarvan 25% vrouw in 2024). Om de student-stafratio binnen de perken te houden, is uitbreiding van de wetenschappelijke staf noodzakelijk.



Onderzoekers Andries van der Meer en Heleen Middelkamp met een model van de retina-on-a-chip.
Foto: Gijs van Ouwerkerk voor UT

6.3.3 Civiele Techniek

Binnen de civiele techniek kiest de UT voor versterking binnen de subdisciplines vloeistofmechanica voor civieltechnische constructies, mechanica van civieltechnische constructies en grondmechanica. De sterkte blijkt uit: Simon Stevin Meester (Hulscher), Vici (Hulscher), Veni (Blom, Roos, Borsje, Horstman) en KNAW-lidmaatschap (Hulscher), Perspectiefprogramma's (RiverCare, Multifunctional Flood Defences, AllRisk, NatureCoast), grote NWO-projecten (Shaping the beach, Sandbox, Smartsea, CoCoChannel, ShoreScape) en tal van andere EU- en NWO-projecten. Dohmen-Janssen is zakelijk directeur van het 4TU Centre Resilience Engineering en Doree is wetenschappelijk directeur van het 4TU Research Centre Bouw. Een veerkrachtige samenleving en de veranderingen in het klimaat vragen om forse versterking van de basisdisciplines binnen de civiele techniek. Op het focusgebied vloeistofmechanica ontwikkelt de UT fysische kennis van waterbeweging, nodig om rivieren en kustzeeën te beheren en op

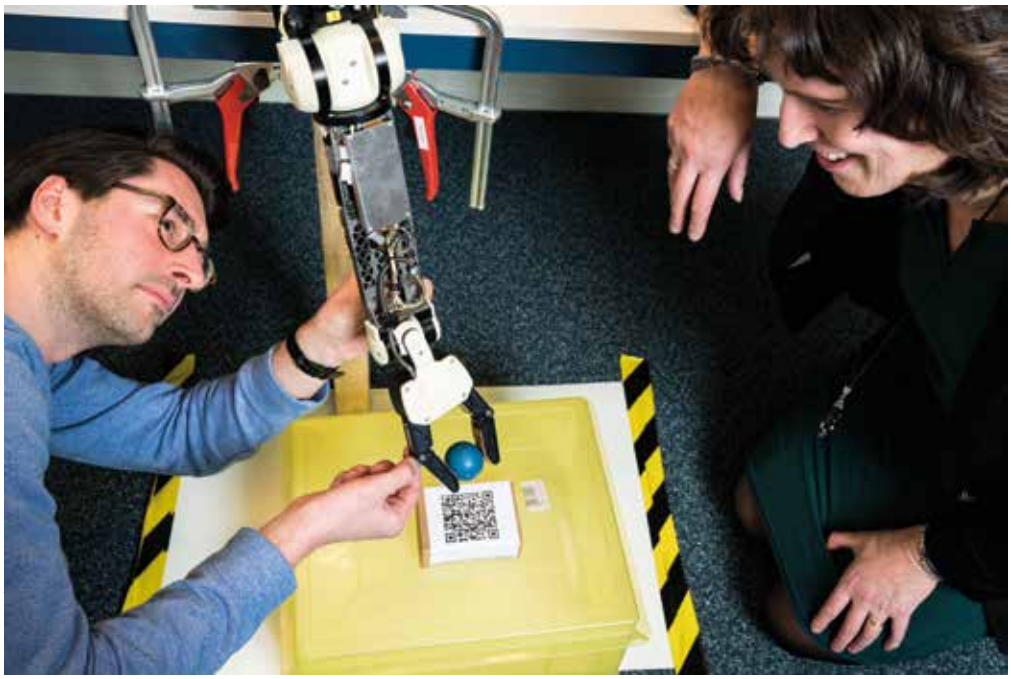
duurzame wijze te gebruiken. De UT wil de vloeistofmechanica die nodig is bij de ontwikkeling van golfoverslagbestendige dijken en bouwen-met-de-natuur voor de hoogwaterbescherming in detail begrijpen en modelleren. Op het focusgebied mechanica van civieltechnische constructies ontwikkelt de UT de benodigde fysische kennis van lucht- en waterbeweging voor kustingrepen gecombineerd met kustduinen als primaire hoogwaterbescherming. Hierbij wordt een brug geslagen naar de stromingsleergroep met expertise op aerodynamica en aero-akoestiek voor windturbines. Op het focusgebied grondmechanica werkt de UT enerzijds aan het materiaal als onderdeel van dijken en anderzijds aan het gedrag van constructies en grond, om inzicht te krijgen in de belastbaarheid en restlevensduur. Er wordt een link gelegd naar de *multiscale mechanics* groep bij Werktuigbouwkunde. Over zes jaar excelleert de staf (blijvend) op waterbewegingsrekenmodellen, waterbewegingsexperimenten, grondmechanica en natte (kunst)werken voor hoogwater veiligheid gecombineerd met sterke bachelor-, master-, PDEng- en PhD-opleidingen. Door de versterking van deze fundamentele subdisciplines, waarvoor enorme onderzoeksbehoefte is van de markt en wetenschappelijke fondsen, voorziet de faculteit een groei van dertig procent tot 2024 in zowel de bachelor- als de masterpopulatie (waarvan 25% vrouw) en is uitbreiding van de wetenschappelijke staf dus noodzakelijk.

6.4 Rijksuniversiteit Groningen

rijksuniversiteit groningen

Binnen de Rijksuniversiteit Groningen is de Faculty of Science and Engineering (FSE) verantwoordelijk voor onderzoek en onderwijs in een breed scala van ingenieurs- en bèta-disciplines. Al zestig jaar verzorgt FSE ingenieurswetenschappen, zoals chemische technologie, technische natuurkunde en technische wiskunde. Deze activiteiten zijn ondergebracht binnen het *Sectorbeeld Bètawetenschappen*. Sinds 2001 zijn de technische activiteiten van FSE uitgebreid met opleidingen als Biomedische Technologie (BMT) en Industrial Engineering & Management (IEM). Specialisatierichtingen van deze opleidingen horen bij de discipline Werktuigbouwkunde. In 2019 start de masteropleiding Werktuigbouwkunde. De start van een bacheloropleiding Werktuigbouwkunde (2024) en een masteropleiding Systems and Control (2022) worden door de RUG gezien als volgende stappen in de verbreding van het palet. Omdat de maatschappij, en vooral de noordelijke regio, roept om meer hoogopgeleid technisch personeel, heeft de faculteit in 2014 gekozen voor het herkenbaarder maken en versterken van haar bètatechnische karakter. FSE zet hiervoor in op hoogwaardige samenwerking met de (regionale) industrie. Binnen de Noord-Nederlandse regio haakt het technisch profiel in op onderzoeksagenda's rond *smart industrie* en vergroening van de chemische sector. Landelijke samenwerking bestaat bijvoorbeeld binnen de topsectoren HTSM, Energie en Chemie. Grote stappen zijn gemaakt met de naamswijziging van de faculteit en het opzetten van het Groningen Engineering Center, het venster naar buiten voor al het technische onderzoek en onderwijs binnen de universiteit; intern zorgt de structuur ervoor dat multidisciplinaire samenwerkingsverbanden worden gestimuleerd. Het brede palet van ingenieurs- en bètadisciplines binnen FSE is uniek: de gehele lijn van fundamenteel onderzoek, tot onderzoek dat zich richt op kennisontwikkeling voor het creëren van innovatieve toepassingen, is aanwezig en stimuleert kruisbestuiving en innovatie.

