Kansen en Risico's van de Toepassing van Neurotechnologie in het Strafrecht

Mr. dr. J. Bijlsma[1]

S.H. Geukes, MSc[2]

Prof. dr. G. Meynen[1,3]

Dr. M.A.H. Raemaekers[2]

Prof. dr. N.F. Ramsey[2]

Dr. mr. M.A. Simon Thomas[4]

Mr. dr. D.A.G. van Toor[5]

Dr. M.J. Vansteensel[2]

[1] Willem Pompe Instituut voor Strafrechtswetenschappen en Utrecht Centre for Accountability and Liability Law (UCALL), Departement Rechtsgeleerdheid, Faculteit Recht, Economie, Bestuur en Organisatie, Universiteit Utrecht

[2] UMC Utrecht Hersencentrum, Afdeling Neurologie en Neurochirurgie, Universitair Medisch Centrum Utrecht

[3] Afdeling Filosofie, Faculteit Geesteswetenschappen, Vrije Universiteit Amsterdam

[4] Staatsrecht, Bestuursrecht en Rechtstheorie en Montaigne Centrum voor Rechtsstaat en Rechtspleging, Departement Rechtsgeleerdheid, Faculteit Recht, Economie, Bestuur en Organisatie, Universiteit Utrecht

[5] Willem Pompe Instituut voor Strafrechtswetenschappen en Montaigne Centrum voor Rechtsstaat en Rechtspleging, Departement Rechtsgeleerdheid, Faculteit Recht, Economie, Bestuur en Organisatie, Universiteit Utrecht

Afkortingen

ACC	*anterior cingulate cortex*
aDBS	*adaptive deep brain stimulation*
ALS	amyotrofische laterale sclerose
BCI	*brain-computer interface*
CT	computertomografie
DBS	*deep brain stimulation*
DTI	*diffusion tensor imaging*
EcoG	elektrocorticografie
ECT	elektroconvulsietherapie
EEG	elektro-encefalografie
EHRM	Europees Hof voor de Rechten van de Mens
EVRM	Europees Verdrag voor de Rechten van de Mens
fMRI	*functional magnetic resonance imaging*
fNIRS	*functional near-infrared spectroscopy*
fTDC	*functional transcranial doppler*
fUSI	*focused ultrasound imaging*
GVM	gedragsbeïnvloedende en vrijheidsbeperkende maatregel
ISD	inrichting voor stelselmatige daders
MEG	magneto-encefalografie
MRI	*magnetic resonance imaging*
MRS	*magnetic resonance spectroscopy*
MS	multiple sclerose
PET	positron emissie tomografie
sEEG	stereotactische elektro-encefalografie
SPECT	*single positron emission computed tomography*
Sr	Wetboek van Strafrecht
Sv	Wetboek van Strafvordering
TBS	terbeschikkingstelling
tDCS	*transcranial direct current stimulation*
TMS	*transcranial magnetic stimulation*
TRL	*technology readiness level*
TFUS	*transcranial focused ultrasound stimulation*
WODC	Wetenschappelijk Onderzoek- en Documentatiecentrum

Vooraf

De laatste tien jaar werden gekenmerkt door een opmars van neurotechnologie, met name in het neurowetenschappelijk en medisch domein. Omdat neurotechnologie ook mogelijke toepassingen heeft in het justitie- en veiligheidsdomein heeft het Wetenschappelijk Onderzoek- en Documentatie Centrum van het Ministerie van Justitie en Veiligheid in Maart 2021 opdracht gegeven aan onderzoekers van het UMC Utrecht (UMCU Hersencentrum) en onderzoekers van het Departement Rechtsgeleerdheid van de Universiteit Utrecht (UCALL en het Montaigne Centrum) om een rapport op te stellen over Kansen en Risico's van de Toepassing van Neurotechnologie in het Strafrecht. Het onderzoek heeft plaatsgevonden tussen mei 2021 en februari 2022. Het rapport is op 28 februari 2022 opgeleverd en voorzien van kleine correcties op 22 Maart 2022.

Het rapport is mede tot stand gekomen door een belangrijke bijdrage van experts uit binnen- en buitenland. Wij, de onderzoekers, willen hierbij onze dank uitspreken aan de veertien geïnterviewde onderzoekers op het gebied van neurowetenschappen, recht en ethiek, voor hun deskundigheid en nuttige suggesties. Daarnaast zijn wij de vier experts die een proeflezing van het conceptrapport hebben uitgevoerd zeer erkentelijk voor de significante tijdsinvestering en de ‘puntjes-op-de-i'. Verder danken we de begeleidingscommissie (T.E. Swierstra (voorzitter), A.M. Brouwer, S. Dorrestijn, B. ter Luun, R. Oostenveld en M. Turina-Tumewu) voor hun waardevolle en constructieve feedback. Ten laatste een woord van waardering aan A. Elbertse, voor het accurate en gedetailleerde secretariaat van de bijeenkomsten met de begeleidingscommissie.

Utrecht, 22-03-2022

De onderzoekers,

Johannes Bijlsma
Simon Geukes
Gerben Meynen
Mathijs Raemaekers
Nick Ramsey
Marc Simon Thomas
Dave van Toor
Mariska Vansteensel

Samenvatting

De laatste jaren is er veel aandacht voor neurotechnologie. Het gaat hierbij om technieken die bijdragen aan kennis over de hersenen en/of die interacteren met de hersenen. De aandacht voor neurotechnologie wordt onder andere veroorzaakt door de voortdurende technologische vooruitgang. Omdat neurotechnologie (ook) potentie heeft voor toepassing binnen het justitie- en veiligheidsdomein heeft het Wetenschappelijk Onderzoek- en Documentatiecentrum (WODC) van het ministerie van Justitie en Veiligheid opdracht gegeven om onderzoek te doen naar de kansen en risico's van dergelijke toepassing van neurotechnologie. Dit rapport is het resultaat van dat onderzoek.

In dit rapport staat de volgende onderzoeksvraag centraal:

'Welke kansen en bedreigingen kunnen worden verwacht van neurotechnologie voor het domein van ministerie van Justitie en Veiligheid en welke impact (juridisch, ethisch en maatschappelijk) kan neurotechnologie hebben voor beleid?'

Het onderzoek is uitgevoerd door onderzoekers van het UMC Utrecht (UMCU Hersencentrum) en onderzoekers van het Departement Rechtsgeleerdheid van de Universiteit Utrecht (UCALL en het Montaigne Centrum).

Bij het beantwoorden van de onderzoeksvraag hebben de onderzoekers zich gericht op de drie belangrijkste toepassingen van neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein, te weten: 1) *opsporing en waarheidsvinding*; 2) *risicotaxatie*; en 3) *interventie*. Een techniek biedt een kans indien deze effectief (en in enige mate efficiënt) is voor het bereiken van één of meerdere doelen die in de drie toepassingen centraal staan. Een risico bestaat uit spanningen met juridische en ethische normen en eventuele onbedoelde, negatieve bij- en neveneffecten van het toepassen van nieuw ontwikkelde kennis en technologieën. De juridische analyse van risico's is beperkt tot de in het Europees Verdrag voor de Rechten van de Mens (EVRM) neergelegde mensenrechten. De onderzoekers hebben zich bij het opstellen van dit rapport gebaseerd op onderzoek van de medisch-wetenschappelijke, juridische en ethische literatuur, interviews met veertien academici met expertise in de neurowetenschappen, neurotechnologie, neurorecht en neuro-ethiek, en een proeflezing van het concept-rapport door nog vier academici met relevante expertise. De bevindingen zijn beschreven in drie secties: 1) technologie; 2) recht en ethiek; en 3) synthese.

In sectie 1 worden bestaande en opkomende neurotechnologieën, hun toepassingsgebieden en relevante ontwikkelingen in kaart gebracht. Binnen de neurotechnologie kan onderscheid worden gemaakt tussen technieken die de hersenactiviteit meten (EEG, MEG, fMRI, fNIRS, fTCD, PET, SPECT), technieken die de hersenen kunnen stimuleren (tDCS, TMS, TFUS en DBS), technieken waarmee zowel gemeten als gestimuleerd kan worden (ECoG, sEEG, endovasculaire EEG, micro-elektroden-arrays), en technieken die de anatomische structuur van de hersenen in beeld brengen (CT, MRI, DTI). Technieken die de hersenactiviteit alleen meten kunnen verder opgedeeld worden in methoden die elektrische signalen (EEG), of daaraan gerelateerde veranderingen in het magnetisch signaal (MEG), registreren, en methoden (fMRI, fNIRS, fTCD, PET, SPECT) die zich richten op de metabole processen van de hersenen: vasculaire reacties, zoals veranderingen in bloedvolume of het zuurstofgehalte van het bloed, in hersengebieden die actief worden als mensen een bepaalde opdracht uitvoeren.

Elke neurotechnologie heeft eigenschappen die, afhankelijk van de toepassing, een voordeel of een beperking kunnen betekenen. Zo hebben metingen van de elektrische signalen een hoge tijdsresolutie (zij kunnen snelle veranderingen in de tijd nauwkeurig meten), terwijl metabole signalen, vanwege de secondenlange vertraging tussen elektrische signalen en daaraan gerelateerde vasculaire reacties, een lage tijdsresolutie hebben. Ook bestaan er belangrijke verschillen tussen neurotechnologieën in de ruimtelijke (spatiële) resolutie en specificiteit en het spatiële bereik. Micro-elektroden maken het bijvoorbeeld mogelijk om signalen van individuele hersencellen te meten, maar de afmetingen van de 'arrays' waarin deze elektroden georganiseerd zijn beperken het spatiële bereik tot enkele millimeters. Daarentegen kunnen EEG en fNIRS de signalen van de gehele oppervlakte van het brein in kaart brengen, maar per sensor wordt een (relatief groot) gebied van enkele centimeters bestreken. Andere onderscheidende factoren zijn de mate van invasiviteit (is er bijvoorbeeld een hersenoperatie nodig om de techniek te kunnen toepassen), de mogelijkheid om diepere hersenstructuren te bereiken, de gevoeligheid voor verstoringen en de eigenschappen van het meetapparaat zelf (afmetingen, mate van draagbaarheid, prijs, etc.). Wanneer er veranderingen in de hersensignalen worden gegenereerd (neuromodulatie), zijn er bovendien belangrijke verschillen in reversibiliteit (omkeerbaarheid) van de effecten.

Veel van de genoemde technieken hebben belangrijke wetenschappelijke waarde en worden (veelvuldig) in de klinische praktijk toegepast, bijvoorbeeld voor de diagnostiek van aandoeningen zoals epilepsie (EEG, MEG, ECoG, S-EEG), hersentumoren (MRI, PET) of de ziekte van Alzheimer (PET, SPECT, DTI), bij de behandeling van depressie (TMS) en bewegingsstoornissen zoals de ziekte van Parkinson (DBS), bij de voorbereiding van neurochirurgische ingrepen (MRI, fMRI, fTCD) of bij het in kaart brengen van neurologische schade (CT, MRI). Andere technieken bevinden zich (vrijwel) uitsluitend in het neurowetenschappelijk domein, ofwel doordat de klinische relevantie en toepasbaarheid van de betreffende technieken nog wordt onderzocht (endovasculaire EEG, micro-elektroden, tDCS, TFUS), ofwel doordat ze hoofdzakelijk gebruikt worden om meer fundamentele neurowetenschappelijke vragen te beantwoorden in situaties waar andere technieken minder geschikt zijn (fNIRS).

De huidige toepassing van neurotechnologie in de strafrechtspleging is beperkt tot het vaststellen, via klinisch-diagnostische methoden, van neurologische aandoeningen zoals fronto-temporale dementie met behulp van technieken zoals MRI en PET. Deze kunnen bijvoorbeeld worden toegepast bij een gedragskundige rapportage pro Justitia van een verdachte. Neurotechnologieën kunnen daardoor een rol spelen bij de beoordeling van de (on)toerekeningsvatbaarheid van de verdachte en de oplegging van TBS. Daarnaast worden vier andere technieken uitgelicht vanwege hun mogelijk toekomstige toepasbaarheid in de strafrechtspleging. Binnen het domein van de *opsporing en waarheidsvinding* wordt bijvoorbeeld onderzoek verricht naar het gebruik van 1) fMRI voor het identificeren van misleiding (neuroleugendetectie) en van 2) EEG voor het opsporen van daderkennis via de zogenaamde P300 respons (neurogeheugendetectie). Neurogeheugen- en neuroleugendetectie kunnen een belangrijke bijdrage gaan leveren aan de waarheidsvinding. Ten behoeve van de beoordeling of een persoon schuldig is, is het vaststellen wat er daadwerkelijk heeft plaatsgevonden onontbeerlijk. Als daarvoor een 'kijkje' in het geheugen van de verdachte mogelijk zou zijn, dan levert dat zeer waardevolle informatie op. In het kader van *risicotaxatie* wordt 3) fMRI onderzocht om de kans op recidive in te schatten. Neurotechnologie kan daardoor in de toekomst van belang worden voor de beslissing welke sanctie aan iemand moet worden opgelegd. Verder wordt 4) de stimulatie-techniek tDCS bestudeerd vanwege de mogelijke toepasbaarheid ervan als interventie-methode binnen de forensische psychiatrie. In het kader van diverse strafrechtelijke sancties kan neurotechnologie in de toekomst een rol gaan spelen als *interventie* om gevaar voor recidive te verminderen en daardoor bijdragen aan resocialisatie van daders.

In algemene zin lijken verdere ontwikkelingen van bestaande neurotechnologieën met name gericht op het breder inzetbaar maken van niet-invasieve technieken en op de ontwikkeling en validatie van volledig implanteerbare systemen. Voor wat betreft technieken met een voorzienbare toepasbaarheid binnen het justitie- en veiligheidsdomein worden ontwikkelingen verwacht op het gebied van het vergroten van de spatiële resolutie van fMRI, het beter begrijpen en betrouwbaarder meten van de EEG-P300-respons, het verbeteren van de voorspellende waarde van neuroimaging door combinatie met andere biologische maten en het vergroten van inzicht in de effectiviteit van het gebruik van neurostimulatie binnen de forensische psychiatrie. Daarnaast hebben verschillende recent-ontwikkelde technieken (bv. fUSI, twee-foton-microscopie en optogenetica) mogelijk relevantie voor het bestuderen van de menselijke hersenen, maar deze bevinden zich nog (voornamelijk) in het stadium van proefdieronderzoek.

De kennis over de structuren en de werking van de hersenen is de afgelopen decennia sterk toegenomen, mede dankzij technologische ontwikkelingen die het mogelijk maken de hersenen in levende en actieve toestand goed in beeld te brengen. Deze ontwikkeling is al van belang voor het straf(proces)recht en kan dat in de toekomst nog meer worden. De vraag is echter in hoeverre dergelijke (toekomstige) technische mogelijkheden ook juridisch toelaatbaar zijn. Zo moet de verdachte menswaardig worden behandeld (artikel 3 EVRM; dit artikel bevat het verbod op het gebruik van foltering en onmenselijke en vernederende behandelingen), heeft hij het recht om te zwijgen en niet te worden gedwongen mee te werken aan zijn eigen veroordeling (artikel 6 EVRM) en het recht op respect voor zijn privéleven (artikel 8 EVRM). Het is de vraag of, en in hoeverre, nieuwe neurotechnologieën in lijn met deze mensenrechten kunnen worden toegepast. In het juridische deel wordt beoordeeld of neurotechnologieën in lijn met het geldige recht kunnen worden toegepast voor de *opsporing en waarheidsvinding*, *risicotaxatie* en *interventie*. De vijf toepassingen van neurotechnologie die uit het technische gedeelte volgen, staan daarbij centraal: te weten: 1) neuroimaging voor het vaststellen van neurologische aandoeningen; 2) het gebruik van fMRI voor het identificeren van misleiding; 3) het gebruik van de P300 uit het EEG-signaal als middel om daderkennis te identificeren; 4) het gebruik van neurotechnologie voor het inschatten van recidiverisico; en 5) het gebruik van hersenstimulatie binnen de forensische psychiatrie.

In het hoofdstuk over de toetsing van de inzet van neurotechnologieën in de *opsporing*sfase ten behoeve van de *waarheidsvinding* is beschreven dat uit het mensenrechtelijke kader geen algeheel verbod met betrekking tot het gebruik van die technieken volgt, of te verwachten is. Zowel het respect voor menselijke waardigheid en het folterverbod, het recht op respect voor privacy en het nemo-teneturbeginsel (dit beginsel houdt in dat de verdachte niet mag worden gedwongen om te spreken of om op een andere wijze mee te werken aan zijn eigen veroordeling) verbieden bepaalde handelingen niet *in abstracto*. Een rechter die wordt geconfronteerd met resultaten uit een bepaalde methode – en dat kan dus een neurotechnologische methode zijn – moet *in concreto* bepalen of de inzet en uitvoering van de methoden in overeenstemming met het geldende recht zijn. Het belangrijkste discussiepunt daarbij is of de resultaten van neurotechnologieën te vergelijken zijn met het gesproken woord *casu quo* producten van geestesinspanning – waarvoor een uitgebreidere bescherming van toepassing is – of, kort gezegd, enkel biologische reacties op stimuli zijn. Belangrijk voor die beoordeling is dat in het strafprocesrecht geldt dat de strafvorderlijke autoriteiten alleen mogen handelen op basis van een wettelijke grondslag. Met andere woorden, bevoegdheidstoekenning om een bepaalde methode in te zetten, moet plaatsvinden via de wet. Afhankelijk van de ingrijpendheid van de methode dient de wettelijke grondslag met meer waarborgen, zoals rechterlijke toetsing voorafgaand aan de uitvoering van de methode bij de meest ingrijpende methoden, te worden vormgegeven. Met betrekking tot neurotechnologische methoden, vooral neurogeheugendetectie waarmee het onzichtbare geheugen inzichtelijk wordt gemaakt, moet

worden gesteld dat dit ingrijpende methoden zijn die met strenge waarborgen in een wettelijke grondslag moeten worden gegoten. Deze waarborgen reguleren dan de beslissing om een neurotechnologische methoden in te zetten.

Met betrekking tot de uitvoering geldt dat alle besproken mensenrechten grenzen stellen aan de dwang die mag worden toegepast. Met andere woorden, als de inzet van een bevoegdheid wettelijk mogelijk is, betekent dit nog niet dat alle uitvoeringshandelingen *ipso facto* rechtmatig zijn. Zo is het met veel (onnodig) geweld iemand fixeren opdat neurogeheugendetectie kan worden afgenomen onrechtmatig. Dit betekent dat de autoriteiten die een neurotechnologische methode uitvoeren zich zorgvuldig, in de zin van dat zij alleen geoorloofde dwang toepassen, moeten gedragen.

Waar het gaat om *risicotaxatie* spelen deels dezelfde spanningen met mensenrechten die in het kader van *opsporing en waarheidsvinding* zijn besproken. Hersenscans die gebruikt worden om gevaar van recidive in te schatten mogen evenmin als scans die in het kader van de opsporing worden ingezet in strijd zijn met artikel 3 en 8 EVRM. Het toetsingskader daarvoor verschilt niet wezenlijk. Waar het gebruik van afgedwongen hersenscans in het kader van de opsporing in strijd kan zijn met het in artikel 6 EVRM neergelegde nemo tenetur-beginsel, geldt dat niet evident voor het gebruik van dergelijke scans voor *risicotaxatie*. Het staat namelijk niet vast dat artikel 6 EVRM bescherming biedt tegen verplichte medewerking aan hersenscans ten behoeve van diagnostiek en *risicotaxatie*. Van belang is ook dat risico-inschattingen niet mogen leiden tot ongerechtvaardigde ongelijke behandeling op basis van groepskenmerken.

In zeer uitzonderlijke gevallen, waarin sprake is van een acuut gevaar voor de gezondheid, kan een medische behandeling (*interventie*), ook in de vorm van gedwongen toepassing van neurotechnologie, volgens het Nederlandse recht en het EVRM toegelaten zijn. Het Nederlandse strafrecht biedt echter geen grond voor gedwongen neuro-interventies om gevaar voor recidive te verminderen, en gedwongen interventies zijn vrijwel ondenkbaar in het licht van artikel 3 en 8 EVRM. Neuro-interventies die leedtoevoeging beogen kwalificeren als vernederende en onmenselijke behandeling in de zin van artikel 3 EVRM. In het licht van artikel 3 en 8 EVRM is een moeilijke vraag in hoeverre neuro-interventies die bijvoorbeeld als bijzondere voorwaarde in het kader van een voorwaardelijke veroordeling worden opgelegd toelaatbaar zijn. Een veroordeelde is in dat geval vrij om de interventie te weigeren, maar het gevolg daarvan is dat een gevangenisstraf ten uitvoer wordt gelegd. Is in dat geval dan niet toch sprake van een afgedwongen, en dus in beginsel niet toelaatbare, interventie? Deze vraag laat zich niet definitief beantwoorden op basis van de huidige stand van de jurisprudentie van het Europees Hof voor de Rechten van de Mens (EHRM). Hoewel een interventie in een dergelijk geval door het EHRM niet in het algemeen als onvrijwillig wordt gekwalificeerd, zijn er ook aanwijzingen dat er onder omstandigheden toch sprake kan zijn van onvrijwilligheid. Dat kan aan de orde zijn indien de veroordeelde zich in een bijzonder kwetsbare positie bevindt. Omgekeerd is het zo dat het recht op vrijheid van artikel 5 EVRM ertoe kan verplichten om bepaalde categorieën van veroordeelden – in het bijzonder levenslanggestraften en TBS-gestelden – een behandeling aan te bieden waarmee zij kunnen resocialiseren zodat zij de mogelijkheid hebben om weer in vrijheid te worden gesteld.

Hersenscans die gebruikt kunnen worden voor *interventie* kunnen raken aan het negatieve recht op vrije meningsuiting (artikel 10 EVRM): het recht om af te zien van het verspreiden van meningen, ideeën en informatie. De vraag is echter of de informatie die met hersenscans wordt gewonnen wel betrekking heeft op meningen, ideeën of informatie in de zin van artikel 10 EVRM. Indien neuro-interventies hersenprocessen van een betrokkene veranderen, kan ook de vrijheid van gedachten en geweten in beeld komen (artikel 9 EVRM). Dat is een recht waarop geen inbreuk mag worden gemaakt.

Het is op dit moment onduidelijk of neuro-interventies de psyche wel zodanig beïnvloeden dat kan worden gesproken van een inbreuk op dit recht.

Ten slotte is een kader geschetst van factoren die relevant zijn voor de beantwoording van de vraag of neuro-interventies toelaatbaar zijn. Factoren die daarbij een rol spelen zijn het doel van de interventie, de ingrijpendheid ervan (inclusief bijwerkingen en risico's), de mate van drang die wordt toegepast en in welke context dat plaatsvindt, de beschikbaarheid van alternatieven en de effectiviteit van de interventie. Hierbij moet bedacht worden dat de daadwerkelijke toepassing van neuro-interventies kan gaan leiden tot een nieuwe dynamiek in de jurisprudentie van het EHRM, vanwege de nieuwe vragen die deze technologie oproept. Denkbaar is bijvoorbeeld dat het tot op heden weinig geprononceerde recht op vrijheid van gedachte en geweten dan een belangrijkere rol gaat spelen.

Kort is besproken dat uit de literatuur naar voren komt dat het bestaande mensenrechtelijke kader mogelijk tekortschiet en dat daarom voorstellen zijn gedaan om nieuwe grondrechten in het leven te roepen, bijvoorbeeld een recht op mentale integriteit.

Vanuit ethisch perspectief raakt de toepassing van neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein in elk geval aan privacy, autonomie, lichamelijke en mentale integriteit, en menselijke waardigheid. Privacy is vanzelfsprekend een centraal punt wanneer informatie uit het brein wordt geregistreerd. Er is overigens wel enige discussie in hoeverre brein-data nu als 'uniek' gezien moeten worden in vergelijking met bijvoorbeeld DNA-gegevens. Autonomie is op (minimaal) drie manieren relevant. Ten eerste: is bij de instemming (consent) van een verdachte of veroordeelde met neurotechnologie wel echt sprake van een vrije, autonome keuze? Of bestaat er het risico op het accepteren van '*an offer you cannot refuse*'? Ten tweede, neurotechnologie die het brein verandert, kan ook iemands keuzeproces beïnvloeden. Op die manier zou de autonomie van die persoon bedreigd/ondermijnd kunnen worden. Ten derde, wanneer neurotechnologie mensen helpt om op termijn hun leven meer in te richten zoals ze dat zelf graag zien, dan ondersteunt de neurotechnologie hun toekomstige autonomie. Mentale en lichamelijke integriteit zijn met name aan de orde bij neuro-interventies. Er wordt wel bepleit om via nieuwe mensenrechten de mentale integriteit beter te beschermen tegen neurotechnologische inmenging dan nu het geval is. Daarbij speelt direct ook de vraag of een dergelijke bescherming dan absoluut zou moeten zijn, of dat inbreuken mogelijk moeten zijn onder bepaalde omstandigheden. Menselijke waardigheid lijkt een overkoepelende – of funderende – rol te spelen bij de hierboven genoemde overwegingen. Met andere woorden: met het oog op respect voor de menselijke waardigheid dienen we na te denken over de implicaties van neurotechnologie voor privacy, autonomie en mentale/fysieke integriteit.

In sectie 3 reflecteren de onderzoekers op de bevindingen uit sectie 1 en 2. Ze concluderen uit het onderzoek dat in elk geval een aantal belangrijke stappen moet worden gezet voordat nieuwe neurotechnologie verantwoord kan worden geïmplementeerd voor *opsporing en waarheidsvinding*, *risicotaxatie* en *interventie*.

Ten eerste moet nader onderzoek worden verricht naar de effectiviteit en betrouwbaarheid van het gebruik van neurotechnologieën voor toepassing in de strafrechtspleging. Meer inzicht is nodig in bijvoorbeeld de voorspellende waarde en de specificiteit van hersenmaten. Daarbij kan gedacht worden aan een vraag zoals: Is het optreden van een bepaald hersensignaal specifiek gerelateerd aan een leugen of kan er ook een ander proces aan ten grondslag liggen? Omdat strafrechtspleging zich veelal afspeelt op het niveau van de individuele verdachte/veroordeelde, zal toekomstig onderzoek naar effectiviteit en betrouwbaarheid uitspraken moeten doen op het niveau van het individu. Dit vergt een andere aanpak dan de correlatieanalyses en groepsvergelijkingen die gebruikelijk zijn in neurowetenschappelijk onderzoek. Daaraan gerelateerd is het belangrijk om vast te stellen in hoeverre

uitspraken over effectiviteit en betrouwbaarheid generaliseerbaar zijn, of dat bepaalde persoonskenmerken deze maten beïnvloeden. Dit is ook van belang om de kans op onrechtvaardige ongelijke behandeling van verdachten te vermijden. Verder moet worden vastgesteld in hoeverre neurotechnologieën kwetsbaar zijn voor het manipuleren van de uitkomst of de bruikbaarheid van de gegevens door verdachten die niet willen meewerken.

Een tweede belangrijk onderwerp van onderzoek is de veiligheid van neurotechnologieën. Daarbij gaat het om de risico's van de toepassing van neurotechnologie zelf, maar ook om de mogelijke fysieke of psychische bijwerkingen. Nader onderzoek is met name nodig als het gaat om technieken die een hersenoperatie vereisen en technieken die een langdurig of blijvend effect op de hersenen zouden kunnen hebben.

Naast het verrichten van onderzoek is bij de implementatie van neurotechnologie in de strafrechtspleging een verheldering van de juridische en ethische kaders essentieel. Zoals hierboven beschreven is er nog veel onduidelijk over de toelaatbaarheid van neurotechnologie in het strafrecht. Omdat de juridische context per land verschilt is het belangrijk dat Nederland een eigen visie ontwikkelt op het toepassen van neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein, welke ook toegesneden is op het Nederlandse strafrecht. Dit proces vindt idealiter al plaats terwijl het onderzoek naar, en de ontwikkeling van, neurotechnologie plaatsvindt, omdat dat kansen biedt om de ontwikkelde technologie toe te spitsen op bijvoorbeeld eisen aan betrouwbaarheid en effectiviteit en juridische waarborgen. Het ontwikkelen van deze visie kan ondersteund worden door het ethisch debat over de raakvlakken tussen neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein en de onderwerpen privacy, autonomie, lichamelijke en mentale integriteit, en menselijke waardigheid. In dit licht hebben de onderzoekers drie belangrijke onderwerpen geïdentificeerd waarover met name nadere gedachtevorming noodzakelijk is.

Ten eerste: De minimale eisen die moeten worden gesteld aan betrouwbaarheid. Waar neurowetenschappers een techniek veelal als geïsoleerd hulpmiddel beschouwen en derhalve hoge eisen stellen aan betrouwbaarheid van uitkomsten van onderzoek, stellen juristen dat informatie verkregen met neurotechnologie in de rechtspleging veelal gecombineerd zal worden met andere bewijsmiddelen en dat het geheel aan bewijsmiddelen gebruikt zal worden om een strafbaar feit 'buiten redelijke twijfel' aan te tonen. Doordat het hier gaat om de beantwoording van een juridische vraagstelling, waarbij bewijs in samenhang beoordeeld wordt, dient er voor toepassing binnen het strafrecht over eigen eisen te worden nagedacht.

Ten tweede: Nadere gedachtevorming over specifieke juridische vragen die rijzen door de toepassing van neurotechnologie in het strafrecht. In alle categorieën is bijvoorbeeld de vraag gerezen onder welke omstandigheden neurotechnologie tegen de wil van de betrokkene mag worden gebruikt. In het kader van *opsporing en waarheidsvinding* en *risicotaxatie* speelt deze vraag in het licht van het zwijgrecht. In het kader van neuro-*interventies* is duidelijk dat deze niet mogen worden afgedwongen en dat de veroordeelde uit vrije wil voor de interventie moet kiezen, maar een vraag is wel in hoeverre het ondergaan van een neuro-interventie onder dreiging van vrijheidsbeneming vrijwillig is te noemen. Nadere gedachtevorming over deze en andere juridische vragen is nodig. Daarbij kan het ethische debat over deze onderwerpen behulpzaam zijn.

Ten derde: Informatieverstrekking aan de rechter. De onderzoekers stellen dat het essentieel is dat rechters adequaat geïnformeerd worden over de effectiviteit, betrouwbaarheid en veiligheid van neurotechnologieën op het moment dat deze in de praktijk van de strafrechtspleging worden toegepast.

Summary

In recent years, neurotechnology has received significant attention. Neurotechnology concerns techniques that contribute to knowledge about the brain and/or that interact with the brain. The attention for these techniques partly results from continuous technological progress. Because neurotechnology (also) has relevance for application within the justice and security domain, the Scientific Research and Documentation Center (WODC) of the Ministry of Justice and Security has commissioned research into the opportunities and risks of such application of neurotechnology. This report is the result of that research.

This report focuses on the following research question:

'What opportunities and threats can be expected from neurotechnology for the domain of the Ministry of Justice and Security and what impact (legal, ethical and social) can neurotechnology have for policy?'

The research was conducted by researchers from UMC Utrecht (UMCU Brain Center) and researchers from the Utrecht University Law Department (UCALL and Montaigne Center).

In answering the research question, the researchers focused on the three most important applications of neurotechnology in the justice and security domain, being: 1*) investigation and fact-finding*; 2) *risk assessment*; and 3) *intervention*. A technique presents an opportunity if it is effective (and to some degree efficient) in achieving one or more goals that are central to the three applications. A risk is defined as tension with legal and ethical standards and possible unintended, negative side-effects of applying newly developed knowledge and technologies. The legal analysis of risks is limited to the human rights enshrined in the European Convention on Human Rights (ECHR). For this report, the researchers drew on a review of the medical, legal and ethical literature, interviews with fourteen academics with expertise in neuroscience, neurotechnology, neurolaw and neuro-ethics, and a proofreading of a draft version of the report by four other academics with relevant expertise. The findings are described in three sections: 1) technology; 2) law and ethics; and 3) synthesis.

In section 1, existing and emerging neurotechnologies, their application areas and relevant developments are mapped out. Within the range of available neurotechnologies, a distinction can be made between techniques that measure brain activity (EEG, MEG, fMRI, fNIRS, fTCD, PET, SPECT), techniques that can stimulate the brain (tDCS, TMS, TFUS and DBS), techniques that can be used for both measuring neural signals and stimulation of the brain (ECoG, sEEG, endovascular EEG, microelectrode arrays), and techniques that visualize the anatomical structure of the brain (CT, MRI, DTI). Techniques that measure brain activity can be divided further into methods that record electrical signals (EEG), or related changes in the magnetic signal (MEG), and methods (fMRI, fNIRS, fTCD, PET, SPECT) that target the metabolic processes of the brain: vascular reactions, such as changes in blood volume or blood oxygenation, in areas of the brain that are activated when people carry out a certain task.

Every neurotechnology has properties that, depending on the application, represent an advantage or a limitation. For example, measurements of the electrical signals have a high temporal resolution (they accurately measure rapid changes over time), while metabolic signals have a low temporal resolution due to the multi-second delay between electrical signals and related vascular responses. There are also important differences between neurotechnologies in the spatial resolution and specificity and the spatial range. Microelectrodes, for example, allow the recording of signals from individual brain cells, but the dimensions of the 'arrays' in which these electrodes are organized limit the spatial range to a

few millimeters. In contrast, EEG and fNIRS can map the signals of the surface of the entire brain, but per sensor a (relatively large) area of a few centimeters is covered. Other distinctive factors are the degree of invasiveness (for example, the necessity of brain surgery for the application of a certain technique), the possibility to reach deeper brain structures, the sensitivity to disturbances and the properties of the measuring device itself (size, degree of portability, price, etc.). In case neurotechnologies are used to induce changes in the neural signals (neuromodulation), there are important differences in the reversibility of the effects.

Many of the mentioned techniques have important scientific value and are (frequently) used in clinical practice, for example for the diagnosis of disorders such as epilepsy (EEG, MEG, ECoG, S-EEG), brain tumors (MRI, PET) or Alzheimer's disease (PET, SPECT, DTI), in the treatment of depression (TMS) and movement disorders such as Parkinson's disease (DBS), in the preparation for neurosurgical procedures (MRI, fMRI, fTCD) or for the assessment of neurological damage (CT, MRI). Other techniques are (almost) exclusively used in the neuroscientific domain, either because the clinical relevance and applicability of the technique in question is still under investigation (endovascular EEG, microelectrodes, tDCS, TFUS), or because it is mainly used to study fundamental neuroscientific questions in situations where other techniques are less suitable (fNIRS).

The *current* application of neurotechnology in criminal justice is limited to the diagnosis, through clinical-diagnostic methods, of neurological disorders such as frontotemporal dementia using techniques such as MRI and PET. These techniques can be applied, for example, in a pro Justitia behavioral assessment of a defendant. As such, neurotechnology may play a role in the assessment of legal insanity and the decision about a hospital order. In addition, four techniques are highlighted because of their possible *future* applicability in criminal justice. Within the domain of *investigation and fact-finding*, for example, research is being conducted into the use of 1) fMRI to identify deception (neuro-lie detection) and 2) EEG to detect offender knowledge via the so-called P300 response (neuro-memory detection). Neuro-memory and neuro-lie detection have significant potential within the realm of *fact-finding*. In order to determine whether a person is guilty, it is essential to establish what actually happened. A 'peek' into the memory of the suspect would provide valuable information in this respect. In the context of *risk assessment*, 3) fMRI is investigated to estimate the risk of recidivism. As such, neurotechnology may become of relevance for decisions on which sanction should be imposed on an individual offender. Furthermore, 4) the stimulation technique tDCS is being studied for its potential applicability as an *intervention* method within forensic psychiatry. Within the framework of various criminal sanctions, neurotechnology may play a role as an intervention to reduce the risk of recidivism and thereby contribute to the rehabilitation of offenders.

In a general sense, further developments of existing neurotechnologies seem particularly aimed at making non-invasive techniques more widely applicable and at the development and validation of fully implantable systems. With respect to techniques with a foreseeable applicability within the justice and security domain, developments are expected in increasing the spatial resolution of fMRI, in a better understanding and more reliable measurement of the EEG-P300 response, in improving the predictive value of neuroimaging by combination with other biological measures and in increasing knowledge about the effectiveness of the use of neurostimulation within forensic psychiatry. In addition, several recently developed techniques (e.g., fUSI, two-photon microscopy and optogenetics) may have relevance for the study of the human brain, but these techniques reside still (mainly) in the stage of animal research.

Knowledge about the structures and functioning of the brain has increased significantly in recent decades, as described above, partly as a result of technological developments that allow visualizing the brain in a living and active state. This development is already important for criminal (procedural)

law, and this importance may develop further in the future. The question is, however, to what extent (future) technical possibilities are also legally permissible. For example, the suspect must be treated with *dignity* (Article 3 ECHR; this article prohibits the use of torture and inhuman and degrading treatment), he has the right to remain *silent* and to not be forced to (actively) cooperate to his own conviction (Article 6 ECHR) and the right of respect for his *private life* (Article 8 ECHR). The question is whether, and to what extent, new neurotechnologies can be applied in line with these human rights. In the legal part, it is assessed whether neurotechnologies can be applied in accordance with the law when they are used for 1) *investigation and fact-finding*; 2) *risk assessment*; and 3) *intervention*. This assessment evolves around the five applications of neurotechnology that arose from the technical part: 1) neuroimaging to diagnose neurological disorders; 2) the use of fMRI to identify deception; 3) the use of EEG-P300 as a means to identify offender knowledge; 4) the use of neurotechnology to estimate recidivism risk; and 5) the use of brain stimulation within forensic psychiatry.

The chapter on the assessment of the use of neurotechnologies for *investigation and fact-finding* describes that a general prohibition with regard to the use of these techniques does not follow, or is expected, from a human rights framework. The respect for human dignity and the prohibition of torture, the right to respect for privacy and the privilege against self-incrimination (i.e., the accused should not be forced to speak or otherwise cooperate in their own conviction) do not, in itself, prohibit certain investigative methods. A judge confronted with the results of a certain method – which may be a neurotechnological method – must specifically determine whether the use and implementation of the method is in accordance with applicable law. The main point of discussion here is whether the results of neurotechnologies can be compared to the spoken word or products of mental effort – for which a more extensive protection applies – or, in short, represent merely biological responses to stimuli. For this assessment, it is important to acknowledge that in criminal procedural law, the criminal law enforcement authorities may only act on a legal basis. In other words, the authority to use a particular method must be provided by law. Depending on the level of invasiveness of a method, such legal basis must provide certain guarantees, such as judicial review prior to implementation for the most drastic methods. With regard to neurotechnological methods, in particular neuro-memory detection that provides insight into the invisible memory, it must be noted that these are far-reaching methods that can only be allowed when there is a legal basis with strict guarantees. These safeguards would then regulate the decision to *use* neurotechnological methods.