De faculteit is georganiseerd in tien voor het merendeel multidisciplinaire onderzoekinstituten, waarbij het technisch onderzoek verspreid is over meerdere instituten. Opleidingen vallen onder de *undergraduate* (bachelors) en *graduate school* (masters en PhD). Samenwerking met het UMCG geeft verder vorm aan werken over disciplinaire grenzen.



Hoogleraar Jacquelien Scherpen (RUG) werkt met afstudeerder Thomas Wesseling aan autonome taken van een humanoid arm.
Foto: Bram Belloni voor RUG

6.4.1 Werktuigbouwkunde

De kracht van de werktuigbouwkunde in Groningen is geconcentreerd rond twee van de drie funderende subdisciplines van de moderne werktuigbouwkunde. Daarbij zijn de subthema's materiaalsystemen, geavanceerde materialen, autonome systemen en interacterende robotsystemen als sterkte aanwezig. De kwaliteit van het Groningse werktuigbouwkundig onderzoek blijkt uit hoge posities in internationale rankings (ARWU 2018, positie 18 voor Automation and Control Engineering, top-100 positie voor Material Science & Engineering), zeer goede tot excellente beoordelingen van betrokken FSE-instituten in recente onderzoekvisitaties, en persoonlijke *grants* en prijzen (2014-2018: een Vici, een ERC Consolidator Grant, drie onderscheidingen) en verschillende subsidies voor grootschalige onderzoeksconsortia met onder andere de industrie en een leidende rol voor FSE-onderzoekers, zoals subsidies voor materialen- en energieonderzoek, *smart industry* en robotica. FSE wil zich versterken in de geavanceerde materialen en interacterende robotsystemen. Het onderzoek naar geavanceerde materialen aan FSE ontleent kracht uit het mondiaal erkende onderzoek naar functionele nanomaterialen (zie Sectorbeeld Bètawetenschappen). Focusgebieden zijn *multiscale modeling* en multifunctionele eigenschappen van materialen. FSE wil dit gebied versterken met het oog op een betere inbedding van deze specifieke expertise in de masteropleiding Werktuigbouwkunde. Er is afstemming en samenwerking met relevante partijen zoals M2i. Systems and Control Engineering van FSE heeft internationaal een leidende positie op het gebied van autonome systemen en het regelen van interacterende robotsystemen. Landelijke samenwerking en afstemming is er binnen de

onderzoeksschool DISC. Ook loopt er een Zwaartekrachtaanvraag Systems and Control (met TU/e en TUD). Voor het behouden van de leidende positie en het verbeteren van de binding met de BMT-opleiding, is uitbreiding nodig op het gebied van nauwkeurig geregelde interacterende robotsystemen die op een veilige manier interacteren met de mens en diens omgeving.

6.5 Wageningen University & Research

Wageningen University & Research verzorgt onderzoek en onderwijs binnen het domein van gezonde voeding en leefomgeving, specifiek in de disciplines *agrotechnology & food sciences, animal sciences, environmental sciences, plant sciences* en *social sciences*. Onderwijs en onderzoek worden verzorgd en uitgevoerd door leerstoelgroepen, ingebed in onderzoeksscholen. Het portfolio aan bachelor- en masteropleidingen weerspiegelt bovengenoemde terreinen. De laatste jaren kent de universiteit een sterke verhoging van de studenteninstroom: sinds 2012 zijn de studentaantallen verdubbeld. Het onderzoek van WUR wordt gekenmerkt door een integrale benadering, waarbij kennis uit de alfa-, bèta- en gammawetenschappen wordt gecombineerd. Veel van het onderzoek wordt niet geïsoleerd uitgevoerd binnen leerstoelgroepen, maar in samenwerking met diverse groepen binnen Wageningen. Deze integrale benadering zorgt ervoor dat WUR wetenschappelijk vernieuwend is en kan bijdragen aan de oplossing van grote maatschappelijke vraagstukken. WUR heeft vanwege haar inhoudelijke focus een unieke positie, en neemt internationaal een sterke wetenschappelijke positie in haar domein in. Dit blijkt onder meer uit verschillende rankings. Wageningen University & Research is wereldwijd de beste universiteit in het domein van *agro & food*. Het onderzoek van WUR wordt zeer goed tot excellent beoordeeld in onderzoeksvisitaties. Onderzoekers verwerven NWO- en ERC-toekenningen. Regionaal is de ontwikkeling van Food Valley in Midden-Nederland van belang. De campus van WUR is daarbij een brandpunt, waar kennisinstellingen en bedrijfsleven nauw met elkaar samenwerken. Op nationaal niveau wordt er de komende jaren verder samengewerkt in 4TU-verband, en specifiek met TU/e. Internationaal werkt de faculteit samen met kennisnetwerken, zoals het A5-netwerk, met daarin de wereldwijd leidende agro-fooduniversiteiten. Binnen de activiteiten van de universiteit passen ook de specifieke activiteiten van de drie techniekdisciplines.

6.5.1 Werktuigbouwkunde

De werktuigbouwkunde binnen WUR is verbonden aan de onderzoeksthema's agronomie (de wijze van produceren en telen) en robotisering binnen de voedselprocestechnologie. De internationale kracht van de Wageningse werktuigbouwkunde blijkt uit het grote aantal EU-projecten (o.a. Timescale, Euphoros, PicknPack, CROPS, SAGA). NWO investeert via de Nationale Roadmap voor Grootschalige Wetenschappelijke Infrastructuur in het Netherlands Plant Eco-phenotyping Centre. Binnen de werktuigbouwkunde wil WUR haar onderzoek versterken in de focusgebieden interacterende robotsystemen en autonome systemen. De

ontwikkelde kennis zal gedeeld worden met andere Wageningse leerstoelgroepen binnen het platform Agro Food Robotics en met andere TU's in het 4TU-project Soft Robotics. Binnen het focusgebied interacterende robotsystemen wil WUR verder invulling geven aan het begrijpen en ontwikkelen van generieke principes voor robotica. Deze zijn gericht op het waarnemen, grijpen en manipuleren van objecten die variëren in kleur, vorm, textuur en grootte. Dit in matig gestructureerde omgevingen waarin zich grote variaties in condities als lichtintensiteit voordoen. De leerstoelgroep Farm Technology Group beschouwt dit thema als kern van haar onderzoek. Binnen het focusgebied autonome systemen wil WUR het onderzoek versterken in de volgende drie gebieden:

- Allereerst in sensoren, monitoringssystemen, modellering en data-analyse ten behoeve van autonome besturing van groei en kwaliteit van gewassen in kassen en van autonome klimaatbesturing.
- Ten tweede in adaptieve en autonome systemen voor de verwerking van complexe agro-grondstoffen, door sensor- en datacollectiesystemen te combineren met realtime modellering van de verandering van structuur van complexe levensmiddelen via adaptieve algoritmen. Dit betreft aparte processtappen en de integratie daarvan tot proces en productieketen
- Tenslotte in adaptieve en autonome systemen ter simulatie en bestudering van biologische digestie van levensmiddelen voor studie in de dynamica van het digestieproces. Dit zal toepasbaar zijn in geavanceerde meet- en regelsystemen voor industriële toepassingen.

  De Wageningse leerstoelgroepen Horticulture and Product Physiology Group, Food Process Engineering Group en Food Quality and Design beschouwen deze onderwerpen als kernthema in de leeropdracht.