With regard to *implementation*, all discussed human rights set boundaries to the level of coercion that may be applied. In other words, if the use of a certain authorization is legally possible, this does not mean that all acts of implementation are *ipso facto* lawful. For example, fixating an individual with significant (unnecessary) violence for the purposes of neuro-memory detection is unlawful. This means that the authorities carrying out a neurotechnological method must behave carefully, in the sense that they only use *lawful coercion*.

Risk assessment is associated with the same tensions with human rights as discussed in the context of *investigation and fact-finding*. Brain scans that are used to estimate the risk of recidivism may not be in conflict with Articles 3 and 8 ECHR, similar to scans that are used in the context of *investigation*. The respective frameworks for this assessment do not fundamentally differ. Where the use of enforced brain scans in the context of *investigation* may conflict with the privilege against self-incrimination laid down in Article 6 ECHR, such conflict is not evident for the use of this type of scans for *risk assessment*. Indeed, it is unclear whether or not Article 6 ECHR offers protection against mandatory cooperation during brain scans for the purposes of diagnosis and risk assessment. Another important topic is that risk assessments should not lead to unjustified unequal treatment based on group characteristics.

In highly exceptional cases, when there is an acute danger to health, forced application of neurotechnology may be permitted under Dutch law and the ECHR. However, Dutch criminal law offers no ground for forced neuro-interventions to reduce the risk of recidivism, and forced *interventions* are virtually unthinkable in the light of Articles 3 and 8 ECHR. Neuro-interventions aimed to inflict suffering qualify as degrading and inhumane treatment within the meaning of Article 3 ECHR. In the light of Articles 3 and 8 ECHR, a difficult question is to what extent neuro-interventions that are imposed, for example, as a special condition in the context of a conditional sentence, are permissible. In that case, a convicted person is free to refuse the intervention, but the consequence is that a prison sentence will be executed. Shouldn't such interventions be considered enforced, and therefore, in principle, inadmissible? This question cannot be definitively answered on the basis of the current state of the case law of the European Court of Human Rights (ECtHR). Although, in general, the intervention would not qualify as involuntary by the ECtHR, there are indications that under certain circumstances involuntariness applies, such as when the convicted person is in a particularly vulnerable position. Conversely, the right to freedom, as laid down in Article 5 ECHR, may require certain categories of offenders – in particular those sentenced for life and those placed under a hospital order – to be offered rehabilitative treatment so that they have the opportunity to be released.

Brain scans that can be used for *interventions* may affect the negative right to freedom of expression (Article 10 ECHR): the right to *refrain* from disseminating opinions, ideas and information. Whether or not the information obtained with brain scans in fact relates to opinions, ideas or information within the meaning of Article 10 ECHR is uncertain. If neuro-interventions change the brain's processes, freedom of thought and conscience may also come into play (Article 9 ECHR). This right cannot be infringed. It is currently unclear, however, whether neuro-interventions affect the psyche in such a way as to constitute an infringement of this right.

Finally, a framework is outlined concerning factors that are relevant to answering the question of whether neuro-interventions are permissible. Factors that play a role here are the aim of the intervention, its level of invasiveness (including side effects and risks), the degree of pressure that is applied and in which context this takes place, the availability of alternatives and the effectiveness of the intervention. It should be borne in mind that the actual application of neuro-interventions may lead to a new dynamic in ECtHR jurisprudence, because of the new questions this technology generates. It is conceivable, for example, that the little pronounced right to freedom of thought and conscience will start to play a more prominent role.

It was briefly discussed that literature shows that the existing human rights framework may be inadequate and that proposals have therefore been made to create new fundamental rights, such as a right to mental integrity.

From an *ethical* perspective, the application of neurotechnology in the justice and security domain affects at least privacy, autonomy, physical and mental integrity, and human dignity. Privacy is obviously a central theme when information from the brain is registered. There is, however, some discussion about the extent to which brain data should be considered 'unique' compared to, for example, DNA data. Autonomy is relevant in (at least) three ways. Firstly: is the consent of a suspect or convicted person really a free, autonomous choice? Or is there a risk of accepting 'an offer you cannot refuse'? Second, neurotechnology that changes the brain may influence a person's decision-making process, which may threaten/undermine the individual's autonomy. Third, if neurotechnology helps people, in the long run, to organize their lives as they desire, it in fact supports their future autonomy. Mental and physical integrity are particularly important in relation to neuro-interventions. It has been argued that new human rights should be used to better protect mental integrity against neurotechnological interference than is currently the case. This immediately raises the question of

whether such protection should be absolute, or whether infringements should be possible under certain circumstances. Human dignity seems to play an overarching – or foundational – role in the considerations mentioned above. In other words, in order to respect human dignity, we need to consider the implications of neurotechnology for privacy, autonomy and mental/physical integrity.

In section 3, the researchers reflect on the findings from sections 1 and 2. They conclude that a number of important steps must be taken before new neurotechnology can be implemented responsibly for *investigation and fact-finding*, *risk assessment* and *intervention*.

First, further *research* is needed into the *effectiveness and reliability* of the use of neurotechnologies for application in criminal justice. A better understanding is needed of, for example, the *predictive value* and *specificity* of brain measurements. A relevant question in that respect is for example: Is the occurrence of a certain brain signal specifically related to a lie or could it also be associated with another process? Because criminal justice often takes place at the level of the individual suspect/convict, future research into effectiveness and reliability will have to take the level of the *individual* into account. This requires a different approach than the correlation analyses and group comparisons that are common in neuroscience research. Related to this, it is important to determine to what extent statements about effectiveness and reliability can be *generalized*, or whether certain personal characteristics influence these measures. This is also important to avoid the risk of unjust unequal treatment of suspects. Finally, it needs to be determined to what extent neurotechnologies are vulnerable to *manipulation* of the outcome or usability of the data by uncooperative suspects.

A second important *research* topic is the *safety* of neurotechnologies. This topic concerns the *risks* of the application of neurotechnology itself, but also the possible physical or psychological *side effects*. Further research is especially needed for techniques that require brain surgery and techniques that could have a long-term or lasting effect on the brain.

In addition to conducting research, *implementation* of neurotechnology in criminal justice requires a *clarification of the legal and ethical frameworks*. As described above, much is still unclear about the admissibility of neurotechnology in criminal law. Because the legal context differs per country, it is important that The Netherlands develop their own view on the application of neurotechnology in the justice and security domain, which is also tailored to Dutch criminal law. This process preferably takes place already while research into, and development of, neurotechnology is conducted, because this offers opportunities to tailor the developed technology to, for example, requirements for reliability and effectiveness and legal safeguards. The development of such view can be supported by the ethical debate about the interface between neurotechnology in the justice and security domain and the topics of privacy, autonomy, physical and mental integrity, and human dignity. In this respect, the researchers have identified three important topics that require further reflection in particular.

First: The minimum requirements for reliability. While neuroscientists often regard a technique as an isolated tool and therefore impose high standards on the required reliability of the results of research, lawyers argue that information obtained with neurotechnology in the administration of justice will often be combined with other means of evidence and that the entirety of evidence will be used to demonstrate a criminal offense 'beyond reasonable doubt'. Because this concerns the answer to a *legal* question, where evidence is assessed in conjunction, it is necessary to develop specific requirements for application within criminal law.

Second: Further reflection on specific legal questions raised by the application of neurotechnology in criminal law. For example, for all applications, the question has arisen under what circumstances neurotechnology may be used against the will of the subject. In the context *of investigation and fact-finding* and *risk assessment*, this question arises in the light of the right to remain silent. In the context

of neuro-*interventions*, it is clear that these may not be enforced and that the convicted person must choose the intervention voluntarily, but the question is to what extent undergoing a neuro-intervention under threat of deprivation of liberty can be called voluntary. Further reflection on these and other legal questions is needed. The ethical debate on these topics may be helpful in this regard.

Third: Provision of information to the judge. The researchers argue that it is essential that judges are adequately informed about the effectiveness, reliability and safety of neurotechnologies when they are applied in the practice of criminal justice.

Inhoud

Afkortingen ... 2
Vooraf ... 3
Samenvatting ... 4
Summary ... 10
1. Inleiding ... 19
(a) Aanleiding ... 19
(b) Onderzoeksvraag ... 19
(c) Neurotechnologie-hype ... 20
(d) Risicostrafrecht ... 20
(e) Afbakening ... 21
(i) Opsporing en waarheidsvinding ... 21
(ii) Risicotaxatie ... 21
(iii) Interventie ... 21
(f) Operationalisering ... 22
(g) Aanpak ... 23
2. Methode ... 24
(a) Sectie 1. Technologie ... 24
(b) Sectie 2. Neurotechnologie in de strafrechtspleging: recht, ethiek en maatschappij ... 25
(c) Sectie 3. Synthese ... 26
Sectie 1. Technologie ... 27
3. Interactie en Beeldvorming ... 28
4. Neurotechnologieën ... 30
(a) Interactie met hersenactiviteit ... 30
(i) Elektrofysiologische interactie ... 30
Technieken om te meten ... 30
Technieken om te meten en stimuleren ... 36
Technieken om te stimuleren ... 45
(ii) Metabole meetmethoden ... 54
(b) Anatomische structuur ... 63
(c) Overzichtstabel ... 67
5. Neurotechnologie in de justitie- en veiligheidsdomeinen ... 70
(a) Opsporing en waarheidsvinding ... 70
(i) fMRI voor het identificeren van misleiding ... 70

(ii) EEG-P300 voor het identificeren van daderkennis 71
(iii) Neuroimaging voor het vaststellen van neurologische aandoeningen 72
(b) Risicotaxatie 73
(i) Neurologische markers voor het inschatten van recidiverisico 73
(c) Interventie 75
(i) Hersenstimulatie binnen de forensische psychiatrie 75
6. Mogelijke toekomstige doorontwikkelingen 76
(a) Mogelijke toekomstige doorontwikkelingen van de neurotechnologieën binnen de justitie- en veiligheidsdomeinen 77
(i) Opsporing en waarheidsvinding 77
FMRI voor het identificeren van misleiding 77
EEG-P300 voor het identificeren van daderkennis 77
Neuroimaging voor het vaststellen van neurologische aandoeningen 77
(ii) Risicotaxatie 78
Neurologische markers voor het inschatten van recidiverisico 78
(iii) Interventie 78
Hersenstimulatie binnen de forensische psychiatrie 78
(b) De ontwikkeling van nieuwe neurotechnologieën 79
(i) Focused ultrasound imaging 79
(ii) Twee-foton-microscopie en optogenetica 80
7. Besluit sectie 1 81
Sectie 2. Neurotechnologie in de strafrechtspleging: recht, ethiek en maatschappij 82
8. Opsporing en waarheidsvinding 83
(a) Neurotechnologie in het opsporingsonderzoek 83
(b) Nationaalrechtelijk kader opsporingsmethoden 85
(c) Neurotechnologische opsporing en het EVRM 86
(i) Neurotechnologische opsporing in het licht van het respect voor menselijke waardigheid en het folterverbod en het verbod van onmenselijke of vernederende behandeling 86
(ii) Neurotechnologische opsporing in het licht van het recht op respect voor het privéleven 89
(iii) Neurotechnologische opsporing in het licht van het recht op een eerlijk proces 91
(d) Conclusie 95
9. Risicotaxatie 96
10. Interventie 99
(a) Neuro-interventies in het strafrechtelijke domein 99
(b) Nationaalrechtelijk kader neuro-interventies 99
(c) Neuro-interventies en het EVRM 100

(i) Neuro-interventies en het verbod van onmenselijke of vernederende behandeling of bestraffing 100
(ii) Neuro-interventies en het recht op respect voor privéleven 102
(iii) Neuro-interventies en de vrijheid van gedachte en geweten 104
(iv) Neuro-interventies en de vrijheid van meningsuiting 105
(v) Neuro-interventies en de positieve verplichting tot rehabilitatie 106
(d) Discussie 106
(e) Slotopmerking: nieuwe grondrechten 108
11. Ethiek 109
(a) Menselijke waardigheid 109
(b) Privacy 110
(c) Autonomie 111
(d) Mentale en fysiek integriteit 113
(e) Bijkomende ethische overwegingen 115
(f) Conclusie 116
Sectie 3. Synthese 117
Appendix 1 – Verklarende woordenlijst 121
Appendix 2 – Interpretatie van de TRLs 122
Appendix 3a – Geïnterviewde experts (Sectie 1) 123
Appendix 3b – Geïnterviewde experts (Sectie 2) 124
Appendix 3c – Proeflezers 125
Literatuur Inleiding 126
Literatuur Sectie 1 127
Literatuur Sectie 2 151
Register 156

1. Inleiding

(a) Aanleiding

Medische technologie waarmee hersenactiviteit in beeld kan worden gebracht of waarmee de hersenen gestimuleerd kunnen worden – ook wel samengevat met de term neurotechnologie – staat sterk in de belangstelling. Commerciële partijen ontwikkelen bijvoorbeeld hersenimplantaten met het doel om consumenten met computers, of zelfs met auto's of andere mensen te laten communiceren (Corbyn, 2019). De haalbaarheid van veel van deze plannen, en de mate waarin deze oplossingen breed kunnen worden ingezet, is vooralsnog echter onduidelijk. Ondanks veelbelovende resultaten (Moses et al., 2021) heeft Facebook bijvoorbeeld een programma waarin onderzoek werd gedaan naar het gebruik van geïmplanteerde elektroden om 'direct' met computers te communiceren beëindigd, naar verluidt omdat het niet snel genoeg een product opleverde (Regalado, 2021). Naast vragen over haalbaarheid roept de mogelijk grootschalige toepassing van neurotechnologie buiten het strikt medische domein ook allerlei ethische en juridische vragen op.

Een domein waarin neurotechnologie al wordt ingezet, is het strafrecht. In de geruchtmakende strafzaak omtrent de poging tot afpersing van de familie De Mol werd bijvoorbeeld met gebruikmaking van MRI- en PET-scans vastgesteld dat de verdachte leed aan fronto-temporale dementie (Rechtbank Midden-Nederland 2 juli 2015, ECLI:NL:RBMNE:2015:4866). Hij werd sterk verminderd toerekeningsvatbaar geacht. Echter, buiten dit type gebruik, namelijk als medisch-diagnostisch hulpmiddel, wordt neurotechnologie in Nederland (nog) niet in de strafrechtspleging toegepast. Wel duidt wetenschappelijk onderzoek erop dat neurotechnologie op termijn breder zou kunnen worden ingezet in de strafrechtspleging. Een recente Rotterdamse studie laat bijvoorbeeld zien dat toepassing van *transcranial direct current stimulation* (tDCS) agressie van bepaalde groepen delinquenten kan verminderen en zo kan bijdragen aan vermindering van recidivegevaar (Sergiou et al., 2020). Doordat neurotechnologie wel volop in de belangstelling staat, maar nog in de kinderschoenen staat als het gaat om toepassing in de strafrechtspraktijk, heeft het WODC het idee opgevat om voorafgaand aan de verdergaande introductie van neurotechnologie in de strafrechtspraktijk relevante ethische en juridische aspecten te laten onderzoeken. Dit rapport is daarvan het uitvloeisel.

(b) Onderzoeksvraag

Het in dit rapport beschreven onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Wetenschappelijk Onderzoek- en Documentatiecentrum (WODC) van het ministerie van Justitie en Veiligheid in het kader van technologie-adaptatie ('het beter omgaan met technologische ontwikkelingen') met betrekking tot de toepassing van neurotechnologieën in het justitie- en veiligheidsdomein.

De volgende onderzoeksvraag staat centraal:

'Welke kansen en bedreigingen kunnen worden verwacht van neurotechnologie voor het domein van ministerie van Justitie en Veiligheid en welke impact (juridisch, ethisch en maatschappelijk) kan neurotechnologie hebben voor beleid?'

Onderzocht wordt welke mogelijke toepassingen van verschillende neurotechnologieën in het strafrechtelijke domein op korte en middellange termijn denkbaar zijn. Ten tweede wordt onderzocht welke juridische, ethische en maatschappelijke vragen de mogelijke toepassing van neurotechnologie in het strafrecht oproept.

(c) Neurotechnologie-hype

In het strafrecht gaat het meestal om overheidshandelen dat de burger gedwongen ondergaat. Een verdachte heeft bijvoorbeeld geen keuze als het gaat om de toepassing van dwangmiddelen en ook straffen en maatregelen moet een veroordeelde ondergaan. Zelfs als in acht wordt genomen dat het in het strafrecht gaat om de opsporing en bestraffing van soms ernstige strafbare feiten, kan het beeld dat de overheid een 'kijkje in de hersenen' van burgers afdwingt**,** of de werking van de hersenen zelfs beïnvloedt**,** huiver oproepen. Een factor die deze huiver mogelijk vergroot is de recente stroom aan berichten over allerlei neurotechnologische toepassingen. Een deel van de stijgende aandacht kan verklaard worden door daadwerkelijk nieuwe ontwikkelingen, bijvoorbeeld op het gebied van de sensortechnologie, en de nieuwe kansen die daarmee gecreëerd kunnen worden, zoals het oplossen van communicatieproblemen van mensen met ernstige verlamming door middel van hersenbesturing van communicatiehulpmiddelen. De wijze waarop veel neurotechnologische ontwikkelingen worden gepresenteerd aan de maatschappij, en de implicaties die eraan toegekend worden, door zowel de media als door een deel van de vertegenwoordigers uit de onderzoekswereld en het bedrijfsleven, lijken echter bij te dragen aan een 'neurotechnologie-hype'. In de maatschappij kan hierdoor een onrealistisch beeld ontstaan van het tempo waarmee neurotechnologie zich ontwikkelt en van het palet aan mogelijke toepassingen van neurotechnologie. Patiënten kunnen hierdoor ten onrechte de hoop krijgen dat er op korte termijn een neurotechnologische oplossing voor hun hersenaandoening beschikbaar komt en burgers krijgen wellicht de indruk dat we binnenkort elkaars gedachten kunnen lezen. Een verkeerd beeld van neurotechnologie kan niet alleen angst opwekken, maar op termijn ook tot desillusie leiden als de ontwikkelingen trager zijn dan gedacht of de toepassingen beperkter. Het is daarom belangrijk dat onderzoekers, het bedrijfsleven en de media bijdragen aan een meer realistisch debat over de mogelijkheden en onmogelijkheden van neurotechnologie.

Met dit onderzoeksrapport willen de auteurs een reëel beeld schetsen van de kansen en risico's van de inzet van neurotechnologie in het strafrecht. In lijn met de opdracht van het WODC wordt hierbij gekeken naar de mogelijkheden van vandaag, morgen (periode < 5 jaar) en overmorgen (periode 5-15 jaar). Daarbij spreekt vanzelf dat wanneer de tijdshorizon verder in de toekomst ligt, uitspraken onzekerder worden.

(d) Risicostrafrecht

De mogelijke toepassing van neurotechnologie in het strafrecht valt samen met de opkomst van wat 'risicostrafrecht' kan worden genoemd. Vooral in de laatste twee decennia is het strafrecht steeds meer gericht geraakt op het voorkomen van recidive door middel van risicotaxatie en gedragsinterventies. Het sanctiestelsel is de voorbije jaren ingrijpend uitgebreid met het oogmerk om recidive zoveel mogelijk te voorkomen. De gedachte dat het strafrecht in de eerste plaats ertoe dient om een in het verleden begaan onrecht te vergelden is daarbij wat naar de achtergrond geschoven. Over deze brede ontwikkeling is het debat in de strafrechtelijke literatuur nog maar net begonnen (Bijlsma, 2021; De Jong, 2021). Vermoed kan worden dat de ontwikkeling van het risicostrafrecht leidt tot de neiging om technologie waarmee recidiverisico's kunnen worden ingeschat en worden beheerst, in het bijzonder AI en neurotechnologie, daadwerkelijk in te zetten. Deze technologieën kunnen tot specifieke dillema's leiden Een veelbesproken dilemma in de toepassing van AI voor risicotaxatie is bijvoorbeeld het gevaar van discriminatie door 'bevooroordeelde' algoritmes. Dit onderzoek is gericht op de kansen en risico's van neurotechnologie.

(e) Afbakening

Er is gekozen om de onderzoeksvraag te beantwoorden aan de hand van de drie belangrijkste toepassingsgebieden van neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein, te weten 1) *opsporing en waarheidsvinding*; 2) *risicotaxatie*; en 3) *interventie*. Bij zowel *opsporing en waarheidsvinding* als bij *risicotaxatie* gaat het erom dat informatie uit het brein wordt gehaald. Bij *interventie* worden de hersenen of hersenfuncties veranderd.

(i) Opsporing en waarheidsvinding

Onder *opsporing en waarheidsvinding* valt de opsporing van strafbare feiten en het vergaren van bewijs. Het kan daarbij gaan om technieken die mogelijk bewijs van betrokkenheid bij een strafbaar feit kunnen opleveren (bijvoorbeeld geheugendetectie; Van Toor, 2017) of die relevant zijn voor andere vragen die in het strafproces moeten worden beantwoord, in het bijzonder het achterhalen van intenties (met name om een strafbaar feit te plegen) of de beoordeling van procesbekwaamheid en toerekeningsvatbaarheid (Meynen, 2020). *Opsporing en waarheidsvinding* zijn zeer relevant in de strafvorderlijke justitie- en veiligheidsdomeinen van forensische opsporing, preventie, handhaving en opsporing en rechtspleging en rechtshandhaving. *Opsporing en waarheidsvinding* kunnen echter ook relevant zijn in andere justitie- en veiligheidsdomeinen, bijvoorbeeld in het kader van de uitvoering van het vreemdelingenbeleid en de bestrijding van aanslagen, extremisme en terrorisme.

(ii) Risicotaxatie

Ook voor *risicotaxatie* kan in de eerste plaats aan de strafvorderlijke domeinen worden gedacht. Onder andere voor beslissingen over de voorlopige hechtenis en de oplegging en tenuitvoerlegging van diverse strafrechtelijke sancties (voorwaardelijke straf, de plaatsing in een inrichting voor stelselmatige daders, terbeschikkingstelling en de gedragsbeïnvloedende of vrijheidsbeperkende maatregel) is taxatie van recidivegevaar noodzakelijk. Risico-inschattingen op individueel niveau zijn echter ook van belang binnen andere justitie- en veiligheidsdomeinen, bijvoorbeeld de uitvoering van noodhulp en de bestrijding van aanslagen, extremisme en terrorisme. Verschillende neurotechnologieën zijn mogelijk geschikt voor risico-inschattingen (bijvoorbeeld fMRI; Tortora et al., 2020, Aharoni et al., 2014).

(iii) Interventie

Interventie betreft neurotechnologieën waarmee hersenfuncties veranderd – en soms verbeterd – kunnen worden. Dit kunnen zowel non-invasieve (bijvoorbeeld *transcranial magnetic stimulation* 'TMS', of tDCS) als invasieve technieken zijn (implanteerbare *brain-computer interface* 'BCI', *deep brain stimulation* 'DBS') (Ryberg, 2020, Vincent et al., 2020). In het strafrechtelijke domein kunnen dergelijke technieken mogelijk in de toekomst bijdragen aan behandeling van ter beschikking gestelden of aan behandeling in het kader van een gedragsbeïnvloedende en vrijheidsbeperkende maatregel of voorwaardelijke straf. Neuro-interventies kunnen ook relevant zijn voor een justitie- en veiligheidsdomein als noodhulp.

In het voorliggende rapport ligt de nadruk op de strafrechtspleging. De meeste justitie- en veiligheidsdomeinen houden daarmee verband en vooral in deze context zullen neurotechnologieën mogelijk kunnen worden toegepast en spelen de belangrijkste dilemma's.

(f) Operationalisering

Neurotechnologieën worden in dit onderzoek geoperationaliseerd als *'technieken die bijdragen aan kennis over de hersenen en/of die interacteren met de hersenen en/of het zenuwstelsel'*, met name technieken die 1) hersenen en/of hersenactiviteit in beeld brengen of meten, 2) de hersenen beïnvloeden via hersenstimulatie, of 3) hersenactiviteit omzetten in acties die teruggekoppeld worden aan de eigenaar van de hersensignalen, zogenoemde b*rain-computer interfaces* (Ramsey & Millán, 2020). Hierbij moet worden opgemerkt dat de focus van dit rapport op sensortechnologieën ligt (technieken voor beeldvorming, meting of stimulatie). Er zijn daarnaast belangrijke ontwikkelingen gaande op het gebied van kunstmatige intelligentie en *machine learning*. Alhoewel deze ontwikkelingen van belang zijn voor bijvoorbeeld de interpretatie van hersensignalen zoals gemeten met verschillende typen sensoren, is de specifieke behandeling van kunstmatige intelligentie geen onderdeel van de opdracht en van dit rapport.

Voor wat betreft de inschattingen van de volwassenheid van een bepaalde techniek, dat wil zeggen hoe ver de techniek verwijderd is van een praktisch toepasbaar instrument, maken we een indeling conform de *technology readiness levels* (TRL) zoals die in het Horizon 2020-programma van de Europese Unie worden gedefinieerd (European Commission, 2014; zie ook Appendix 2).

Kansen en risico's worden geoperationaliseerd in instrumentele, juridische, ethische en maatschappelijke termen. Een techniek biedt een kans indien deze effectief (en in enige mate efficiënt) is voor het bereiken van een of meer van de doelen die in de drie categorieën centraal staan, dat wil zeggen: bij kan dragen aan 1) de *opsporing en waarheidsvinding*; 2) *risicotaxatie*; en/of 3) *interventie*. Risico's bestaan uit spanningen met juridische en ethische normen en eventuele onbedoelde, negatieve bij- en neveneffecten van het toepassen van nieuw ontwikkelde kennis en technologieën. In het juridische domein kan gedacht worden aan mensenrechten, zoals het verbod op onmenselijke en vernederende behandeling (artikel 3 van het Europees Verdrag voor de Rechten van de Mens 'EVRM'; Van Toor, 2017, p. 119-210), recht op een eerlijk proces (artikel 6 EVRM, in het bijzonder het zwijgrecht en het nemo-teneturbeginsel; Van Toor, 2017, p. 369-442) en het recht op respect voor privéleven (artikel 8 EVRM; Van Toor, 2017, p. 211-368, Ligthart et al., 2020) en aan nationaalrechtelijke kaders (bijvoorbeeld het Wetboek van Strafvordering). De Grondwet bevat grondrechten die in het geding kunnen zijn bij de toepassing van neurotechnologie in de strafrechtspleging, zoals het recht op de onaantastbaarheid van het lichaam (artikel 11 Gw). We laten de Grondwet in dit onderzoek echter buiten beschouwing, omdat overlap bestaat tussen de in de Grondwet en het EVRM neergelegde rechten. Door het toetsingsverbod van artikel 120 Gw speelt de Grondwet in de strafrechtspraktijk een geringere rol dan het EVRM, terwijl over de in het EVRM neergelegde mensenrechten uitvoerige jurisprudentie van het Europees Hof voor de Rechten van de Mens (EHRM) bestaat. Daarmee is niet gezegd dat de Grondwet niet relevant is. Verder staat het huidige positieve recht centraal. Slechts terzijde wordt gewezen op de discussie die gaande is of toepassing van neurotechnieken nieuwe grondrechten vereisen of dat het bestaande grondrechtelijke kader toereikend is (bijvoorbeeld wanneer een grondrecht iets anders wordt uitgelegd) (zie uitgebreid Ligthart, 2021b). Op ethisch terrein gaat het in dit onderzoek met name om bio-ethische kaders (Beauchamp & Childress, 2019) en meer specifiek om principes en waarden als autonomie, privacy, lichamelijke en geestelijke integriteit en menselijke waardigheid. Op maatschappelijk terrein gaat het om de (te verwachten) effecten van de invoering van eventueel nieuw beleid op gedrag van mensen.

(g) Aanpak

Voor een effectieve beantwoording van deze onderzoeksvraag zijn drie deelprojecten uitgevoerd die elk tot een aparte sectie in dit rapport hebben geleid.

In **Sectie 1 (Technologie)** worden de verschillende neurotechnologieën en hun klinische en wetenschappelijke toepassingsgebieden in kaart gebracht en worden de huidige en toekomstige ontwikkelingen beschreven. Op die manier wordt een helder beeld verkregen van de verschillende soorten technieken waarvan de toepassing in een strafrechtelijke context (eventueel) denkbaar is. Dat is belangrijk omdat de technieken sterk verschillen. De beschrijving van de technieken is ook belangrijk omdat daarmee al te wilde toekomstscenario's worden gerelativeerd. Op deze manier draagt deze stap bij aan de nauwkeurigheid van het debat en vormt deze de basis voor het tweede deel van het onderzoek.

In **Sectie 2 (Neurotechnologie in de strafrechtspleging: recht, ethiek en maatschappij)** worden de juridische, ethische en maatschappelijke implicaties en dilemma's van het gebruik van de neurotechnologieën in het justitie- en veiligheidsdomein onderzocht, waarbij de nadruk ligt op de juridische analyse aangezien het toepassingen binnen het justitiële domein betreft. Er wordt hierbij gepoogd om een globaal overzicht te bieden van de kansen en risico's van de toepassing van neurotechnologie in het strafrecht. Daarbij ligt de nadruk op de vraag hoe de mogelijke inzet van neurotechnologie zich verhoudt tot mensenrechten, omdat deze de minimumvereisten bevatten waarin deze inzet moet voldoen. Hiervoor maakt het vanzelfsprekend uit hoe diep een bepaalde techniek fysiek en mentaal ingrijpt in het leven van een (verdachte of veroordeelde) mens. Op basis van de huidige stand van het recht kunnen dan al duidelijke grenzen worden aangegeven. Zo is het ook nu al ondenkbaar dat de overheid in een strafrechtelijke context het inbrengen van een hersenimplantaat fysiek afdwingt. Ook kunnen betrekkelijk onproblematische toepassingen van neurotechnieken worden geïdentificeerd. Ten slotte wordt duidelijk dat het mensenrechtelijke kader nog belangrijke vragen openlaat. Dit is begrijpelijk, omdat het rechtssysteem nog niet geconfronteerd is met de specifieke dilemma's die de toepassing van neurotechnologie in het recht oproept. Door deze dilemma's te identificeren draagt dit onderzoek bij aan het debat over de kansen en risico's van het gebruik van neurotechnologie in het strafrecht. Door de juridische analyse aan te vullen met een ethische en sociologische kunnen de 'blinde vlekken' van het grondrechtelijke kader van een mogelijke inkleuring worden voorzien. Met name in de ethiek is het debat over neurotechnologie in een strafrechtelijke context verder gevorderd.

Sectie 3 (Synthese) vormt de synthese van de eerste twee secties, waarin de bevindingen ten aanzien van de *state of the art* van huidige en ontluikende technieken, kansen en risico's worden vertaald in een beantwoording van de onderzoeksvraag.

Belangrijk is op te merken dat dit onderzoek verkennend van aard is. Het probeert een eerste, algemene inventarisatie te maken van centrale thema's en aandachtspunten waar nader op ingegaan kan worden in vervolgonderzoek.

2. Methode

Het onderzoek is uitgevoerd door onderzoekers van het UMC Utrecht (UMCU Hersencentrum) en onderzoekers van het Departement Rechtsgeleerdheid van de Universiteit Utrecht (UCALL en het Montaigne Centrum).

(a) Sectie 1. Technologie

De vraagstelling betreffende de bestaande en ontluikende neurotechnologieën, hun toepassingsgebieden en relevante ontwikkelingen wordt behandeld in sectie 1. Het onderzoek is verricht door het UMCU-team en bestreek drie fasen.

a) Voor een eerste inventarisatie van neurotechnologieën die op dit moment in gebruik zijn en van neurotechnologieën die zich in een meer experimenteel stadium bevinden, putte het UMCU-team uit eigen expertise en heeft het tien gerenommeerde experts uit het bedrijfsleven en de academische wereld (zie Appendix 3a) geïnterviewd over huidige en ontluikende technieken en hun mogelijke toepassingsgebieden. Om een goed beeld te krijgen van mogelijke toepassingen bij mensen lag het accent bij deze eerste inventarisatie op klinisch en cognitief neurowetenschappelijke gebied. Deze informatie is van belang voor een adequate inschatting van de mogelijkheden en potenties van elk van de technieken.
b) De tweede fase bestond uit een literatuuronderzoek, gericht op de in de eerste fase geïdentificeerde technieken. Hierbij werden zowel non-invasieve als invasieve technieken geadresseerd. Per neurotechnologie is een beschrijving gemaakt van de aard van de metingen en de manier waarop interactie met het brein plaatsvindt of zou kunnen vinden. Daarnaast is/zijn:
    a. De mogelijke toepassingen van de technieken in zowel het klinische als het cognitief neurowetenschappelijke domein in kaart gebracht;
    b. De gerapporteerde relevantie voor, en mogelijke toepassingen binnen, het justitie- en veiligheidsdomein samengevat;
    c. Een inschatting gemaakt van het *technology readiness level* (TRL) voor wat betreft de meest relevante toepassingen van neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein;
    d. Een inschatting gemaakt van de mogelijke doorontwikkelingen van de technieken en de impact daarvan op de verschillende toepassingsmogelijkheden op de korte (<5 jaar) en langere (5-15 jaar) termijn. Als onderdeel hiervan is ook een kwalitatieve inschatting op basis van de fundamentele eigenschappen van de techniek uitgewerkt (denk hierbij aan zaken als mate van invasiviteit, elektrofysiologische of vasculaire basis van de techniek, etc.).
    e. Voor het includeren van literatuur voor een inventarisatie van neurotechnologieën werd primair gebruik gemaakt van de zoekmachine PubMed (PubMed, n.d.), waarin de neurowetenschappelijke literatuur vrijwel volledig vertegenwoordigd is. Hierbij werden zoekwoorden gebruikt die relateren aan de neurotechnologieën die in de eerste fase vastgesteld zijn. Gevonden literatuur is door de onderzoekers gefilterd op basis van de informatie in de samenvattingen. Literatuur die buiten het thema viel is hierbij geëxcludeerd. De referentielijsten van de geïncludeerde literatuur zijn doorzocht op de aanwezigheid van eventueel gemiste literatuur. Afhankelijk van beschikbaarheid is bij het literatuuronderzoek gebruik gemaakt van review- en overzichtsartikelen die de aard van de techniek, de mogelijke toepassingen daarvan,

of de *technology readiness level* (TRL) beschrijven. Voor wat betreft de meest prille ontwikkelingen zijn dergelijke overzichten afwezig en is per techniek een eigen inschatting gemaakt op basis van de primaire onderzoeksliteratuur.

c) Op basis van de resultaten van fase a en b is sectie 1 van dit rapport (Technologie) opgesteld.

(b) Sectie 2. Neurotechnologie in de strafrechtspleging: recht, ethiek en maatschappij

Sectie 2 is een inventarisatie van juridische, ethische en maatschappelijke implicaties van de inzet van neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein, waarbij de nadruk ligt op de juridische analyse. De maatschappelijke implicaties zijn niet los beschreven, maar vormen onderdeel van de juridische en ethische analyses; het justitie- en veiligheidsdomein is immers een maatschappelijk domein. Vanzelfsprekend kan neurotechnologie, zoals hierboven reeds benoemd, brede maatschappelijke impact hebben, maar dit onderzoek richt zich op het justitie- en veiligheidsdomein. Het onderzoek is door het UU-team verricht in drie, deels parallel lopende, onderdelen: interviews, literatuuronderzoek en een integrerend overzicht van de bevindingen.

a) Voor een eerste inventarisatie van kansen en risico's voor het justitie- en veiligheidsdomein van neurotechnologieën die op dit moment in gebruik zijn en van neurotechnologieën die zich in een meer experimenteel stadium bevinden heeft het UU-team uit eigen expertise geput en heeft het vier nationale en internationale academici met expertise op het terrein van neurorecht en neuro-ethiek (in de praktijk zijn dit overigens deels overlappende velden/expertises, zie Appendix 3b) geïnterviewd over de juridische, ethische en maatschappelijke implicaties van huidige en ontluikende technieken en hun (mogelijke) toepassingsgebieden. Aan deze experts is voorafgaand aan het semigestructureerde interview een samenvatting van de eerste resultaten van sectie 1 verstrekt. Per categorie, zoals die in de operationalisering van de probleemstelling is beschreven (*opsporing en waarheidsvinding*, *risicotaxatie* en *interventie*), is de experts gevraagd naar hun oordeel over juridische, ethische en maatschappelijke aspecten van de diverse neurotechnologieën voor het justitie- en veiligheidsdomein.
b) Het tweede onderdeel bestond uit onderzoek van juridische en ethische literatuur. Dit onderzoek is primair gericht op internationale literatuur. Het debat over neurorecht en neuro-ethiek vindt vooral daar plaats. Hierbij is ook gebruik gemaakt van onder meer Google Scholar en WorldCat. Voor het juridische deel is tevens gebruik gemaakt van analyse van rechtsbronnen: verdragen, wetten, jurisprudentie en nationale literatuur. Deze bronnen zijn opgenomen in de HUDOC-database van het Europees Hof voor de Rechten van de Mens, wetten.nl, rechtspraak.nl en rechtsorde.nl. Het onderzoek is ook hier gestructureerd volgens de categorieën zoals die in de operationalisering van de probleemstelling zijn beschreven (*opsporing en waarheidsvinding*, *risicotaxatie* en *interventie*). Ten aanzien van iedere categorie is het gebruik van neurotechnologieën in het licht van de resultaten van het literatuuronderzoek beschreven in termen van instrumentaliteit en juridische, ethische en maatschappelijke kansen en risico's.
c) Op basis van de resultaten van onderdeel a en b is Sectie 2 van dit rapport (Neurotechnologie in de strafrechtspleging: recht, ethiek en maatschappij) opgesteld.

(c) Sectie 3. Synthese

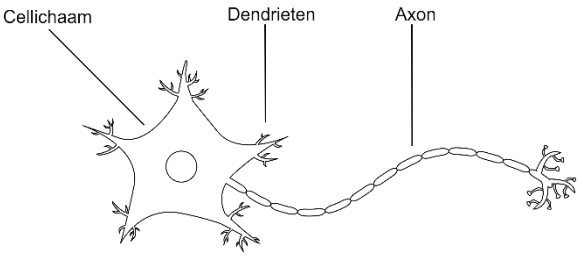
In sectie 3 wordt de probleemstelling beantwoord door het UMCU-team en UU-team gezamenlijk: '*Welke kansen en bedreigingen kunnen worden verwacht van neurotechnologie voor het domein van ministerie van Justitie en Veiligheid en welke impact (juridisch en ethisch) kan neurotechnologie hebben voor beleid?*' In deze sectie werden de resultaten van de eerste twee secties, betreffende de kansen voor neurotechnologie om aan verwezenlijking van de beleidsterreinen van ministerie van Justitie en Veiligheid bij te dragen en de ernst van de daarmee geassocieerde juridische, ethische en maatschappelijke risico's, gewogen en geëvalueerd. De *technology readiness level* (TRL) is eveneens in deze afweging betrokken. Verder werden in de Synthese aanbevelingen voor nader onderzoek opgenomen.

Nadat een conceptversie van het hele onderzoeksrapport was opgesteld is het geheel ter proeflezing voorgelegd aan vier experts uit de betrokken vakgebieden (Appendix 3c). Het concept onderzoeksrapport werd aangepast naar aanleiding van de aldus verkregen feedback.