Een door de Farm Technology Group van WUR ontwikkelde plukrobot.
Foto: WUR

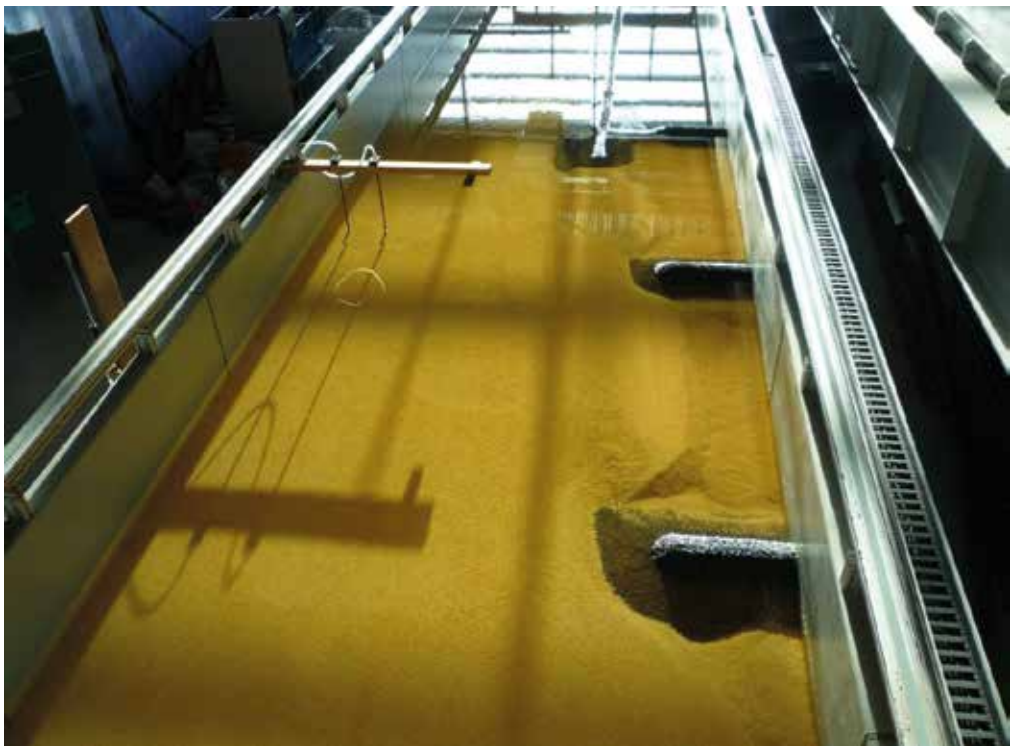
6.5.2 Elektrotechniek

De elektrotechniek binnen Wageningen University & Research is verbonden aan het thema gedistribueerde elektrische energievoorziening. Er wordt onderzoek gedaan naar nieuwe efficiënte technieken om duurzame elektriciteit op te wekken. Deze technologie wordt ontwikkeld voor de productie van duurzame energie en voor de terugwinning van energie uit (industrieel) afvalwater, om zo mogelijkheden te creëren voor bottom-up decentrale energieproductie. Ook wordt er gewerkt aan technologieën om energie tijdelijk op te slaan, cruciaal voor duurzame decentrale energieproductiesystemen. Daartoe doet de WUR onderzoek aan capacitieve processen, brandstofcellen, elektrolysecellen en batterijen. Verder werkt de universiteit aan het dynamisch modelleren van *smart grids*: modellen worden ontwikkeld voor *demand response management*, waarbij de integratie van de technologieën in smart grids bestudeerd wordt. De kracht van de Wageningse elektrotechniek blijkt uit twee Veni's binnen de leerstoelgroep Environmental Technology en andere prijzen (onder andere de Marcel Mulder-prijs in 2015 en 2016 voor watertechnologisch onderzoek met hoge industriële relevantie) en uit de samenwerking met de WUR-ERC-beurshouder Louis de Smet op het gebied van elektrode-ontwikkeling voor capacitieve processen. Daarnaast wordt samengewerkt met bedrijven, zoals Aliander, Magneto, REDSTACK, Vitens, Evides, Bluebattery, VOLTEA, DOW Benelux, Unilever en Shell. De leerstoelgroep Environmental Technology is in de onderzoeksvisitatie zeer goed beoordeeld. Wageningen University is voornemens zich in de komende periode te versterken in het focusgebied energietechniek. Daarbij gaat het specifiek om het dynamisch modelleren van smart grids en de ontwikkeling van nieuwe efficiënte technieken om duurzame elektriciteit op te wekken. Voor dit focusgebied wordt met name gedacht aan de onderzoeksgebieden die een samenhang hebben met de bestaande sterktes in de leerstoelgroep Environmental Technology, maar er zal ook impact op het onderzoek van aanpalende leerstoelgroepen zijn. Nationaal zal er samenwerking en afstemming met TUD, TU/e en UT plaatsvinden. Deze versterking zal ook ten goede komen aan het onderwijs.

6.5.3 Civiele Techniek

WUR verricht civieltechnisch onderzoek binnen de onderwerpen vloeistofmechanica en herbruikbaar water. De kracht van de civiele techniek binnen WUR blijkt onder andere uit: de NWO-TTW perspectiefprogramma's Bio-Geo-Civil, WATER NEXUS 2015-2022 en RiverCare, een Veni-beurs voor het biologisch verwijderen van microverontreinigingen uit grondwater en een KNAW-project gericht op de Kapuas Delta. Wageningen University & Research wil zich versterken op het focusgebied vloeistofmechanica voor civieltechnische constructies, en dan specifiek binnen de thema's vloeistofmechanica en herbruikbaar water. De vloeistofmechanica is in Wageningen onderdeel van de droge en natte cultuurtechniek en waterhuishouding. In 2010 is het Kraijenhoff van de Leur Laboratory for Water and Sediment Dynamics opgericht, waar onderzoek wordt verricht naar oplossingen voor watervraagstukken rond de herinrichting van het deltalandschap. In dit kader wil WUR haar onderzoek versterken op het gebied van experimentele hydraulica, ter bevordering van kennis over de wisselwerking tussen stroming, sedimenttransport, vegetatie en bodemontwikkeling in delta's. Daarnaast is er behoefte aan aanvullende kennis op het gebied van estuariene dynamica om de ontwikkeling naar een veerkrachtige, klimaatbestendige delta te versnellen. Binnen het thema herbruikbaar water doet WUR onderzoek naar infrastructuur voor sanitatie en technologie voor zuivering van stedelijk water, om zo water, organische grondstoffen en nutriënten terug te winnen en herbruikbaar te

maken. Op dit onderwerp is er samenwerking met TUD binnen het AMS Institute. Daarnaast wil WUR het onderzoek versterken naar de ontwikkeling van infrastructuur en technologie voor de zuivering van water en grondstoffen met betrekking tot microverontreinigen, zoals medicijnen en bestrijdingsmiddelen. De bestaande samenwerking op dit onderwerp met UT en TU/e (fysisch-chemische en membraantechnologische zuivering), en TUD (biologische zuivering) wordt verder versterkt. Bovenstaande onderzoeksthema's zijn gekoppeld aan de leerstoelgroepen Hydrology and Quantitative Water Management en Environmental Technology, en hebben impact op het onderzoek van de leerstoelgroepen Water Resources Management, Water Systems and Global Change en Soil Physics and Land Management.