Sectie 1. Technologie

3. Interactie en Beeldvorming

In deze sectie wordt een overzicht gegeven van de huidige stand van zaken van verschillende neurotechnologieën. Neurotechnologieën worden in dit rapport gedefinieerd als technieken die bijdragen aan kennis over de werking van de hersenen en/of die interacteren met de hersenen.



Figuur 1 - Schets van een neuron (bron).

De bouwstenen van ons zenuwstelsel heten neuronen, waarvan de menselijke hersenen er ongeveer 86 miljoen bevatten (Azevedo et al., 2009). Zoals in figuur 1 te zien is, bestaat een neuron uit verschillende onderdelen. De dendrieten zijn de toegangspoorten van het neuron, de plaats waar de informatie binnenkomt. Het brede uiteinde van het neuron is het cellichaam. In het cellichaam wordt de informatie die vanuit de dendrieten binnenkomt verzameld. Vanuit het cellichaam kan de informatie vervolgens doorgestuurd worden naar andere neuronen. Dit gebeurt door middel van elektrische signalen die vanuit het cellichaam langs het axon lopen en die gepaard gaan met magneetvelden. De communicatie tussen het uiteinde van axonen en de dendrieten van andere neuronen verloopt middels chemische boodschappersstoffen (neurotransmitters), zoals dopamine of serotonine. Naast het overbrengen van signalen via axonen kan communicatie tussen neuronen ook via directe elektrische verbindingen plaatsvinden, waarbij geladen deeltjes zich via kleine buisjes van de ene naar de andere cel kunnen verplaatsen.

De veranderingen in elektrische signalen in het brein kunnen gemeten worden met schijfjes of naaldjes van geleidend materiaal, zogenaamde elektroden. Elektroden kunnen op verschillende plekken op of in het hoofd geplaatst worden, zoals op de hoofdhuid, op het hersenoppervlak of in de hersenen zelf. De ruimtelijke resolutie (de mate van ruimtelijk detail) en de specificiteit van de meting (de mate waarin uit een meting af te leiden valt waar in de hersenen een signaal precies vandaan komt) hangen af van de plaatsing, grootte en karakteristieken van de elektroden. Een naald-elektrode geplaatst in hersenweefsel kan de activiteit van individuele neuronen meten, terwijl een elektrode die op de hoofdhuid ligt de activiteit van grote groepen neuronen meet.

Met elektroden kunnen de hersenen ook gestimuleerd worden. Door een elektrische stroom tussen elektroden te laten lopen, kunnen nabijgelegen neuronen gestimuleerd worden om te gaan vuren en wordt hersenactiviteit opgewekt of geblokkeerd.

Interactie met de hersenen via elektrofysiologische signalen, of via het magnetisch veld dat uit deze signalen voortkomt, is de basis van de eerste groep neurotechnologieën die we bespreken. Deze technologieën spelen dus direct in op de hersenactiviteit.

Een andere manier van het meten van hersenactiviteit richt zich op de metabole processen in de hersenen. Net als spieren gebruiken neuronen meer zuurstof en voedingsstoffen als ze actiever worden. Door veranderingen in de hoeveelheid zuurstof of glucose in het bloed dat door de hersenen stroomt te meten, kan de neurale activiteit in de hersenen bepaald worden. Op deze manier is het mogelijk om van buiten de schedel (niet-invasief) hersenactiviteit te meten. Echter, omdat deze metingen een vasculaire afgeleide zijn van de neurale activiteit, is het interval tussen een gebeurtenis in de hersenen en de effecten in de metabole signalen vrij lang, en kunnen elkaar snel opvolgende hersenprocessen minder goed in beeld gebracht worden.

Wanneer men niet geïnteresseerd is in hersenactiviteit, maar in de anatomische structuur van de hersenen, kunnen er weer andere meetmethoden gebruikt worden. Deze methoden maken

bijvoorbeeld gebruik van MRI of CT-scans om afbeeldingen van de hersenen te maken. Aan deze beelden kunnen met behulp van diverse analysetechnieken verschillende maten ontleend worden.

In de hiernavolgende hoofdstukken worden de meest relevante neurotechnologieën besproken. Per techniek wordt hierbij kort ingegaan op de manier waarop de techniek interacteert met de hersenen, gevolgd door de belangrijkste wetenschappelijke en klinische toepassingen van de techniek. Speciale aandacht is geschonken aan neurofeedback, het proces waarbij een proefpersoon leert om op basis van directe feedback de eigen neuronale activiteit bij te stellen. Neurofeedback ligt aan de basis van veelbelovende innovaties zoals *brain-computer interfaces* (BCIs), waarmee directe verbindingen tussen de hersenen en een computer tot stand gebracht worden.

Als eerste worden de neurotechnologieën besproken die werken op basis van elektrische of magnetische signalen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen technieken die alleen geschikt zijn om hersenactiviteit meten, technieken die zowel kunnen meten als stimuleren, en technieken die alleen geschikt zijn voor stimulatie. Daarna worden de technologieën besproken die de metabole activiteit van de hersenen bemeten. Als laatste worden de technologieën besproken die de structurele anatomie van de hersenen inzichtelijk maken. In hoofdstuk 5 geven we vervolgens een overzicht van huidige kennis over de toepassing van neurotechnologie binnen de drie genoemde justitie- en veiligheidsdomeinen, te weten *opsporing en waarheidsvinding*, *risicotaxatie* en *interventie*. In het hoofdstuk 6 worden de verwachte ontwikkelingen op de korte en langere termijn beschreven.

4. Neurotechnologieën

(a) Interactie met hersenactiviteit

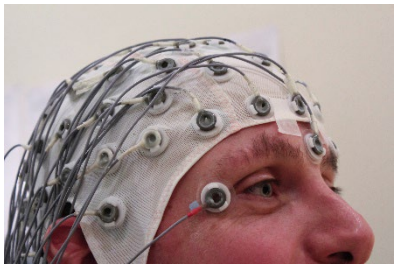
(i) Elektrofysiologische interactie

Technieken om te meten

Elektro-encefalografie

1) Opzet

Wanneer neuronen actief zijn, produceren ze kleine elektrische pulsen. Als grote groepen neuronen in de cortex – de buitenste laag van de hersenen – tegelijkertijd actief zijn, ontstaat er een potentiaalverschil dat kan worden gedetecteerd met behulp van elektroden op de hoofdhuid. De potentiaalveranderingen worden gemeten ten opzichte van een referentie-elektrode met een stabiel potentiaal – die vaak op het bot achter het oor (het mastoïd) geplaatst wordt. Deze manier van het meten van hersensignalen wordt elektro-encefalografie (EEG) genoemd (Berger, 1929).



Figuur 2 - Een proefpersoon met EEG-muts (bron).

Figuur 2 laat de opzet van een EEG-meting zien. Bij dergelijke metingen worden 2 tot wel 256 elektroden los of als onderdeel van een muts in contact gebracht met de hoofdhuid. Hierbij is het noodzakelijk dat de electroden een goed elektrisch contact met de hoofdhuid maken. Meestal wordt dit bewerkstelligd door middel van geleidende gel, maar tegenwoordig zijn er ook systemen verkrijgbaar waarbij dit niet meer nodig is. De elektroden zijn via draden verbonden met een versterker, die de signalen vervolgens naar een computer stuurt.

Aangezien een EEG-systeem relatief goedkoop en mobiel is, en er van buiten de schedel gemeten kan worden, is het één van de meest gebruikte manieren om hersenactiviteit te meten. Daarnaast is EEG één van de neurotechnologieën die de directe elektrofysiologische processen als gevolg van hersenactiviteit kan meten, waardoor de tijdsresolutie van EEG hoog is (in de orde van milliseconden) (Lopes da Silva, 2013). Een nadeel van EEG is echter dat de spatiële specificiteit laag is. Dat wil zeggen dat het lastig is om nauwkeurig te bepalen waar in de hersenen een EEG-signaal vandaan komt. Deze onnauwkeurigheid is gerelateerd aan een fundamentele onzekerheid bij het bepalen van de bronnen van de potentiaalveranderingen, de sterke verbondenheid van corticale gebieden (Sporns et al., 2007) en de spatiële vervaging van de signalen door elektrisch slechte doorlatendheid van hoofdhuid en schedel. Daarbovenop is het EEG-signaal gevoelig voor spierbewegingen van het gezicht en het knipperen van de ogen, al kunnen deze spier-gerelateerde artefacten tegenwoordig al tijdens de meting zelf behoorlijk goed uit het signaal gefilterd worden.

2) Toepassingen

Klinisch

Een belangrijk deel van het EEG-signaal wordt gekenmerkt door herkenbare ritmische patronen. Zo wordt bijvoorbeeld diepe slaap gekenmerkt door grote, trage golven in het EEG-signaal, terwijl de golven in wakkere toestand relatief klein zijn en snel op elkaar volgen. Door te kijken naar afwijkingen van deze patronen kan EEG diagnostisch toegepast worden. Eventuele afwijkingen in het signaal

kunnen gerelateerd worden aan neurologische afwijkingen zoals slaapstoornissen, epilepsie of de aanwezigheid een hersentumor (Gazzaniga et al., 2009, p. 148).

Wetenschappelijk

EEG wordt gebruikt bij divers wetenschappelijke onderzoek aan het gezonde en zieke brein, zoals bijvoorbeeld op het gebied van perceptie, geheugen, epilepsie, autisme of schizofrenie (Lopes da Silva, 2013). Vaak worden proefpersonen bij deze experimenten blootgesteld aan bepaalde stimuli (prikkels) of moeten ze opdrachten uitvoeren. Omdat de hoeveelheid ruis in het EEG-signaal relatief hoog is, moeten de stimuli of opdrachten een aantal keren herhaald worden. Vervolgens kan een gemiddelde EEG-signaalverandering worden berekend, waaruit valt af te leiden wat de daadwerkelijk onderliggende neurale respons op de stimulus of opdracht is.

Omdat EEG-systemen relatief mobiel zijn, wordt de techniek vaak gebruikt bij onderzoek naar neuro-ergonomie – de studie naar het gedrag van de hersenen in het dagelijks leven. Binnen neuro-ergonomie wordt bijvoorbeeld onderzoek gedaan of werklast, vermoeidheid of afdwalende gedachten op basis van hersensignalen gedetecteerd kunnen worden (Borghini et al., 2014). Met name een verandering in de langzame golven in het brein lijkt voorspellend voor het missen van bepaalde prikkels uit de omgeving (Dockree et al., 2017; O'Connel et al., 2009). Verwacht wordt dat de producten die uit de neuro-ergonomie ontwikkeld worden consumenten ten goede kunnen komen (Brouwer, 2021), en kunnen bijdragen aan sectoren zoals onderwijs, transport of de psychiatrie (Dehais et al., 2020).

Neurofeedback/BCI

Brain-computer interfaces (BCIs) zijn systemen waarbij hersenactiviteit gemeten wordt en vervolgens vertaald naar een controlesignaal voor een computer, zoals bijvoorbeeld een muisklik (Wolpaw et al., 2002). De gebruiker ontvangt daarmee directe feedback over het hersensignaal en kan deze naar eigen inzicht aanpassen. Een BCI kan verschillende doelen dienen: een BCI kan verloren lichaamsfunctionaliteit vervangen, herstellen, verbeteren of aanvullen, of gebruikt worden als onderzoeksmethode in gezonde proefpersonen of patiënten (Brunner et al., 2015).

Er zijn verschillende strategieën om een BCI aan te sturen.

De eerste strategie is om een proefpersoon of gebruiker een bepaalde actie te laten uitvoeren, om zodoende een specifiek patroon van hersenactiviteit te genereren. Een voorbeeld hiervan is het bewegen van de rechterhand, waarbij een consistent activatiepatroon in het EEG ontstaat boven de linker motorcortex. Een computer-algoritme kan getraind worden om de patronen van hersenactiviteit die gekoppeld zijn aan echte of ingebeelde beweging te herkennen. BCIs gebaseerd op het uitvoeren of inbeelden van bewegingen tijdens EEG worden bijvoorbeeld gebruikt om patiënten te helpen met revalidatie na een beroerte (Abiri et al., 2019).

De tweede strategie is gebaseerd op een specifieke marker in het EEG-signaal, dat 300 milliseconden nadat een proefpersoon iets herkenbaars of afwijkends ziet of hoort, te meten is. Dit is de P300-respons. Hoewel de neurologische basis van deze respons nog onduidelijk is, is het bestaan ervan onomstotelijk vastgesteld (Linden, 2005). In een klassiek P300-paradigma worden twee verschillende tonen aan proefpersoon gepresenteerd. Hierbij komt de één vaker voor dan de ander (bijvoorbeeld 80% t.o.v. 20%), en wordt de proefpersoon geïnstrueerd te reageren op de zeldzame toon (Ritter & Vaughan, 1969). Wanneer een zeldzame toon gepresenteerd wordt, is de P300 te meten. De P300-respons kan toegepast worden in BCIs (Brouwer & van Erp, 2010; Farwell & Donchin, 1988; Höhne & Tangermann, 2014; Waal et al., 2012). Farwell & Donchin (1988) presenteerden bijvoorbeeld een 6x6 matrix van letters en cijfers, waarbij verschillende kolommen en rijen afwisselend oplichtten. Wanneer de kolom of rij oplicht die de letter bevat die de proefpersoon wil communiceren, is de P300 te meten. Zo kan de te communiceren letter vastgesteld worden. Omdat de P300 gebruikt zou kunnen worden

om aanwezige kennis bij een verdachte te bepalen, wordt de mogelijke rol van de P300 binnen waarheidsvinding veelvuldig onderzocht. In hoofdstuk 5 wordt daar uitgebreid aandacht aan besteed.

Ten derde zijn er in het EEG-signaal directe reacties op visuele prikkels, zoals lichtflitsen, te zien. Met behulp van deze signaalveranderingen kunnen ook BCIs aangestuurd worden, bijvoorbeeld door het EEG-signaal op te nemen terwijl een proefpersoon naar knipperende letters op een computerscherm kijkt. Hierbij kan de letter waar iemand naar kijkt worden bepaald op basis van de veranderingen in het EEG signaal als gevolg van het knipperpatroon van de letter (Li et al., 2021).

In de interviews met experts kwam naar voren dat EEG, via neurofeedback/BCI, ook gebruikt zou kunnen worden bij de ondersteuning van leerprocessen. De systemen hiervoor zijn op relatief eenvoudige wijze toe te passen. Zo heeft het bedrijf Neurable EEG verwerkt in een *noise-cancelling* koptelefoon, en kan het opgenomen EEG-signaal, volgens het bedrijf, informatie geven over de bereikte focus en werkroutine (Freight, n.d.). Daarnaast benoemde een geïnterviewde expert dat het EEG-signaal zou kunnen laten zien welke prikkels je niet bewust hebt waargenomen, waar dat wel had gemoeten (zoals bij het ontwikkelen van de rijvaardigheid, wanneer een fietser in de zijspiegel wordt gemist). Inzicht in EEG-hersengolven zou ook kunnen helpen bij het verbeteren van andere cognitieve vaardigheden (Gruzelier, 2014; Viviani & Vallesi, 2021). Echter, of EEG-neurofeedback ook buiten het laboratorium voor langdurige verbetering van cognitieve vaardigheden zorgt is nog onduidelijk. Zo voerden onderzoekers een systematisch literatuuronderzoek uit naar het gebruik van EEG-neurofeedback in sport (voor het eerst is toegepast bij het boogschieten (Landers et al., 1991)). De onderzoekers concludeerden dat consistente verbetering van sportprestaties door middel EEG-neurofeedback nog niet is aangetoond (Mirifar et al., 2017). Ook het gebruik van EEG-feedback ten behoeve van stressreductie lijkt vooralsnog niet effectief (Van Boxtel et al., 2012). Meer belovend lijken de resultaten van EEG-feedback bij ADHD (Krepel et al., 2020).

3) Technische ontwikkelingen

Aangezien EEG-systemen tegenwoordig relatief eenvoudig draagbaar en draadloos (bijv. Shambroom et al., 2011) te maken zijn, en het gebruik van geleidende gels niet meer noodzakelijk is, kunnen gebruiksvriendelijke systemen gemaakt worden. Daarnaast is EEG relatief goedkoop en veilig. Dit heeft de ontwikkeling van diverse toepassingen voor thuisgebruik gestimuleerd. Verschillende bedrijven bieden EEG-systemen aan in combinatie met speciale BCI-software en richten zich daarmee specifiek op BCI-onderzoek en implementatie (*MindAffect - Home*, n.d.; *OpenBCI - Open Source Biosensing Tools (EEG, EMG, EKG, and More)*, n.d.; 'Products Overview | g.Tec Medical Engineering,' n.d.). Daarnaast is er een consumentenmarkt voor allerhande toepassingen op basis van het EEG-signaal, zoals bijvoorbeeld binnen de *gaming* industrie (Kerous et al., 2018), voor concentratietraining (Freight, n.d.) en voor meditatie (*Muse™ - Meditation Made Easy with the Muse Headband*, n.d.). Deze consumentensystemen voldoen echter vaak niet aan de standaarden die worden gesteld aan klinische EEG-systemen en de kwaliteit van het signaal is in de meeste gevallen suboptimaal. De verwachting is echter dat binnen afzienbare tijd kwalitatief goede EEG-sets op de consumentenmarkt beschikbaar komen. Verder wordt EEG gebruikt binnen het onderzoeksveld van *neuromarketing*, waar wordt bestudeerd hoe proefpersonen reageren op bijvoorbeeld advertenties of verpakkingen.

Sinds enkele jaren wordt onderzocht of EEG toepast kan worden als bron voor biometrische identificatie (Chan et al., 2018; Gui et al., 2019). Gui et al. (2019) benoemen hiervan een aantal voordelen, met als belangrijkste punt dat het EEG-signaal beduidend moeilijker te stelen is dan een vingerafdruk of irisscan. Op basis van eenvoudige eigenschappen van het EEG-signaal is het mogelijk om individuen uit een groep van ongeveer 100 proefpersonen te identificeren (Demuru & Fraschini,

2020). Er zijn onderzoekers die verwachten dat verdere ontwikkelingen in *hardware*, signaalverwerking en computeralgoritmes (bijvoorbeeld op basis van *machine learning* (bijv. Hogendoorn & Burkitt, 2018)) in de nabije toekomst zullen leiden tot het ontstaan van commerciële persoonsherkenningssystemen op basis van EEG (Chan et al., 2018), bijvoorbeeld door bepaalde aspecten van het signaal te kwantificeren (Wessel & Aron, 2013). Er bestaan echter ook twijfels over de uiteindelijke accuratesse en bruikbaarheid van dergelijke systemen. In de interviews werd benoemd dat het EEG-signaal aan verandering onderhevig is en wordt beïnvloed door veroudering (Voytek et al., 2015) of door psychologische of fysiologische pathologie.

Magneto-encefalografie

1) Opzet

Magneto-encefalografie (MEG) is een meetmethode die in de basis lijkt op EEG. Als neuronen actief zijn, produceren ze tegelijk met het elektrofysiologische signaal ook een klein magnetisch veld. Het magnetisch veld dat ontstaat wanneer groepen neuronen tegelijkertijd actief zijn, kan opgepikt worden met een MEG-scanner (Cohen, 1968) (figuur 3). Net als EEG is MEG een directe meting van de neurale activiteit, en is de tijdsresolutie hoog. Echter, met MEG kunnen de bronnen van de activiteit meer in detail bepaald worden, aangezien magnetische signalen niet verstoord worden door de tussenliggende hersenstructuren, de schedel en de hoofdhuid (in tegenstelling tot de signalen die gemeten worden met EEG). Geschat wordt dat MEG de gecombineerde activiteit van ongeveer vijftigduizend hersencellen in de cortex meet, wat neerkomt op een cirkel met een diameter van ongeveer een millimeter (Proudfoot et al., 2014).

Figuur 3 - Een proefpersoon in een MEG-scanner (bron).

Een MEG-meting is een meer complexe aangelegenheid dan een EEG-meting. Tijdens een MEG-meting draagt de patiënt of proefpersoon een helm met sensoren. De sensoren sturen signalen naar supergeleidende sensoren die vastzitten in een grote buis met uitsparing voor het hoofd (zie figuur 3). Deze supergeleidende sensoren zijn zeer gevoelig. De veranderingen in het magneetveld die ze kunnen meten zijn ongeveer een miljoen keer kleiner dan het aardmagnetisch veld. Om een dergelijke gevoeligheid te bereiken moeten de supergeleidende sensoren gekoeld worden met vloeibaar helium. Dit heeft uiteraard consequenties voor de afmetingen van de apparatuur en voor de kosten van gebruik en onderhoud. Daarnaast moet de MEG-scanner in een ruimte staan die afgeschermd is voor elektromagnetische golven, zodat het gemeten signaal niet verstoord wordt door signalen van buitenaf (bijvoorbeeld als gevolg van elektrische apparaten of bewegende metalen voorwerpen, zoals auto's). Ook moet de proefpersoon zijn of haar hoofd zo stil mogelijk houden, aangezien hoofdbewegingen vanaf een grootte van 5 mm het signaal al sterk kunnen verstoren (Gross et al., 2013). Tot slot is de gevoeligheid van MEG, in tegenstelling tot die van EEG, afhankelijk van de spatiele oriëntatie van het weefsel waar de activiteit plaatsvindt. Hierdoor is de activiteit die in de windingen van de hersenen plaatsvindt beter meetbaar dan de activiteit aan de oppervlakte van de hersenen (Gazzaniga et al., 2009, p. 152).

2) Toepassingen

Klinisch

In tegenstelling tot EEG is MEG een meer geschikte methode om de ligging van bronnen van hersenactiviteit niet-invasief in kaart te brengen. De techniek wordt daarom veel gebruikt in de voorbereiding van neurochirurgische ingrepen, zoals bijvoorbeeld voor de lokalisatie van de bron van epilepsie (Stufflebeam, 2011).

Wetenschappelijk

MEG wordt veel gebruikt in neurocognitief onderzoek, vooral als het belangrijk is om snelle veranderingen in activiteit in het hele brein te kunnen meten (Gross, 2019). Zo kan bijvoorbeeld worden gekeken naar de veranderende patronen van hersenactiviteit tijdens het lezen van tekst (Schoffelen et al., 2017) of het uitvoeren van andere opdrachten. Daarnaast wordt MEG ook gebruikt

om neurologische aandoeningen zoals de ziekte van Parkinson te onderzoeken (Fernández et al., 2002).

Neurofeedback/BCI

De mogelijkheid om MEG-signalen te gebruiken voor BCI is in een aantal studies onderzocht (Mellinger et al., 2007; van Gerven et al., 2009), bijvoorbeeld in de context van revalidatie na een beroerte (Buch et al., 2008). Door de praktische beperkingen die bij metingen met MEG een rol spelen wordt de techniek echter weinig gebruikt voor neurofeedback/BCI-doeleinden.

3) Technische ontwikkelingen

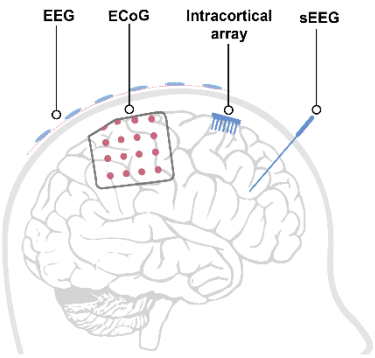
De ontwikkeling van een nieuw type sensoren, *optically pumped magnometers*, is voor MEG onderzoek zeer relevant (zie bijvoorbeeld: Boto et al., 2018; Hill et al., 2020; Paek et al., 2020; Pratt et al., 2021). Deze sensoren hoeven namelijk niet gekoeld te worden met vloeibaar helium, en dat heeft een aantal belangrijke praktische voordelen. Ten eerste maken ze de installatie en het gebruik van MEG aanzienlijk makkelijker en goedkoper. Daarnaast hoeven de nieuwe sensoren niet in een vaste helm gemonteerd te worden, maar kunnen ze ook aan een soort EEG-muts bevestigd worden. Hierdoor wordt de toepasbaarheid van MEG in potentie verbreed. Wel moet de MEG-meting nog altijd in een afgeschermde ruimte plaatsvinden.

Daarnaast worden er ook stappen gezet in de ontwikkeling van MEG-sensoren waarmee in groter detail en dieper in de hersenen gemeten kan worden (Barbieri et al., 2016; Caruso et al., 2017). Zo lieten Caruso et al. (2017) zien dat er met naaldvormige MEG-sensoren op het niveau van individuele neuronen gemeten kan worden in de visuele hersengebieden van een kat. In de toekomst zou dit kunnen leiden tot draadloze, implanteerbare MEG-systemen (Zaeimbashi et al., 2021).

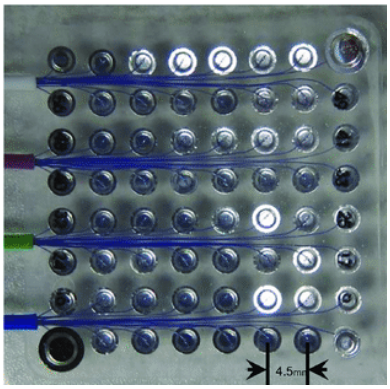
Electrocorticografie

1) Opzet

In plaats van via de hoofdhuid, kunnen elektrofysiologische signalen uit de hersenen ook gemeten worden met elektroden die, via een chirurgische procedure, direct op het hersenoppervlak geplaatst worden. Deze methode heet electrocorticografie (ECoG) (Caton, 1875) (figuur 4). ECoG-elektroden worden ingebed in een laag siliconen en zijn beschikbaar als strips van bijvoorbeeld 4 of 8 elektroden lang, of als matjes van verschillende afmetingen. De typische afstand tussen twee elektroden is 1 cm, maar sinds enkele jaren zijn ook matjes verkrijgbaar waar de elektroden kleiner zijn en dichter bij elkaar liggen (hoog-resoluut ECoG, figuur 5; Hiremath et al., 2017). Het ECoG-signaal bestaat uit de summatie van het signaal van de enkele honderdduizenden neuronen die direct onder iedere elektrode liggen (Dubey & Ray, 2019; Hermes & Miller, 2020). ECoG levert een directe en getailleerde meting van hersenactiviteit. Echter, om de elektroden te plaatsen is een neurochirurgische ingreep nodig. Afhankelijk van de hoeveelheid en afmetingen van de te plaatsen strips of matjes wordt een craniotomie – een luikje in de schedel – uitgevoerd (voor het plaatsen van matjes), of worden boorgaten gemaakt in de schedel (voor het plaatsen van strips).



Figuur 4 - ECoG in vergelijking tot andere neurotechnologieën. SEEG en micro-elektroden-arrays zullen verderop besproken worden. Met dank aan M.P. Branco.



Figuur 5 - Een high-density ECoG matje (Hiremath et al., 2017).

Omdat een hersenoperatie noodzakelijk is, worden ECoG-elektroden in het algemeen alleen geplaatst met een directe medische aanleiding, zoals bijvoorbeeld voor het bepalen van de bron van epilepsie. Bij dit klinische gebruik van ECoG zijn de elektroden met snoeren aangesloten op een signaalversterker en een computer. Voor situaties buiten het ziekenhuis, bijvoorbeeld voor neurofeedback/BCI toepassingen (zie onder), zijn er ook implanteerbare versterkers ontwikkeld die de signalen draadloos naar buiten het lichaam kunnen versturen.

2) Toepassingen

Klinisch

Klinisch wordt ECoG voornamelijk toegepast binnen het kader van de diagnostiek van epilepsie. Bij sommige patiënten met epilepsie is medicatie niet of onvoldoende werkzaam. Een alternatief is dan het operatief verwijderen van de bron van de epilepsie in de hersenen. Om te bepalen waar deze bron zich bevindt zijn niet-invasieve metingen zoals EEG soms niet toereikend. In dat geval kan gekozen worden voor een implantatie met ECoG-elektroden. De patiënt met de geïmplanteerde elektroden blijft dan opgenomen in het ziekenhuis, waarbij de signalen van de ECoG elektroden 24 uur per dag gemeten worden, tot een epileptische aanval plaatsvindt (met een maximum van circa twee weken) waarmee de locatie van de epileptische bron bepaald kan worden. In deze periode worden de ECoG

elektroden vaak ook gebruikt om hersengebieden die essentieel zijn voor bijvoorbeeld taal of motoriek in kaart te brengen. Dat gebeurt door middel van elektrische stimulatie van de hersenen via de ECoG-elektroden (Lesser et al., 1984). Aan de hand van de reactie van de patiënt tijdens deze stimulaties kan bepaald worden welke functie het hersengebied onder de gestimuleerde elektroden heeft. Zo kan ervoor gezorgd worden dat er tijdens het weghalen van de bron van de epilepsie geen schade wordt toegebracht aan hersengebieden die essentieel zijn voor taal of motoriek.

Stimulatie met ECoG-elektroden lijkt ook effectief bij de behandeling bij patiënten met fantoompijn (de pijn die mensen kunnen voelen in geamputeerde ledematen). ECoG-stimulatie van de motorgebieden in de hersenen kan deze pijn verminderen (Tsubokawa et al., 1993).

Het bedrijf NeuroPace heeft daarnaast een klinische behandeling voor epilepsie ontwikkeld op basis van volledig implanteerbare ECoG en diepe hersenstimulatie (DBS, zie onder) (Morrell, 2011). Wanneer de elektroden epileptische activiteit in de hersenen meten, kan direct bij de bron van de activiteit gestimuleerd worden om zodoende de epileptische aanval te onderdrukken, nog voordat deze begonnen is. Het systeem is in de groep geïmplanteerde patiënten na meer dan negen jaar nog altijd werkzaam (Nair et al., 2020).

Wetenschappelijk

Terwijl de epilepsiepatiënt met geïmplanteerde ECoG-elektroden in het ziekenhuis wacht op een epileptische aanval kan gevraagd worden of hij of zij deel wil nemen aan wetenschappelijk onderzoek. ECoG-metingen van de hersenactiviteit zijn van grote waarde voor neurowetenschappers en hebben substantieel bijgedragen aan het begrip van vele cognitieve processen zoals werkgeheugen of taal (Jacobs & Kahana, 2010), maar ook van spontante hersenactiviteit (Berezutskaya et al., 2020; Canolty et al., 2006). Een belangrijke beperking voor het doen van wetenschappelijk onderzoek in deze setting is echter dat de locatie van de geplaatste elektroden wordt bepaald door de klinische vraagstelling. Er kan dus niet op ieder punt op de cortex naar wens gemeten worden. Daarnaast hebben patiënten vaak onderliggende aandoeningen, zoals bijvoorbeeld epilepsie, die van invloed kunnen zijn op de kwaliteit en de generaliseerbaarheid van het gemeten hersensignaal.

Binnen het kader van wetenschappelijk onderzoek met ECoG kunnen de hersenen ook gestimuleerd worden. Hiermee wordt onder andere de mogelijkheid voor de ontwikkeling van een prothese voor blinden onderzocht, waarbij gebruik gemaakt wordt van stimulatie door ECoG-elektroden op de visuele cortex (Bosking et al., 2017). Daarnaast is in het verleden een draagbaar systeem ontwikkeld, om op basis van beelden van een videocamera de visuele hersengebieden met ECoG-elektroden te stimuleren. Zo konden de patiënten grove patronen onderscheiden (Dobelle, 2000). Hierbij kwamen echter relatief vaak infecties en technische problemen voor (Rush & Troyk, 2012).

Neurofeedback/BCI

Naast de klinische toepassing van ECoG voor de behandeling van epilepsie (zie boven, NeuroPace), worden ECoG-systemen ook ingezet bij onderzoek naar *brain-computer interfaces*, waar hersensignalen worden gebruikt om bijvoorbeeld een robotarm (W. Wang et al., 2013) of exoskelet (een systeem van mechanische ondersteuning) (Benabid et al., 2019) aan te sturen. Er zijn inmiddels ook ECoG-systemen ontwikkeld die de gemeten hersensignalen draadloos kunnen versturen naar een ontvanger. Dit betekent dat de metingen gedaan kunnen worden zonder dat de proefpersoon of patiënt met een snoer gekoppeld zit aan een computer en ook plaats kunnen vinden buiten het ziekenhuis of een laboratorium. Zo is het voor een volledig verlamde amyotrofische laterale sclerose (ALS)-patiënte mogelijk met het ECoG-hersensignaal zelfstandig en draadloos een spraakcomputer aan te sturen (Vansteensel et al., 2016).

Een belangrijk doel binnen het onderzoeksveld van BCI is het decoderen van spraak. Hierbij wordt door middel van het analyseren hersensignalen, zoals bijvoorbeeld gemeten met ECoG, bepaald welke woorden iemand uitspreekt of probeert uit te spreken. Dit type BCI-toepassing zou volledig verlamde mensen in staat kunnen stellen om door hersenactiviteit gerelateerd aan spraak-productie snel te kunnen communiceren. Opmerkelijk is dat Facebook dergelijk onderzoek tot voor kort financieel steunde. De betrokken onderzoeksgroep publiceerde recent een manuscript waarin een deelnemer met ALS werd beschreven die geïmplanteerd was met een *high-density* ECoG matje. Door zijn aandoening kan deze patiënt geen woorden meer uitspreken. De onderzoekers vroegen de patiënt om zich voor te stellen vijftig veelgebruikte woorden een aantal keren uit te spreken. Met deze data trainden de onderzoekers een algoritme, waarmee op basis van de hersenactiviteit van de patiënt in 40% van de gevallen correct geïdentificeerd kon worden welk woord de patiënt probeerde te communiceren (het kans-niveau was 2%). Daarnaast konden zinnen gevormd werden op basis van de set van vijftig woorden. Met behulp van een taalprogramma dat beoordeelde welke woorden in de Engelse taal het meest waarschijnlijk na elkaar gebruikt zouden worden werd daarbij een accuratesse tot 75% behaald (Moses et al., 2021). Hoewel dit onderzoek belangrijke wetenschappelijke vooruitgang demonstreert, hoopte Facebook binnen afzienbare tijd een commercieel product uit dit onderzoekveld te destilleren, maar het bedrijf heeft zich recent teruggetrokken uit het onderzoek omdat dit niet is gelukt (Regalado, 2021).

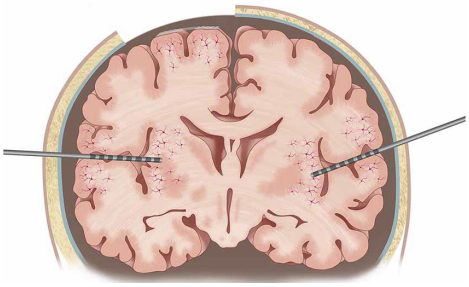
3) Technische ontwikkelingen

Er wordt momenteel veel werk verricht om kleinere ECoG-elektroden te ontwikkelen waarmee voor langere tijd en in meer detail gemeten kan worden (Shokoueinejad et al., 2019). Zo wordt veel ECoG-onderzoek uitgevoerd met *high-density* ECoG, waarbij de afstand tussen elektroden ongeveer 4 mm is (Hermes & Miller, 2020). Een ander voorbeeld is ‘NeuroGrid’, waarbij de afstand tussen elektroden slechts 0,3 millimeter bedraagt. Met NeuroGrid kan niet alleen de activiteit van groepen neuronen, maar ook het signaal van individuele neuronen gemeten worden (Khodagholy et al., 2015). Aangezien de elektroden en signaalzenders door hun geringe afmetingen ook steeds veiliger worden, is door onder andere enkele geïnterviewde experts beargumenteerd dat de risico’s theoretisch aanvaardbaar kunnen worden om te implanteren zonder medische noodzaak (zie ook Chang, 2015).

Stereotactische elektro-encefalografie

1) Opzet

De tot nu toe besproken technieken interacteren met gebieden aan de oppervlakte van de hersenen. Om de elektrische signalen te meten die uit dieper gelegen hersenstructuren komen, zoals bijvoorbeeld de amygdala of de hippocampus, kunnen er ook elektroden dieper in het hersenweefsel aangebracht worden. Daarvoor is een computergestuurde operatie nodig, waar elektroden worden aangebracht terwijl genavigeerd wordt op basis van MRI-beelden van de hersenen en de bloedvaten (bewerking van Gholipour et al., 2020). Deze methode heet stereotactische EEG (sEEG) (figuur 6, bewerking van Grande et al., 2020). Tijdens de implantatie worden naalden met daarop verschillende sEEG-elektroden in de hersenen geplaatst met een nauwkeurigheid van ongeveer 3 mm. Voor klinische toepassingen worden er gemiddeld 5 tot 15 naalden geplaatst, met ieder 8 tot 18 elektroden (Herff et al., 2020). De afstand tussen de elektroden aan één naald is ongeveer 1,5 tot 3,5 mm (van der Loo et al., 2017).



Figuur 6 - Een illustratie van sEEG (bewerking van Grande et al., 2020).

2) Toepassingen

Klinisch

SEEG wordt, net als ECoG, voornamelijk gebruikt voor het lokaliseren van de bron van epilepsie. Afhankelijk van de locatie van de vermoedelijke bron wordt steeds vaker gekozen voor sEEG. Dit is vooral het geval wanneer de epilepsie afkomstig lijkt te zijn uit diepere hersenstructuren (George et al., 2020; Gompel et al., 2021). Het inbrengen van sEEG gaat door middel van boorgaten (enkele mm in diameter) in de schedel waardoor de kansen op medische complicaties kleiner zijn dan bij ECoG, waar veelal een grotere opening in de schedel gemaakt moet worden (Iida & Otsubo, 2017; Youngerman et al., 2019). Afhankelijk van de regio van de hersenen die in kaart gebracht moet worden, wordt sEEG soms ook in combinatie met ECoG toegepast. Op deze manier kan er zowel op het oppervlak als diep in de hersenen gemeten worden.

Wetenschappelijk

Door een toegenomen klinisch gebruik van sEEG, wordt de techniek ook steeds vaker gebruikt voor neurowetenschappelijk onderzoek, waarbij zowel gemeten als gestimuleerd wordt (George et al., 2020; Herff et al., 2020). Een aantal studies heeft laten zien dat het geheugen potentieel verbeterd kan worden met hersenstimulatie. Zo is gedemonstreerd dat stimulatie met sEEG het spatiele geheugen kan verbeteren (Suthana et al., 2012). Hamani et al. (2008) beschreven een studie waarin de hypothalamus van een patiënt intra-operatief gestimuleerd werd. Dit riep levendige herinneringen uit zijn jeugd op en na de operatie bleek zijn autobiografisch geheugen significant beter dan voor de operatie (Hamani et al., 2008). Momenteel wordt er onderzoek gedaan naar het verbeteren van het geheugen bij patiënten met geheugenstoornissen na hersenschade door in de geheugengebieden van de hersenen hersenactiviteit te meten en te stimuleren (Hampson et al., 2018; Kahana et al., 2021). Volgens een geïnterviewde expert zijn de resultaten van dit onderzoek echter nog niet eenduidig.