Fysisch schaalmodel van een langsdam, die wordt geëvalueerd als alternatief voor rivierkribben. Onderzoek bij het Kraijenhoff van de Leur Laboratory for Water and Sediment Dynamics, WUR.
Foto: WUR

7 Wisselwerking eerste en tweede geldstroom

Met de sectorplannen wil het kabinet de onderzoekbasis in een aantal basisdisciplines in bèta en techniek versterken, via uitbreiding van de onderzoekscapaciteit en het aantrekken en behouden van (nieuw) onderzoektalent. Daarnaast richten de sectorplannen zich op een aantal overkoepelende doelen, zoals de strategische samenwerking tussen de instellingen op het gebied van onderzoek, onderwijs en maatschappelijke impact.

Zoals in paragraaf 2.5 is toegelicht, investeert het kabinet M€ 60 per jaar, waarvan tachtig procent als eerste geldstroom en twintig procent via NWO beschikbaar wordt gesteld. In dit hoofdstuk beschrijft de kwartiermaker zijn visie op de beoogde samenhang tussen de eerste en tweede geldstroom zoals deze bij de totstandkoming van de voorliggende sectorbeelden is gevormd. Daarbij wordt ingegaan op de gewenste aansluiting van de beide geldstromen en de samenwerkingsmogelijkheden tussen NWO en het veld. Onderstaand voorstel is in goed overleg met de NWO-domeinen Exacte en Natuurwetenschappen (ENW) en Toegepaste en Technische Wetenschappen (TTW) en met de betrokken bèta- en techniekdecanen tot stand gekomen.

7.1 Eerste geldstroom voor nieuwe posities

De sectorbeelden geven de geprioriteerde basisdisciplines binnen bèta en techniek aan. Daarbinnen wordt een geselecteerd aantal focusgebieden beschreven waarin het onderzoek in Nederland zich internationaal kan onderscheiden en waarvan versterking met het oog op de toekomstige wetenschappelijke en maatschappelijke uitdagingen nodig wordt geacht. Zoals beoogd, krijgt de Commissie Van Duijn het komend jaar de verantwoordelijkheid om de tachtig procent eerste geldstroommiddelen toe te kennen aan voorstellen voor de gewenste versterking van facultaire zwaartepunten binnen de genoemde focusgebieden, zoals in de profileringsplannen omschreven. Het voorstel in de sectorbeelden voor bèta en techniek is om deze eerste geldstroommiddelen direct in te zetten voor het creëren van nieuwe posities in de vaste wetenschappelijke staf. Afhankelijk van de senioriteit van het gezochte talent en de benodigde middelen voor de materiële inbedding van het nieuwe staflid, gaat de kwartiermaker ervan uit dat de jaarlijks benodigde bedragen voor een nieuwe positie uiteen lopen van K€ 120 tot 250, zoals in paragraaf 2.6 nader is uitgewerkt. Langs deze weg kunnen met de eerste geldstroommiddelen naar verwachting circa 85 nieuwe posities in de techniek en circa 185 in de bèta gerealiseerd worden.

7.2 Tweede geldstroom voor infrastructuur en tijdelijke staf

Binnen bèta en techniek hebben de decanen aangegeven dat er, naast de invulling van nieuwe vaste wetenschappelijke posities, ook grote behoefte is aan investering in onderzoekinfrastructuur en in tijdelijke universitaire onderzoekposities (promovendi en postdocs). Met het oog op de werving van nieuw talent wordt de investering bij voorkeur zo vormgegeven dat het de aantrekkingskracht van de nieuwe posities vergroot. Men verwacht dat de spoeling voor werving dun is en dat met het buitenland geconcurreerd moet kunnen worden door de inzet van aantrekkelijke startpakketten.

Het voorstel dat in overleg met NWO tot stand is gekomen, is om de tweede geldstroom te benutten voor investeringen in infrastructuur en tijdelijke wetenschappelijke posities in de gekozen focusgebieden van de sectorplannen, verbonden met de nieuw ingevulde sectorplanposities. OCW heeft aangegeven dat de tweede geldstroom via competitie moet worden ingezet. NWO heeft besloten daarvoor het bestaande instrumentarium binnen ENW en TTW te gebruiken. Tevens wil NWO de bestuurlijke verantwoordelijkheid voor de inzet van de middelen nemen door middel van de eigen systematiek van beoordeling en toetsing van voorstellen.

7.3 Een eerste investering in infrastructuur

Van de toegezegde tweede geldstroommiddelen heeft OCW al voor 2018 een bedrag van M€ 30 aan NWO beschikbaar gesteld. Voorgesteld wordt om die middelen op korte termijn – bij voorkeur in de loop van 2019 - in te zetten voor investeringen in infrastructuur voor de geselecteerde focusgebieden binnen de sectorplandisciplines. Omdat de meeste nieuwe posities pas in de loop van de tijd ingevuld kunnen worden, wordt voorgesteld om deze middelen al in te zetten op basis van voorstellen voor de in de sectorbeelden beschreven focusgebieden. De voorstellen kunnen uitsluitend ingediend worden door groepen van onderzoekers en hoofdaanvragers werkzaam in de zwaartepunten die volgens de sectorplannen in aanmerking komen voor versterking. Daarbij wordt het van belang geacht dat er ruimte komt voor substantiële investeringen met een maximale sectorplanbijdrage van M€ 1. Aangezien het hier investeringen betreft in de basisonderzoekinfrastructuur, is het voorstel dat NWO bij de toekenning afziet van voorwaarden betreffende valorisatie, toepassing en industriële financiële bijdragen. Mogelijke aanvragen kunnen worden beperkt tot die facultaire zwaartepunten waaraan de Commissie Van Duijn in de zomer van 2019 nieuwe posities heeft toegekend. NWO zal de hiervoor benodigde systematiek nader uitwerken in overleg met de Commissie Van Duijn. Parallel aan de voorbereiding van de profileringsplannen wordt NWO verzocht om de beoogde systematiek en aanpak vóór 15 maart 2019 nader uit te werken en aan de commissie voor te leggen.

Zoals in paragraaf 2.5 is omschreven is binnen deze ronde M€ 11 beschikbaar voor investeringen in de focusgebieden binnen de drie sectorplandisciplines in de techniek en M€ 19 voor de vier binnen bèta. NWO heeft aangegeven hierbij gebruik te willen maken van het bestaande instrumentarium van ENW (Open Competitie ENW-KLEIN) en TTW (Open Technologie Programma OTP). NWO zal daarbij aandacht schenken aan de wijze waarop de competitie wordt ingericht én aan de manier waarop geborgd wordt dat de beschikbare sectorplanmiddelen

volledig ten goede komen aan de geselecteerde focusgebieden uit de sectorbeelden. In overleg met de Commissie Van Duijn zal NWO nader bepalen op welke wijze de hierbij betrokken selectiecommissies of jury's de voorstellen zullen beoordelen in het licht van de focus en doelen van de sectorbeelden. Hierbij kan overwogen worden om de uitgewerkte aanvragen in beginsel niet aan referenten voor te leggen, om de besluitvorming te bespoedigen. De aanvragers van alle uitgewerkte voorstellen worden uitgenodigd voor een interview door een brede beoordelingscommissie, waarbij het voornemen is om een link (personele unie) tussen de beoordelingscommissie en de Commissie Van Duijn te hanteren. De beoordelingscommissie bestaat uit voldoende personen om de interviews te kunnen uitvoeren. Deze commissie is een adequate afspiegeling van de disciplinaire samenstelling van ENW/TTW en ruimt voldoende plaats in voor deskundigen op het terrein van de gekozen focusgebieden. Daarnaast heeft het een evenwichtig verdeling man/vrouw en spreiding over universiteiten. Om een verantwoorde verdeling van de middelen over de disciplines en focusgebieden van de bèta en de techniek te bewaken, worden deze bij voorkeur als volgt gecompartimenteerd:

Tabel 13 – Compartimentering tweede geldstroom sectorplanregeling 2019 voor infrastructuur in de bèta- en techniekdisciplines

Discipline	Tweede geldstroom infrastructuur
Natuurkunde	€ 8.500.000,=
Scheikunde	€ 8.500.000,=
Informatica	€ 2.000.000,=
Bèta totaal	**€ 19.000.000,=**
Werktuigbouw	€ 5.500.000,=
Elektrotechniek	€ 3.250.000,=
Civiele Techniek	€ 2.250.000,=
Techniek totaal	**€ 11.000.000,=**

Bij de compartimentering is naar voren gekomen dat er voor de wiskunde geen en voor de informatica maar een relatief beperkte behoefte is aan investeringen in experimentele infrastructuur. Overwogen kan worden om het compartiment voor de gewenste investeringen in de informatica - gelet op de aard ervan - over te hevelen naar de NWO-regeling die voor de infrastructuur in de techniek wordt ingericht. Om het honoreringspercentage op een redelijk niveau te houden (35-50 procent) wordt voorgesteld dat de decanen samen met de Commissie Van Duijn en NWO afspreken hoe het aantal voorstellen per universiteit en per discipline te reguleren.

7.4 Projecten voor nieuwe onderzoekers

Voor de periode 2020-2024 heeft OCW aan NWO jaarlijks M€ 8,6 toegezegd. In paragraaf 2.5 is geschetst dat deze middelen in de verhouding van 5,6 : 3,0 bedoeld zijn voor de geselecteerde focusgebieden van de bèta, respectievelijk de techniek. De middelen worden bij voorkeur in

een doorlopende regeling of een tweetal gerichte calls ter beschikking gesteld voor tijdelijk wetenschappelijk personeel (promovendi en postdocs), aan te nemen door de nieuw benoemde onderzoekers op de 'sectorplanposities'. NWO zal in overleg met de Commissie Van Duijn en op basis van haar instrumentarium een systematiek uitwerken die voldoende competitie garandeert, ten goede komt aan de nieuwe posities vanuit het sectorplan en voldoende spreiding bewaakt over deze posities en de geprioriteerde focusgebieden. Van belang daarbij is dat de verdeling van de middelen voor de bèta (jaarlijks M€ 5,6) en techniek (jaarlijks M€ 3,0) wordt geborgd. Gezien de beperkte behoefte van de wiskunde en informatica aan versterking van de infrastructuur, moet in deze volgende rondes een groter deel ten goede komen aan deze bètadisciplines.

Een specifiek punt van aandacht is dat er voor de natuur- en scheikunde nog een bedrag van jaarlijks M€ 6,0 beschikbaar is uit het Sectorplan Natuur- en Scheikunde (SNS). Overwogen kan worden om deze middelen te betrekken bij het nieuwe sectorplan bèta, waarbij rekening gehouden moet worden met de positie van de wiskunde en informatica die significant minder infrastructuur gebruiken.

7.5 Versterking van het zelforganiserend vermogen

De kwartiermaker heeft in de voorbereiding van de sectorbeelden vast kunnen stellen dat er een grote gezamenlijke wens en energie is tot het stimuleren van het zelforganiserend vermogen van de (sub)disciplines in Nederland om zo mede richting te geven aan de uitdagingen van de wetenschappelijke (sub)disciplines. Dit kan leiden tot een prachtige wisselwerking tussen het veld en NWO. De nieuwe structuur van NWO geeft goede kansen om in de Nexus-rol de verschillende disciplines te faciliteren in het maken van gezamenlijke afspraken en het formuleren van uitdagingen voor de toekomst.

In de sectorplannen en de financiering vanuit NWO staan het faciliteren van excellent onderzoek en het aantrekken en behouden van toptalent in Nederland centraal. Universiteiten zijn gebaat bij een zekere vorm van competitie op basis van excellentie. Daarnaast is ook aandacht nodig voor het belang van de beoogde versterking van de geprioriteerde onderzoekgebieden. Naar verwachting zullen de nieuwe posities eveneens bijdragen aan voorstellen in de brede NWO-rondes, waaronder de instrumenten die gerelateerd zijn aan de NWA en de wisselwerking met de industrie in de topsectoren. De eerste geldstroommiddelen van de universiteiten worden structureel ingezet voor nieuwe vaste wetenschappelijke staf. Om de aanvraagdruk en honoreringspercentages op een gewenst niveau te kunnen houden is uitbreiding van de open competitie van NWO een essentieel onderdeel van deze sectorplannen. Het voorstel voor de komende zes jaar is erop gericht om de middelen van de sectorplannen in de uitgekozen gebieden te laten landen en de geselecteerde focusgebieden te versterken. Na 2024 wordt de situatie bepaald door de behaalde successen. De Commissie Van Duijn zal de resultaten beoordelen en de minister van OCW adviseren over het mogelijk indalen van de NWO-gelden.

8 Hoe verder naar sectorplannen

8.1 Van een sectorbeeld naar het sectorplan

In de sectorplanaanpak staat de integrale versterking van het wetenschappelijk onderzoek en onderwijs centraal. Het beschikbare budget komt direct ten goede aan hen die het dichtst bij het onderzoek en onderwijs staan: de (wetenschappelijke) staf van de universiteit, faculteit en vakgroep. Dit is de beste garantie voor een effectieve inzet van de beschikbare middelen. Vanaf 2018 is een significant budget beschikbaar om de onderzoekbasis in een geselecteerd aantal disciplines te versterken. Hiermee kunnen niet alle gesignaleerde knelpunten in de volle omvang worden weggenomen, maar wordt wel de neergaande trend in de (concurrentie)positie ten opzichte van de ons omringende landen aangepakt. De versterking van de universiteiten is dan ook vooral gericht op het uitbreiden van de wetenschappelijke staf en infrastructuur in een aantal strategisch gekozen focusgebieden in de basisdisciplines binnen het bèta- en techniekdomein. Dit dient meerdere doelen tegelijk, in willekeurige volgorde: i) het verder focusseren van het onderzoek in zwaartepunten per universiteit die samen een complementair landelijk onderzoekspalet bieden; ii) het versterken van de bèta- en techniekopleidingen, iii) het schragen van de onderzoekbasis die cruciaal is voor de interdisciplinaire uitdagingen, zoals bijvoorbeeld in de Nationale Wetenschapsagenda, iv) vernieuwing brengen in onderzoek in aansluiting op actuele wetenschappelijke en maatschappelijke uitdagingen, v) het uitbreiden van de onderzoekinfrastructuur in erkende zwaartepunten, vi) het versterken van de basis die nodig is voor het intensiveren van de publiek-private samenwerking met het bedrijfsleven en de versterking van de topsectoren, vii) het verbeteren van de genderbalans in staf en studenten, viii) het zorgen voor meer academisch geschoolde leraren voor de klas, en ix) het versterken van de koppeling tussen het nationaal onderzoeks- en onderwijspalet, et cetera. De betrokken universiteiten zullen zelf in zogeheten profileringsplannen beschrijven hoe ze met de integrale aanpak de gewenste verbeteringen willen realiseren. Het sectorplan techniek bestaat daarmee uit dit sectorbeeld en de daarop gebaseerde profileringsplannen van de universiteiten.