Neurofeedback/BCI

Het gebruik van sEEG voor BCI-doeleinden wordt actief onderzocht, maar kent tot dusverre nog geen concrete toepassingen (Herff et al., 2020). De procedures van de implantatie van sEEG vertonen veel

overeenkomsten met die van implantatie van elektroden voor diepe hersenstimulatie (DBS, zie onder). De mogelijkheid tot permanente elektrode-implantaties voor DBS suggereert dat dit voor sEEG ook mogelijk zou moeten zijn (bijvoorbeeld ten behoeve van BCI-toepassingen), maar concreet bewijs van de haalbaarheid ontbreekt nog (Herff et al., 2020).

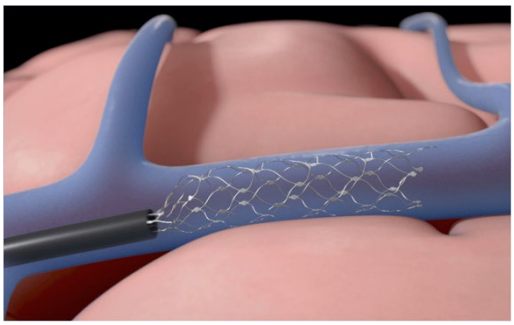
3) Technische ontwikkelingen

Er wordt gewerkt om met sEEG-elektroden meer detail te kunnen meten. Hiervoor kunnen aan de punt van de sEEG-naald dunne draadjes geplaatst worden die kunnen fungeren als aparte elektroden. Op deze manier kan zowel de activiteit van individuele neuronen (met de draadjes) als de activiteit van groepen neuronen worden opgenomen (met de sEEG-elektroden). Met deze methode wordt bijvoorbeeld aan het Nederlands Herseninstituut onderzocht hoe herinneringen gevormd worden in de hippocampus (Reddy et al., 2020).

Endovasculaire elektro-encefalografie

1) Opzet

Om de risico's van de implantatie van elektroden te minimaliseren, is recentelijk gewerkt aan de mogelijkheid om elektroden in de hersenen te plaatsen in een stent (Oxley et al., 2016). Een stent is een soort veertje (zoals in een balpen) dat geplaatst wordt om een bloedvat open te houden. Stents worden veelvuldig gebruikt in de behandeling van vernauwing van de bloedvaten in het hart (Cakulev et al., 2009) en de hersenen (Chimowitz et al., 2011; Puffer et al., 2013). Een onderzoeksgroep uit Australië heeft de 'Stentrode' ontwikkeld, een stent met daarin 16 meetelektroden (Oxley et al., 2016) (figuur 6). Bij de implantatie ligt de stent in een buisje gevouwen en wordt via de halsader ingebracht. Het buisje wordt vervolgens doorgeschoven naar een bloedvat in de hersenen, waarna de stent uit het buisje gehaald wordt. Via de elektroden op de stent kan er vanuit de binnenkant van het bloedvat hersenactiviteit gemeten worden en kunnen de hersenen zelfs gestimuleerd worden. Door zijn afmeting is het gebruik van de Stentrode beperkt tot het grootste bloedvat rond de hersenen (de sinus sagittalis superior).



Figuur 7 - Een model van de Stentrode in een bloedvat boven de hersenen (bron).

2) Toepassingen

Klinisch
De Stentrode kent momenteel geen klinische toepassingen.

Wetenschappelijk
Zie neurofeedback/BCI.

Neurofeedback/BCI
De Stentrode is ontwikkeld voor BCI-toepassingen en werd onlangs voor het eerst geïmplanteerd bij twee mensen met ALS (Oxley et al., 2021). Hierbij werd de Stentrode verbonden met een apparaatje onder het sleutelbeen. Dit onderhuidse apparaatje stuurt de hersensignalen vervolgens draadloos naar een ander apparaatje dat op het sleutelbeen geplaatst wordt. Vervolgens worden de signalen naar een computer gestuurd. De deelnemers werden getraind 'muisklikken' te maken met de hersensignalen, of in te zoomen op een computerscherm, door te denken aan het bewegen van de hand of de voet. De muis konden ze bewegen op het computerscherm via een *eye tracker,* een apparaat dat meet op welk punt de ogen van de gebruiker zijn gericht. Zo konden de deelnemers van dit onderzoek een computer besturen door een combinatie van oogbewegingen en hersensignalen.

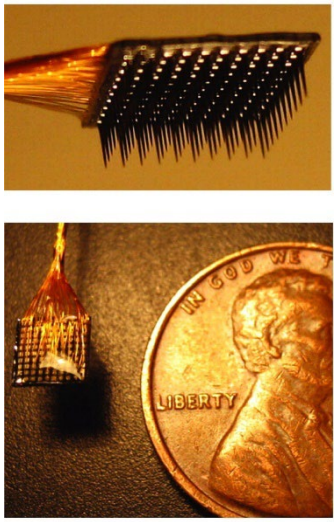
3) Technologische ontwikkelingen

Het is de bedoeling dat de Stentrode in de toekomst ook gebruikt gaat worden om de hersenen te stimuleren om zodoende het gebruik van BCI-systemen te verbeteren (Oxley et al., 2016). Dit lijkt conceptueel haalbaar, aangezien initiële studies al hebben aangetoond dat endovasculaire stimulatie van de hersenen via de Stentrode mogelijk is en wellicht zelfs een alternatief biedt voor hersenstimulatie via DBS elektroden (Gerboni et al., 2018; Neudorfer et al., 2020).

Micro-elektroden

1) Opzet

Micro-elektroden-arrays bestaan uit kleine naaldjes (de micro-elektroden) van ongeveer 1,5 millimeter lang (K. E. Jones et al., 1992) (figuur 8, van Kelly et al., 2007). De meest gebruikte arrays bevatten circa 100 naaldjes. Deze naaldjes kunnen in het oppervlak van de cortex geplaatst worden. Met het topje van de naalden kan hersenactiviteit vanuit de cortex gemeten worden of kan er gestimuleerd worden. De ontwikkeling van micro-elektroden-arrays is erg belangrijk geweest vanuit wetenschappelijk oogpunt, omdat hiermee voor het eerst zowel de elektrische activiteit van groepen als van individuele neuronen gemeten kon worden. Hierdoor kan de werking van de hersenen in bijzonder hoog detail bestudeerd worden. Het nadeel van micro-elektroden is dat ze maar een kleine oppervlakte kunnen bemeten (de honderd naaldjes zijn verdeeld over een oppervlakte van ongeveer 18 mm^2). Daarom is het met de conventionele micro-elektroden-arrays niet mogelijk om bijvoorbeeld de communicatie tussen hersengebieden te bestuderen, zoals dat wel mogelijk is met ECoG.



Figuur 8 - Boven: close-up van een standaard elektrode-array. Onder: elektrode-array naast een muntstuk (Kelley et al., 2007).

De micro-elektroden-arrays worden in de cortex geplaatst tijdens een hersenoperatie, waarna ze worden verbonden aan een connector die in de schedel wordt geplaatst. Tot dusverre zijn draadloze, mobiele systemen niet breed beschikbaar en moet de connector via een snoer aangesloten worden op een computer. Een uitgebreide studie heeft laten zien dat in apen de elektroden meestal na een half jaar niet meer bruikbaar zijn (Barrese et al., 2013). In mensen gaan de micro-elektroden-arrays waarschijnlijk een stuk langer mee. Twee onderzoekslaboratoria met een langlopende studie naar het gebruik van micro-elektroden-arrays in deelnemers met verlamming demonstreerden recentelijk dat de arrays na 1500 (Hughes et al., 2021) en 1800 (Colachis et al., 2021) dagen nog te gebruiken zijn. Echter, ook bij mensen vormen instabiliteit en geleidelijke verslechtering van de signalen van micro-elektroden-arrays een beperking. Er zijn aanwijzingen gevonden voor inkapseling van de elektroden en voor verslechtering van het elektrodemateriaal na langdurige implantatie (Woeppel et al., 2021 en referenties daarin).

2) Toepassingen

Klinisch
Micro-elektroden worden vooralsnog niet toegepast in een klinische setting.

Wetenschappelijk
Zie neurofeedback/BCI.

Neurofeedback/BCI
De directe en gedetailleerde metingen met micro-elektroden-arrays vormen een bijzonder geschikte basis voor het maken van BCIs. De uitgebreide informatie die hiermee uit de hersenen kan worden geëxtraheerd maakt het namelijk mogelijk om complexe, multidimensionale BCI-controle signalen te genereren. De micro-elektroden-arrays moeten echter tijdens een hersenoperatie in het corticale hersenweefsel aangebracht worden, en dat is niet zonder risico. Daarom worden deze arrays alleen geplaatst binnen het kader van wetenschappelijk onderzoek bij patiënten die vaak (groten)deels verlamd zijn. Deelname aan onderzoek heeft als het doel om de patiënten in staat te stellen via de

hersensignalen een BCI aan te sturen en daarmee te interacteren met de buitenwereld. Zo hebben onderzoekers laten zien dat het mogelijk is om met behulp van het signaal van geïmplanteerde micro-electroden een robotarm complexe bewegingen uit te laten voeren (Collinger et al., 2013), zoals bijvoorbeeld het oppakken en naar de mond brengen van een stuk chocolade. Daarnaast zijn micro-elektroden gebruikt bij hersengestuurde communicatie, waarbij patiënten via hersensignalen een cursor bedienen en daarmee letters op een scherm selecteren (Jarosiewicz et al., 2015). In ander recent onderzoek werden deelnemers gevraagd zich in te beelden dat zij letters schreven (Willett et al., 2021). Een computer werd daarbij getraind om de patronen in de gemeten hersensignalen te herkennen en deze te vertalen naar letters. Op deze manier werd een schrijfsnelheid tot wel 90 letters per minuut bereikt (ter vergelijking: in een gezonde populatie wordt met 115 karakters per minuut op een smartphone getypt (Willett et al., 2021)).

Bij een aantal patiënten zijn meerdere micro-elektroden-arrays geplaatst, zodat er tegelijkertijd gemeten en gestimuleerd kan worden (Armenta Salas et al., 2018; Flesher et al., 2016). Op deze manier kan bijvoorbeeld een robotarm worden aangestuurd met behulp van metingen uit de motorcortex, en kan tegelijkertijd de sensorische cortex – het hersengebied dat verantwoordelijk is voor tastzin – gestimuleerd worden. Door deze stimulaties toe te passen op het moment dat de robotarm iets aanraakt wordt bij de patiënt het gevoel opgewekt dat zijn eigen hand daadwerkelijk iets aanraakt (Flesher et al., 2016). De besturing van een robotarm blijkt met gebruik van deze kunstmatige tastzin een stuk nauwkeuriger en sneller te gaan dan zonder (Flesher et al., 2021).

Daarnaast zijn er experimenten gaande bij zowel apen als mensen naar het gebruik van micro-electroden bij blindheid, om zodoende een rudimentaire vorm van visuele perceptie te herstellen. Bij een 57-jarige vrouw is inmiddels een micro-array in de visuele cortex geïmplanteerd (Fernández et al., 2021). Zij was in staat om de letters en randen van de objecten in haar omgeving te herkennen, die door middel van stimulatie van de geïmplanteerde elektroden aan haar werden aangeboden. De methode heeft een grote potentie om bij te dragen aan de toekomstige behandeling van blindheid.

3) Technische ontwikkelingen

Er wordt momenteel veel onderzoek gedaan naar het gebruiksvriendelijker (d.w.z. draadloos en dus volledig implanteerbaar) maken van BCIs op basis van micro-elektroden. Zo is onlangs aangetoond dat patiënten een draadloze micro-elektroden-BCI thuis kunnen gebruiken (Simeral et al., 2021; Weiss et al., 2020). Ook is gedemonstreerd dat signalen van de elektroden draadloos naar buiten het lichaam verstuurd kunnen worden, wat een beperktere klinische supervisie mogelijk maakt (Borton et al., 2013; Simeral et al., 2021; Yin et al., 2013, 2014).

Andere ontwikkelingen richten zich op het vergroten van het aantal elektroden. Neuralink, een bedrijf van Elon Musk, presenteerde onlangs een nieuw type implantaat met bijna 100 dunne draden, waarin ieder 32 elektroden zitten, wat neerkomt op een totaal van ongeveer 3000 meetpunten (Musk & Neuralink, 2019). Om de nauwkeurigheid van de plaatsing te verhogen wordt er een robot gebruikt voor de implantatie van de individuele draden. Neuralink heeft onlangs in een video gedemonstreerd dat een aap met het geïmplanteerde BCI-systeem in staat was het spelletje Pong te spelen. Dit niveau van functionaliteit is echter niet nieuw; dergelijke resultaten werden twintig jaar eerder al behaald door onderzoeksgroepen die apen implanteerden met standaard elektrode-arrays (Carmena et al., 2003).

Musk heeft (onder andere) als doel om een BCI te ontwikkelen waar mensen onderling mee kunnen communiceren op basis van hersensignalen, zonder te spreken (Manuel, 2021). Dit betekent dat

innerlijke spraak gedecodeerd moet kunnen worden én dat de hersenen zo gestimuleerd worden dat de perceptie wordt opgewekt alsof iemand tegen je spreekt. De mogelijkheid om dit binnen afzienbare tijd te realiseren, wordt door velen als onrealistisch gezien (Jackson, 2020). Op dit moment werken de meeste BCIs via het decoderen van motorische bewegingen, omdat over de werking van de motorcortex relatief veel bekend is. Taalproductie en perceptie in de hersenen zijn hogere orde functies met een complexere representatie in de hersenen. Het is nog onduidelijk of het decoderen van taal voor BCI-toepassingen met de huidige staat van de techniek te verwezenlijken is.

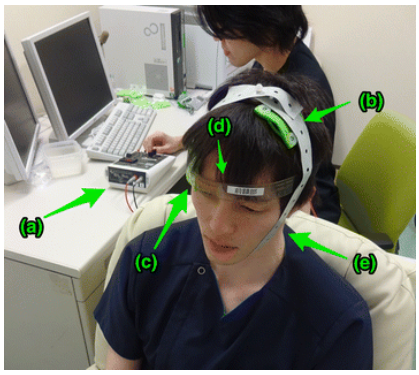
Naast het werk van Neuralink zijn er twee andere noemenswaardige ontwikkelingen op het gebied van micro-elektroden: neuropixels en neural dust. Neuropixels bestaat uit dunne draadjes met ongeveer 1000 meetlocaties, waarmee recent is aangetoond dat het de activiteit van ongeveer 200 individuele neuronen in het menselijke brein kan meten (Paulk et al., 2021). Neural dust bestaat uit zeer kleine elektroden waarmee in theorie draadloos hersenactiviteit gemeten zou kunnen worden. De metingen worden via ultrasoon geluid naar buiten het lichaam gestuurd. De werking van deze elektroden is alleen nog maar in het perifere zenuwstelsel van ratten aangetoond (Seo et al., 2016).

Op het gebied van visuele protheses op basis van micro-elektroden-arrays lopen er al een aantal klinische studies (Niketeghad & Pouratian, 2019). Recent Nederlands onderzoek in apen heeft de werking van een 1024 elektroden-array als onderdeel van een visuele prothese aangetoond (Chen et al., 2020). Door zijn omvang zou deze array ook een groot gedeelte van de visuele cortex in mensen kunnen bedekken, en daarmee functionaliteit van visuele protheses sterk verbeteren.

Transcraniële elektrische stimulatie

1) Opzet

Er zijn verschillende vormen van transcraniële elektrische stimulatie, oftewel methoden om vanaf de oppervlakte van het hoofd de hersenen elektrisch te stimuleren. *Transcranial direct current stimulation* (tDCS) is de meest gebruikte vorm van deze niet-invasieve elektrische stimulatie van de hersenen. Dit gebeurt via twee elektroden die op een spons op de hoofdhuid worden aangebracht. Deze elektroden zijn verbonden aan een stimulator, waarmee voor langere tijd een zwak elektrisch stroompje tussen de elektroden gestuurd wordt (bijv. 1 mA, voor 20 minuten). Dit stroompje verandert de elektrofysiologische balans van neuronen, wat ervoor zorgt dat ze makkelijker of juist moeilijker geactiveerd kunnen worden, waarmee de activiteit van de hersenen wordt beïnvloed.



Figuur 9 - De opzet van tDCS; a) laat de stimulator zien, b) en c) de elektroden en d) en e) een hoofdband en rubber band (bron).

Wanneer tDCS wordt toegepast door experts, is het een veilige techniek voor zowel kinderen als volwassenen (Bikson et al., 2016; Buchanan et al., 2021). Eventuele bijwerkingen beperken zich tot zaken als jeuk aan het hoofd. Daarnaast is het ten opzichte van andere niet-invasieve stimulatietechnieken relatief goedkoop en makkelijk te gebruiken. Een groot nadeel is echter het feit dat enigszins lokaal stimuleren niet mogelijk is. Zelfs wanneer relatief kleine elektroden gebruikt worden en de afstand tussen de elektroden gering is, laten modelberekeningen zien dat ongeveer 10 cm^2 cortex bereikt wordt met 50% van de maximale stimulatiekracht (Faria et al., 2011). Omdat tDCS niet direct neurale activiteit teweegbrengt, maar de elektrofysiologische balans beïnvloedt, wordt verondersteld dat het enkele minuten duurt voordat de effecten merkbaar worden, en kunnen de effecten tot enkele uren aanhouden (Reinhart & Woodman, 2015).

Zoals de naam al suggereert, opereert tDCS met gelijkstroom. Er zijn echter ook alternatieve systemen die wisselstroom (*transcranial alternating current stimulation*) of ruis (*transcranial random noise current stimulation*) gebruiken voor stimulatie (Paulus, 2011). Ook elektroconvulsietherapie (ECT) is een vorm van niet-invasieve elektrische stimulatie. Hierbij wordt door middel van sterke, kortdurende elektrische stimulatie (van 500-800 mA (Kropotov, 2016)) een soort epileptische aanval opgewekt. Deze techniek kan toegepast worden bij psychiatrische patiënten, voornamelijk bij ernstige depressie of schizofrenie, wanneer andere vormen van therapie niet (meer) werken. In Nederland is ECT een erkende behandeling (Nederlandse Vereniging voor Psychiatrie, 2010).

2) Toepassingen

Klinisch
TDCS wordt momenteel klinisch niet toegepast.

Wetenschappelijk
Het gebruik van tDCS werd al in 1802 gedocumenteerd. Stimulatie zou een positief effect hebben op revalidatie bij patiënten na een beroerte (Hellwag & Jacobi, 1802). Tegenwoordig wordt veel onderzoek gedaan naar het gebruik van tDCS voor de behandeling van neuropsychiatrische

aandoeningen, met name vanwege de mogelijke lange termijneffecten. De resultaten hiervan zijn veelal nog onduidelijk, al is er inmiddels bewijs dat tDCS positieve effecten heeft op patiënten met unipolaire depressie (Sudbrack-Oliveira et al., 2021). Ook heeft een aantal studies aangetoond dat tDCS de concentratie en het functioneren van het werkgeheugen versterkt (Brunoni et al., 2012).

Er is veel variatie in de methoden die bij tDCS-onderzoek gebruikt worden. Verschillende onderzoeksgroepen gebruiken verschillende parameters bij de stimulatie, en dat maakt het lastig om onderzoek met elkaar te vergelijken. Daarnaast is er, vanwege de onduidelijkheid over de exacte onderliggende werking van tDCS, scepsis voor wat betreft de gevonden effecten (Horvath et al., 2015; Vöröslakos et al., 2018).

Neurofeedback/BCI

Een aantal studies heeft laten zien dat tDCS ingezet kan worden in combinatie met een EEG-BCI. Hierbij wordt met tDCS over de motorgebieden gestimuleerd terwijl proefpersonen bewegingen inbeelden om een BCI te besturen. Dit blijkt de accuratesse van de BCI te verhogen (Wei et al., 2013). Met behulp van DTI- en functionele MRI-data is gedemonstreerd dat tDCS tijdens EEG-BCI een positief effect heeft op de ontwikkeling van witte stof en de doorbloeding van de hersenen bij patiënten met een beroerte (Hong et al., 2017).

3) Technische ontwikkelingen

Op technisch vlak vinden er met betrekking tot tDCS ontwikkelingen plaats waardoor er nauwkeuriger gestimuleerd kan worden. Zo is er *high-density* tDCS ontwikkeld door compacte elektroden (<5 cm^2) in een ringvormige opstelling te plaatsen (Datta et al., 2009). Daarnaast zijn er methoden ontwikkeld waarmee de stroom die door de hersenen loopt bij tDCS exact te modelleren (zie bijvoorbeeld Rawji et al., 2018).

Een geïnterviewde expert noemde temporele interferentie (TI) als een belangrijke recent ontwikkelde techniek (zie: Grossman et al., 2017) om de hersenen op niet-invasieve wijze te stimuleren. Hierbij worden twee elektrische velden rond het hoofd gecreëerd, ieder met twee elektroden. Beide velden fluctueren op een verschillende frequentie. Op de plek waar de fluctuaties elkaar kruisen ontstaat een interferentiepatroon. In de hersenen van muizen is aangetoond dat de interferentie een effect op hersenactiviteit kan hebben, ook in dieper gelegen hersengebieden (Grossman et al., 2017). Interessant is ook dat de stimulatie te sturen is door de sterkte van de elektrische velden aan te passen – dus zonder elektroden te verplaatsen. Of de techniek ook toepasbaar is in mensen, wordt nog onderzocht (bijv. Rampersad et al., 2019).

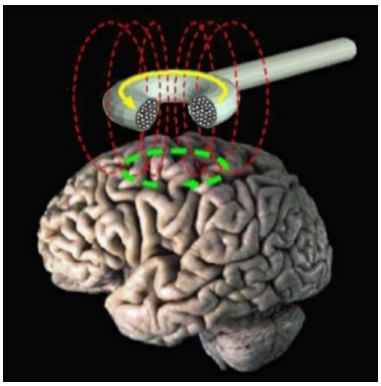
Een tDCS-systeem kan door zijn relatieve eenvoud ook buiten het lab of ziekenhuis gebruikt worden door patiënten of gezonde mensen. Zo is recent aangetoond dat tDCS thuis toegepast kan worden door chronisch zieke patiënten met als doel pijn- en slaapproblemen te verminderen (Riggs et al., 2018). Ook zijn er een aantal commerciële partijen die systemen voor niet-invasieve elektrische stimulatie aanbieden. Zo heeft Humm een systeem ontworpen op basis van stimulatie met wisselstroom, dat bij gebruik een verhoogde concentratie belooft (Humm, 2019). De studie van Humm die deze claim ondersteunt is echter niet gepubliceerd in een wetenschappelijk tijdschrift, waardoor kwaliteitscontrole door experts ontbreekt. Datzelfde geldt voor Flow, een tDCS headset waarmee thuis depressie behandeld zou kunnen worden (*Flow TDCS Device - Flow Neuroscience*, n.d.). Ook bij Flow ontbreekt een door experts gecontroleerde studie. Volgens een geïnterviewde expert zijn deze ontwikkelingen niet verontrustend. Aangenomen kan worden dat de effecten van de stimulatie

beperkt en kortstondig zijn, waardoor het waarschijnlijk geen kwaad kan. De expert vergeleek de stimulatie door tDCS met het nemen van een kop koffie.

Transcraniële magnetische stimulatie

1) Opzet

Transcraniële magnetische stimulatie (TMS) is een methode om van buiten het hoofd specifieke gebieden van de cortex voor korte tijd te activeren of uit te schakelen (Barker et al., 1985). Deze methode gebruikt een draadspoel, verpakt in een isolerend omhulsel. Door een stroom door de spoel te laten lopen, ontstaat er een magnetisch veld (figuur 10). Wanneer de spoel op het hoofd geplaatst wordt, loopt dit magnetisch veld door de hoofdhuid en schedel, en induceert een stroom in de hersenen die de onderliggende neuronen activeert. De techniek is niet-invasief, veilig en kent minimale bijwerkingen (Rossi et al., 2009).



Figuur 10 - Model van de werking van TMS. Door stroom door de spoel te sturen, ontstaat er een magnetisch veld waarmee de hersenen gestimuleerd kunnen worden (bron).

Met de huidige spoelen kan, afhankelijk van de positie van de spoel, een volume geactiveerd worden van ongeveer 1-1.5 cm^3 aan de oppervlakte van de cortex (Gazzaniga et al., 2009, p. 153). In diepere lagen van de hersenen neemt de nauwkeurigheid snel af. Op 1,5 cm diepte is de spreiding van het magnetisch veld meer dan 10 cm^2 (Deng et al., 2013). Daarnaast merkte een geïnterviewde expert op dat de hersenmechanismen waar TMS en andere vormen van stimulatie op inspelen nog niet goed begrepen zijn, en resulteert stimulatie niet altijd in consistente effecten. Afhankelijk van het aantal gegeven TMS pulsen kan de reactietijd van oogbewegingen bijvoorbeeld verbeteren of verslechteren (Neggers et al., 2007; Van Ettinger-Veenstra et al., 2009).

Om regio's in de hersenen te stimuleren die specifiek verantwoordelijk zijn voor een bepaalde hersenfunctie, kan bijvoorbeeld voorafgaand met PET of fMRI de exacte locatie van stimulatie bepaald worden (Hallett, 2007). Tevens kan TMS gecombineerd worden met EEG voor het achterhalen van de veranderingen in de corticale potentialen als gevolg van de stimulatie (Fernandez et al., 2020; Hallett, 2007).

De meeste kennis over de werking van TMS is vergaard via stimulatie van de motorgebieden in de hersenen, hetgeen resulteert in spieractiviteit. Eenmalige stimulatie in veel andere delen van de hersenen heeft echter geen duidelijk direct effect, behalve in de visuele gebieden, waar proefpersonen het zien van lichtflitsjes rapporteren na stimulatie (Ridding & Rothwell, 2007). De TMS pulsen kunnen ook snel achtereenvolgend gegeven worden (*repeated* TMS; rTMS). Hoge frequenties worden verondersteld te exciteren, terwijl lagere frequenties onderdrukkend werken. De gevolgen hiervan worden vaak tot zo'n 30 tot 60 minuten na stimulatie merkbaar, maar ook langdurigere effecten zijn beschreven (Lefaucheur et al., 2014).

2) Toepassingen

Klinisch

RTMS is goedgekeurd in de Verenigde Staten en verschillende Europese landen als behandeling van depressie (Hardy et al., 2016). Het magnetisch veld bij deze behandeling is even sterk als dat van een standaard MRI-scanner (1,5-2 Tesla) (Rossi et al., 2009). RTMS wordt ook buiten de reguliere zorg aangeboden als aanvullende of alternatieve behandeling bij depressie en dwanggedachten (*rTMS Behandeling Amsterdam*, n.d.).

Wetenschappelijk

TMS wordt veel gebruikt voor fundamenteel hersenonderzoek (Hallett, 2007). Dit kan gedaan worden door bijvoorbeeld de motorgebieden te stimuleren en vervolgens de mate van spieractiviteit te meten als gevolg van stimulatie (via elektroden die op de ledematen geplakt worden). Zo is bijvoorbeeld gedemonstreerd dat TMS meer spieractiviteit opwekt wanneer proefpersonen woorden uitspreken die met beweging te maken hebben (Oliveri et al., 2004). Dit laat zien dat de betreffende motor gebieden makkelijker te activeren zijn, en waarschijnlijk betrokken, bij taalverwerking van woorden gerelateerd aan beweging.

Een ander belangrijk thema van hersenonderzoek met TMS is het creëren van kortstondige 'virtuele laesies' (Pascual-Leone et al., 1999). Door de hersenen kortstondig te stimuleren, wordt de normale werking van een stukje van de cortex kort verstoord. Op deze manier kunnen oorzakelijke verbanden tussen gedrag en de werking van de hersenen worden aangetoond. Zo kan bijvoorbeeld eenmalige stimulatie in de visuele cortex rondom letterpresentatie tot gevolg hebben dat een proefpersoon letters niet herkent (Corthout et al., 1998).

Momenteel wordt onderzocht of rTMS ingezet zou kunnen worden voor de behandeling van verschillende aandoeningen, zoals bijvoorbeeld de ziekte van Parkinson, migraine (Lefaucheur et al., 2014; Ridding & Rothwell, 2007) of voor de behandeling van autisme (Oberman et al., 2016). Op dit moment loopt er ook een studie naar het gebruik van rTMS bij dwanggedachten bij het Amsterdam UMC (*Onderzoek naar OCD - ZonMw Digitale Publicaties*, n.d.). Hierbij is het doel om de hersenen van patiënten zodanig te stimuleren dat ze weer ontvankelijk worden voor gedragstherapie.

Neurofeedback/BCI

TMS in combinatie met neurofeedback is een relatief nieuw onderzoeksveld, waarin slechts enkele studies zijn uitgevoerd (Koganemaru et al., 2018; Majid et al., 2015; Mihelj et al., 2021; Ruddy et al., 2018). Zo is bijvoorbeeld gedemonstreerd dat TMS in combinatie met neurofeedback de spieractiviteit tijdens ingebeelde vingerbewegingen versterkt (Mihelj et al., 2021). De ingebeelde vingerbewegingen waren bovendien ook beter af te leiden uit een gelijktijdig opgenomen EEG-signaal. Dit betekent dat TMS-neurofeedback potentieel kan bijdragen aan revalidatie en/of BCI-onderzoek.

3) Technische ontwikkelingen

Een relevante ontwikkeling is het gebruik van *deep* TMS met een H-vormige spoel. Hiermee kunnen dieper gelegen gebieden in de cortex bereikt worden. Met *deep* TMS kunnen bijvoorbeeld gebieden gestimuleerd worden waarvan aangetoond is dat ze betrokken zijn bij depressie, maar die met conventionele rTMS niet bereikt kunnen worden (Levkovitz et al., 2015). Verder blijkt uit een recente literatuurstudie dat *deep* TMS ook veelbelovende resultaten laat zien in studies bij patiënten met dwanggedachten – al zijn er meer uitgebreide studies nodig om de effecten te consolideren.

Belangrijk is dat momenteel aangepaste TMS-apparatuur ontwikkeld wordt waarmee patiënten thuis TMS kunnen gebruiken. Zo kunnen patiënten met acute migraine *single pulse* TMS gebruiken wanneer de migraine opspeelt (Bhola et al., 2015). Ook rTMS blijkt veilig en langdurig (twee keer per dag, voor zes maanden) door patiënten thuis uitgevoerd te kunnen worden, zonder directe medische supervisie, zo blijkt uit een onderzoek naar de effecten van rTMS op cognitieve eigenschappen bij patiënten met de ziekte van Alzheimer (Mimenza-Alvarado et al., 2021).

Transcranial focused ultrasound stimulation

1) Opzet

Transcranial focused ultrasound stimulation (TFUS) is een relatief nieuwe techniek, waarmee de hersenen op niet-invasieve wijze gestimuleerd kunnen worden (Fry et al., 1958; Tufail et al., 2010). Dit gebeurt door het versturen van een geluidsgolf met een zeer hoge frequentie (niet hoorbaar voor mensen) (figuur 10, van Yu et al., 2021). Afhankelijk van de stimulatieparameters, interacteert TFUS op verschillende manieren met biologisch weefsel (Rabut et al., 2020). Met specifieke instellingen kan TFUS neuronen activeren of inhiberen. In mensen is het oppervlak van het gestimuleerde hersengebied meestal enkele vierkante millimeters groot (Ghanouni et al., 2015). Stimulatie met TFUS is dus veel plaatselijker dan andere niet-invasieve stimulatie-technieken. Bovendien is het met TUS ook mogelijk om dieper gelegen hersengebieden te bereiken (zie bijvoorbeeld een recente studie in makaken naar gerichte stimulatie van de amygdala (Folloni et al., 2019)).

Figuur 11 – Een tekening van transcranial ultrasound stimulation (Yu et al., 2021).

Er is nog veel onbekend over het optimale gebruik van TFUS in mensen (Fomenko et al., 2018; Rabut et al., 2020). Het is bij mensen bijvoorbeeld nog lastig om bij alle proefpersonen even plaatselijk te stimuleren (de dikte van de schedel en opbouw van de cortex kunnen flink verschillen tussen mensen). Daarnaast zijn de optimale stimulatieparameters en de manier waarop de stimulatie precies met de hersenen interacteert, nog onbekend (Fomenko et al., 2018; Rabut et al., 2020). Ook zijn er potentiële auditieve of sensorische bijwerkingen als gevolg van de stimulatie. Dit maakt adequaat ontwerp van wetenschappelijke studies, met bijvoorbeeld een *sham* conditie, belangrijk (Rabut et al., 2020). Wel is aangetoond dat TFUS een veilige techniek is: het brengt geen significante complicaties met zich mee (Legon et al., 2020).

2) Toepassingen

Klinisch
TFUS wordt nog niet klinisch toegepast.

Wetenschappelijk
Tot op heden is TFUS nog slechts bij enkele studies in mensen gebruikt (Fomenko et al., 2018; Kubanek, 2018), maar het gebruik van de techniek bij mensen is wel in opkomst. In een pilotstudie werd verbetering in humeur en enige verlichting van chronische pijn na TFUS-stimulatie gerapporteerd (Hameroff et al., 2013). Daarnaast heeft gerichte stimulatie van de thalamus een patiënt doen ontwaken uit een toestand van zeer beperkt bewustzijn (Monti et al., 2016). Ondertussen hebben onderzoekers de effecten van stimulatie op de motor cortex (Legon, Bansal, et al., 2018; Yu et al., 2021), somatosensorische cortex (W. Lee, Chung, et al., 2016; Legon et al., 2014), visuele cortex (W. Lee, Kim, et al., 2016) en de thalamus vastgelegd (Legon, Ai, et al., 2018). Lee, Kim, et al. (2016) gebruikten bijvoorbeeld fMRI en EEG om te demonstreren dat TFUS hersenactiviteit in de visuele cortex en gerelateerde hersengebieden opwekt. Ook rapporteerden de proefpersonen dat ze lichtflitsjes zagen na de ultrasone stimulatie.

Neurofeedback/BCI
TFUS wordt nog niet onderzocht in neurofeedback/BCI settings.

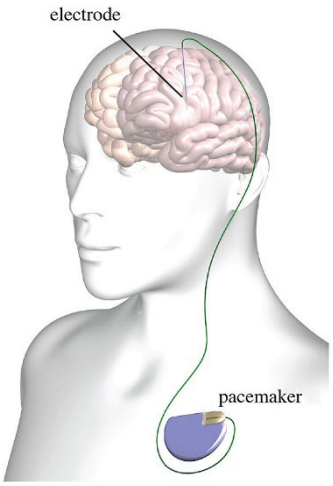
3) Technische ontwikkelingen

Op dit moment worden er klinische studies uitgevoerd voor het gebruik van TFUS bij de behandeling van epilepsie, de ziekte van Alzheimer, de ziekte van Parkinson en bewustzijnsstoornissen (Fomenko et al., 2018). Op wetenschappelijke vlak zou deze niet-invasieve stimulatie veel bij kunnen dragen aan de kennis over de functie van dieper gelegen hersengebieden in gezonde proefpersonen, en over de rol van deze gebieden bij neurologische aandoeningen (Kubanek, 2018).

Diepe hersenstimulatie

1) Opzet

Bij diepe hersenstimulatie (*deep brain stimulation*; DBS) worden er elektroden chirurgisch in één of meer diepgelegen gebieden in de hersenen geplaatst (figuur 12). Voor de behandeling van de ziekte van Parkinson met DBS is dit bijvoorbeeld vaak de *subthalamic nucleus*. Daarnaast wordt er een pacemaker onder de huid bij het sleutelbeen geplaatst. Deze wordt verbonden met de elektroden in de hersenen, zodat die een constant en langdurig elektrisch signaal af kunnen geven. Op deze manier kan er nauwkeurig gestimuleerd worden (met een precisie in de orde van millimeters), met de intentie de activiteit in het gestimuleerde hersengebied en verbonden netwerk te veranderen, zodat de gewenste behandelingseffecten optreden.



Figuur 12 - De opzet van diepe hersenstimulatie (bron).

DBS is een relatief veilige methode (Lozano et al., 2019), maar aan de hersenoperatie voor implantatie kleven uiteraard risico's. Na de operatie kunnen de instellingen van de stimulatie worden aangepast, om de behandelingseffecten te optimaliseren. Het bijstellen van de instellingen kan echter een tijdrovend proces van *trial and error* zijn. Ook is de implantatie van een DBS-systeem een relatief dure ingreep, waarvoor een team van experts nodig is, en zitten patiënten levenslang vast aan een implantaat.

2) Toepassingen

Klinisch

DBS wordt momenteel voornamelijk gebruikt bij de behandeling van bewegingsstoornissen, zoals de ziekte van Parkinson, tremor en dystonie (Habets et al., 2018; Kogan et al., 2019; Lozano et al., 2019), en bij de onderdrukking van epileptische aanvallen met de eerder beschreven systemen van NeuroPace, waarbij metingen met ECoG de stimulatie van de hersenen met DBS aansturen (Morrell, 2011; Nair et al., 2020).

Wetenschappelijk

DBS wordt gebruikt om de neurologische aandoeningen die met de techniek behandeld worden beter te leren begrijpen. Dit is mogelijk doordat informatie over de onderliggende mechanismen ontleend kan worden aan de variabiliteit in de effectiviteit van verschillende typen en locaties van stimulatie (Lozano et al., 2019). Ook heeft de kennis die opgedaan is bij DBS bijgedragen aan de ontwikkeling van BCIs, met name voor wat betreft de praktische implicaties van permanente elektrode-implantaties in mensen (Benabid et al., 2011).

De exacte werking van DBS is nog niet helemaal begrepen (Lozano et al., 2019), maar DBS heeft mogelijk klinische toepassingen voor een breed scala aan neurologische en psychiatrische aandoeningen (Benabid et al., 2011; Harmsen et al., 2020). Momenteel wordt er onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om DBS in te zetten bij de behandeling van de ziekte van Alzheimer (Harmsen et al., 2020) en voor psychiatrische aandoeningen zoals depressie (Crowell et al., 2019), dwangstoornissen (Greenberg et al., 2006) en het syndroom van Tourette (Martinez-Ramirez et al., 2018). Het gebruik van DBS wordt ook onderzocht binnen het kader van het verminderen van disruptief gedrag. Zo is DBS toegepast bij vier patiënten met een autismespectrumstoornis en levensbedreigende vormen van automutilatie. Drie patiënten vertoonden langdurige, substantiële verlichting van

symptomen (Park et al., 2017; Stocco & Baizabal-Carvallo, 2014; Sturm et al., 2013). De symptomen van de andere patiënt vielen, na initiële verbetering, na zes maanden weer terug tot op het oude niveau (Stocco & Baizabal-Carvallo, 2014).

In de interviews is benoemd dat de ontwikkeling van DBS voor psychiatrische aandoeningen een aanzienlijke hoeveelheid onderzoekswerk vergt. Anders dan bij bewegingsstoornissen is het succes van de behandeling namelijk niet direct meetbaar (zoals bij het afnemen van tremor door DBS-toepassing bij de ziekte van Parkinson), maar kunnen veranderingen in symptomen pas op de langere termijn plaatsvinden.

Een belangrijke vernieuwing binnen DBS is de mogelijkheid om de stimulatieparameters aan te passen op basis van signalen gemeten bij de patiënt, om zo de effecten van DBS te optimaliseren. Dit heet *closed-loop* of *adaptive* DBS (aDBS) (Habets et al., 2018). Deze signalen kunnen gebaseerd zijn op hersenactiviteit, bijvoorbeeld zoals gemeten met ECoG, maar ook de data van een bewegingssensor of van een mobiele applicatie kunnen als inputsignaal dienen. ADBS wordt voornamelijk toegepast bij de ziekte van Parkinson, tremor en epilepsie (Krauss et al., 2021; Morrell, 2011).

Neurofeedback/BCI
DBS wordt momenteel niet toegepast in neurofeedback/BCI settings.

3) Technische ontwikkelingen

Onderzoekers geven aan dat er de afgelopen twintig jaar weinig technologische vooruitgang is geboekt rond DBS, maar voorzien daar nu een ommekeer in. Verwacht wordt dat snelle verbeteringen in de elektroden en batterijen, stimulatieparadigma's en het toepassen van aDBS voor meer veiligheid en effectiviteit van DBS gaan zorgen (Krauss et al., 2021).

(ii) Metabole meetmethoden

Functional magnetic resonance imaging

1) Opzet

Functional magnetic resonance imaging (fMRI) is een speciale vorm van MRI. Waar men met conventionele structurele MRI geïnteresseerd is in de vorm van de hersenen, kan met fMRI de *activiteit* van de hersenen in beeld gebracht worden. Deze activiteit wordt afgeleid uit de hoeveelheid zuurstof in het bloed dat door de hersenen stroomt. De magnetische eigenschappen van hemoglobine, het eiwit dat zuurstof in het bloed vervoert, veranderen namelijk wanneer het zuurstof bindt of loslaat. Deze verandering in de magnetische eigenschappen kan gemeten worden tijdens een fMRI-scan. Hoe meer zuurstof er in het bloed zit, hoe sterker het signaal dat gemeten wordt (Kwong et al., 1992; Ogawa et al., 1992).

Figuur 13 - Een MRI-scanner. Hiermee kunnen ook fMRI-scans worden uitgevoerd (bron).

Met fMRI kan hersenactiviteit zeer gedetailleerd in kaart worden gebracht, tot op het niveau van minder dan een millimeter (bijv. Huber et al., 2020). Een ander belangrijk voordeel van fMRI is dat het zich niet beperkt tot metingen aan de oppervlakte van de hersenen, maar dat er ook diep in het brein gemeten kan worden. Ook kan fMRI onderzoek met vrijwel iedere reguliere MRI-scanner worden uitgevoerd. Aangezien deze in moderne ziekenhuizen standaard aanwezig zijn, is het gebruik van fMRI als onderzoeksmethode relatief laagdrempelig.

Een groot nadeel van fMRI is dat de signalen die gemeten worden gekoppeld zijn aan vasculaire veranderingen en daardoor ontstane veranderingen in zuurstoftoevoer. Deze is met enkele seconden vertraagd ten opzichte van de toename in hersenactiviteit. Het is daarom lastig om met fMRI met enige nauwkeurigheid vast te stellen wanneer bepaalde hersenactiviteit heeft plaatsgevonden. Daarnaast zijn MRI-scanners luidruchtig en moeten proefpersonen ook een tijd lang stil kunnen blijven liggen, wat door de meesten niet als aangenaam ervaren wordt. FMRI-onderzoek met bijvoorbeeld jonge kinderen of mensen met claustrofobie is dus lastig.

In de interviews kwam ook de consistentie van fMRI-metingen naar voren. De reproduceerbaarheid van fMRI-metingen is namelijk beperkt. Dat betekent dat herhaling van een fMRI-scan, met een identiek experiment en dezelfde proefpersoon, niet noodzakelijkerwijs identieke meetwaarden oplevert. In hoeverre dit de toepasbaarheid van de metingen beïnvloedt is een belangrijk wetenschappelijk discussiepunt (Compère et al., 2021; Elliott et al., 2020; Kragel et al., 2020). Daar komt bij dat ook de conclusies die door verschillende onderzoeksteams getrokken worden op basis van dezelfde data flink kunnen verschillen (Botvinik-Nezer et al., 2020). Om de reproduceerbaarheid van fMRI-scans te optimaliseren wordt er daarom momenteel veel aandacht besteed aan het opstellen van *best practices* in het uitvoeren van fMRI-onderzoek (Nichols et al., 2017; Poldrack et al., 2017).

2) Toepassingen

Klinisch

Klinisch wordt fMRI veelal toegepast ter voorbereiding op neurochirurgische ingrepen, om gebieden in kaart te brengen die de neurochirurg niet wil beschadigen bij het weghalen van een tumor of een epileptische bron. Dit zijn onder andere de hersengebieden die betrokken zijn bij taal (bijv. Jansma et al., 2015) of motoriek (bijv. Krainik et al., 2001).

Wetenschappelijk

FMRI is één van de meest gebruikte methoden om hersenactiviteit bij mensen in kaart te brengen (Smith, 2012), aangezien het een niet-invasieve techniek is en activiteit in het hele brein tegelijkertijd tot in vrij groot detail in beeld kan worden gebracht. Zo kan bijvoorbeeld in detail bestudeerd worden welke hersengebieden betrokken zijn bij emoties (bijv. Sladky et al., 2013), motor controle (bijv. Vink et al., 2005) of gezichtsvermogen (bijv. Schellekens et al., 2016). In patiënten kan bijvoorbeeld onderzocht worden hoe de activiteit van de motorische hersengebieden verandert gedurende multiple sclerose (MS) (Pantano et al., 2005).

Daarnaast zijn er aanwijzingen dat fMRI ook gebruikt kan worden om vast te stellen of iemand bij bewustzijn is. Een onderzoek uit 2010 heeft laten zien dat het mogelijk is om met behulp van fMRI ja/nee communicatie te voeren is met iemand van wie met andere middelen het bewustzijn lastig was vast te stellen. Dit werd gedaan door deze persoon te vragen aan bepaalde activiteiten te denken (tennissen, of navigeren door een stad) (Monti et al., 2010). Onderzoekers zijn er verder in geslaagd om, met een accuratesse boven kans niveau, zeven seconden van tevoren te voorspellen of een proefpersoon op een bepaalde knop ging drukken, voordat de proefpersoon naar eigen zeggen bewust werd van zijn intentie (Soon et al., 2008). Over de precieze betekenis van deze bevinding wordt nog gediscussieerd (Mele, 2020).

Neurofeedback/BCI

Ondanks de intrinsieke traagheid in het fMRI-signaal wordt fMRI ook gebruikt in neurofeedback paradigma's. Hierbij krijgen personen tijdens een fMRI-scan een weergave van hun activiteit in een hersengebied te zien, naar aanleiding waarvan ze kunnen proberen dit signaal bewust te veranderen (Weiskopf et al., 2003). Zo is het proefpersonen gelukt om, op basis van timing en verschillende soorten hersenactiviteit (bijv. rekenen, of het voorstellen van beweging), 27 verschillende herkenbare patronen op te roepen en zo letter voor letter woorden te spellen met behulp van fMRI-activiteit (Sorger et al., 2012). Daarnaast is gesuggereerd dat, via fMRI-neurofeedback, bepaalde verbindingen tussen hersengebieden versterkt kunnen worden. In een uitgebreid literatuuronderzoek beschrijven onderzoekers dat neurofeedback op basis van fMRI (en ook EEG) een positief effect heeft bij patiënten met uiteenlopende psychiatrische aandoeningen (Trambaiolli et al., 2021). In de interviews werd een studie genoemd waarbij patiënten met depressie leerden om, op basis van fMRI neurofeedback, ofwel hersengebieden die worden geassocieerd met emoties, ofwel hersengebieden die worden geassocieerd met het visuele systeem, te activeren. Verwacht werd dat de patiënten die geleerd hadden invloed uit te oefenen op de emotionele hersengebieden een sterkere verlichting van symptomen zouden laten zien. Tussen de beide groepen zat echter geen significant verschil, en over de gehele groep genomen verminderde de maat voor de ernst van depressie met 43%. De auteurs suggereren dat neurofeedback al door het gevoel van controle op de ziekte een positief effect op de patiënt heeft (Mehler et al., 2018).

Naast deze directe neurofeedback/BCI-toepassingen, wordt fMRI ook gebruikt om de gedetailleerde representatie van bepaalde hersenfuncties te onderzoeken, om zodoende te bepalen of deze geschikt

zou kunnen zijn voor BCI met geïmplanteerde elektroden. Ook wordt fMRI gebruikt om de ideale plaats voor geïmplanteerde BCI-elektroden te bepalen voorafgaand aan operatie.

3) Technische ontwikkelingen

Er wordt veel gewerkt aan het verbeteren van manieren om hoog-resolute fMRI-data te meten en te analyseren (Viessmann & Polimeni, 2021). Meestal worden fMRI-beelden gemaakt met een veldsterkte van 3 Tesla, maar steeds vaker wordt er gewerkt met scanners met een veldsterkte van 7 Tesla, waarmee in groter detail in de hersenen gemeten kan worden. Hiermee is bijvoorbeeld gedemonstreerd dat het mogelijk is om op basis van fMRI-beelden van de visuele hersengebieden te achterhalen welke van vier letters (een 'H', 'T', 'S' of 'C') (Senden et al., 2019), of drie symbolen (een '+', 'x' of 'o') (Van den Boom et al., 2019) proefpersonen zich in gedachten voorstelden.

Verder zijn er ontwikkelingen gaande in het veld van *resting-state* fMRI. Bij *resting-state* fMRI worden veranderingen in het fMRI-signaal gemeten terwijl een persoon in de scanner ligt zonder dat er stimuli aangeboden worden of een taak moet worden uitgevoerd. De gemeten signalen kunnen zodoende gebruikt worden om de functionele verbindingen in de hersenen in kaart te brengen, wat het inzicht in de werking van de hersenen vergroot. Er zijn daarnaast aanwijzingen dat individuen geïdentificeerd kunnen worden op basis van de patronen van deze verbindingen (Finn et al., 2015).

Functional near infrared spectroscopy

1) Opzet

Functional near infrared spectroscopy (fNIRS) leidt, net als fMRI, neurale activiteit af uit het zuurstofgehalte van het bloed, maar doet dit met nabij-infrarood licht (Gratton & Fabiani, 1998). Zuurstofrijk bloed absorbeert het nabij-infrarode licht namelijk op een andere manier dan zuurstofarm bloed. FNIRS wordt gemeten door een muts met optoden (lichtbronnen en -detectoren) op het hoofd te plaatsen (figuur 14, van Lloyd-Fox et al., 2017). Afhankelijk van het belang van onder andere de draagbaarheid van het systeem, wordt het aantal optoden aangepast (zie bijvoorbeeld figuur 14 en 15). FNIRS is dus relatief draagbaar, relatief ongevoelig voor hoofdbewegingen en een stuk minder duur en gemakkelijker te gebruiken dan fMRI. Een belangrijk nadeel van fNIRS is echter dat de metingen minder gedetailleerd zijn, want de optoden meten het signaal van een oppervlakte van ongeveer 2-3 cm^2 (Pinti et al., 2020). Daarnaast kan alleen aan het oppervlak van de hersenen gemeten worden.

Figuur 14 - Een kind draagt een fNIRS-muts (Lloyd-Fox et al., 2017)

2) Toepassingen

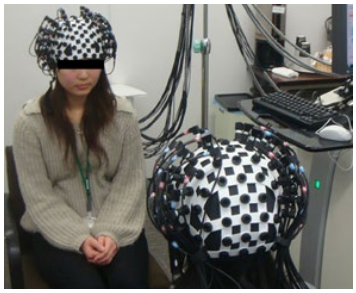
Klinisch
FNIRS wordt momenteel niet klinisch ingezet.

Wetenschappelijk
FNIRS wordt vooral gebruikt bij onderzoek naar de werking van hersengebieden in populaties waar andere technieken moeilijker te gebruiken zijn, zoals bijvoorbeeld kleine kinderen. Daardoor is fNIRS een erg belangrijke techniek geworden in onderzoek naar de ontwikkeling van de hersenen (Lloyd-Fox et al., 2010; Vanderwert & Nelson, 2014) en in psychiatrisch onderzoek (Ehlis et al., 2014). De relatieve draagbaarheid van het systeem maakt ook het gebruik buiten het lab mogelijk, bijvoorbeeld om loopgedrag in patiënten met Parkinson (Maidan et al., 2016) of met een cerebrale parese (Kurz et al., 2014) te onderzoeken.

Een speciale vorm van fNIRS wordt ook sporadisch ingezet tijdens hersenoperaties voor metingen direct vanaf het oppervlak van de hersenen, dus zonder dat het signaal door de schedel wordt verstoord (Mitra et al., 1997; Noordmans et al., 2018; Obrig et al., 2000; Rayshubskiy et al., 2014). Hiermee wordt een nauwkeurig signaal verkregen, dat gebruikt kan worden voor neurowetenschappelijk onderzoek.

Neurofeedback/BCI
Neurofeedback op basis van fNIRS is een relatief nieuwe ontwikkeling, maar de eerste *proof-of-concept* studies geven aan dat dit mogelijk is (Kohl et al., 2020). Op den duur zou fNIRS een praktisch alternatief kunnen zijn voor EEG of fMRI bij klinische toepassingen van neurofeedback (Kohl et al., 2020).

3) Technische ontwikkelingen



Figuur 15 - Hyperscanning met fNIRS (Osaka et al., 2015).

Er is op dit moment veel aandacht voor lichtgewicht fNIRS systemen (Pinti et al., 2020). Zo heeft het bedrijf Kernel onlangs een lichtgewicht systeem voor BCI op basis van fNIRS op de markt gebracht (*Kernel*, 2021). Ook sponsorde Facebook de Johns Hopkins Universiteit tot voor kort bij onderzoek dat als doel had om het fNIRS-signaal snel en nauwkeurig genoeg te meten om een computer te kunnen besturen. Dit project is echter niet geslaagd (Regalado, 2021). Daarnaast worden recente ontwikkelingen van nieuwe configuraties van optoden als veelbelovend beschouwd (Pinti et al., 2020). Hiermee is het conceptueel mogelijk om 3D metingen te maken, en de nauwkeurigheid van de meting te verhogen tot het niveau van fMRI (Ferradal et al., 2014). Verder zijn er ontwikkelingen in het combineren van fNIRS met EEG, om zodoende met fNIRS meer informatie te krijgen over de temporele aspecten van de gevonden activiteit (Leamy & Ward, 2010). Ook wordt er geëxperimenteerd met optoden die gevoelig zijn voor de doorbloeding van de hoofdhuid, waarvan het signaal gebruikt kan worden om de meting van de doorbloeding van de hersenen op te schonen (Sato et al., 2016).

Een laatste relevante ontwikkeling is hyperscanning met fNIRS (Czeszumski et al., 2020; Pinti et al., 2020). Tijdens hyperscanning worden de signalen van twee of meer proefpersonen tegelijk gemeten (figuur 15, van Osaka et al., 2015). Hyperscanning wordt ook veel gedaan met EEG en sporadischer met MEG of fMRI. De relatieve bewegingsvrijheid van fNIRS-proefpersonen maakt hyperscanning met fNIRS geschikt voor het bestuderen van sociale interacties. Zo kan hersenactiviteit van meerdere proefpersonen direct gekoppeld worden aan bepaalde sociale situaties, en is er bijvoorbeeld synchronisatie van hersenactiviteit te meten wanneer proefpersonen samen zingen (Osaka et al., 2015) of wanneer er oogcontact gemaakt wordt (Hirsch et al., 2017).

Functionele transcraniële Doppler-sonografie

1) Opzet

Functionele transcraniële Doppler-sonografie (fTCD) is een niet-invasieve meetmethode die gebruik maakt van echografie boven de dunne botstructuur tussen het oog en oor (figuur 15, van Naqvi et al., 2013). Door verschillen in de frequenties tussen de verzonden en ontvangen geluidsgolven te meten, kan met fTCD de snelheid van de bloedstroom in de hersenen afgeleid worden (Aaslid et al., 1982), om zodoende de activiteit van hersengebieden rond de grote bloedvaten in de hersenen te monitoren. Het is een goedkope en veilige techniek waarmee continu gemeten kan worden en die ook buiten het ziekenhuis of lab toegepast kan worden.

Figuur 16 - Een tekening van functionele transcraniële Doppler-sonografie (Naqvi et al., 2013).

Er kleven drie belangrijke nadelen aan fTCD (Naqvi et al., 2013; Purkayastha & Sorond, 2013). Ten eerste is de techniek alleen gevoelig genoeg om metingen aan de grote bloedvaten van de hersenen te doen. Ten tweede is de kwaliteit van de meting sterk afhankelijk van de expertise van de onderzoeker en vergt het veel training om de uitkomst goed te interpreteren. Tot slot is het signaal alleen te detecteren boven relatief dunne botstructuren. Bij ongeveer 10 tot 20 procent van de mensen is de schedel te dik voor een goede meting (Naqvi et al., 2013; Purkayastha & Sorond, 2013).

2) Toepassingen

Klinisch en wetenschappelijk

Omdat metingen met fTCD geen expliciete medewerking van een proefpersoon of patiënt vereisen en er gemakkelijk voor langere tijd gemeten kan worden, is het een geschikte methode om bijvoorbeeld de corticale bloedstroom van patiënten op de *intensive care* afdeling in de gaten te houden (Naqvi et al., 2013). Ook wordt fTCD gebruikt bij de diagnose van en onderzoek naar cerebrovasculaire aandoeningen (Naqvi et al., 2013; Purkayastha & Sorond, 2013). Voorbeelden hiervan zijn de bepaling van het risico op beroerte in patiënten met sikkelcelanemie (Adams, 2005) en het monitoren van de bloedstroom na bloedingen tussen de hersenvliezen (Rigamonti et al., 2008). FTCD wordt soms ook gebruikt om de dominante hersenhelft voor taalverwerking vast te stellen. Dit kan zowel voor onderzoeks- als klinische doeleinden interessant zijn. Als een fMRI-meting daarvoor niet mogelijk of onpraktisch is kan fTCD een waardevol alternatief zijn (Deppe et al., 2000; Somers et al., 2011).

Neurofeedback/BCI

FTCD wordt momenteel niet voor neurofeedback/BCI toepassingen gebruikt.

3) Technische ontwikkelingen

Zeer relevant is de ontwikkeling van *focused ultrasound imaging* (fUSI). Deze techniek gebruikt, net als fTCD, echografie om beelden van de hersenen te maken, en zal in het hoofdstuk 6 uitgebreid besproken worden. Een andere variant hiervan is foto-akoestiek, waarmee met licht gestimuleerd wordt en de ultrasound gedetecteerd (Nasiriavanaki et al., 2013).

Positron emissie tomografie

1) Opzet

Figuur 17 - Een PET-scanner (bron).

Met positron emissie tomografie (PET) kunnen de metabole processen van de hersenen in kaart gebracht worden. Om dat mogelijk te maken, moet een tracer in het bloed aangebracht worden (oraal of intraveneus) die bestaat uit radioactieve elementen. Deze elementen vervallen snel en verdwijnen dus ook weer snel uit het lichaam. Als het element vervalt stoot het een positief deeltje (positron) uit de atoomkern. Dit positron zal snel op een negatief deeltje (elektron) botsen, en als dit gebeurt ontstaan er twee fotonen, die in tegengestelde richting wegvliegen. Een PET-scanner kan deze fotonen detecteren en bepalen waar de botsing heeft plaatsgevonden. Afhankelijk van de gekozen tracer, kunnen verschillende processen in de hersenen in beeld gebracht worden. Zo kan bijvoorbeeld met radioactief zuurstof hersenactiviteit gemeten worden. Omdat er meer zuurstofrijk bloed naar actieve hersengebieden gaat, zal de PET-scanner méér fotonen registreren in gebieden waar méér neurale activiteit is. De scanner meet vanuit verschillende hoeken, waardoor er een driedimensionale afbeelding van de hersenen gemaakt kan worden. Op deze manier kan een PET-scan activiteit in het hele brein meten, met een resolutie van ongeveer 5-10 mm^3 (Gazzaniga et al., 2009; p. 154).

Volgens een geïnterviewde expert is de betrouwbaarheid van PET-metingen een groot voordeel ten opzichte van die met fMRI. Daarmee wordt bedoeld dat twee PET metingen tot zeer grote hoogte dezelfde resultaten opleveren. PET-scanning kent echter een aantal praktische nadelen. Los van de noodzakelijke aanwezigheid van een PET-scanner, moet de radioactieve tracer lokaal gefabriceerd worden in een cyclotron en moet deze worden ingespoten bij een proefpersoon voordat het element vervalt (de halfwaardetijd voor de veelgebruikte isotoop ^{15}O is bijvoorbeeld slechts twee minuten).

2) Toepassingen

Klinisch en wetenschappelijk

Met PET-scans kunnen, afhankelijk van de gekozen tracer, uiteenlopende lichamelijke processen in kaart gebracht worden. Dit maakt PET belangrijk in de diagnose van en onderzoek naar verschillende neurologische en/of psychiatrische aandoeningen (Meyer et al., 2020; Schain & Kreisl, 2017). Zo kan PET bijvoorbeeld ontstekingen in de hersenen aantonen, of kunnen tumoren gedetecteerd worden door hun verhoogde metabole activiteit, terwijl de ziekte van Alzheimer in een vroeg stadium juist een verlaging van metabole activiteit laat zien. Tekenen van de ziekte van Alzheimer zijn, volgens een geïnterviewde expert, al 20 jaar voordat de klinische diagnose gesteld wordt, aan te tonen met PET. Ook is het in kaart brengen van het gedrag van neurotransmitters in het brein een belangrijke toepassing van PET. Hiermee zijn bijvoorbeeld de verschillen in dynamiek van de binding tussen cocaïne en methylfenidaat (G. -J. Wang et al., 2019) of de binding van THC in het ventrale striatum onderzocht (Bossong et al., 2015).

PET-data kunnen ook gecombineerd worden met data uit een CT- of MRI-scan, om zodoende de PET resultaten beter te lokaliseren en de diagnostiek te verbeteren (Ehman et al., 2017; Pyatigorskaya et al., 2020).

Voor wetenschappelijke doeleinden, waarbij hersenactiviteit wordt gemeten op basis van zuurstoftoevoer, wordt fMRI tegenwoordig veel vaker gebruikt dan PET (Gazzaniga et al., 2009; p. 155), vanwege de praktische nadelen die aan PET kleven.

Neurofeedback/BCI
PET wordt momenteel niet gebruikt voor neurofeedback/BCI toepassingen.

3) Technische ontwikkelingen

T. Jones & Townsend (2017) beschrijven een aantal technische innovaties die PET-scans aanzienlijk zouden kunnen verbeteren, zoals verdere ontwikkeling van tracers die makkelijker gedeeld kunnen worden tussen medische centra, zodat niet ieder centrum een cyclotron nodig heeft. Daarnaast is recent aangetoond dat minimale tijd tussen twee PET-scans verminderd kan worden van 5-10 seconden naar 1-2 seconden (G. Wang, 2019).

Single positron emission computed tomography

1) Opzet

Net als PET kan *single positron emission computed tomography* (SPECT) de metabole processen in de hersenen in kaart brengen. SPECT lijkt erg op PET, maar meet, in tegenstelling tot PET, met slechts één foton het verval van een tracer element. Dit foton is direct afkomstig uit het verval. Hierdoor is de SPECT-scan minder gedetailleerd dan PET, maar de metingen kunnen wel sneller herhaald worden. Ook is de benodigde apparatuur voor SPECT goedkoper dan voor PET en kunnen met SPECT meerdere tracers tegelijk ingezet worden (Lu & Yuan, 2015).

Figuur 18 - Een SPECT-scanner (bron).

2) Toepassingen

Klinisch en wetenschappelijk
Net als PET, kan SPECT met specifieke tracers ingezet worden voor wetenschappelijk onderzoek of de klinische diagnose van neuropsychiatrische aandoeningen, zoals schizofrenie of de ziekte van Alzheimer. SPECT wordt als zeer accuraat gezien bij de diagnose van de ziekte van Parkinson (Buchert et al., 2019). Buchert et al. (2019) stellen daarom voor om SPECT in te zetten om de ziekte van Parkinson te diagnosticeren in gevallen van twijfel, en vervolgens PET toe te passen om het subtype van de ziekte te bepalen.

Neurofeedback/BCI
SPECT wordt momenteel niet gebruikt voor neurofeedback/BCI toepassingen.

3) Technische ontwikkelingen

Er zijn verschillende ontwikkelingen op het gebied van SPECT hardware en de algoritmen die gebruikt worden om de beelden te reconstrueren (Cuocolo et al., 2018). Zo hebben Stam et al. (2018) gedemonstreerd dat het mogelijk is om hoge resolutie SPECT-beelden te maken, om zo neurobiologische markers van de ziekte van Parkinson beter in beeld te brengen.

(b) Anatomische structuur

Computertomografie

1) Opzet

Figuur 19 - Een CT-scanner (bron).

Een computertomografie (CT) scan is een geavanceerde versie van de conventionele röntgenscan. De CT-scanner bestaat uit twee belangrijke onderdelen, de stralingsbron en de stralingsontvanger, die recht tegenover elkaar staan. De stralingsbron verstuurt röntgenstraling. Afhankelijk van de dichtheid van het tussenliggende weefsel zal een deel van de straling geblokkeerd worden alvorens het door de ontvanger wordt gedetecteerd. Doordat de bron van de straling en de ontvanger tijdens een CT-scan om de patiënt heen draaien, is het mogelijk om vanuit verschillende hoeken metingen te doen en zo een driedimensionale reconstructie van het gescande lichaamsdeel te creëren. Om het contrast van de CT-scan te verhogen, kan een arts beslissen een contrastmiddel oraal of intraveneus toe te dienen.

Een CT-scan heeft een nauwkeurigheid van ongeveer een halve millimeter in de drie dimensies (Lin & Alessio, 2009). Hoewel dit een relatief hoge resolutie is, zijn de anatomische grensgebieden tussen hersenkwabben op een CT-scan moeilijk te zien. Voor meer gedetailleerde metingen verdient structurele MRI (zie onder) daarom de voorkeur. Een CT-scan leent zich echter uitstekend voor het in beeld brengen van grotere structuren en afwijkingen in de hersenen.

2) Toepassingen

Klinisch en wetenschappelijk
Vergeleken met een MRI-scan is een CT-scan goedkoper, toegankelijker en sneller. CT wordt daarom frequent gebruikt om onderzoek te doen naar of diagnoses te stellen van acute neurologische schade (Gazzaniga et al., 2009; p. 131), bijvoorbeeld na een beroerte (Campbell & Khatri, 2020; Krishnan et al., 2017).

Neurofeedback/BCI
CT wordt momenteel niet gebruikt voor neurofeedback/BCI toepassingen.

3) Technische ontwikkelingen

Voortdurende technische ontwikkelingen maken het mogelijk CT-scans met hogere resolutie in een korter tijdsbestek te maken om structuren beter in beeld te brengen (Krishnan et al., 2017).

Structurele MRI

1) Opzet

MRI maakt gebruik van de magnetische eigenschappen van waterstofatomen, die in vrijwel al het lichamelijk weefsel rijkelijk aanwezig zijn. Als een persoon gaat liggen in het sterke magnetische veld van een MRI-scanner, oriënteren de waterstofatomen in het lichaamsweefsel zich langs de magnetische veldlijnen. Wanneer er een radiopuls door de scanner gegenereerd wordt, worden de waterstofatomen uit hun evenwichtsstand gestoten. Bij het terugkeren naar hun evenwichtsstand komt energie vrij, die door de MRI-scanner opgepikt kan worden. Op deze manier is het mogelijk om met hoge resolutie (<1 mm) anatomische afbeeldingen van de hersenen te maken.

2) Toepassingen

Klinisch

MRI-scans worden klinisch voornamelijk gebruikt om neurologische schade in kaart te brengen (Gazzaniga et al., 2009; p. 131), zoals bijvoorbeeld bij cerebrale parese (Bax et al., 2006). Door herhaalde MRI-scans te maken kunnen ook effecten van een behandeling over tijd in beeld gebracht worden. Zo zou bijvoorbeeld na het nemen van medicatie tegen de ziekte van Alzheimer een vermindering van de afname in hersenweefsel te zien kunnen zijn.

Daarnaast benoemde een expert dat het klinische gebruik van kwantitatieve maten bepaald op MRI (zie ook hieronder) – waarbij niet alleen naar de afbeelding van de scan gekeken wordt, maar ook de onderliggende fysische maten vastgelegd worden – bijvoorbeeld voor de kwantificatie van atrofie of krimp van de hersenen bij dementie, wel in klinische richtlijnen vermeld staat, maar nog niet wijdverbreid geïmplementeerd is. De experts benadrukken dat de *hardware*, scaninstellingen en interpretatie van de scans kunnen variëren tussen centra en dat dit het gebruik van kwantitatieve maten in MRI compliceert.

Wetenschappelijk

Op wetenschappelijk vlak is er met diagnostische imaging technieken zoals structurele MRI flinke vooruitgang geboekt in het begrijpen van verschillende neurologische/psychiatrische aandoeningen (Zhuo et al., 2019). Zo zijn er op groepsniveau maten te vinden die wijzen op ADHD (Durston et al., 2004), depressie (Koolschijn et al., 2009; Zhuo et al., 2019) en schizofrenie (Haijma et al., 2013). Een expert noemt als voorbeeld dat de grootte van bepaalde hersengebieden bij patiënten met schizofrenie met 1 tot 6% afwijken van de gezonde populatie.

Belangrijk is dat de voorspellende waarde van markers wel voldoende groot moet zijn om op individueel niveau uitspraken te doen over het ontwikkelen van een ziekte. De experts benoemen dat de toegevoegde waarde van dit soort scans, bovenop de conventionele maten (genetisch onderzoek, neuropsychologische tests) vaak nog beperkt is. Tot op heden is er daarom nog maar een beperkte translatie van deze maten naar klinische toepassingen.

De experts noemen in deze context dat longitudinale metingen (bijvoorbeeld iedere twee jaar) betrouwbaarder en informatiever zijn dan één meting, ten opzichte van de enorme variabiliteit in de algehele populatie. In deze context leent MRI zich dan goed om de ontwikkeling van hersenmaten binnen het individu te volgen.

3) Technische ontwikkelingen

Een geïnterviewde expert benoemde dat structurele MRI een indrukwekkende ontwikkeling doormaakt wat betreft automatische verwerking van informatie uit verschillende laboratoria en dat zo steeds vaker kwalitatief hoogwaardige data tussen medische centra gedeeld kan worden.

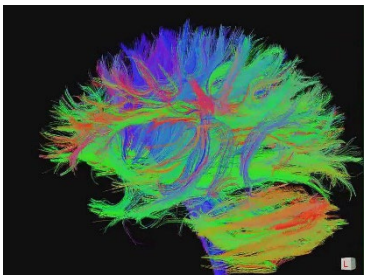
Een andere expert merkte op dat er in de kliniek een beweging naar een meer kwantitatieve interpretatie van MRI-beelden gaande is. Dat betekent dat, in plaats van een afbeelding alleen kwalitatief te interpreteren, artsen proberen de anatomie of functie meer kwantitatief vast te leggen, steeds vaker ondersteund door automatische analyse, bv met AI. Volgens de expert is er op dit vlak ook veel beweging van medisch-technologische bedrijven te zien, wat betekent dat het aantal *tools* om dit soort maten te berekenen toe zal nemen. Het kan verwacht worden dat er meer multicenter studies uitgevoerd gaan worden om aan te tonen hoe betrouwbaar een marker is. Dit soort studies moeten ook aantonen of de maten voldoende robuust zijn bij verschillen in gebruikte hardware en beeldacquisitie protocollen.

In een interessante studie op basis van kwantitatieve MRI is aangetoond dat de hersenanatomie gebruikt kan worden om individuen te identificeren uit een groep van bijna 200 proefpersonen (Valizadeh et al., 2018). De onderzoekers deden dit met relatief eenvoudige classificatiemethoden, op basis van drie verschillende structurele MRI-scans per proefpersoon genomen over twee jaar tijd. Ook Aloui et al. (2018) slaagden erin om driedimensionale MRI-beelden te gebruiken als biometrische identificatie. In deze studie konden individuen zeer nauwkeurig geïdentificeerd worden uit een groep van 220 proefpersonen.

Ook andere vormen van MRI zijn relevant om hier te noemen. *Magnetic resonance spectroscopy* (MRS) is een MRI-techniek waarmee informatie wordt achterhaald over de chemische samenstelling van hersenweefsel (Bottomley et al., 1985). MRS kost slechts enkele minuten scantijd en kan daarom aanvullend op andere MRI-metingen worden ingezet (Manias & Peet, 2018). MRS gebruikt de magnetische eigenschappen van waterstofatomen om de relatieve concentraties van verschillende metabolieten in de hersenen vast te stellen. Zo verschilt bijvoorbeeld de biochemische samenstelling van gezond hersenweefsel van dat van tumorweefsel (Peet et al., 2008). MRS kan bijdragen aan de klinische diagnose van verschillende neurologische aandoeningen, maar de toegevoegde waarde van MRS in relatie tot andere technieken en de mogelijkheden tot standaard klinische implementatie van MRS worden nog onderzocht (Manias & Peet, 2018). Daarnaast is recentelijk ook driedimensionale a*mplified* MRI ontwikkeld (Abderezaei et al., 2021; Terem et al., 2021), waarmee driedimensionale beelden van de hersenen gemaakt kunnen worden en ook het pulseren van de hersenen met de slagen van het hart duidelijk te zien is. Zo kan op een nieuwe manier gekeken worden naar neurologische aandoeningen die invloed hebben op de biomechanica van de hersenen.

Diffusion tensor imaging

1) Opzet



Figuur 20 - Voorbeeld van een DTI-scan (bron).

Naast de anatomische structuur van de hersenen kunnen, met behulp van MRI-scanners, ook de witte-stofbanen in de hersenen in kaart gebracht worden. De daarbij gebruikte methode is *diffusion tensor imaging* (DTI) (Le Bihan et al., 1986). DTI is gebaseerd op beweging van watermoleculen, die door diffusie willekeurig heen en weer bewegen. In de witte stof in de hersenen is de diffusie haaks op de looprichting van de witte-stof banen echter beperkt. Door de variaties in diffusie langs verschillende richtingen te meten, kan daarmee bepaald worden hoe de looprichting van de witte-stof banen is (Moseley et al., 1990). Door dit door het hele brein te meten, is het uiteindelijk mogelijk de witte-stof banen te reconstrueren (DaSilva et al., 2003) (figuur 20). Gemiddeld meet DTI met een nauwkeurigheid van ongeveer 1 tot 3 mm (Mori & Zhang, 2006).

Er zitten echter een aantal beperkingen aan DTI-metingen (Mori & Zhang, 2006). Ten eerste kan uit de bewegingsrichting van watermoleculen afgeleid worden dát er een axon aanwezig is, maar niet in welke richting de signalen door het axon lopen. Ten tweede is het lastiger om neurale banen die elkaar kruisen accuraat te reconstrueren en zijn daarvoor langdurige metingen nodig. Tot slot is de techniek gevoelig voor hoofdbewegingen en is er extensieve signaalverwerking nodig om hiervoor te corrigeren.

2) Toepassingen

Klinisch en wetenschappelijk

DTI wordt voornamelijk gebruikt als onderzoeksmethode, maar wordt af en toe ook klinisch ingezet. Zo kan de techniek de schade aan de witte-stof banen als gevolg van neurologische aandoeningen en de reactie op een behandeling in beeld te brengen (Tae et al., 2018). DTI is hierdoor een relevante techniek bij verschillende neurologische aandoeningen, zoals MS, epilepsie, de ziekte van Alzheimer en beroertes. DTI wordt daarnaast gebruikt om vast te stellen hoe hersengebieden met elkaar verbonden zijn. Dit is bijvoorbeeld zeer relevant binnen onderzoek naar de ontwikkeling van de hersenen (Mukherjee et al., 2002). Metingen die in beeld brengen hoe hersengebieden via witte-stofbanen onderling verbonden zijn, kunnen gebruikt worden bij wetenschappelijk onderzoek naar neurologische aandoeningen, zoals bijvoorbeeld depressie (Liao et al., 2013).

3) Technische ontwikkelingen

Tae et al. (2018) beschrijven een aantal technische verbeteringen van DTI, zoals snellere scans (wat zal zorgen voor een lagere gevoeligheid voor hoofdbewegingen), hogere nauwkeurigheid en standaardisatie van meetinstellingen. Deze verbeteringen zullen er volgens de onderzoekers voor zorgen dat gebruik van DTI in klinisch onderzoek toeneemt.