Dit sectorbeeld geeft een integrale beschrijving van het onderzoek en onderwijs binnen de geprioriteerde disciplines van de deelnemende universiteiten, waarin zowel de huidige stand van zaken alsook de plannen voor de toekomst zijn opgenomen. Hierin zijn soms ook opleidingen genoemd waarvoor nog geen macrodoelmatigheidstoets heeft plaatsgevonden. Op basis van de nieuwe regeling is uitsluitsel van deze toets mogelijk onder bepaalde voorwaarden. De precieze voorwaarden en werkwijze hieromtrent zullen nog door het ministerie van OCW worden vastgesteld en met de Commissie Van Duijn worden besproken.

8.2 Wat wordt verwacht van de universiteiten?

Op basis van de in dit sectorbeeld gemaakte keuzes zullen de hierin genoemde universiteiten uitgenodigd worden om profileringsplannen in te dienen bij de Commissie Sectorplan Bèta en Techniek met Hans van Duijn als beoogd voorzitter. Deze plannen beschrijven de beoogde profilering van de in dit sectorbeeld geprioriteerde disciplines en faculteiten. Bij het opstellen van de profileringsplannen zal er namens elke universiteit één decaan optreden als penvoerder voor het universitaire profileringsplan techniek. Deze zal daarmee ook het aanspreekpunt zijn voor de Commissie Van Duijn betreffende alle inspanningen in de techniekdisciplines van die universiteit. De penvoerder zal in het profileringsplan beschrijven hoe en welke van de aangegeven ambities de universiteit nastreeft en wat nodig is om deze te realiseren. Het plan is één geïntegreerd stuk met daarin de gezamenlijke plannen voor die disciplines in het techniekdomein die voor versterking in aanmerking kunnen komen, gericht op de versterking van de in hoofdstuk 4 beschreven focusgebieden. De profileringsplannen worden door de Commissie Van Duijn geëvalueerd en beoordeeld, en waar de commissie dit nodig acht tussentijds teruggelegd bij de faculteiten met een verzoek om opheldering. Na 15 mei zal de commissie de definitieve profileringsplannen prioriteren, en een daaruit voortvloeiend voorstel tot verdeling van middelen voorleggen aan het ministerie van OCW. De minister zal op basis van dit advies besluiten hoe de middelen voor de periode 2019-2024 worden verdeeld, met de uitdrukkelijke intentie om deze na die periode structureel te laten indalen.

De plannen en ambities van de verschillende disciplines zullen een cruciale rol in het beoordelingsproces spelen. Dat wil zeggen dat landelijk afgestemde afspraken over zwaartepuntvorming (ter herinnering: faculteiten kennen zwaartepunten en disciplines kennen focusgebieden) zoals beschreven in hoofdstuk 4 en 6 leidend worden bij het toekennen van de posities. In de prioritering zal de commissie verder rekening houden met de kwaliteit van het voorstel en de daarin uitgesproken ambities, evenals de kracht van de indienende faculteit (zijnde een combinatie van grootte en kwaliteit van het facultaire zwaartepunt). Ten slotte kunnen uitdagende ambities alleen met bewezen kracht worden gerealiseerd. Hoewel de in dit sectorbeeld vastgestelde bedragen per discipline niet onderhandelbaar zijn, doet dit sectorbeeld geen uitspraken over de marges van de te verkrijgen structurele gelden per zwaartepunt in elke discipline voor een faculteit. Dit is geheel aan de Commissie Van Duijn. Het is echter mogelijk om een reële schatting te maken van de slagingskansen van de zwaartepunten zoals opgevoerd door de faculteit in het profileringsplan. Hierdoor kan wat in de sectorplannen wordt voorgesteld ter versterking van een discipline in een individuele faculteit gelijke tred houden met wat er per discipline en faculteit gemiddeld te verdelen valt. Na toekenning door de minister van OCW zal de Commissie Van Duijn het verloop van het proces monitoren. Bij het succesvol realiseren van de - door de faculteiten zelf gestelde - ambities in de zesjarige looptijd van het sectorplan, zullen de daarin beschikbaar gestelde middelen op structurele wijze indalen in de eerste geldstroom van de universiteiten. Voor de planning met specifieke data wordt verwezen naar tabel 14.

Tabel 14 – Tijdspad vanaf 1 december 2018

1 december – 25 januari	Goedkeuringsproces van de sectorbeelden bij het ministerie OCW
15 maart	Faculteiten leveren hun profileringsplannen in bij de Commissie Van Duijn
15 april	Terugkoppeling naar faculteiten door commissie
15 mei	Faculteiten leveren de definitieve plannen in
Medio juni	Commissie Van Duijn adviseert minister OCW
1 juli	Minister neemt een beslissing

8.3 Richtlijnen voor een universitair profileringsplan

In nauw overleg met de Commissie Van Duijn zijn hier de richtlijnen van de in te dienen profileringsplannen omschreven, met een nadere detaillering, uitleg en motivatie van de in hoofdstuk 6 beschreven activiteiten en ambities van de faculteiten in elke discipline. De Commissie Van Duijn zal daar, zo spoedig mogelijk na vaststelling van dit sectorbeeld, specifieke richtlijnen voor geven aan de decanen. In de profileringsplannen kan de huidige positie en de ambities op het gebied van onderzoek, onderwijs en maatschappelijke betrokkenheid op uitgebreide wijze beschreven worden. Hierbij wordt rekening gehouden met de doelen en randvoorwaarden zoals gesteld in dit sectorbeeld. De hoofdpunten daarvan worden hieronder benoemd. Van de instellingen wordt verwacht dat ze de volgende onderwerpen adresseren in de in te dienen profileringsplannen:

A Een korte en bondige beschrijving over de universiteit en de samenhang binnen en buiten de faculteiten in het techniekdomein (de preambule):

- Een beschrijving van de strategie van de universiteit en de faculteiten met betrekking tot hun unieke positie.
- De profilering van de universiteit (en faculteiten) op het gebied van onderwijs en onderzoek.
- Een beschrijving van de ambities en doelen van de universiteit in de onderhavige sectoren, dit in samenhang met de facultaire doelen, centrale stimuleringen, en met de landelijke en internationale samenwerkingen op universitair niveau.

B Beschrijving van de onderzoekzwaartepunten en informatie over de gevraagde versterkingen:

- De penvoerders worden gevraagd om op heldere wijze voor elke discipline afzonderlijk de lokale zwaartepunten (3-4) gekoppeld aan de landelijke focusgebieden te benoemen en te correleren aan de landelijke afspraken, zoals weergegeven in hoofdstuk 4 en 6.
- Alle zwaartepunten worden in detail beschreven inclusief de huidige bezetting (inclusief de namen van zittende staf – als dit volgens de privacywet niet mag, zal een andere oplossing gekozen moeten worden om een goed beeld te krijgen van de huidige bezetting) en de ambities voor de periode 2019-2024, alsook de onderbouwing van de kwaliteit en een heldere link naar het onderwijs. Dit wordt gevraagd voor alle zwaartepunten, ook daar waar in de profileringsplannen geen versterking wordt aangevraagd. Met andere woorden: voor alle onderhavige disciplines komt een staalkaart van Nederland van alle (herkenbare) zwaartepunten beschikbaar, zodat duidelijk is wie waar actief betrokken is bij welke focusgebieden.