(c) Overzichtstabel

Techniek	Soort informatie	Voordelen	Nadelen
Interactie met hersenactiviteit			
	Elektrische interactie		
		Meten	
EEG	*Elektrische activiteit van groepen neuronen in de cortex*	*Niet-invasief *Hoge tijdsresolutie * Goedkoop *Draagbare systemen beschikbaar	* Lage ruimtelijke resolutie * Niet spatieel specifiek * Alleen oppervlaktemetingen * Gevoelig voor beweging en spieractiviteit
MEG	*Magnetische activiteit van groepen neuronen in de cortex*	* Niet-invasief * Hoge tijdsresolutie * Hoge ruimtelijke resolutie	* Duur * Niet draagbaar * Alleen oppervlaktemetingen
		Meten en stimuleren	
ECoG	*Elektrische activiteit van groepjes neuronen in de cortex*	* Hoge tijdsresolutie * Hoge ruimtelijke resolutie mogelijk * Spatieel specifiek * Volledig implanteerbare systemen beschikbaar	* Hersenoperatie noodzakelijk * Alleen oppervlaktemetingen
Stereotactische EEG	*Elektrische activiteit van groepjes neuronen*	* Weinig invasief * Hoge tijdsresolutie * Hoge ruimtelijke resolutie mogelijk * Spatieel specifiek * Metingen vanuit het hele brein	* Hersenoperatie noodzakelijk * Beperkt spatieel bereik
Endovasculaire EEG	*Elektrische activiteit van groepjes neuronen rond een groot bloedvat*	* Weinig invasief * Hoge tijdsresolutie * Hoge ruimtelijke resolutie * Volledig implanteerbare systemen beschikbaar	* Beperkt spatieel bereik
Micro-elektroden-arrays	*Elektrische activiteit van een enkele of klein aantal neuronen*	* Hoge tijdsresolutie * Zeer hoge ruimtelijke resolutie * Spatieel zeer specifiek	* Hersenoperatie noodzakelijk * Beperkt spatieel bereik * (Nog) geen volledig implanteerbaar systeem beschikbaar voor het centrale zenuwstelsel

	Stimuleren		
tDCS	*Veranderingen in de elektrische balans, waardoor neuronen makkelijker of moeilijker te activeren zijn*	* Niet-invasief * Goedkoop * Draagbaar * Effecten kunnen langdurig aanhouden	* Zeer lage ruimtelijke resolutie (niet spatieel specifiek) * Bereik beperkt tot hersenoppervlak
TMS	*Magnetisch activeren van groepen neuronen*	* Niet-invasief	* Niet draagbaar *Lage ruimtelijke resolutie (niet spatieel specifiek) * Bereik beperkt tot hersenoppervlak
TFUS	*Activeren van groepjes neuronen met een geluidsgolf*	* Niet-invasief * Hoge ruimtelijke resolutie * Bereikt diepe hersenstructuren	* Niet draagbaar
DBS	*Elektrisch activeren van groepjes neuronen*	* Zeer hoge ruimtelijke resolutie * Chronisch implantaat * Bereikt diepe hersenstructuren	* Hersenoperatie noodzakelijk * Dure, ingrijpende ingreep
	Metabole meetmethoden		
fMRI	*Verandering van zuurstofgehalte in het bloed*	* Niet-invasief * (Zeer) hoge ruimtelijke resolutie * Bereikt diepe structuren	* Duur * Niet draagbaar * Lage tijdsresolutie
fNIRS	*Verandering van zuurstofgehalte in het bloed*	* Niet-invasief * Goedkoop * Draagbaar	* Lage tijdsresolutie * Lage ruimtelijke resolutie * Alleen oppervlaktemetingen
fTCD	*Snelheid van de bloedstroom in de hersenen*	* Niet-invasief * Goedkoop * Draagbaar	* Lage tijdsresolutie * Lage ruimtelijke resolutie * Alleen oppervlaktemetingen * Niet toepasbaar wanneer de schedel relatief dik is

PET	*Verandering van metabole en fysiologische waarden in het bloed*	* Niet-invasief * Herhaalde metingen in hoge mate vergelijkbaar	* Duur * Niet draagbaar * Lage tijdsresolutie * Injectie van radioactieve tracer
SPECT	*Verandering van metabole en fysiologische waarden in het bloed*	* Niet-invasief	* Niet draagbaar * Lage tijdsresolutie * Lage ruimtelijke resolutie * Injectie van radioactieve tracer
Metingen van anatomische structuur			
CT	*Driedimensionale reconstructie van Röntgenscans*	* Kan relatief snel uitgevoerd worden	* Niet draagbaar * Lage ruimtelijke resolutie * Blootstelling aan röntgenstraling
Structurele MRI	*Visualisatie van verschillende structuren op basis van waterstofdichtheid*	* Zeer hoge ruimtelijke resolutie	* Duur * Niet draagbaar * Vanwege veiligheidsoverweginge n niet toepasbaar bij mensen met bepaalde implantaten
DTI	*Visualisatie van witte stofbanen op basis van de bewegingen van waterstofatomen*	* Zeer hoge ruimtelijke resolutie	* Duur * Niet draagbaar

5. Neurotechnologie in de justitie- en veiligheidsdomeinen

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste toepassingen van neurotechnologieën besproken binnen de drie justitie- en veiligheidsdomeinen, te weten *opsporing en waarheidsvinding*; *risicotaxatie*; en *interventie*. Aan de hand van deze informatie zal het *technology readiness level* (TRL) bepaald worden. Zoals beschreven in de offerte wordt het TRL geoperationaliseerd zoals beschreven in het Horizon-2020 programma van de Europese Unie. De interpretatie van de begrippen is te lezen in tabel A1 (Appendix 2).

(a) Opsporing en waarheidsvinding

Binnen het domein van de *opsporing en waarheidsvinding* zijn in het literatuuronderzoek drie toepassingen van neurotechnologie het meest pregnant naar voren gekomen: 1) het gebruik van fMRI voor het identificeren van misleiding, 2) het gebruik van de P300 (zie boven) uit het EEG-signaal als middel om daderkennis te identificeren en 3) *neuroimaging* voor het vaststellen van neurologische aandoeningen. Deze toepassingen worden hieronder besproken.

(i) fMRI voor het identificeren van misleiding

Het gebruiken van hersenmetingen voor het identificeren van misleiding ('neuroleugendetectie') is anders dan de conventionele methoden van leugendetectie die bijvoorbeeld de bloeddruk of hartslag meten, omdat hersenmetingen zich niet richten op de *emotie*. Dit kan een voordeel zijn: het ervaren van emotie betekent immers niet altijd dat iemand liegt – het kan bijvoorbeeld ook wijzen op de angst om niet geloofd te worden. Hersenmetingen daarentegen, althans dat wordt verondersteld, brengen de fysiologische veranderingen tijdens cognitieve processen die geassocieerd worden met een mogelijke leugen in beeld (Farah et al., 2014).

Voor het identificeren van leugens is fMRI de meest gebruikte onderzoekstechniek, hoewel EEG ook in deze context onderzocht wordt. Met behulp van fMRI is in onderzoekssettings gedemonstreerd dat bij groepen proefpersonen onder experimentele condities specifieke patronen van hersenactiviteit te identificeren zijn die wijzen op misleiding (Ganis et al., 2003; Hakun et al., 2008; Kozel et al., 2005; Langleben et al., 2002; T. M. C. Lee et al., 2002; Spence et al., 2001).

Het gebruik van fMRI voor leugendetectie in de praktijk is echter door een aantal wetenschappers sterk bekritiseerd (Editorial, 2008; Farah et al., 2014; Gamer, 2014; Ganis, 2014; Rusconi & Mitchener-Nissen, 2013; Simpson, 2008). Een eerste fundamenteel probleem dat wordt genoemd is dat hersenmetingen – net als conventionele leugendetectietechnieken – geen leugens *an sich* aantonen. De gemeten fysiologische processen in de hersenen kunnen ook geassocieerd zijn met andere psychologische processen, bijvoorbeeld twijfel over het te formuleren antwoord. Farah et al. (2014) beschrijven in een uitgebreide meta-analyse dat de meeste studies gebruikmaken van een paradigma waarbij de proefpersonen in specifieke trials geïnstrueerd worden om te liegen, terwijl ze in andere de waarheid dienen te vertellen. Door de 'leugen' trials te contrasteren met 'ware' trials kunnen verschillen in hersenactiviteit geassocieerd worden met liegen. Farah et al. (2014) observeren dat de hersengebieden die actief zijn tijdens de geïnstrueerde leugens vaak ook de hersengebieden zijn die over het algemeen geassocieerd worden met het inhiberen van een respons. De auteurs beschrijven dat op basis van dit paradigma niet bepaald kan worden welke psychologische processen, anders dan liegen, hetzelfde patroon van hersenactiviteit oproepen. Net als bij de emotie die gemeten wordt met

conventionele leugendetectietechnieken, hoeft ook de aanwezigheid van dit type hersenactiviteit tijdens een fMRI-meting dus niet per se te betekenen dat iemand liegt. Daarnaast, zo schrijven de auteurs, bevatten de meeste studies *confounding* factoren in de onderzoeksopzet die verschillen tussen de condities ook zouden kunnen verklaren, zoals verschillen in de mate van aandacht of geheugen die een proefpersoon besteedt aan de trials waarin hij geacht wordt te liegen versus de waarheid te spreken. Inderdaad is in een fMRI-studie gevonden dat puur het in gedachten houden van bepaalde stimuli – zonder dat de waarheid gesproken of gelogen hoeft te worden – dezelfde hersengebieden activeert als doorgaans geassocieerd worden met liegen (Gamer et al., 2012).

Los van deze methodologische vragen dient nog veel te gebeuren voordat fMRI-leugendetectie betrouwbaar toegepast kan worden buiten gecontroleerde onderzoekssettings. Een eerste belangrijk kritiekpunt is dat de meeste studies rond leugendetectie met fMRI zich beperkten tot groepsanalyses (Farah et al., 2014; Gamer, 2014; Ganis, 2014). Echter, om daadwerkelijk toepasbaar te zijn, moet het fMRI-signaal betrouwbaar en voorspellend zijn op een individueel niveau – zonder *confounding* factoren in de onderzoeksopzet. Dat is, voor zover bekend, nog niet aangetoond (Farah, 2014; Gamer, 2014; Ganis, 2014). Hiermee hangt ook de eerder besproken intrinsieke tekortkoming van fMRI samen: de beperking in het consistent repliceren van eerder gedane bevindingen (Ganis, 2014). Een derde belangrijk kritiekpunt betreft de ecologische validiteit (Farah et al., 2014; Gamer, 2014; Ganis, 2014). Dat wil zeggen dat een techniek goed kan werken in een gecontroleerde laboratoriumsetting, maar dat de werking daarbuiten nog niet goed gevalideerd is. De context waarin een onderzoeksdeelnemer meedoet aan dit soort proeven in een laboratorium verschilt uiteraard sterk van die van een verdachte in een strafzaak. Een daaraan gerelateerd punt is dat proefpersonen in onderzoekssettings hoogstwaarschijnlijk coöperatief zijn bij deelname aan het experiment. Een verdachte in een rechtszaak zou, door niet mee te werken, het fMRI-signaal voor leugendetectie onbruikbaar kunnen maken. De noodzaak van meewerkende proefpersonen voor een adequate fMRI-scan werd ook benadrukt door een geïnterviewde expert. Inderdaad blijkt het betrekkelijk eenvoudig om proefpersonen te trainen tégen leugendetectie met fMRI, door bijvoorbeeld tijdens bepaalde stimuli onmerkbaar een vinger of teen te bewegen (Ganis et al., 2011).

Een aantal bedrijven heeft gesteld dat het met fMRI mogelijk is om betrouwbaar leugens te detecteren, voor allerhande doeleinden, zoals het opsporen van verzekeringsfraude (Talbot, 2010). Er is (voor zover bekend) tweemaal geprobeerd fMRI-scans als bewijs in de rechtbank in de VS aan te voeren (Madrigal, 2010c; Murphy, 2009; Talbot, 2010). In beide gevallen is dit door de rechter afgewezen (Madrigal, 2010a, 2010b; Talbot, 2010).

Samenvattend: het gebruik van fMRI voor het identificeren van misleiding is uitgebreid onderzocht in laboratoria, maar toepassingen in de praktijk zijn beperkt en omstreden. Het TRL van fMRI voor het identificeren van misleiding wordt daarom geschat op 4 (*Technology validated in lab*).

(ii) EEG-P300 voor het identificeren van daderkennis

De mogelijkheden van EEG-P300 voor *opsporing en waarheidsvinding* is sinds de jaren ’80 onderzocht. Hierbij wordt gewerkt met de hypothese dat de proefpersoon lichamelijk reageert op relevante kennis die alleen de dader zou kunnen hebben. Een afwijking in lichamelijke reactie, zoals in hartslag, of de P300 respons, zou een indicatie van betrokkenheid bij een misdrijf zou kunnen zijn. Afwijkingen zouden bijvoorbeeld te meten zijn wanneer een dader een foto van het moordwapen waarneemt tussen foto’s van andere wapens. In een meta-analyse is de P300 voor dit doeleinde vergeleken met huidgeleiding, hartslag en ademhaling (Meijer et al., 2014). De accuratesse van P300 bleek vergelijkbaar met

huidgeleiding in een *mock crime* proefopzet. Belangrijk is echter dat het (ook) bij EEG-P300 mogelijk is om eenvoudige *countermeasures* te nemen om de accuratesse van de meting teniet te doen (Rosenfeld, 2005; Rosenfeld et al., 2004). Dit zijn maatregelen waarbij iemand probeert de meting te verstoren. Het is daarom van belang het onderzoek zo op te zetten dat de proefpersoon gedwongen wordt aandacht te besteden aan de stimuli, om zo *countermeasures* te voorkomen (Farwell et al., 2014). Daarnaast is het vanzelfsprekend dat voor een correcte interpretatie van de resultaten een gedegen onderzoeksopzet en goed stimulusmateriaal noodzakelijk zijn.

Ondanks toonaangevend onderzoek met EEG-P300 in de VS en Israël zijn daadwerkelijke toepassingen van de techniek binnen de rechtsgang omstreden en beperkt – in beide landen wordt de techniek in de praktijk niet gebruikt. Van Toor (2017) beschrijft dat waarheidsvinding op basis van EEG-P300 in India eenmalig toegepast werd in een proces – de EEG opname werd gezien als doorslaggevend bewijs en de verdachte werd veroordeeld voor moord. Dit werd echter sterk bekritiseerd (Giridharadas, 2008) en is later door het Indiase Hooggerechtshof als ongrondwettelijk verklaard. Japan lijkt het enige land in de wereld waar (neuro)geheugendetectie in het strafprocesrecht is opgenomen (Van Toor, 2017). Hierbij worden draagbare polygraafsystemen gebruikt, waarmee naast autonome maten (bv. elektrocardiogram of huidgeleiding) ook EEG gemeten kan worden (Osugi, 2011). Sommige autonome maten kunnen, in tegenstelling tot EEG, met relatief weinig ruis en buiten een gecontroleerde laboratoriumomgeving worden gemeten. Hierdoor zijn sommigen van mening dat dergelijke autonome maten binnen strafrechtelijk onderzoek de voorkeur verdienen (Matsuda et al., 2019).

Uit commerciële hoek is er ook interesse in het gebruik van EEG-P300 voor *opsporing en waarheidsvinding*. Zo claimt het bedrijf Brainwave Science dat op basis van de P300 met 100% nauwkeurigheid zou kunnen worden afgeleid of een persoon betrokken was bij een misdrijf (*Brainwave Science - Crime-Fighting Technology for Law Enforcement*, n.d.). Deze claim is echter omstreden en de wetenschappelijke basis achter de claims van Farwell en Brainwave Science zijn veelvuldig bekritiseerd (Editorial, 2008; Meijer et al., 2013; Rosenfeld, 2005). Met behulp van het systeem van Brainwave Science zou in één rechtszaak in de VS bewijs zijn aangedragen maar dit bewijs is in de uitspraak uiteindelijk buiten beschouwing gelaten (Rosenfeld, 2005).

Samengevat: Het gebruik van EEG-P300 voor het identificeren van daderkennis is uitgebreid onderzocht in laboratoria, maar toepassingen in de praktijk zijn beperkt en omstreden. Samengenomen wordt het TRL van EEG-P300 binnen *opsporing en waarheidsvinding* geschat op 4 (*Technology validated in lab)*.

(iii) Neuroimaging voor het vaststellen van neurologische aandoeningen

Zoals besproken in het vorige hoofdstuk, wordt *neuroimaging* in de klinische praktijk regelmatig gebruikt als hulpmiddel voor het stellen van een diagnose over stoornissen of ziekten. Diverse neurologische of psychiatrische afwijkingen zijn ook van belang binnen het justitie- en veiligheidsdomein (met name met betrekking tot cognitie en toerekeningsvatbaarheid zoals bij dementie). In het bijzonder PET zou, volgens een geïnterviewde expert, door middel van het vaststellen van de aanwezigheid van bepaalde eiwitten, zeer specifiek zijn in het diagnosticeren van de ziekte van Alzheimer. Hersenscans kunnen, wanneer geïnterpreteerd door experts, gebruikt worden in strafzaken voor de vaststelling van stoornissen of ziektes bij verdachten.

Een eerdere inventarisatie door het Wetenschappelijk Onderzoek- en Documentatiecentrum (WODC) over de periode 2000-2012 vond dat in meer dan 200 zaken 'neurobewijs' gebruikt werd (De Kogel & Westgeest, 2015). Informatie werd in dit onderzoek gezien als neurobewijs wanneer het verwees naar

informatie uit neurotechnologieën (in dit onderzoek: CT-, EEG-, MRI- of PET-scans), neuro-endocrinologische tests (bijv. hormonale waarden), neuropsychologische tests of een verwijzing maakte naar neurobiologische predisposities of hersenschade. De auteurs gaven aan dat de rechtsvragen waarvoor neurobewijs het meest voor werd aangewend betrekking hadden op toerekeningsvatbaarheid, maar dat neurobewijs bijvoorbeeld ook gebruikt werd in het kader van de inschatting van risico. In 97 zaken gepubliceerd op rechtsspraak.nl werd direct verwezen naar een neurotechnologie. De Kogel & Westgeest (2015) noemen een voorbeeld waarbij EEG-metingen werden aangedragen door de verdediging van de verdachte, met de bewering dat de herinnering van de aanklaagster niet betrouwbaar zou zijn, omdat zij zou lijden aan ernstige hersenschade. Een ander voorbeeld hiervan is de zaak rondom de poging tot afpersing van familie De Mol. Zo is te lezen op rechtspraak.nl (Rechtbank Midden-Nederland 2 juli 2015, ECLI:NL:RBMNE:2015:4866):

'*Verschillende deskundigen hebben de verdachte onderzocht. Hun conclusie is dat de verdachte lijdt aan fronto-temporale dementie, type gedragsvariant. Door deze aandoening had verdachte, aldus de deskundigen, nauwelijks moreel besef van zijn handelen. Verdachte liet zich leiden door – kinderlijk aandoende – sentimentaliteit. Hij overzag de consequenties van zijn handelen niet en het ontbrak hem aan empathie voor de slachtoffers. Het is zeer onwaarschijnlijk dat de verdachte zijn hersenaandoening kan faken, dit blijkt onder meer uit de MRI-scan en PET-scan die tijdens de zitting zijn getoond en onderzoek door de gedragsdeskundigen.*'

Interessant hier is ook dat de MRI- en PET-scan nadrukkelijk genoemd worden in de context van betrouwbaarheid (namelijk i.v.m. de mogelijkheid van faken).

In feite wordt *neuroimaging* in de rechtszaal op dezelfde manier ingezet als in de klinische praktijk gebruikelijk is (zoals ook hierboven bij de verschillende technieken benoemd). Het gaat met andere woorden om een standaard medische toepassing, namelijk de vaststelling van een neurologische stoornis, en niet om een gebruik van de technologie dat specifiek is binnen de context van een strafzaak.

Samengevat: *Neuroimaging* wordt in de rechtspraktijk regelmatig toegepast voor het vaststellen van neurologische aandoeningen. Het TRL van *neuroimaging* voor het vaststellen van neurologische aandoeningen wordt daarom geschat op 9 (*Actual system proven in operational environment*).

(b) Risicotaxatie

(i) Neurologische markers voor het inschatten van recidiverisico

Bij *risicotaxatie* is het van belang op te merken dat de huidige instrumenten geen volledig correcte voorspelling kunnen geven, en dat er aanzienlijke ruimte voor verbetering is (Fazel et al., 2012; Meynen, 2020). De hoop is daarom dat *neuroimaging* op dit punt een aanvulling kan bieden, waardoor de kwaliteit van de recidive-inschatting verbetert. Zo opperde een geïnterviewde expert dat hersenscans mogelijk bij kunnen dragen aan het efficiënter inzetten van middelen, wanneer mensen in bepaalde groepen gestratificeerd kunnen worden – bijvoorbeeld wanneer er een hogere kans op recidive is vastgesteld (mede) op basis van hersenscans.

Met betrekking tot *risicotaxatie* zijn er volgens de geïnterviewde experts echter momenteel nauwelijks markers in de hersenen bekend die samenhangen met een verhoogd risico op delinquent gedrag. Een expert legde uit dat er bijvoorbeeld op groepsniveau wel associaties zijn tussen minder goed ontwikkelde hersenengebieden (zoals te meten met MRI) en sociaal zeer ernstig afwijkend gedrag in kinderen en adolescenten (Zhang et al., 2019). Dit zijn echter zwakke associaties en deze kunnen geen

voorspelling verantwoorden op individueel niveau. Wat betreft het voorspellen van delinquent gedrag zijn met name drie studies te noemen, namelijk Aharoni et al. (2013), Zijlmans et al. (2021) en Delfin et al. (2019). De eerstgenoemden voerden een fMRI-experiment uit waarin gedetineerden (n = 96) hun impuls tot het drukken op een knopje moesten beheersen. De auteurs vonden dat lagere activiteit in de *anterior cingulate cortex* (ACC) tijdens dit experiment samenhing met een verhoogde kans dat de gedetineerde binnen vier jaar opnieuw gearresteerd zouden worden (Aharoni et al., 2013). De kans dat de gedetineerden opnieuw gearresteerd zouden worden was namelijk 60% versus 46% voor degenen met respectievelijk relatief lage en hoge ACC-activiteit. Later heeft dezelfde onderzoeksgroep bij een deel van dezelfde populatie ook twee EEG-markers meegenomen in de analyse. Eén van deze ('*error processing*') bleek voorspellende waarde te hebben, de andere niet (Steele et al., 2015). Zijlmans et al. (2021) namen bovenop traditionele recidiverisicofactoren ook fysiologische maten, twee-EEG markers en fMRI-activiteit in de ACC, mee in een model om recidive te voorspellen in delinquente jongvolwassenen (n = 127). Van de neurobiologische maten bleek één van de EEG-markers (ook '*error processing*') te associëren te zijn met recidiverisico. Belangrijk is ook dat de neurobiologische waarden de voorspellende waarde van de recidiverisicoschatting significant verbeterden. In tegenstelling tot Aharoni et al., 2013 vertoonde de fMRI-activiteit in de ACC in deze studie echter geen associatie met recidiverisico. De auteurs suggereren dat dit te wijten kan zijn aan de verschillende leeftijdsgroepen gebruikt in de studies (het cohort van Zijlmans et al., 2021, was aanzienlijk jonger dan dat van Aharoni et al., 2013), of verschillen in de gebruikte methodologie. Daarbovenop is, zoals eerder benoemd, replicatie van fMRI-resultaten altijd lastig (Bennett & Miller, 2010). Delfin et al. (2019) gebruikten binnen een forensisch psychiatrische populatie (n = 44) een model met klassieke risicofactoren voor recidive en voegden daar later een andere neurobiologische maat, namelijk SPECT, aan toe. Het gebruik van de klassieke factoren in combinatie met SPECT-data bleek de voorspelling van het model op de kans op recidive te verbeteren. Zo ging het deel correcte classificaties van 0,64 (zonder gebruik van SPECT-data) naar 0,82 (met gebruik van SPECT-data) – een stijging van 28%. Een zeer interessante studie, maar nog altijd op basis van groepsniveau.

Net als voor de diagnose van complexe psychiatrische aandoeningen (Zhuo et al., 2019), lijkt een risicotaxatie enkel op basis van hersenscans niet haalbaar, zo stellen geïnterviewden. Ook hersenscans worden beïnvloed door een veelvoud aan factoren. Daarnaast benoemen de experts dat de hersenen functioneren als een netwerk – er is niet één hersengebied dat verantwoordelijk is voor één soort gedrag – en het is niet mogelijk om dat netwerk volledig in kaart te brengen (fMRI is hiervoor te traag).

Toch kunnen de onder *opsporing en waarheidsvinding* genoemde technieken, die met name voor relevante medische diagnostiek worden aangewend, ook binnen het domein van de *risicotaxatie* waardevolle informatie opleveren. Wanneer bijvoorbeeld prefrontale hersenschade aangetoond wordt, kan dat gezien worden als een indicatie van verhoogd recidiverisico – prefrontale hersenschade wordt namelijk geassocieerd met ongeremd gedrag (De Kogel & Westgeest, 2015).

Samengevat: Het gebruik van neurotechnologieën voor het inschatten van recidiverisico is onderzocht, maar wordt momenteel niet in de praktijk toegepast. Het TRL van neurotechnologieën voor het inschatten van recidiverisico wordt daarom geschat op 4 (*Technology validated in lab*). Wanneer hersenscans in het kader van neurologische aandoeningen (zie eerder) worden gebruikt, kan dit hoger liggen. Echter, dan worden de neurobiologische bevindingen geplaatst binnen een bredere klinische context, en kunnen zij daarbinnen bijdragen aan een oordeel van het risico – niet als een op zichzelf staande risico-meting.

(c) Interventie

(i) Hersenstimulatie binnen de forensische psychiatrie

Voor zover bekend zijn er op dit moment nog geen neurotechnologische interventies die in de forensisch psychiatrische praktijk of elders in het strafrecht worden toegepast. In beginsel lijken er mogelijkheden te zijn voor hersenstimulatie binnen de forensische psychiatrie, maar de resultaten van studies zijn nog niet eenduidig.

Het gebruik van invasieve hersenstimulatie binnen de forensische psychiatrie is in enkele studies onderzocht. Torres et al. (2020) pasten bijvoorbeeld DBS toe bij zeven patiënten met pathologische agressie. De auteurs rapporteerden dat binnen twee jaar tijd het ziektebeeld van vijf patiënten significant verbeterd was.

Onderzoekers van de Erasmus Universiteit concludeerden na literatuuronderzoek dat tDCS het empathische vermogen bij plegers van geweldsmisdrijven kan doen toenemen en agressie en/of gewelddadig gedrag kan verminderen (Sergiou et al., 2020). Echter, zo stellen de onderzoekers, de effecten van tDCS zijn wisselend bij verschillende stimulatieparameters, en is er meer onderzoek nodig om de effecten van tDCS te consolideren. In een latere studie pasten de onderzoekers *high-density* tDCS (twee keer twintig minuten per dag, voor vijf dagen) op een forensische populatie toe, en vonden geen toename in empathie, maar wel een significatie reductie van reactieve agressie ten opzichte van de controlegroep, met een matig tot groot effect (Sergiou et al., 2021). Verder is gevonden dat stimulatie met tDCS in frontale hersengebieden ook een variabele impact heeft op het produceren van leugens, terwijl het produceren van ware antwoorden onveranderd blijft. Afhankelijk van de locatie en instellingen van de stimulatie kunnen tegengestelde effecten ontstaan (Karim et al., 2010; Mameli et al., 2010; Priori et al., 2008). Zo rapporteerden Priori et al. (2008) dat de reactietijd bij het vertellen van een leugen na tDCS toeneemt, terwijl Mameli et al. (2010) reactietijd juist zagen afnemen.

Het gebruik van hersenstimulatie binnen de forensische psychiatrie is zeer beperkt onderzocht en wordt momenteel niet in de praktijk toegepast. Het TRL van hersenstimulatie binnen de forensische psychiatrie wordt daarom geschat op 4 (*Technology validated in lab*).

6. Mogelijke toekomstige doorontwikkelingen

In dit hoofdstuk wordt een inschatting gemaakt over de mogelijke doorontwikkelingen van de neurotechnologieën, waar relevant voor het justitie- en veiligheidsdomein. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen de ontwikkelingen op de kortere (<5 jaar) en de langere termijn (5 tot 15 jaar). Als laatste zullen drie innovatieve neurotechnologieën (fUSI, twee-foton microscopie en optogenetica) besproken worden, die nog niet voor hersenonderzoek in mensen zijn toegepast, maar waarvan wel verwacht wordt dat ze in de toekomst voor dat doeleinde relevant zullen zijn. Mede omdat het in dit hoofdstuk gaat om inschattingen over de toekomst, waarover vanzelfsprekend nog geen of weinig wetenschappelijke studies voorhanden zijn, wordt veel gebruik gemaakt van de inzichten van de geïnterviewde experts.

Over het algemeen ontwikkelen de niet-invasieve neurotechnologieën zich in een hoog tempo. Dit blijkt bijvoorbeeld uit het snel toegenomen aanbod aan tDCS- en EEG-systemen voor particulieren. Een aantal experts verwacht dat deze particulier verkrijgbare EEG-sets binnen 5 jaar mogelijk zullen functioneren op het niveau van de klinische standaard. Daarnaast verwachten experts dat EEG in de toekomst ingezet zou kunnen worden om het hersensignaal te koppelen aan gedrag of om de veranderingen in het EEG-signaal over langere tijd te meten. EEG zou dan waarschijnlijk niet zozeer ingezet worden om bepaalde acties mogelijk te maken (zoals het besturen van een robotarm), maar eerder om, via neurofeedbackmethoden, eigenschappen te verbeteren die we op dit moment al bezitten, zoals concentratie. Zo werken twee autofabrikanten, Mercedes en Nissan, momenteel aan het integreren van EEG-signaal tijdens het rijden, om de rijervaring en -prestatie te verbeteren (Humphries, 2021; The Bitbrain Team, 2018). Ook voor fNIRS en MEG zijn er technologische ontwikkelingen die het mogelijk maken om de technieken breder toe te passen. Zo zullen nieuwe typen MEG-sensoren er wellicht voor zorgen dat veel onderzoekscentra waarvoor conventionele MEG nu te duur is op termijn wel MEG-scans kunnen gaan gebruiken. Dat is relevant voor zowel wetenschappelijke als klinische toepassingen waar MRI niet gebruikt kan worden en waar EEG niet voldoende spatiële informatie geeft. De bredere beschikbaarheid van niet-invasieve neurotechnologieën betekent waarschijnlijk dat ze steeds vaker voor niet-medische toepassingen zullen worden ingezet, zoals voor neuromarketing. Eén van de geïnterviewde onderzoekers verwachtte dat binnen 10 tot 15 jaar problemen kunnen ontstaan wanneer data, verkregen binnen neuromarketing, misbruikt worden, bijvoorbeeld voor het personaliseren van advertenties.

Gegeven de complexiteit van de technologie zal de ontwikkeling van implanteerbare neurotechnologieën naar verwachting relatief langzamer gaan dan die van de niet-invasieve technieken. Daarnaast wordt de termijn tot daadwerkelijke maatschappelijke impact ook beïnvloed door de regelgeving rondom implantaten. Een expert merkte echter op dat de vooruitgang van implanteerbare neurotechnologie lange tijd werd bemoeilijkt door een gebrek aan substantiële investeringen in het veld. Dat tij lijkt nu te keren. Wat dat betreft noemde een andere expert de ontwikkeling van *neural dust* (draadloze, implanteerbare micro-sensoren met een afmeting in de orde van mm's) relevant. Ook verwacht een expert dat het implanteerbare systeem van Neuralink (een bedrijf van Elon Musk) over ongeveer vijf jaar het niveau zal bereiken van de momenteel meest geavanceerde BCI-systemen. Op het moment dat het systeem van Neuralink aantoonbare relevantie heeft en daadwerkelijk klinisch ingezet wordt voor het oplossen van bepaalde medische problematiek, zal dit als katalysator voor verdere ontwikkelingen van implanteerbare neurotechnologieën kunnen werken.

Een aantal grote commerciële partijen (zoals Google, Facebook en Huawei) heeft aanzienlijke investeringen gedaan in neurowetenschappelijk onderzoek/neurotechnologie. Deze ontwikkeling

maakt gedurfde langetermijnprojecten mogelijk. Daarnaast waagt een aantal grote technologiebedrijven (bijv. Google, Microsoft en IBM) zich aan het gebruik van kunstmatige intelligentie in de gezondheidszorg (Lundervold & Lundervold, 2019). Het Engelse DeepMind probeert bijvoorbeeld op basis van 700 CT- en MRI-scans van patiënten weefsel van hersentumoren automatisch te classificeren (Baraniuk, 2016). DeepMind, dat eerder bekritiseerd is voor de manier waarop het omging met de medische data van 1,6 miljoen patiënten van Londense ziekenhuizen (Revell, 2017), is nu onderdeel van het Amerikaanse Google Health (Vaughan, 2019). X, een zusterbedrijf van Google, heeft zich daarnaast ten doel gesteld een eigen EEG-systeem te creëren, en met behulp van kunstmatige intelligentie klinisch relevante informatie uit datasets te destilleren, zoals het diagnosticeren van depressie (Felten, 2021).

(a) Mogelijke toekomstige doorontwikkelingen van de neurotechnologieën binnen de justitie- en veiligheidsdomeinen

(i) Opsporing en waarheidsvinding

FMRI voor het identificeren van misleiding

Zoals in hoofdstuk 4 beschreven, wordt hard gewerkt aan het technisch optimaliseren van MRI-scanners en het ontwikkelen van *best practices* voor het analyseren van fMRI-scans (Smith, 2012). Ook Nederland en Europa doen aan deze ontwikkelingen mee. Zo staat sinds kort een van de twee werkende MRI-scanners met een veldsterkte met 9 Tesla in Maastricht. Ook zijn er in Parijs onlangs voor het eerst beelden gemaakt met een 11 Tesla-scanner (Gaubert, 2021). Met deze veldsterktes wordt het op korte termijn mogelijk om de hersenen in groter detail te bestuderen.

De technische ontwikkelingen staan echter los van de methodologische problemen waar leugendetectie op basis van hersensignalen, met name gebaseerd op fMRI, voor staat. Ook is de vertaalslag van het gebruik van hersensignalen voor leugendetectie van een onderzoeksomgeving naar betrouwbare werking in de praktijk (nog) niet gemaakt. La Tona et al. (2020) tonen dat er nog geen studies zijn die de bewijskracht van fMRI-leugendetectie in de praktijk beoordelen. De auteurs stellen dat fMRI-leugendetectie momenteel de benodigde accuratesse, specificiteit en ecologische validiteit mist om betrouwbaar in een forensische setting toegepast te kunnen worden.

EEG-P300 voor het identificeren van daderkennis

EEG-P300 lijkt een veelbelovende techniek om vast te stellen of een verdachte over daderkennis beschikt. Zoals in hoofdstuk 5 beschreven, is het wel van groot belang het onderzoek correct op te zetten en goed stimulusmateriaal te creëren, zodat de mogelijkheden om *countermeasures* te nemen minimaal is en de resultaten eenduidig geïnterpreteerd kunnen worden. Verder moeten de resultaten van het onderzoek op een correcte manier gepresenteerd worden, waarbij ook de beperkingen van de methode in acht wordt genomen. Toekomstig neurobiologisch onderzoek zal zich onder andere richten op het verder bestuderen van de P300-respons en het in kaart brengen van de verschillende zaken die invloed op het signaal kunnen hebben, zoals de opzet van de taak, contextuele informatie en individuele verschillen tussen proefpersonen (Leue & Beauducel, 2019).

Neuroimaging voor het vaststellen van neurologische aandoeningen

Neuroimaging-gegevens worden in toenemende mate toegepast in de rechtszaal. De Kogel & Westgeest (2015) lieten zien dat er in de periode van 2009-2012 een verdrievoudiging is van het aantal rechtsvragen op rechtspraak.nl waarbij neurotechnologieën (in dit onderzoek: CT-, EEG-, MRI- of PET-scans) werden gebruikt, ten opzichte van de periode 2000-2003 (gemiddeld 1 op de 1000 in 2000-2003

versus gemiddeld 3 op de 1000 in 2009-2012). Tussen de periode 2000 en 2009 blijken er iets meer hersenscans gemaakt te zijn in het Pieter Baan Centrum; dit waren voornamelijk MRI-scans (Harmsel & Molendijk, 2016). Op dit moment wordt bij ongeveer een op de vijf onderzochten in het Pieter Baan Centrum een hersenscan gemaakt (Kempes, 2019; Meynen, 2020). De in hoofdstuk 4 beschreven ontwikkelingen (technologische verbeteringen in de neurotechnologieën en toegenomen afstemming tussen verschillende medische centra) zullen er waarschijnlijk voor zorgen dat deze stijging doorzet op de korte en lange termijn. Belangrijk om te benadrukken is dat relevante diagnoses momenteel gesteld worden op basis van meerdere maten/gegevens, en niet op basis van een hersenscan alleen.

(ii) Risicotaxatie

Neurologische markers voor het inschatten van recidiverisico

Om de associaties tussen biologische maten en ziektebeelden te versterken, zullen volgens geïnterviewde experts MRI-gegevens steeds vaker worden toegevoegd aan andere maten, zoals genetische informatie en cognitieve tests. Met behulp van kunstmatige intelligentie kunnen dan sterkere verbanden tussen biologische informatie en ziektebeelden aangetoond worden (Woo et al., 2017). Een expert opperde dat het aannemelijk is dat het diagnosticeren van psychiatrische aandoeningen in toenemende mate met computerondersteuning zal gebeuren. Een belangrijke waarschuwing van een expert hierbij is dat de data die gebruikt wordt om de algoritmen te trainen representatief moet zijn voor de context waarbinnen ze toegepast worden – alleen dan kan ingeschat worden hoe het algoritme zich zal gedragen. De expert vergeleek dit met vaccinontwikkeling: het is niet verstandig een vaccin dat alleen getest is op volwassenen ook direct aan kinderen te geven.

Waarschijnlijk zullen de neurologische markers voor het inschatten van recidiverisico meer voorspellende waarde krijgen, niet alleen door het combineren van verschillende maten, maar ook door verdere technologische ontwikkeling van de neurotechnologieën en verbeterd inzicht in hersenprocessen. Daarmee zouden neurotechnologieën wellicht al over een jaar of 5-10 een rol kunnen gaan spelen voor het daadwerkelijk inschatten van recidiverisico.

(iii) Interventie

Hersenstimulatie binnen de forensische psychiatrie

Zoals in hoofdstuk 4 en 5 beschreven, wordt actief onderzoek gedaan naar het toepassen van niet-invasieve (rTMS, tDCS) en invasieve (DBS) hersenstimulatie voor psychiatrische of forensische doeleinden. Meta-analyses naar het gebruik van hersenstimulatie binnen de behandeling van verslaving (Luigjes et al., 2019), chronische pijn (O'Connell et al., 2018) en eetstoornissen (Duriez et al., 2020) laten zien dat de effecten niet eenduidig zijn, en dat er meer gerandomiseerde klinische studies nodig zijn om de effecten van stimulatie met zekerheid vast te stellen.

Wij verwachten dat er binnen 5 jaar meer zekerheid is over de effecten van gevestigde stimulatietechnieken (rTMS, tDCS, DBS) voor psychiatrische en voor sommige forensische toepassingen. De ontwikkeling van zelfstandig te gebruiken TMS- en tDCS-systemen zal naar verwachting doorgaan en daardoor zal niet-invasieve stimulatie vaker buiten het ziekenhuis of laboratorium uit te voeren zijn, in beginsel ook in een forensische setting. Dit betekent dat er binnen 5 jaar waarschijnlijk de eerste mogelijkheden kunnen zijn om rTMS of tDCS als behandeling aan een forensische populatie aan te bieden, bijvoorbeeld als aanvulling op of vervanging van psychofarmaca.

De technologische ontwikkelingen rondom DBS zullen ervoor zorgen dat de implantatieprocedure minder risico met zich mee gaat dragen. Samen met de verwachte consolidatie van het inzicht in de effecten van stimulatie, zal dit er waarschijnlijk toe leiden dat DBS op langere termijn (5-15 jaar) in een bredere populatie patiënten toegepast kan worden. Een aanpak van DBS die perspectief biedt is het context-gebonden stimuleren van de hersenen. Bij recent onderzoek werden elektroden op meerdere plekken in de hersenen geïmplanteerd bij een patiënt met depressie en werd gevonden dat de reactie op de stimulatie sterk afhing van de context en de staat waarin de patiënt verkeerde (Scangos et al., 2021). Ook werd door de experts geopperd dat niet-invasieve stimulatie potentieel gebruikt kan worden om patiënten te selecteren die wellicht baat hebben bij het implanteren van elektroden. Dit zou het gebruik van DBS verder kunnen verbeteren.

TFUS staat nog in kinderschoenen, maar we verwachten dat de komende 5 jaar werk gemaakt zal worden van het vinden van de optimale manier van stimuleren in menselijke proefpersonen. TFUS is spatieel specifieker dan TMS of tDCS, zeker in diepere lagen van de hersenen. Omdat TFUS niet-invasief is, zijn er daarnaast aanzienlijk minder risico's bij het gebruik van TFUS dan bij DBS. Op langere termijn zal TFUS daardoor misschien gebruikt kunnen worden als niet-invasief alternatief voor DBS.

(b) De ontwikkeling van nieuwe neurotechnologieën

Naast de beschreven technieken hebben, meer recent, volledig nieuwe concepten en technologieën het daglicht gezien. Voor de volledigheid beschrijven we hier 'Focused ultrasound imaging' en 'Twee-foton-microscopie' en 'optogenetica', en merken daarbij op dat de relevantie van deze technieken voor het strafrecht vooralsnog niet duidelijk is.

(i) Focused ultrasound imaging

Een aantal experts noemt specifiek de ontwikkeling van focused ultra sound imaging (fUSI) zeer relevant – er wordt verwacht dat fUSI veel bij kan dragen aan neurowetenschappelijk onderzoek (Bercoff et al., 2011; Macé et al., 2011). Zoals hierboven besproken, zijn metingen met traditionele *Doppler imaging* relatief langzaam (50 beelden per seconde) en bevatten ze relatief veel ruis. Met fUSI kunnen duizenden opnamen per seconde gemaakt worden. In combinatie met de huidige toegenomen rekenkracht is het daarom nu mogelijk om de veranderingen in bloedstroom als gevolg van neurale activiteit met fUSI in beeld te brengen (Rabut et al., 2020; Tanter & Fink, 2014). De exacte relatie tussen het fUSI-signaal en neurale activiteit wordt nog verder onderzocht (Rabut et al., 2020).

Het is belangrijk om te weten dat de hoogfrequente fUSI geluidsgolven gedempt worden door bot (Pinton et al., 2012). Bij mensen is fUSI daarom nog slechts toegepast om hersenactiviteit via de fontanellen (de openingen tussen delen van de schedel) van pasgeborenen te monitoren (Demene et al., 2017) of via een luikje in de schedel, tijdens een operatie (Imbault et al., 2017; Soloukey et al., 2019). Ook is fUSI, ondanks de grote nauwkeurigheid, nog altijd een indirecte maat van neurale activiteit, en is de snelheid van de meting intrinsiek beperkt door de tijd die het kost voor de bloedstroom om te reageren op een toe- of afname in hersenactiviteit.

Binnen fUSI is er nog veel ruimte voor verbetering (Rabut et al., 2020). Rabut et al. (2020) benoemen dat veel onderzoek gedaan wordt naar het driedimensionaal in beeld brengen van het complete brein, naar het gebruik van contrastmiddel om de sensitiviteit van de metingen te verhogen en zo metingen door de schedel heen mogelijk te maken en naar de ontwikkeling van chronische fUSI-BCIs. Inderdaad

is zeer recent de mogelijkheid om fUSI te gebruiken voor BCI aangetoond bij apen, waarbij de meetapparatuur vastgeschroefd werd op het hoofd en metingen werden verkregen via een opening in de schedel (Norman et al., 2021). In deze studie naar het plannen van bewegingen, werd aangetoond dat het mogelijk was om de intentie van de beweging af te leiden uit het fUSI-signaal, voordat deze daadwerkelijk uitgevoerd werd, met meer dan 85% accuraatheid.

(ii) Twee-foton-microscopie en optogenetica

Er wordt een aantal veelbelovende technieken ontwikkeld die werken op basis van licht. Zo gebruikt twee-foton-microscopie nabij-infrarood licht om bij levende proefdieren tot op het niveau van individuele neuronen beelden te maken (Zipfel et al., 2003). Ook is het mogelijk om neuronen genetisch te modificeren. Op deze manier kan de neuronale activiteit beïnvloed worden door een lichtstraal, met een precisie van milliseconden. Deze techniek heet optogenetica en wordt in levende proefdieren toegepast (Adamantidis et al., 2007; Banghart et al., 2004). Zo kan optogenetica bijvoorbeeld worden toegepast binnen een gesloten systeem, waarbij de hoeveelheid stimulatie automatisch aangepast wordt aan signalen gemeten vanuit het neuron zelf (Grosenick et al., 2015). Dit zou een bijzonder relevante manier kunnen zijn om oorzakelijke verbanden in de werking van neuronen te bestuderen.

Twee-foton microscopie is gebruikt om een monster van menselijk hersentumorweefsel van gezond weefsel te onderscheiden (Poulon et al., 2018). De auteurs hopen dat hun methode binnenkort ook bij levende mensen toegepast kan worden. Ook is in een *proof-of-concept* studie gedemonstreerd dat twee-foton-microscopie gecombineerd kan worden met fMRI met een zeer hoge veldsterkte (16,4 Tesla) om zeer nauwkeurige beelden te maken van de hersenen van een levende muis (Cui et al., 2017). De auteurs beweren dat het systeem ook gebruikt kan worden met andere veldsterktes en daarmee ook toegepast zou kunnen worden onderzoek met mensen.

Optogenetica is recent voor het eerst toegepast in een menselijke klinische setting. Een patiënt werd blind door een dysfunctionele retina (een lichtgevoelig laagje achterin het oog). Optogenetica is toegepast om de cellen in retina weer lichtgevoelig te maken. Zo kan de patiënt, met behulp van een speciale bril, weer gedeeltelijk zien (Sahel et al., 2021). In de toekomst zou de mogelijkheid tot zeer precieze stimulatie van optogenetica gebruikt kunnen worden om DBS te verbeteren (Delbeke et al., 2017).

7. Besluit sectie 1

In dit deel van het onderzoek stonden de technologieën en hun specifieke eigenschappen, werking, bijwerkingen en (on)mogelijkheden centraal. Hierbij werd breed geïnventariseerd welke potentieel relevante neurotechnieken er zijn en werd vervolgens gefocust op een aantal van deze technieken die het meest van belang zijn/lijken voor het strafrecht, zoals EEG-P300 voor het opsporen van misleiding en fMRI voor leugendetectie. Verder hebben we naar de toekomst gekeken, en een inschatting gemaakt van de toekomstige technologische ontwikkelingen – met alle slagen om de arm die daarbij passen. De reden om dit te doen was dat de opdracht van het WODC niet alleen voortkomt uit de vraag wat 'vandaag' mogelijk is, maar ook wat – in het licht van de (veronderstelde) ontwikkelingen in de neurowetenschappen – 'morgen' en 'overmorgen' mogelijk zou kunnen zijn. Immers, het gebruik van neurotechnologieën is mogelijk ingrijpend, je wilt daarop goed voorbereid zijn in termen van kansen en risico's. Nu deze inventarisatie gemaakt is, volgt sectie 2 over de juridische, ethische en maatschappelijke aspecten van het gebruik van neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein. Hierbij gaat het vanzelfsprekend ook om dezelfde technologieën als beschreven in sectie 1, maar duidelijk in minder detail. Zeker niet alle in het voorgaande besproken technieken zullen in sectie 2 expliciet aan bod komen, omdat sectie 2 meer in het algemeen vanuit normatieve kaders naar mogelijkheden en risico’s kijkt. Zo hoeft het vanuit het recht op respect voor privacy niet zoveel uit te maken via welke techniek nu precies informatie uit het brein wordt gehaald – het heeft dan ook geen zin om afzonderlijk bij alle (potentiële) *neuroimaging*-technieken stil te staan die dag mogelijk maken. Met andere woorden, vanaf nu staan de normatieve – juridische, ethische en maatschappelijke – kaders centraal.

Sectie 2. Neurotechnologie in de strafrechtspleging: recht, ethiek en maatschappij

8. Opsporing en waarheidsvinding

(a) Neurotechnologie in het opsporingsonderzoek

De kennis over de structuren en de werking van de hersenen is de afgelopen decennia sterk toegenomen, mede dankzij technologische ontwikkelingen die het mogelijk maken de hersenen in levende en actieve toestand goed in beeld te brengen. Deze ontwikkeling is al, en kan in de toekomst nog meer, van belang zijn voor het straf(proces)recht (De Kogel & Westgeest, 2013; Ligthart et al., 2017; Ligthart et al., 2021). Neurotechnologieën kunnen bijvoorbeeld behulpzaam zijn bij het bewijzen van subjectieve bestanddelen (Rechtbank Zutphen 9 november 2007, ECLI:NL:RBZUT:2007:BB7529 en rechtbank 's-Hertogenbosch 5 september 2007, ECLI:NL:RBSHE:2007:BB2861) – dit zijn de onderdelen van een strafbaar feit die bewezen moeten worden voor een veroordeling die de psyche van de verdachte betreffen, zoals *opzettelijk* handelen – en bij de beoordeling van de (on)toerekeningsvatbaarheid van de verdachte (Hof 's-Gravenhage 22 februari 2010, ECLI:NL:GHSGR:2010:BL7187). Verder wordt onderzoek gedaan naar onder andere neurogeheugen- en neuroleugendetectie met fMRI en EEG (zoals beschreven in het technische deel).

Deze tak van de wetenschap is interessant voor het straf(proces)recht, onder andere in de opsporingsfase. Neurogeheugen- en neuroleugendetectie kunnen in principe namelijk een belangrijke bijdrage leveren aan de waarheidsvinding. Ten behoeve van de beoordeling of een persoon schuldig is, is het vaststellen wat er daadwerkelijk heeft plaatsgevonden onontbeerlijk. Als daarvoor een 'kijkje' in het geheugen van de verdachte mogelijk zou zijn, dan levert dat zeer waardevolle informatie op. Het uitgangspunt is namelijk dat daders daderkennis in het geheugen hebben opgeslagen, terwijl onschuldige personen die informatie (in beginsel) niet hebben. Wat is voor de waarheidsvinding mooier dan die herinneringen direct te raadplegen zonder dat de persoon hoeft te spreken? En als de verdachte (of getuige) wel spreekt, dan kan de vaststelling van de waarheidsgetrouwheid met een neuroleugendetectie ook de waarheidsvinding kunnen versterken.

Dit gaat echter niet zonder (juridische) slag of stoot (Van Toor, 2017; Ligthart et al., 2021). Zo moet de verdachte *menswaardig* worden behandeld (artikel 3 EVRM), heeft hij het recht om te zwijgen en niet te worden gedwongen mee te werken aan zijn eigen veroordeling (artikel 6 EVRM) en het recht op respect voor zijn privéleven (artikel 8 EVRM). Het is de vraag of, en in hoeverre, nieuwe neurotechnologieën in lijn met deze mensenrechten kunnen worden toegepast. Zo kan een analogie worden getrokken met het downloaden van gegevens van een computer versus het halen van informatie uit een menselijk brein: 'degraderen' we hiermee niet het *menszijn*, in de zin van dat de mens zelfstandig en onafhankelijk beslissingen moet kunnen nemen over het delen van persoonlijke informatie? Wat betreft het zwijgrecht zijn er vergelijkbare overwegingen. Als de verdachte wordt gevraagd te reageren, kan hij er altijd voor kiezen niets te zeggen. De hersenen kunnen echter niet op verlangen van de verdachte stoppen met het reageren op stimuli. In dit hoofdstuk komen dit soort vragen aan bod ten behoeve van de beoordeling of neurotechnologieën in lijn met het geldige recht kunnen worden toegepast voor de *waarheidsvinding*. De drie toepassingen van neurotechnologie die uit het technische gedeelte volgen, staan daarbij centraal: te weten: 1) het gebruik van fMRI voor het identificeren van misleiding, 2) het gebruik van de P300 uit het EEG-signaal als middel om daderkennis te identificeren en 3) neuroimaging voor het vaststellen van neurologische aandoeningen. Niet telkens wordt specifiek op een techniek of methode ingegaan, maar zij worden gegroepeerd behandeld omdat de inbreuk op mensenrechten van verschillende technieken of methoden gelijk is.

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Ten eerste wordt kort stil gestaan bij het nationaalrechtelijk kader[1]. Op basis van het Wetboek van Strafvordering (hierna: Sv) moeten alle procesrechtelijke handelingen, waaronder de inzet van opsporingsmethoden vallen, worden uitgevoerd op basis van een formeel-wettelijke basis. Artikel 1 Sv bepaalt dat strafvorderlijke handelingen alleen plaatsvinden op de wijze zoals geregeld bij wet. Dit wordt het legaliteitsbeginsel genoemd. Verder worden opsporingsmethoden op hun rechtmatigheid getoetst: nationale wetten in formele zin mogen niet aan de Grondwet, maar wel in het licht van internationale verdragen worden beoordeeld. Voor Nederland vervult het Europese Verdrag voor de Rechten van de Mens (hierna: EVRM) meestal de rol van toetsingskader voor de rechtmatigheid van allerlei overheidshandelingen. Daarom wordt, ten tweede, in dit hoofdstuk uitgebreid stilgestaan bij de drie belangrijkste mensenrechten voor de toetsing van opsporingsmethoden uit het EVRM. Achtereenvolgens komen het verbod van onmenselijke of vernederende behandeling; het recht op respect voor het privéleven en het recht op een eerlijk proces aan bod. De vrijheid van gedachte en geweten (artikel 9 EVRM) en de vrijheid van meningsuiting (artikel 10 EVRM) komen in dit onderzoek wel aan de orde in hoofdstuk 10, maar worden ook relevant geacht voor de normering van opsporingsbevoegdheden in de toekomst (Bublitz, 2014; Ligthart, 2021b, 114-196). Ligthart (2021b, p. 134) ziet vooral ruimte voor artikel 10 EVRM – ondanks dat hier weinig jurisprudentie over gewezen is (p. 146) –, omdat het Europees Hof voor de Rechten van de Mens (EHRM) meestal oordeelt dat '*obliging an individual to disclose simple facts in the context of a criminal procedure do not typically qualify as the disclosure of any 'thoughts' in the meaning of Article 9 ECHR*'. Tevens merkt hij op dat, '*regarding defendants in criminal proceedings, it is – to say the least – questionable whether the Court would actually consider complaints about coercive brain-reading under the head of Article 10 ECHR. In its case-law on Article 6 ECHR – concerning the privilege against self-incrimination – the Court has developed a comprehensive approach tailored to coercing defendants to produce information in criminal trials*' (Ligthart, 2021b, p. 147). Het ligt daarom voor de hand hier wel uitgebreid stil te staan bij artikel 6 EVRM, en de artikelen 9 en 10 EVRM, waarvan het belang naar huidig recht niet vaststaat, niet te bespreken.

De paragrafen hieronder over rechten uit het EVRM zijn allemaal hetzelfde opgebouwd. Eerst wordt uiteengezet wat het recht betekent en welke criteria worden gebruikt voor de toetsing van opsporingsmethoden. Vervolgens worden deze criteria toegepast op de drie in het technische gedeelte beschreven methoden, opdat kan worden geconcludeerd of en in welke mate de gedwongen toepassing van neurotechnologieën naar huidig recht[2] door de beugel kunnen. De focus ligt op gedwongen toepassing van de hier besproken methode, omdat vrijwillige toepassing van bepaalde methoden (in beginsel) geen mensenrechtenschending oplevert, als de persoon op correcte wijze afstand heeft gedaan van zijn rechten.[3] De hier besproken technieken kunnen natuurlijk ook op verzoek van een verdachte worden uitgevoerd, bijvoorbeeld om zijn of haar onschuld aan te tonen (zo bericht Van Toor (2017, p. 103) dat de P300 betrouwbaardere resultaten oplevert bij de vaststelling

[1] Zo als in de inleiding is uitgelegd, worden de grondrechten uit de Grondwet niet besproken.
[2] Zie voor een meer conceptuele, rechtsfilosofische toets Van Toor 2017.
[3] Ook aan een *waiver* van de uitoefening van grondrechten in een strafvorderlijk kader stelt het EHRM eisen (zie onder meer EHRM 17 juli 2007, 48666/99 (*Kucera* t. *Slowakije*), par. 199, 122; EHRM 28 juli 2009, 47709/99, par. (*Rachwalski & Ferenc* t. *Polen*), r.o. 432-433). De afstand moet onder meer *free and informed* zijn.

van *afwezigheid* van daderkennis in vergelijking met de vaststelling van *aanwezigheid* van daderkennis).

(b) Nationaalrechtelijk kader opsporingsmethoden

Het Wetboek van Strafvordering stelt zelf enige vereisten aan de uitvoering van opsporingsmethoden. Twee daarvan, die in algemene zin van belang zijn bij de inzet van opsporingsmethoden, worden in deze paragraaf behandeld, te weten het in artikel 1 Sv opgenomen legaliteitsbeginsel en de verbaliseringsplicht.

Volgens artikel 1 Sv moeten alle strafvorderlijke handelingen, waaronder de uitvoering van opsporingsmethoden vallen, worden gebaseerd op en uitgevoerd in overeenstemming met een wettelijke bepaling. Dit wordt het (strafvorderlijke) legaliteitsbeginsel genoemd. Hieruit volgen twee vereisten voor de Nederlandse strafvordering, te weten (i) een kwaliteitsvereiste en (ii) een uitvoeringsvereiste.

Het eerste legaliteitsvereiste behelst een opdracht aan de wetgever. Hij moet wettelijke bepalingen creëren die de grondslag vormen voor de handelingen van de uitvoerende macht. De zwaardere procedure om een wet in formele zin tot stand te laten komen – waarbij de regering en de Staten-Generaal gezamenlijk tot wet bepalen, in plaats van bijvoorbeeld een ministeriële regeling die wordt gemaakt door één of meerdere ministers –, zorgt voor een bepaalde kwaliteitsgarantie. De discussie die plaatsvindt tijdens plenaire behandelingen van wetten zou moeten leiden tot het niet lichtzinnig creëren van (vergaande) strafvorderlijke bevoegdheden die een inbreuk maken op grondrechten (Corstens, Borgers & Kooijmans, 2021, p. 23 e.v.). Daarnaast is het de gedachte dat de belangenafweging gemaakt door de regering en Staten-Generaal tezamen hoogstwaarschijnlijk niet tot vrijbrieven of blanco cheques leidt. In het toekennen van (onbegrensde) macht schuilt het gevaar van grove vrijheidsbeperking van verdachten en derden en eventueel ook van machtsmisbruik (door willekeurig om te gaan met de bevoegdheid) (Corstens, Borgers & Kooijmans, 2021, p. 23 e.v.). Het is dus van belang dat de formele wetgever begrensde bevoegdheden toekent aan de uitvoerende macht, in dit geval opsporingsautoriteiten.

Het tweede legaliteitsvereiste is gericht op de uitvoerende macht. Nadat de wetgevende macht bevoegdheden voor de uitvoerende macht heeft neergelegd in wetten in formele zin, vereist het legaliteitsbeginsel dat de uitvoerende macht de bevoegdheden uitvoert in overeenstemming met de wet (en het recht). Door Cleiren (1992; 2015) wordt dit vereiste de '*gebondenheid aan de wet*' genoemd. Tezamen betekent dit dat opsporingsmethoden alleen mogen worden uitgevoerd als een wettelijke grondslag bestaat, en moet de methode worden uitgevoerd zoals in de wet (en eventuele uitvoeringsbesluiten) is bepaald.

Op dit moment bestaat geen wettelijke grondslag voor de uitvoering van fMRI en EEG voor neuroleugen- of neurogeheugendetectie, terwijl dat, vanwege de meer dan beperkte inbreuk die wordt gemaakt door de inzet van die methoden wel noodzakelijk is. Wanneer geen wettelijke bevoegdheden bestaan, dan is het noodzakelijk dat de wetgever deze lacune dicht (wanneer sprake is van een meer dan beperkte inbreuk op grondrechten – dat is het geval bij de hier besproken neurotechnologische opsporing – of indien gevaar voor de integriteit van de opsporing bestaat) voordat de uitvoerende macht met deze methoden aan de slag gaat.

(c) Neurotechnologische opsporing en het EVRM

Naast deze eerste twee vereisten die volgen uit het nationale recht dient de toepassing van neurotechnologie te voldoen aan internationale mensenrechten. In de Nederlandse rechtsorde wordt daarbij vaak getoetst aan de mensenrechten uit het EVRM, zo ook in dit onderzoek. Het eerste mensenrecht waarin de neurotechnologische opsporing wordt getoetst, is het respect voor menselijke waardigheid en het folterverbod en het verbod van onmenselijke of vernederende behandeling.

(i) Neurotechnologische opsporing in het licht van het respect voor menselijke waardigheid en het folterverbod en het verbod van onmenselijke of vernederende behandeling

Ondanks dat de notie menselijke waardigheid in de Nederlandse regelgeving en het EVRM niet expliciet voorkomt, is het wereldwijd een belangrijk concept. De Baets stelt in 2007 (p. 72, 76) vast dat in ongeveer 75 procent van de door hem bekeken constituties (N=193) het begrip (menselijke of persoonlijke) waardigheid expliciet voorkomt. In de vijf daaropvolgende jaren is dit percentage gestegen tot 84 procent (Shulztiner & Carmi 2014). Daarnaast speelt het in de constituties en verdragen waarin het niet expliciet voorkomt een rol bij de uitleg van grondrechten.

De Nederlandse Grondwet en het EVRM behoren tot de (hele kleine) minderheid van constituties wereldwijd en verdragen waarin de menselijke waardigheid niet expliciet voorkomt. Alhoewel de notie menselijke waardigheid in het EVRM dus ontbreekt, wordt de menselijke waardigheid in de rechtspraak van EHRM wel naar voren wordt gebracht als *richtinggevend principe* bij de interpretatie van de bescherming die de mensenrechten bieden (onder andere EHRM (GK) 10 april 2007, 6339/05 (*Evans* t. *het Verenigd Koninkrijk*) par. 89 en EHRM 5 juli 2011, 41588/05 (*Avram e.a.* t. *Moldavië* par. 36). Dit is vooral zo bij artikel 3 EVRM; het folterverbod en het verbod op onmenselijke en vernederende behandelingen. Een vernederende behandeling is een mensonwaardige behandeling, omdat daarmee het menszijn wordt genegeerd en de mens als object wordt behandeld. Omdat de menselijke waardigheid veelvuldig wordt gebruikt als richtinggevend principe bij de interpretatie van artikel 3 EVRM worden in dit hoofdstuk zowel het concept menselijke waardigheid als het verbod op vernederende en onmenselijke behandelingen tezamen behandeld.

Vernederende behandelingen vormen de laagste gradatie van mogelijke schendingen van artikel 3 EVRM, en zijn daarom, als ondergrens, voor onderhavig onderzoek van belang. Het gaat daarbij om de vraag wanneer deze ondergrens is overschreden – dus wanneer sprake is van *vernedering*, van een *mensonwaardige* behandeling – en vervolgens of gedwongen toepassing van neurotechnologische opsporing deze grens overschrijdt en als vernederend is te bestempelen. Hieronder wordt aan de hand van de rechtspraak van het EHRM kort toegelicht in welke situaties sprake is van een schending van artikel 3 EVRM op het gebied van het verbod van vernederende behandelingen.

Zaken waarin het EHRM de menselijke waardigheid gebruikt als richtinggevend principe bij handelingen verricht in de opsporingsfase zijn grofweg in drie categorieën te onderscheiden: klachten over *detentieomstandigheden* (zie onder andere EHRM 22 december 2008, 46468/06 (*Aleksanyan* t. *Rusland*) ; EHRM 24 oktober 2013, 5288/08 (*Lapsov* t. *Rusland*); EHRM 31 oktober 2013, 46282/07 (*Grossman* t. *Rusland*); *onnodig geweld* tegen personen van wie de vrijheid wordt beperkt (zie onder andere EHRM 23 juli 2013, 6343/11 (*Gorea* t. *Moldavië*); EHRM 3 oktober 2013, 47137/07) (*Tahirova* t. A*zerbaidjan*); of die van hun vrijheid zijn beroofd (zie onder andere EHRM 3 mei 2012, 23880/05

(*Salikhov* t. *Rusland*); EHRM 18 oktober 2012, 37679/08 (*Bures* t. *Tsjechië*); EHRM 25 juli 2013, 32133/11 (*Kummer* t. *Tsjechië*)) en *andere vernederende behandelingen* (zie voor een overzicht van rechtspraak op dit terrein EHRM 7 juli 2011, 39229/03 (*Fyodorov & Fyodorova* vs. *Oekraïne*), par. 60). Het zijn vooral de tweede en derde categorie die voor dit hoofdstuk van belang zijn. De tweede categorie spreekt voor zich: onnodig geweld tegen personen die zich in de macht van overheidsfunctionarissen bevinden, levert een aantasting van de menselijke waardigheid op. Als voorbeeld kan de zaak *Kummer* (EHRM 3 oktober 2013, 47137/07) dienen. Daarin werd de (onder invloed verkerende en agressieve) verdachte met een handboei vastgemaakt aan een ijzeren ring in de muur en met zijn andere hand aan de tegenoverliggende muur. Daarnaast werden zijn benen met een leren riem vastgebonden. '*The Court considers that such a situation must have aroused in the applicant feelings of fear, anguish and inferiority and was an attack on his dignity*' (par. 69). Het EHRM categoriseerde deze behandeling als een vernederende behandeling: de klager was slechts agressief tegen anderen en leek niet gevaarlijk voor zichzelf, dus enkele opsluiting zou ook voldoende zijn geweest om de agressie beteugelen. Het vastketenen was derhalve onnodige, ongepaste geweldsuitoefening.

Naast de zaken waarin onnodig geweld wordt gebruikt, is de laatste categorie van artikel 3 EVRM schendingen waarbij het EHRM de menselijke waardigheid aangetast acht een restcategorie. In *Fyodorov & Fyodorova* geeft het EHRM een overzicht van door hem behandelde klachten die in deze categorie vallen (EHRM 7 juli 2011, 39229/03, par. 60). In het algemeen kan de conclusie worden getrokken dat het gaat om behandelingen zonder (processueel) doel, maar alleen om leed toe te voegen of te stigmatiseren. Hierbij kan gedacht worden aan een vertoning in het publiek met handboeien om zodat het publiek de verdachte op die manier kan waarnemen, het onderzoek ter terechtzitting bijwonen in een ijzeren kooi zonder '*sufficient security justifications*',[4] onderzoek in het lichaam zonder wettelijk doel en het scheren van hoofdhaar als disciplinaire straf. Deze handelingen hebben geen processueel doel: het beperken van de bewegingsvrijheid van een verdachte is bijvoorbeeld gerechtvaardigd als daarmee wordt voorkomen dat hij een gevaar voor zichzelf of anderen oplevert, maar niet om te stigmatiseren.

Uit deze korte beschrijving van zaken (zie uitvoerig Van Toor 2017, hoofdstuk 5) die onder de vernederende behandeling worden geschaard, zijn twee aspecten te distilleren die van belang zijn bij de beoordeling of sprake is van een vernedering: het gaat om een veiligheidsaspect (het gebruik van onnodig geweld) en een gelijkheids- of objectiviteitsaspect (het gebruik van (vergaande) maatregelen zonder legitiem doel). Op beide aspecten kunnen gevoelens van onmacht, angst en inferioriteit worden opgeroepen, en daarmee kunnen onnodig geweld en ongelijke behandelingen als vernederende behandelingen worden gecategoriseerd. Hiermee kunnen gevoelens van angst en inferioriteit worden opgewekt omdat de verdachte zich in de macht van de overheid bevindt en te maken krijgt met (gewelddadige) handelingen zonder doel.

---

[4] Zie daarover in het bijzonder EHRM (GK) 17 juli 2014, appl. no. 32541/08 & 43441/08 (*Svinarenko & Slyadnev* t. *Rusland*), in par. 138: '*Regardless of the concrete circumstances in the present case, the Court reiterates that the very essence of the Convention is respect for human dignity and that the object and purpose of the Convention as an instrument for the protection of individual human beings require that its provisions be interpreted and applied so as to make its safeguards practical and effective. It is therefore of the view that holding a person in a metal cage during a trial constitutes in itself – having regard to its objectively degrading nature which is incompatible with the standards of civilised behaviour that are the hallmark of a democratic society – an affront to human dignity in breach of Article 3.*'

Geweld is een duidelijke aantasting van de lichamelijke veiligheid. Als het geweld niet strikt noodzakelijk is, reduceert dat de verdachte tot een object. Bij bepaalde handelingen, zoals het met grof geweld toedienen van een braakmiddel zonder voldoende medische waarborgen (EHRM (GK) 11 juli 2006, *NJ* 2007, 226, m.nt. Sch), is de menselijke maat volledig uit beeld verdwenen. Overigens is niet alleen fysiek geweld problematisch. Ook psychisch geweld kan gevoelens van angst en inferioriteit oproepen. Het dreigen met geweld (dat als foltering zou kunnen worden gecategoriseerd) om de verblijfplaats van een ontvoerde jongen te achterhalen (EHRM (GK) 1 juni 2010, NJ 2010, 628, m.nt. YB) is geen fysiek geweld, maar kan natuurlijk wel gevoelens van onmacht, angst en inferioriteit oproepen waardoor de verdachte zich niet als subject maar object voelt behandeld.

Ook geldt voor het opsporingsonderzoek dat verdachten niet onderscheidend op grond van bijvoorbeeld huidskleur, religie, etniciteit of andere niet-geïndividualiseerde kenmerken mogen worden behandeld. Opsporingsmethoden dienen te worden toegepast ongeacht deze kenmerken, maar op grond van een graad van verdenking die individualiseerbaar, concretiseerbaar en objectiveerbaar is. Als dat de grondslag vormt voor strafvorderlijk optreden, dan worden gelijke gevallen gelijk behandeld.

Dit betekent dat moet worden getoetst of door de toepassing van neurotechnologische opsporingsmethoden gevoelens van angst of inferioriteit worden opgeroepen, doordat sprake is van onnodig geweld of ongeoorloofde ongelijke behandeling. Van een algeheel verbod van gedwongen neurotechnologische opsporing op basis dit criterium onder artikel 3 EVRM kan geen sprake zijn (vgl. Ligthart, 2019a, p. 97-98). In essentie zijn de toepassing van EEG en fMRI/*neuroimaging* (hierna 'hersenscan') in de opsporingsfase in beginsel niet in strijd met het respect voor menselijke waardigheid en levert het geen vernederende (of onmenselijke) behandeling op. De verdachte mag bijvoorbeeld voor de toepassing van een EEG waarvoor de bewegingsvrijheid volledig moet worden ontnomen zodanig worden gefixeerd dat daarmee betrouwbare afname van de methode mogelijk is. Bij ernstig tegenstribbelende verdachten zou het kunnen zijn dat het onmogelijk is om een hersenscan of EEG af te nemen. Beide methoden vereisen namelijk zo min mogelijk lichaamsbeweging voor een betrouwbare afname, terwijl fixatie van een tegenstribbelende verdachte waarschijnlijk niet zonder slag of stoot plaats kan vinden[5]. Daarnaast geldt dat een fMRI en EEG ook cognitieve medewerking vereisen: het denken aan allerlei dingen die irrelevant voor de afname zijn, kunnen de resultaten behoorlijk vertroebelen (Rosenfeld et al., 2004).

Daarnaast is het van belang dat de toepassing van de methoden gebaseerd wordt op een individualiseerbare, concretiseerbare en objectiveerbare verdenking. Het is in strijd met artikel 3 EVRM om alle personen uit een bepaalde religieuze groepering of etnische minderheid aan een EEG ter identificatie te onderwerpen, omdat het idee leeft dat de verdachte in die populatie moet worden gevonden.

Tezamen betekent dit dat een duidelijk kader moet gecreëerd – en dat vereist het in de vorige paragraaf besproken artikel 1 Sv ook – onder welke omstandigheden een hersenscan of EEG mag worden toegepast. Daarbij is vereist dat de uitvoering plaatsvindt met een *strafvorderlijk* doel. Verder

[5] Overigens loopt de tegenstribbelende verdachte natuurlijk het risico op het begaan van een strafbaar feit door het feit dat hij de uitvoering tegenwerkt. Denk bijvoorbeeld aan het delict wederspannigheid of het weigeren van een ambtelijk bevel.

dient de toepassing alleen plaats te vinden om basis van individualiseerbare, concretiseerbare en objectiveerbare feiten. Ook is het van belang dat, bijvoorbeeld bij Algemene Maatregel van Bestuur (zoals dat ook is gebeurt voor de afname van lichaamsmateriaal voor DNA-onderzoek), nadere regels worden opgesteld op welke wijze een expert (arts; neuropsycholoog) betrokken is bij de afname, voorafgaande medische controle en medisch toezicht tijdens de uitvoering, in hoeverre de verdachte wordt geïnformeerd over de toepassing van een neurotechnologische opsporingshandeling en op welke wijze een tegenstribbelde verdachte toch kan worden onderworpen aan een hersenscan of EEG.

(ii) Neurotechnologische opsporing in het licht van het recht op respect voor het privéleven

Naast artikel 3 EVRM biedt ook artikel 8 EVRM, waarin het recht op respect voor het privéleven is geregeld, de (verdachte) burger bescherming tegen ongeoorloofd overheidsingrijpen. Waar artikel 3 EVRM echter een absoluut recht betreft – dit is een recht waarop geen uitzondering mogelijk is –, is artikel 8 EVRM een relatief recht. In de strafvorderlijke opsporingspraktijk zijn daarom de rechtvaardigingscriteria voor inbreuken op artikel 8 lid 1 EVRM belangrijker geworden dan de vraag óf een overheidshandeling een inbreuk maakt op het recht op respect op het privéleven (Taylor Parkins - Ozephius et al., 2021). Het staat namelijk meestal niet ter discussie *of* een strafvorderlijke opsporing een inbreuk maakt op iemands privacy, maar *in welke mate* de privacy wordt beperkt. Dit uitgangspunt – in beginsel maken opsporingshandelingen inbreuk op de privacy van de verdachte of een derde – maakt duidelijk dat derhalve de criteria waaronder een inbreuk op het recht op respect voor het privéleven mag worden gemaakt van groter belang zijn geworden dan het recht zelf. Voor opsporingshandelingen die een inbreuk maken op de lichamelijke integriteit als onderdeel van het recht op respect voor het privéleven (Harris et al. 2009; zie bijv. EHRM (GK) 4 december 2008, *NJCM Bulletin* 2009, 4, m.nt. Van der Staak) zoals een hersenscan en EEG maar ook afname van lichaamsmateriaal voor DNA-onderzoek, betekent dit dat vooral moet worden gekeken naar de rechtvaardigingscriteria uit artikel 8 lid 2 EVRM voor een rechtmatige toepassing. Het is namelijk evident dat lichamelijk onderzoek een inbreuk maakt op iemands privacy.

Een inbreuk op het recht op respect voor het privéleven is legitiem wanneer voldaan is aan de volgende criteria: de inbreuk moet 1) in overeenstemming met een wettelijke bepaling plaatsvinden; 2) een legitiem doel nastreven en; 3) noodzakelijk zijn in een democratische samenleving. Het criterium 'in overeenstemming met een wettelijke bepaling' kan worden onderverdeeld in drie subcriteria. De inbreuk moet ten eerste op een wettelijke bepaling zijn gebaseerd (*legal basis*) (zie bijvoorbeeld EHRM (GK) 10 mei 2001, 25781/95 (*Husayn* t. *Polen*), par. 295). Dit houdt in dat er een wettelijke basis moet zijn waarop de op het recht op respect voor privéleven inbreukmakende handeling is gebaseerd (zie bijvoorbeeld EHRM 27 november 1992, 13441/87 (*Olsson* t. *Zweden (nr. 2*), par. 81; EHRM 12 mei 2000, 35394/97 (*Khan* t. *het Verenigd Koninkrijk*), par. 27; EHRM 5 november 2002, 48539/99 (*Allan* t. *het Verenigd Koninkrijk*), par. 36), en die bepaling moet voor grovere inbreuken *voldoende specifiek* zijn (Harris et al., 2009, p. 400). Ten tweede eist het EHRM dat de wettelijke bepaling van *voldoende kwaliteit* is (zie bijvoorbeeld EHRM (GK) 26 november 2013, 27853/09 (*X* t. *Letland*), par. 58). Het is derhalve in sommige omstandigheden onvoldoende *dat* een wettelijke grondslag bestaat. De wettelijke bepaling moet van voldoende kwaliteit zijn zodat daarmee wordt voorkomen dat arbitrair gebruik wordt gemaakt van de in de bepaling opgenomen bevoegdheid. Hiervoor is onder andere de *voorzienbaarheid* van de gedragingen van overheidsfunctionarissen op grond van de bepaling en *waarborgen* tegen willekeurig gedrag op basis van de bepaling belangrijk (Zie bijvoorbeeld EHRM 12

januari 2010, 4158/05 (*Gillan & Quinton* t. *het Verenigd Koninkrijk*), par. 77; EHRM 5 juni 2014, 33761/05 (*Tereshchenko* t. *Rusland*), par. 135).[6] Ten derde moet de inbreuk op het recht op respect voor het privéleven *in overeenkomst met* de nationale bepaling hebben plaatsgevonden (EHRM 18 april 2013, 19522/09 (*M.K.* t. *Frankrijk*), par. 29).

Bij het tweede criterium uit artikel 8 lid 2 EVRM wordt het doel van de inbreuk op het recht op respect voor het privéleven beoordeeld. De doelen die een inbreuk op het recht op privéleven rechtvaardigen zijn limitatief opgenomen in artikel 8 lid 2 EVRM, maar worden erg breed geïnterpreteerd. Het gaat onder andere om het belang van de nationale en openbare veiligheid en het voorkomen van wanordelijkheden en strafbare feiten. Onder het 'voorkomen van strafbare feiten' wordt ook het detecteren en opsporen (EHRM (GK) 3 april 2012, 42857/05 (*Van der Heijden* t. *Nederland*), par. 54) van strafbare feiten verstaan. Opsporingshandelingen die een inbreuk maken op het recht op respect voor het privéleven voldoen derhalve aan de eis van een legitiem doel.

Het derde criterium waaraan voldaan moet zijn om een inbreuk op het recht op respect voor het privéleven te rechtvaardigen, is dat de inbreuk noodzakelijk is in een democratische samenleving. Bij deze beoordeling komt het op het vinden van een *fair balance* tussen het doel dat wordt gediend en het individuele recht waarop een inbreuk wordt gemaakt. Deze redelijke belangenafweging loopt ook als een rode draad door het hele verdrag (EHRM 7 juli 1989, 14038/88 (*Soering* t. *het Verenigd Koninkrijk*), par. 89. Zie ook EHRM (GK) 12 mei 2005, 46221/99 (*Öcalan* t. *Turkije*), par. 88; en EHRM (GK) 27 mei 2008, 26565/05 (*N.* t. *het Verenigd Koninkrijk*), par. 44; en EHRM 21 juni 2011, 3052/96 (*Adamov* t. *Zwitserland*), par. 57). Bij de *fair balance*-toets beoordeelt het EHRM of lidstaten 1) binnen de *margin of appreciation* om beleid te maken in een 2) *dwingende maatschappelijke behoefte* voorzien 3) door op een *proportionele wijze* een inbreuk op het recht op respect voor het privéleven te maken. Een voorbeeld van de beoordeling van de door de staat gemaakte belangafweging (*fair balance*) en eventueel minder bezwarende opties speelden een centrale rol in de zaak-*S. & Marper* (EHRM (GK) 4 december 2008, *NJCM-Bulletin* 2009, 4, m.nt. Van der Staak). In Engeland, Wales en Noord-Ierland (als enige Raad van Europa-lidstaten (par. 110)) werden lichaamsmateriaal en vingerafdrukken voor onbepaalde tijd opgeslagen in een databank, ook als de verdachten uiteindelijk niet werden vervolgd en zelfs wanneer zij waren vrijgesproken. Het EHRM snapt dat het gebruik van technologische ontwikkelingen van essentieel belang is in de strijd tegen misdaad, maar dat maakt niet dat de opslag ongelimiteerd noodzakelijk is (par. 105, 112, 114). Van doorslaggevende betekenis om de handelswijze van een deel van het Verenigd Koninkrijk in strijd met artikel 8 EVRM te achten, is die volledig ongedifferentieerde bevoegdheid voor de opslag van lichaamsmateriaal en vingerafdrukken (par. 125). Hierdoor heeft de lidstaat de dwingende maatschappelijke behoefte en de individuele, private belangen niet *fair* tegen elkaar gewogen (par. 125).