- Voor de zwaartepunten per faculteit wordt gevraagd de verbinding te beschrijven met de bestaande bacheloropleiding (CROHO-label) en masteropleiding(en) en/of *master tracks*. Zoals ook in de vorige sectorplannen is de inhoudelijke relatie tussen een facultair zwaartepunt en de bijbehorende master (of *master track*) een essentieel onderdeel van het borgen van de kwaliteit van onderwijs en de verwevenheid tussen onderzoek en onderwijs.
- De gevraagde posities zijn gekoppeld aan een facultair zwaartepunt en passen binnen de focusgebieden van de discipline zoals beschreven in hoofdstuk 4 en 6. Dit wordt in het plan duidelijk gemaakt door voor elke aangevraagde positie een korte beschrijving van het voorziene werkterrein op te nemen, in relatie tot het beoogde focusgebied en daarin te versterken zwaartepunt.
- Voor de zwaartepunten per faculteit wordt aangegeven wat de betekenis is van het zwaartepunt en de verwoorde ambities voor de relevante NWA-routes of kennisagenda's van de topsectoren.
- Bij elke positie wordt aangegeven of het hier gaat om een senior of *tenure track* positie en of het een positie betreft die voornamelijk experimenteel of theoretisch van aard is. Daarbij worden de tarieven zoals beschreven in 2.6 aangehouden.
- In beperkte mate is er de mogelijkheid om een investering in dure apparatuur c.q. infrastructuur te doen met een afschrijvingsperiode van zes jaar. Ook technische ondersteunende staf kan beperkt worden opgevoerd tegen een tarief van k€ 75 per jaar. Het is aan de Commissie Van Duijn om te bezien of dit in 2024 wordt gezien als een strategische investering, die financieel kan indalen. Bij deze investering wordt eenzelfde beschrijving gemaakt als gevraagd bij de vaste wetenschappelijke posities ten aanzien van de koppeling met zwaartepunt en focusgebied.
- Er is de mogelijkheid om per universiteit één positie te reserveren voor een nieuw vrouwelijk staflid zonder dat deze op voorhand wordt gekoppeld aan een specifiek zwaartepunt. Bij de benoeming moet echter wel aannemelijk te maken zijn dat deze passend is in de focussering en de landelijke afspraken.
- Het wordt sterk aangeraden om bij meerdere aangevraagde posities in één zwaartepunt een prioritering aan te geven.
- In gezamenlijk overleg kunnen de decanen besluiten om een (klein) deel van de middelen voor de verschillende disciplines te reserveren voor landelijke acties voor *outreach* en lerarenopleidingen, in plaats van deze doelen elk in de separate plannen op te nemen. Als de decanen hiertoe besluiten wordt hen gevraagd een gezamenlijk plan van aanpak inclusief een passende begroting op te stellen. Dit plan zal eenzelfde procedure ondergaan als de plannen per universiteit, dat wil zeggen: 15 maart een eerste en 15 mei een definitieve versie voorleggen aan de Commissie Van Duijn.

C De toetsbare ingrediënten – inclusief SMART criteria – voor de integrale versterking van het onderzoek, onderwijs en andere aspecten die gerealiseerd gaan worden door bovenstaande investeringen:

- Een getalsmatige samenstelling van het aantal studenten (bachelor, master en promovendus) per discipline wordt gevraagd voor zowel de laatste drie jaar als een voorgestelde situatie in 2024. Nadrukkelijk moet helder zijn hoe deze doelstellingen te halen zijn, inclusief SMART criteria voor halverwege het proces. Het lijkt goed om in samenspraak tussen de Commissie Van Duijn en het decanenoverleg hier een tabel/template voor te maken en een opzet voor hoe de kengetallen aangeleverd moeten worden.
- Een overzicht van het aantal vrouwelijke studenten en stafleden dat de discipline momenteel kent en de doelstellingen voor 2024.

- Een beschrijving van de studierendementen van de bachelor- en masteropleidingen in de zwaartepunten evenals het promotierendement en de doorlooptijd daarvan, en een voorgestelde situatie in 2024.
- Een beschrijving hoe de investering in de faculteit kan leiden tot het aanpassen van bestaande of toekomstige numeri fixi.
- De specifieke maatregelen voor het verhogen van het aantal academisch geschoolde leraren voor de klas in het hbo, inclusief streefgetallen per universiteit. Hierbij kan ook worden verwezen naar een door de techniekdecanen gezamenlijk geformuleerd plan.
- De specifieke maatregelen voor *outreach* naar het primair en voortgezet onderwijs om de aantrekkingskracht van studenten in de techniekdisciplines structureel hoog te houden. Ook hierbij mag worden verwezen naar een door de decanen gezamenlijk geformuleerd plan.
- De verwevenheid tussen onderzoek en onderwijs is groot in de academische activiteiten. Met bovenstaande relatie tussen zwaartepunt en bachelor- en masteropleidingen kan ook helder worden gemaakt hoe de huidige sectorale investeringen worden ondersteund door inzet vanuit de twee procent profileringsmiddelen en de middelen uit het *Sectorakkoord wetenschappelijk onderwijs 2018*; en hoe vice versa de geformuleerde profileringsplannen bijdragen aan de kwaliteitsafspraken op het gebied van onderwijs. Zie voor meer info: https://www.rijksoverheid.nl/documenten/convenanten/2018/04/09/sectorakkoord-wetenschappelijk-onderwijs-2018.

Met bovenstaande richtlijnen als uitgangspunt zal de Commissie Van Duijn in samenspraak met het decanenoverleg de gespecificeerde SMART criteria vaststellen en ook de omvang en manier van rapporteren. De individuele faculteiten zullen zelf hun ambities vaststellen en vermelden in hun profileringsplannen van 15 maart. Deze worden voorgelegd aan de Commissie Van Duijn en door de commissie voorzien van commentaar voor de definitieve profileringsplannen van 15 mei.

9 Conclusie

Na de voorgaande hoofdstukken volledig te hebben afgestemd met alle betrokkenen, wil ik als kwartiermaker dit hoofdstuk aangrijpen om de sectorbeelden met een meer persoonlijke noot te beëindigen. Daarbij verwijs ik graag naar de inleiding, waar gesproken wordt over een enthousiaste start. Deze sectorbeelden reflecteren namelijk precies dat: het enthousiaste begin van een proces wat de Nederlandse universiteiten vergaand kan versterken. Naast het feit dat de sectorbeelden de basis vormen voor de broodnodige investering in de bèta- en techniekse ctoren, is het opstellen hiervan vooral een eerste stap in een proces van verdere zelforganisatie van deze sectoren. Een bottom-up gedreven aanpak, waarin zelforganisatie plaatsvindt langs de lijn van de disciplines, waarin de universiteiten zijn onderverdeeld, en waarbinnen het onderwijs, onderzoek en werken aan maatschappelijke doelstellingen plaatsvindt. Ik ben er dan ook van overtuigd dat dit grotere doel scherp in het vizier gehouden wordt en dat de verworven middelen worden besteed met dat doel in gedachten; een versterkte basis. Alleen op deze manier kan de zelforganisatie van de Nederlandse wetenschapsgebieden maximaal worden vergroot, het vertrouwen in en de autonomie van de wetenschap en de wetenschappers ten volle worden versterkt. Uiteindelijk zal dat de Nederlandse wetenschap optimaal positioneren in een wereld waar internationaal steeds meer wordt geïnvesteerd in de natuur- en technische wetenschappen. Hieronder zal ik kort op deze aspecten ingaan.

9.1 Sectorplannen als investeringsmechanisme

De ambities op gebied van onderzoek, onderwijs en bijdragen aan maatschappelijke uitdagingen zijn hoog. Echter, de onderzoeksinspanning van Nederland in de hier beschreven disciplines is teruggelopen tot onder de mondiale norm en is nog verder onder druk komen te staan door de toegenomen student-stafratio en de vraag naar goed opgeleide bètatechnici vanuit de maatschappij. Voor de informatica en de werktuigbouwkunde is de vraag momenteel zelfs zo sterk dat universiteiten amper kunnen concurreren met de industrie en dus grote moeite hebben om hun wetenschappelijke staf aan te trekken c.q. te behouden. Gezien de achterstand en de omvang van de problematiek zullen de beschikbare middelen niet voldoende zijn om al de beschreven ambities ten volle waar te maken. Als deze middelen echter worden ingezet vanuit het gedachtegoed van de integrale aanpak van onderzoek, onderwijs en bijdragen aan maatschappelijk doelen, zal dit maximaal effect hebben op indicatoren zoals de onderzoekspecialisatie index, (citatie) impact van het onderzoek en de student-stafratio, en ook op de minder SMART te formuleren doelen als autonomie en zelforganisatie van de discipline.

Het is belangrijk bij deze integrale aanpak ook de gehele keten van primair en voortgezet onderwijs, verbinding met hbo en academische scholing van bachelor tot *tenure track* voor ogen te houden. Hiervoor zal moeten worden ingezet op *outreach* en versterken van lerarenopleidingen, maar kan ook gekeken worden naar de internationale wervingskracht op alle niveaus. Als voorbeeld hiervan is in nauwe samenwerking met Studyportals Eindhoven een

analyse gemaakt van de aantrekkelijkheid van de Nederlandse universiteiten voor buitenlandse studenten. Daaruit blijkt dat studenten uit de internationale topuniversiteiten (de top 100) maar beperkt geïnteresseerd zijn om in Nederland verder te studeren in de bèta en techniek. Het is dan ook zeer aan te raden om de staalkaart van de Nederlandse natuur- en technische wetenschappen zoals verenigd in de zwaartepunten en verbonden met de masteropleidingen in te zetten om toekomstige studenten en promovendi aan te trekken.

Over de volle linie geldt dat de doelen zoals beoogd in de integrale aanpak voornamelijk gerealiseerd zullen moeten worden door het creëren van nieuwe stafposities. Met de beschikbare middelen zal een significante versterking van de universitaire wetenschappelijke staf in het bèta en techniekdomein worden bereikt. Dit geeft een geweldige kans voor de vele uitmuntende jonge wetenschappers die recent zijn gepromoveerd en momenteel als postdoc in het buitenland of op de Nederlandse universiteiten werkzaam zijn. Het is dan ook mijn hoop dat de faculteiten vertrouwen geven aan deze jonge wetenschappers, die dankzij de sectorplannen met mooie startpakketten kunnen beginnen. *Tenure track* onderzoekers moeten al zoveel tegelijk realiseren in een korte tijd – waarin ze ook vaak nog een familie stichten – dat een onvoorwaardelijke steun aan de nieuwe stafleden meer dan gerechtvaardigd is.

9.2 Sectorplannen als middel om de sectoren te organiseren

Bij het opstellen van deze sectorbeelden is eens te meer gebleken hoe de domeinen bèta en techniek enerzijds hetzelfde nastreven (het geven van goed onderwijs, doen van hoge kwaliteit onderzoek en hebben van impact in maatschappelijke uitdagingen) en anderzijds verschillen in aanpak (het verleggen van de grenzen van het weten dan wel van het kunnen). Deze verschillen in aanpak vullen elkaar aan en stellen de domeinen in staat om gezamenlijk de belangrijkste uitdagingen van de maatschappij tot een succesvol resultaat te brengen. Dit komt tot uitdrukking in interdisciplinaire projecten en programma's waar wetenschappers en technologen elkaar aanvullen en inspireren. Deze wisselwerking wordt straks gevoed door een versterkte basis, van waaruit de disciplines de grenzen van het weten en het kunnen verleggen. Dit geheel wordt gecomplementeerd door het goed opleiden van jonge mensen en hen toerusten met kennis en kunde die zeer gewenst is in de Nederlandse (maak)industrie en maatschappij.

Om bij dit alles de juiste balans tussen complementariteit en gezamenlijkheid te bereiken zullen de decanen in goed overleg en op basis van deze sectorbeelden hun profileringsplannen opstellen. De Commissie Van Duijn zal op de implementatie en uitvoering hiervan toezien, waarbij het bèta-decanenoverleg en het nieuw gestarte techniekdecanenoverleg als primair aanspreekpunt dienen voor de landelijke afspraken, en de leden hierin elk individueel aanspreekpunt zijn voor de lokale uitvoering van de gemaakte afspraken. Daarnaast is een belangrijke rol weggelegd voor de nationale disciplinaire overlegorganen, zoals het Platform Wiskunde Nederland en het Informatica Platform Nederland. Het is dan ook goed om te zien dat andere disciplines, zoals de werktuigbouwkunde en de elektrotechniek, in het kader van deze sectorbeelden hebben uitgesproken een vergelijkbaar platform te willen starten. Dergelijke platforms zijn essentiële instrumenten voor de landelijke afspraken over onderzoek en onderwijs en zullen als zodanig hun functie verder versterken tijdens de looptijd van de komende sectorplannen. In combinatie

met de ambitie die NWO voor zichzelf geformuleerd heeft als Nexus kan een prachtige synergie ontstaan tussen de eerste en tweede geldstroom. Een mooie eerste stap hierin is het koppelen van de nationale disciplineplatforms aan strategische discussies binnen NWO.

Gegeven de inzet en het enthousiasme vanuit alle geledingen voor deze sectorbeelden heb ik dan ook het volste vertrouwen dat er met de komende sectorplannen flink geoogst kan worden. Ik voorzie daarbij een verdere toenadering van de natuurwetenschappen (bèta) en technische wetenschappen, waarbij de verschillen de komende decennia zullen marginaliseren. De noodzaak van de technologische benadering zal nog belangrijker worden voor de puur fundamentele natuurwetenschapper, terwijl anderzijds de uitdagingen in de technologie om een steeds fundamenteler aanpak zullen vragen. Deze verwevenheid is nu al te zien in de informatica, waar de kerninformatica niet zonder de toepassingen kan en de toegepaste informatica geen echte vooruitgang zal boeken zonder de nieuwe inzichten uit de kerninformatica. Maar ook bij de quantumcomputer en de geïntegreerde fotonica lopen de verschillende disciplines naadloos in elkaar over. Het is mijn hoop en verwachting dat ook in de andere disciplines deze toenadering steeds meer zal plaatsvinden, waardoor Nederland straks een internationaal sterke en geïntegreerde *science en engineering*-positie kan innemen. Op deze wijze zullen de centrale vraagstukken in de NWA en de topsectoren een nog beter basis voor interdisciplinair onderzoek verkrijgen. Hierbij zal de zelforganisatie zoals ingezet in de komende sectorplannen de disciplines optimaal in staat stellen om assertief te reageren op ontwikkelingen binnen en buiten de eigen discipline, om zo vanuit de basis de slagkracht van de faculteiten en universiteiten te vergroten en de Nederlandse wetenschap tot grotere hoogten te brengen.

Colofon

Tekstcorrectie	Anita van Stel, Van Stel voor teksten, en Gerti Vos, vos/seo tekst en web
Vormgeving	Mooizo Design
Beeld omslag	Bram Nauta (UT)
Print	Studio Gewoon Badoux

Januari 2019