Net zoals hierboven al is besproken, volgt ook uit het recht op respect voor het privéleven dat een duidelijk wettelijk kader voor de gedwongen toepassing van hersenscans en EEG op de verdachte tijdens de opsporingsfase noodzakelijk is. De inbreuk op het recht op respect voor het privéleven moet

[6] Overigens maakt een ongelimiteerde bevoegdheid het moeilijk voorzienbaar welk gedrag op die bevoegdheid kan worden gebaseerd. Zie daarover ook *Tereshchenko* t. *Rusland* en EHRM 12 juni 2008, appl. no. 78146/01, par. 125 (*Vlasov* t. *Rusland*).

namelijk in overeenstemming met een wettelijke grondslag plaatsvinden. Het uitvoeren van deze twee methoden maakt (ten minste) een inbreuk op de lichamelijke integriteit van de verdachte, en daarmee een inbreuk op het recht op respect voor het privéleven. Dit is alleen rechtmatig als de toepassing van de methode is gebaseerd op een wettelijke grondslag van voldoende kwaliteit (en dat overeenkomstig die bepaling wordt gehandeld). Het is overigens evident dat hiermee een legitiem doel wordt bereikt: namelijk het detecteren en opsporen van strafbare feiten. Wel dient bij het creëren van de wettelijke grondslag aandacht te bestaan voor de *fair balance*-toets, waarbij onder andere aandacht dient te bestaan voor de duur van de opslag en hoe om wordt gegaan met gegevens van naar later blijkt onschuldige verdachte, maar ook bij welke strafbare feiten ingrijpende opsporingsbevoegdheden mogen worden uitgevoerd (vgl. Ligthart, 2019b). Uit artikel 8 EVRM volgt in ieder geval, net zoals uit artikel 3 EVRM, geen absoluut verbod op opsporingshandelingen waarmee inbreuk wordt gemaakt op de lichamelijke integriteit, zoals hersenscans en EEG.

(iii) Neurotechnologische opsporing in het licht van het recht op een eerlijk proces

Naast artikelen 3 en 8 EVRM speelt artikel 6 EVRM een belangrijke, zo niet de belangrijkste, rol bij de beoordeling van de rechtmatigheid van opsporingsmethoden. Dit heeft te maken met het feit dat onder artikel 6 EVRM ook wordt beoordeeld of bewijs tegen de verdachte mag worden gebruikt of moet worden uitgesloten (Van Toor 2020). Eventuele schendingen van artikel 3 of artikel 8 EVRM hebben in beginsel geen directe betekenis voor het bewijs in de strafzaak tegen een verdachte,[7] maar wel als ook wordt vastgesteld dat het *gebruik* van bewijs dat door de onrechtmatigheid is verkregen in strijd is met het recht op een eerlijk proces. Dit zou via een inbreuk op het zwijgrecht en het nemo-teneturbeginsel kunnen: de verdachte mag in beginsel namelijk niet worden gedwongen te spreken of worden gedwongen op een andere wijze mee te werken aan zijn eigen veroordeling (Van Toor 2016). Zo heeft het EHRM meerdere malen geoordeeld dat (hoge) (en bij herhaling opgelegde) boetes om documenten te verkrijgen oneerlijk zijn (EHRM 25 februari 1993 (*Funke* t. *Frankrijk*), 10828/84; EHRM 2 mei 2001 (*J.B.* t. *Zwitserland*), 31827/96); is een spreekplicht afgedwongen met eventuele gevangenisstraf oneerlijk (EHRM 17 december 1996 (*Saunders* t. *het Verenigd Koninkrijk*), 19187/91); en is het gebruik van bewijs verkregen via schendingen van artikel 3 EVRM oneerlijk (EHRM 5 november 2020, 31454/10 (*Cwik* t. *Polen*)).

Vooral de tweede categorie – een afgedwongen verklaring – is voor dit onderzoek van belang: in hoeverre kan de verdachte worden gedwongen (correcte) herinneringen te openbaren, die normaal alleen door de autoriteiten kunnen worden verkregen als de verdachte spreekt? Daar gaat het namelijk om bij neuroleugendetectie en neurogeheugendetectie.[8] Of dit in strijd is met het zwijgrecht of het nemo-teneturbeginsel is echter niet eenvoudig te beantwoorden.

---

[7] Zie als voorbeeld de zaak *Michael P. / Anne Faber*, waarin de verdachte te maken krijgt met dreiging met geweld middels de inzet van een politiehond (en dat is een schending van artikel 3 EVRM). Deze onrechtmatigheid wordt gecompenseerd door middel van strafvermindering. HR 23 juni 2020, ECLI:NL:HR:2020:1092.

[8] De identificatie via EEG blijft hier voorlopig buiten beschouwing. Daarvoor lijkt artikel 6 EVRM in beginsel geen rol te spelen (mits de afname van de EEG op een geoorloofde – *id est*, met gepast geweld – manier plaatsvindt). Hetzelfde geldt namelijk voor identificatie middels de stem of DNA-onderzoek.

De eerste vraag die beantwoord moet worden, is of het verkrijgen van informatie over herinneringen middels fMRI of EEG overeenkomen met het verkrijgen van een mondelinge verklaring (het zwijgrecht) of de verkrijging van lichaamsmateriaal (het nemo-teneturbeginsel). Met betrekking tot de eerste categorie – het gesproken woord – geldt namelijk een veel stringenter toetsingskader dan voor de tweede categorie. De eerste categorie wordt, in de rechtspraak van het EHRM, materiaal *dat afhankelijk van de wil van de verdachte bestaat* genoemd, terwijl de tweede categorie *materiaal dat onafhankelijk van de wil van de verdachte bestaat* betreft (EHRM 17 december 1996, 19187/91 (*Saunders* t. *het Verenigd Koninkrijk*), par. 69). Bij de verkrijging van materiaal dat *afhankelijk* van de wil van de verdachte bestaat, is eigenlijk geen ruimte om dat tegen de wil van de verdachte te verkrijgen. Met andere woorden, slechts zeer geringe dwang mag worden gebruikt om dit soort materiaal te verkrijgen (EHRM 17 december 1996, 19187/91 (*Saunders* t. *het Verenigd Koninkrijk*), par. 69). Dit is anders bij materiaal dat *onafhankelijk* van de wil van de verdachte bestaat: lichaamsmateriaal mag met gepast geweld worden verkregen; documenten kunnen met een rechtmatige doorzoeking en inbeslagname worden vergaard; zelfs ingeslikte bolletjes drugs zouden met gepast geweld kunnen worden verkregen. Dit alles is gerechtvaardigd onder het nemo-teneturbeginsel (EHRM 17 december 1996, 19187/91 (*Saunders* t. *het Verenigd Koninkrijk*), par. 69). Doordat de ene categorie aan een veel stringentere toets wordt onderworpen dan de andere categorie is het noodzakelijk te bekijken onder welke categorie neuroleugendetectie en neurogeheugendetectie vallen.

Wat betreft neuroleugendetectie wordt tijdens het afleggen van een verklaring middels bijvoorbeeld fMRI bekeken of de afgelegde verklaring overeenkomstig de 'waarheid' is, althans of de verdachte denkt dat hij de waarheid verklaart. Doordat de verdachte tijdens neuroleugendetectie *moet* spreken – want zonder een afgelegde verklaring kan geen waarheid of onwaarheid worden vastgesteld –, is het evident dat neuroleugendetectie valt onder de categorie van materiaal dat *afhankelijk* van de wil van de verdachte bestaat.

Neurogeheugendetectie gebruikt een herkenningstaak om te onderzoeken of iemand 'schuldige kennis' heeft. Tijdens de taak wordt de verdachte 1) fysiek gefixeerd terwijl hij een 2) EEG (of een andere fysieke) meting ondergaat – in het vervolg noemen we dit, in lijn met Van Toor (2017) het biologische spoor –, en na analyse van het biologische spoor kan worden geconcludeerd dat de verdachte 3) schuldige kennis heeft – we noemen dit, in lijn met Van Toor (2017), het cognitieve spoor –. Doordat zowel een biologisch spoor als een cognitief spoor wordt verkregen, is de categorisatie van neurogeheugendetectie niet zo eenduidig als de categorisatie van neuroleugendetectie.

Farrell (2010; 94) stelt dat: '*asking a defendant for responses to questions while conducting a scan would clearly seem to violate this principle (against self-incrimination,* onze toevoeging*), the answer is less obvious in a situation where a brain scan tracks subconscious or passive perceptions to photos or statements but the defendant remains silent*'. Met een neurogeheugendetectietest wordt beoordeeld of iemand schuldige kennis heeft door een vergelijking te maken tussen hersenactiviteit bij twee verschillende delen van een taak. Het komt daarom overeen met het tweede deel van Farrells opmerking (om onderbewuste of passieve waarnemingen te volgen, maar de beklaagde zwijgt). De taak die de persoon uitvoert, omvat het luisteren naar meerkeuzevragen en de antwoorden daarop. Een van de antwoorden is *meaningful* omdat het schuldige kennis bevat, de andere antwoorden zijn plausibele afleiders. De hersenactiviteit als reactie op het betekenisvolle item wordt vergeleken met de hersenactiviteit als reactie op de afleiders. De veronderstelling is dat de dader de details van de

plaats delict heeft waargenomen en daarom fysiologisch anders reageert wanneer hij wordt geconfronteerd met schuldige kennis.

De onderzochte persoon hoeft tijdens het onderzoek in principe geen fysieke handeling te verrichten (al worden ook neurogeheugendetectietests afgenomen waarbij dat wel het geval is). De test kan volledig auditief worden uitgevoerd. De persoon hoeft tijdens het onderzoek niet te spreken of anderszins intellectueel mee te werken. Hij moet 'tolereren' dat hij vragen en antwoorden hoort terwijl zijn hersenactiviteit of een andere fysiologische reactie wordt gemeten. Of de verdachte het betekenisvolle item herkent, wordt bepaald door zijn hersenactiviteit of fysiologische reactie. De verdachte kan de reactie niet onderdrukken of veranderen. Omdat de persoon de reactie na herkenning niet kan beheersen of stoppen, is de enige logische conclusie dat het met neurogeheugendetectie verzamelde biologische spoor *onafhankelijk* van de wil van de verdachte bestaat. In die zin zijn hersengolven en fysiologische reacties fysiek bewijs, net als bloed, haar en cellen (zoals genoemd als voorbeelden in de *Saunders*-zaak). Het biologische spoor bestaat dus onafhankelijk van de wil van de verdachte.

Naast het biologische spoor dat zojuist is geanalyseerd, verkrijgen de autoriteiten indirect ook een cognitief spoor door het afnemen van neurogeheugendetectie. Door de analyse van de fysiologische respons wordt duidelijk dat de verdachte bepaalde *kennis* heeft. De EEG-P300 respons – het biologische spoor – is op zichzelf namelijk niets waard in een strafzaak. Pas wanneer de P300 is onderzocht en een expert stelt dat uit de resultaten blijkt dat de verdachte daderkennis bezit, is neurogeheugendetectie een methode die belastende informatie oplevert. Dit aspect – dat neurogeheugendetectie *contents of the mind* 'openbaart' is het punt dat het meest problematisch is in het licht van het zwijgrecht en het nemo-teneturbeginsel, omdat het cognitieve spoor op het eerste gezicht alleen kan worden vergeleken met het gesproken woord. Zowel met het cognitieve spoor als met het gesproken woord wordt inhoudelijke informatie verkregen die opgeslagen is in het geheugen doordat op de vragen (al dan niet direct) wordt geantwoord. Het cognitieve spoor is echter niet precies hetzelfde als het gesproken woord omdat de verdachte minder controle heeft over het opslaan, onthouden en ophalen van informatie in de hersenen, terwijl hij wel volgende controle heeft over het feit of hij, via het gesproken woord, herinneringen herproduceert. Deze overeenkomsten en verschillen maken het op het eerste gezicht moeilijk om het cognitieve spoor te categoriseren als volledig onafhankelijk of volledig afhankelijk van de wil van de verdachte bestaand.

Als uitgangspunt voor de beoordeling van de categorisatie van het cognitieve spoor nemen we enkele posities in die andere auteurs in de literatuur hebben geponeerd. Farahany (2012) vergelijkt de herinneringen met documenten die in een kluis liggen. De opgeslagen herinneringen zijn te vinden in een mentale 'kluis', en zijn niet toegankelijk voor derden maar bestaan wel onafhankelijk van de wil van de verdachte. In die zin moet de informatie uit de mentale kluis op dezelfde manier worden beschermd als documenten in een echte kluis. Easton (1998) wijst op het feit dat het onderscheid tussen een biologisch en een cognitief spoor gebaseerd is op een cartesiaans dualisme tussen lichaam en geest, terwijl die tweedeling pertinent onjuist is. Dit zou ertoe leiden dat het biocognitieve spoor wordt gezien als een 'eenvoudige' lichamelijke reactie en op dezelfde manier wordt beschermd als lichaamsweefsel, haar, bloed *et cetera*. Andere auteurs wijzen op de inhoud van het cognitieve spoor en maken een vergelijking met een verklaring (Farrel (2010); Fox (2009)).

De vraag of het cognitieve spoor al dan niet afhankelijk is van de wil van de verdachte is niet eenvoudig te beantwoorden omdat er twee concurrerende, elkaar volledig uitsluitende opvattingen mogelijk zijn.

Het cognitieve spoor als zodanig wordt niet verkregen door de afname van de EEG. Alleen door analyse van het biologische spoor kunnen getuige-deskundigen conclusies trekken over de aan- of afwezigheid van schuldige kennis. Deze conclusie is dus een indirect gevolg van de neurogeheugendetectietest, een resultaat van analyse van een biologisch spoor, en wij hebben hierboven (in lijn met de jurisprudentie over ander lichaamsmateriaal) geconcludeerd dat dit biologische spoor onafhankelijk van de wil van de verdachte bestaat omdat de verdachte het patroon van hersenactiviteit of zijn fysiologische reactie op zinvolle items tijdens de afname niet kan beïnvloeden. Omdat het cognitieve spoor niet als zodanig wordt verkregen, maar alleen door analyse van het biologische spoor, kan worden geconcludeerd dat het cognitieve spoor (tenminste gedeeltelijk) onafhankelijk van de wil van de verdachte bestaat.

Daar staat tegenover dat de aard van de verkregen informatie kan worden benadrukt. Daderkennis is per definitie kennis die (meestal) alleen de dader bezit. Deze informatie kan momenteel niet op een andere manier worden verkregen dan wanneer de verdachte een verklaring aflegt, dus de verkrijging is altijd afhankelijk van de wil van de verdachte. Met de neurogeheugendetectietest wordt dus informatie van de verdachte verkregen die anders alleen verkregen kan worden als hij een verklaring aflegt. Als hij tijdens een verhoorsituatie met het moordwapen wordt geconfronteerd, kan hij verklaren onbekend te zijn met het wapen of zich van elke verklaring te onthouden. De verdachte heeft deze keuze niet als hij een neurogeheugendetectietest ondergaat (al kan hij proberen de resultaten van de neurogeheugendetectietest te manipuleren, maar daarmee voorkomt hij niet altijd dat ook herkenning van daderkennis plaatsvindt (maar mogelijk alleen dat de resultaten moeilijker interpreteerbaar zijn) (Rosenfeld, Soskins, Bosh & Ryan, 2004)). Met de invoering van deze test in het strafrecht wordt het zwijgrecht ten minste gedeeltelijk omzeild. Tijdens een verhoor is het niet meer nodig om te beoordelen of de verdachte schuldig is, de autoriteiten kunnen een neurogeheugendetectietest bij de (misschien zelfs slapende; Meijer & Van Toor 2020) verdachte afnemen en dezelfde informatie verkrijgen. Door deze vergelijking te maken en te benadrukken dat met neurogeheugendetectie, zij het via een omweg, inzicht wordt verkregen in herinneringen, kan ook worden geconcludeerd dat het verwerven van het cognitieve spoor afhankelijk is van de wil van de verdachte.

Dat houdt in dat het afnemen van neuroleugendetectie in ieder geval moet worden beoordeeld vergelijkbaar met ander materiaal dat afhankelijk van de wil van de verdachte bestaat, terwijl dat voor neurogeheugendetectie nog onduidelijk is. Wat betreft de rechtmatigheid betekent dit dat slechts zeer geringe dwang kan worden toegepast om de verdachte te dwingen neuroleugendetectie te ondergaan: de verdachte mag namelijk in beginsel niet worden gedwongen te spreken, terwijl dat voor het vaststellen van de (on)waarheid wel noodzakelijk is. Hierdoor lijkt er *geen* ruimte te bestaan voor de afname van neuroleugendetectie in de Nederlandse strafvordering. *Mutatis mutandis* geldt voor neurogeheugendetectie als het cognitieve spoor wordt gecategoriseerd als materiaal dat *afhankelijk* van de wil van de verdachte bestaat. Als het cognitieve spoor wordt gecategoriseerd als materiaal dat *onafhankelijk* van de wil van de verdachte bestaat, is wel enige ruimte om met gepaste fysieke dwang, maar niet met strafbedreiging, neurogeheugendetectie af te nemen. Daarbij is dan wel noodzakelijk

dat relevante waarborgen bestaan die aard en de mate van de dwang reduceren.[9] Hiervoor zou aansluiting kunnen gezocht bij al bestaande bevoegdheden die een inbreuk maken op de lichamelijke integriteit *casu quo* waarmee lichaamsmateriaal wordt verkregen.

(d) Conclusie

Uit het in dit hoofdstuk beschreven mensenrechtelijke kader volgt duidelijk dat geen algeheel verbod bestaat, of te verwachten is, met betrekking tot de inzet van neurotechnologische methoden in een strafvorderlijke context. Zowel het respect voor menselijke waardigheid en het folterverbod, het recht op respect voor privacy en het nemo-teneturbeginsel verbieden bepaalde handelingen niet *in abstracto*. Een rechter die wordt geconfronteerd met resultaten uit een bepaalde methode, en dat kan dus een neurotechnologische methode zijn, moet *in concreto* bepalen of de inzet en uitvoering van de methoden in overeenstemming met het geldende recht is.

Belangrijk voor die beoordeling is dat in het strafprocesrecht geldt dat de strafvorderlijke autoriteiten alleen mogen handelen op basis van een wettelijke grondslag. Met andere woorden, bevoegdheidstoekenning om een bepaalde methode in te zetten, moet plaatsvinden via de wet. Afhankelijk van de ingrijpendheid van de methode dient de wettelijke grondslag met meer waarborgen, zoals rechterlijke toetsing voorafgaand aan de uitvoering van de methode bij de meest ingrijpende methoden, te worden vormgegeven. Met betrekking tot neurotechnologische methoden, vooral neurogeheugendetectie waarmee het onzichtbare geheugen inzichtelijk wordt gemaakt, moet worden gesteld dat dit ingrijpende methoden zijn die met strenge waarborgen in een wettelijke grondslag moeten worden gegoten. Deze waarborgen reguleren dan de beslissing om een neurotechnologische methoden *in te zetten*.

Met betrekking tot de *uitvoering* geldt dat alle in dit hoofdstuk besproken mensenrechten grenzen stellen aan de dwang die mag worden toegepast. Met andere woorden, als de inzet van een bevoegdheid wettelijk mogelijk is, betekent dit nog niet dat alle uitvoeringshandelingen *ipso facto* rechtmatig zijn. Zo is het met veel (onnodig) geweld iemand fixeren opdat neurogeheugendetectie kan worden afgenomen onrechtmatig. Dit betekent dat de autoriteiten die een neurotechnologische methode uitvoeren zich zorgvuldig, in de zin van dat zij alleen *geoorloofde dwang* toepassen, moeten gedragen.

[9] EHRM 11 juli 2006, appl. no. 54819/00 (Jalloh vs. Duitsland). Op grond van het Duitse strafprocesrecht (artikel 81a StPO) zijn alle lichamelijke ingrepen toegestaan die van belang zijn voor de vaststelling van het delict, mits de ingreep door een arts wordt uitgevoerd met gebruikmaking van de normale methoden van zijn wetenschap en bij afwezigheid van gezondheidsrisico's. Het toedienen van een braakmiddel is derhalve mogelijk omdat daarmee voor het strafproces belangrijk bewijs wordt vergaard, *mits* de procedurele waarborgen worden gevolgd.

9. Risicotaxatie

In het Nederlandse strafrecht speelt speciale preventie – het voorkomen dat een veroordeelde opnieuw strafbare feiten pleegt – een steeds grotere rol (Bijlsma, 2021; De Jong, 2021). De TBS-maatregel is het oudste en wellicht bekendste voorbeeld van een sanctie die haar grondslag vindt in speciale preventie. De laatste twee decennia is een aantal nieuwe maatregelen ingevoerd gericht op het voorkomen van recidive. Het gaat om de plaatsing in een inrichting voor stelselmatige daders (ISD, art. 38m Sr), de vrijheidsbeperkende maatregel (art. 38v Sr) en de gedragsbeïnvloedende en vrijheidsbenemende maatregel (GVM, art. 38z Sr). Ook straffen zijn steeds meer gericht op speciale preventie. Zo kan de proeftijd voor voorwaardelijke invrijheidstelling sinds 2015 *telkens* en dus onbeperkt worden verlengd indien het risico bestaat op delicten die de lichamelijke integriteit aantasten (art. 6.1.18 lid 2 Sv). Neurotechnologie is in twee opzichten relevant voor dit 'risicostrafrecht'. Met neuro-interventies kan het risico op recidive mogelijk worden verminderd. De juridische aspecten daarvan worden besproken in hoofdstuk 10. Neurotechnologie kan ook bijdragen aan een inschatting van het risico op recidive en daarmee helpen bij het beantwoorden van de vraag of een op speciale preventie gerichte sanctie moet worden opgelegd. Dit onderwerp wordt in deze paragraaf besproken.

Risicotaxatie vindt momenteel plaats met behulp van actuariële risicotaxatie-instrumenten, waarin risicofactoren 'gescoord' worden en die uitmonden in een indeling van een veroordeelde in een bepaalde risicocategorie. Soms wordt op basis van het klinisch oordeel van een gedragsdeskundige een risico-inschatting gemaakt, al of niet in aanvulling op een actuariële risicotaxatie. Uit het technisch onderzoek kwam naar voren dat *neuroimaging* mogelijk tot een verbetering van de kwaliteit van risico-inschattingen kan leiden, maar ook dat op dit moment nog weinig markers in de hersenen zijn gevonden die samenhangen met een verhoogd risico op delinquent gedrag. Risicotaxatie met behulp van neurotechnologie wordt op dit moment in de praktijk niet toegepast, maar dat kan binnen een termijn van vijf tot tien jaar mogelijk wel het geval zijn. Het TRL van risicotaxatie met behulp van neurotechnologie werd geschat op 4.

Ten dele spelen bij *risicotaxatie* kwesties die al besproken zijn onder waarheidsvinding (hoofdstuk 8). In het licht van het verbod op marteling en onmenselijke of vernederende behandeling (art. 3 EVRM) worden aan hersenscans in het kader van risicotaxatie geen andere eisen gesteld dan in de opsporingsfase. Onmenselijke en vernederende behandeling is in beide gevallen verboden. Zoals besproken, vereist het in artikel 8 EVRM neergelegde recht op respect voor privéleven een duidelijk wettelijk kader voor de toepassing van hersenscans. Dit geldt net zo goed voor hersenscans die worden gebruikt voor risicotaxatie. Het is ook vooral op deze punten dat gebruik van neurotechnologie voor risicotaxatie zich lijkt te onderscheiden van actuariële en klinische risicotaxatie. Bij die vormen van risicotaxatie is de lichamelijke integriteit van de betrokkene zoals dat beschermd wordt door artikelen 3 en 8 EVRM niet in het geding.

Waar het gaat om de uit het recht op een eerlijk proces (art. 6 EVRM) voortvloeiende waarborgen is het antwoord minder eenduidig. De beslissing om een bepaalde sanctie op te leggen, TBS bijvoorbeeld, wordt gebaseerd op een inschatting van de recidivegevaarlijkheid van de verdachte. Daarmee rijst de vraag of een verdachte verplicht kan worden inzicht te bieden in zijn of haar recidiverisico (*Kamerstukken II* 2016/17, 20, 36 937, p. 1-2). Kan een verdachte tegen zijn of haar wil aan een hersenscan worden onderworpen waarmee recidivegevaar kan worden ingeschat?

Mogelijk speelt hier het al eerder behandelde nemo-teneturbeginsel een rol: de verdachte kan niet worden gedwongen zichzelf te belasten. Volgens voormalig staatssecretaris van Veiligheid en Justitie Teeven staat dit beginsel aan verplichte medewerking aan diagnostische methoden in de weg

(*Kamerstukken II* 2010/11, 29 452, nr. 138; zie ook Lieftink, 2018). Hiervoor wordt door de staatssecretaris echter geen onderbouwing gegeven, en zo eenvoudig is de link tussen het nemo-teneturbeginsel en gedwongen medewerking aan diagnostiek of taxatie niet. Diagnostiek met betrekking tot een stoornis of risicotaxatie is namelijk niet van invloed op de *bewijsvraag* (heeft de verdachte een strafbaar feit gepleegd?). Het is daarom de vraag of deze beoordelingen vallen onder het nemo-teneturbeginsel dat in de kern de verdachte beschermt tegen gedwongen afleggen van belastende verklaringen. Dat *belasten* kan algemeen worden begrepen – ook een zwaardere sanctie is nadelig voor de verdachte – maar het nemo-teneturbeginsel lijkt vooral een principe van het *bewijsrecht* te zijn. Aan de bewezenverklaring mag geen afgedwongen belastende verklaring liggen.

De ratio en reikwijdte van dit beginsel zijn echter tamelijk onduidelijk (Ligthart, 2021a; Stevens, 2005, 2; Van Toor, 2017, H7). Stevens (2005, 1) somt in haar proefschrift verschillende definities op, waaruit onder meer verschillen in mogelijke reikwijdte kunnen worden afgeleid. De verdachte zou niet hoeven mee te werken aan het *strafproces* (waardoor ook beslissingen met betrekking tot sancties onder het nemo-teneturbeginsel zouden vallen). Een andere definitie legt de focus op de *veroordeling*: de verdachte kan niet worden gedwongen daaraan bij te dragen en dan ligt de focus sterk op het nemo-teneturbeginsel als principe van bewijsrecht (en niet als algemeen procesrechtelijke principe). Stevens (2005, 2) komt vervolgens met de opmerking dat volgens het EHRM het nemo-teneturbeginsel 'bepaalde grenzen stelt aan onderzoeksbevoegdheden en bewijsvoering'. Van sanctieoplegging is in dit citaat geen sprake.

In het enkele jaren na Stevens' proefschrift gewezen arrest in de zaak *Gäfgen* (EHRM 1 juni 2010, 22978/05) laat het EHRM doorschemeren dat afgedwongen informatie geen invloed mag hebben op sanctieoplegging (par. 179) en dat een verklaring afgelegd in strijd met artikel 3 EVRM geen invloed mag hebben op het vaststellen van de relevante feiten (par. 166). Op andere punten in dit arrest, maar ook in andere arresten, zijn de overwegingen van het EHRM over de reikwijdte van het nemo-teneturbeginsel tamelijk sterk in de sleutel van het bewijs geformuleerd. Zo wordt in *Gäfgen* (par. 167) door het EHRM overwogen dat '*the use at the trial of real evidence obtained as a direct result of ill-treatment in breach of Article 3, the Court has considered that incriminating real evidence obtained as a result of acts of violence, at least if those acts had to be characterised as torture, should never be relied on as proof of the victim's <u>guilt</u>*' (onze onderstreping). Het gaat het bestek van dit onderzoek te buiten om dieper op de ratio en reikwijdte van het nemo-teneturbeginsel in te gaan. Het spreekt echter niet voor zich dat het beginsel gedwongen medewerking aan diagnostiek of taxatie verbiedt. Diagnose van een stoornis en risicotaxatie worden doorgaans immers niet gebruikt voor de vaststelling van schuld, maar voor de vraag of, bijvoorbeeld, TBS kan worden opgelegd. Het staat niet vast dat het nemo-teneturbeginsel zich uitstrekt tot de sanctieoplegging.

Een ander bewijsrechtelijk principe dat een rol speelt bij de beoordeling van gedwongen medewerking aan risicotaxatie is de onschuldpresumptie. Onder meer om te voorkomen dat onschuldigen worden veroordeeld, stelt artikel 6 lid 2 EVRM (de onschuldpresumptie) strenge eisen aan het bewijs van een strafbaar feit. Bij redelijke twijfel aan de schuld van de verdachte moet hij of zij worden vrijgesproken (Bemelmans 2018, 234-238). Deze strenge eisen zijn niet van toepassing in de fase van de sanctietoemeting (EHRM 8 juni 1976, 5100/71 (*Engel* t. *Nederland*), par. 90). De vaststelling van recidivegevaarlijkheid hoeft dus niet buiten redelijke twijfel te gebeuren, omdat het in dat geval niet gaat om een vaststelling van schuld aan een strafbaar feit. Onduidelijk is echter hoe 'krachtig' het bewijs voor feiten die van belang zijn voor de sanctietoemeting wel moet zijn (Bijlsma, 2021).

Inherent aan risicotaxatie is dat dit met grote onzekerheden is omgeven. Volgens een veel geciteerde meta-studie (Fazel et al., 2012) leveren gevaarsinschattingen met bestaande risicotaxatie-instrumenten relatief veel vals-positieven op. Een vals-positief is in dit verband een veroordeelde die

door het risicotaxatie-instrument als hoog-risico wordt aangewezen, maar in feite niet zal recidiveren. Van iedere tien personen die risicotaxatie-instrumenten als hoog-risico aanmerken zullen er ongeveer zes *niet* recidiveren. Omdat het grondrechtelijke kader weinig bescherming biedt tegen de oplegging van op recidiverisico gebaseerde sancties is er wel voor gepleit om, analoog aan de onschuldpresumptie, een 'ongevaarlijkheidspresumptie' in te voeren met een bijpassende bewijsmaatstaf (Ashworth & Zedner, 2014, 259; Bijlsma, 2021). Verbetering van risico-inschattingen met behulp van neurotechnologie (evt. in combinatie met *machine learning*) kan bijdragen aan een reductie van het aantal vals-positieve inschattingen en daarmee ten onrechte opgelegde preventieve sancties voorkomen (vgl. Meynen, 2020). Tegelijkertijd is (AI-)neuropredictie niet vrij van gevaren die ook kleven aan andere vormen van risicotaxatie, zoals het risico op discriminatie door *bias* en het beoordelen van personen op groepskenmerken (Tortora et al., 2020).

Risicotaxatie wordt gebruikt om beslissingen te nemen die vrijheidsbeneming of juist invrijheidstelling tot gevolg hebben. Het kan dan gaan om het ondergaan van voorlopige hechtenis wegens recidivegevaar (art. 67a lid 2 sub 2 Sv), om het opleggen van een sanctie of juist om een verdachte (voorwaardelijk) in vrijheid te stellen. Artikel 5 EVRM beschermt tegen willekeurige vrijheidsbeneming. Vrijheidsbeneming mag daarom slechts plaatsvinden in de gevallen die in artikel 5 EVRM worden opgesomd. Daaronder valt bijvoorbeeld het ondergaan van een gevangenisstraf na een veroordeling. Het EHRM lijkt geen principiële bezwaren te hebben tegen het indelen van verdachten of veroordeelden in verschillende risicocategorieën, maar voor een ongelijke behandeling op basis van groepskenmerken moet wel een objectieve basis bestaan (EHRM 13 juli 2010, 7205/07 (*Clift* t. *VK*)). Beslissingen over vrijheidsbeneming of invrijheidstelling op risico-inschattingen die 'bevooroordeeld' zijn jegens bepaalde bevolkingsgroepen kunnen daarom leiden tot een schending van artikel 5 EVRM in combinatie met artikel 14 EVRM (waarin het discriminatieverbod is neergelegd).

Samenvattend concluderen we dat bij *risicotaxatie* met behulp van neurotechnologie deels dezelfde kwesties spelen als bij de toepassing van neurotechnologie bij *opsporing en waarheidsvinding*. Een vraag is echter of het nemo-teneturbeginsel wel van toepassing is op het verlenen van medewerking aan risicotaxatie. Recidivegevaar hoeft niet met dezelfde mate van zekerheid te worden vastgesteld als de schuld aan een strafbaar feit. Risicotaxatie mag niet tot ongerechtvaardigde ongelijke behandeling leiden.

10. Interventie

(a) Neuro-interventies in het strafrechtelijke domein

Justitiële neuro-interventies worden in dit onderzoek gedefinieerd als: technieken die de hersenenfuncties veranderen met het doel om gevaar te verminderen. Het gaat om het in een strafrechtelijk kader voorkomen van recidive en/of om rehabilitatie van veroordeelden te bevorderen (hierna ook wel: 'rehabilitatieve neuro-interventies', of kortweg 'neuro-interventies'). De veroordeelde krijgt daarbij veelal de keuze tussen het ondergaan van een behandeling aan de ene kant en het (verder) ondergaan van (bijvoorbeeld) een gevangenisstraf aan de andere kant. Zoals in de volgende paragraaf wordt beschreven kunnen dit soort interventies buiten zeldzame, acute noodsituaties niet worden afgedwongen, omdat dat in strijd zou zijn met artikel 3 en 8 EVRM. De Nederlandse wetgeving biedt ook geen grondslag voor dwangbehandeling in een strafrechtelijk kader.

In het technisch deelrapport (sectie 1) is geconcludeerd dat op dit moment neuro-interventies nog niet in het justitiële domein worden toegepast. Toepassingen van neuro-interventies in het strafrechtelijke domein zijn echter denkbaar, bijvoorbeeld in de vorm van hersenstimulatie gericht op agressiebeheersing en bevordering van empathie. De TRL van hersenstimulatie in het strafrechtelijke domein is geschat op 4. Dit houdt in dat de techniek in laboratoriumsituaties gevalideerd is, maar dat de nodige stappen gezet moeten worden voordat het tot concrete toepassing ervan in de praktijk kan komen. De verwachting is dat binnen de komende vijf jaar meer zekerheid ontstaat over de effecten van deze technieken op recidiverisico.

De fysieke inbreuk van de gevalideerde technieken varieert van twee op de hoofdhuid geplaatste elektroden (rTMS, tDCS) tot chirurgisch geplaatste elektroden diep in de hersenen en een batterij onder de huid bij het sleutelbeen (DBS). Voor de juridische implicaties van de toepassing van neuro-interventies is echter niet alleen de fysieke kant van belang. Omdat neuro-interventies de hersenen stimuleren beïnvloeden zij de psyche van de betrokkene. Voor de juridische waardering van de interventie is dit aspect van neuro-interventies eveneens van belang.

(b) Nationaalrechtelijk kader neuro-interventies

Het sanctierecht biedt diverse mogelijkheden om een betrokkene tot gedragsdeskundige of medische behandeling (waaronder neuro-interventies kunnen worden begrepen) te bewegen met het oog op voorkomen van recidive en/of ter rehabilitatie. Aan een (deels) voorwaardelijke veroordeling (art. 14c lid 2 Sr) of voorwaardelijke invrijheidstelling (art. 6.2.11 lid 3 Sv) kunnen als bijzondere voorwaarden worden verbonden dat de veroordeelde zich onder behandeling stelt van een deskundige of een zorginstelling of deelneemt aan een gedragsinterventie.[10] Deze voorwaarden kunnen ook worden verbonden aan de GVM van artikel 38z Sr (art. 6.6.23b lid 2 Sv). Ook kan behandeling als bijzondere voorwaarde worden verbonden aan een (voorwaardelijke) plaatsing in een inrichting voor stelselmatige daders (art. 38m; 38p lid 5 Sr). Ten slotte vindt behandeling plaats in het kader van de

[10] Ook enkele in dit opzicht wat minder relevante modaliteiten (schorsing van de voorlopige hechtenis, voorwaardelijk sepot, strafbeschikking, gratie) kennen de mogelijkheid om bijzondere voorwaarden op te leggen. De Aanwijzing OM-strafbeschikking (*Stcrt*. 2020, 62572) beperkt ambulante behandeling voor de strafbeschikking echter tot maximaal twintig bijeenkomsten. Zij mag geen verplichting om medicijnen te nemen inhouden. De Aanwijzing sepot en gebruik sepotgronden (*Stcrt*. 2020, 62570) verbiedt het verbinden van voorwaarden in de medische sfeer aan een voorwaardelijk sepot. Deze modaliteiten blijven hier verder buiten beschouwing.

tenuitvoerlegging van TBS. Dit kan zijn in de vorm van een voorwaarde gesteld aan een voorwaardelijke TBS: behandeling door een deskundige of het innemen van voorgeschreven medicatie (art. 38a lid 1 Sr). In het geval van TBS met dwangverpleging (art. 37b lid 1 Sr) wordt een behandelplan opgesteld, gericht op het 'zodanig wegnemen' van het recidivegevaar dat door de stoornis wordt veroorzaakt dat de TBS (voorwaardelijk) kan worden beëindigd (art. 16 lid Bvt).

Kenmerkend aan de genoemde strafrechtelijke kaders is dat de behandeling niet afgedwongen kan worden. In het kader van TBS met dwangverpleging is het uitgangspunt dat behandeling alleen plaatsvindt als de verpleegde zich daar niet tegen verzet (art. 16a sub c Bvt). Het niet voldoen aan bijzondere voorwaarden heeft als gevolg dat een straf(restant), maatregel of vervangende hechtenis (alsnog) ten uitvoer wordt gelegd. De (voortzetting van) vrijheidsbeneming oefent dus een sterke drang op de veroordeelde uit om de behandeling te ondergaan. In de wetsgeschiedenis van voorwaardelijke sanctiemodaliteiten is herhaaldelijk benadrukt dat met *dwang* een inbreuk op grondrechten wordt gemaakt, maar dat dat in het geval van de *drang* die uitgaat van (voortzetting van) vrijheidsbeneming niet het geval is. Zie bijvoorbeeld deze passage uit de memorie van toelichting bij de GVM:

> '*Aangezien het wetsvoorstel niet voorziet in een bevoegdheid tot dwangmedicatie, kan bijvoorbeeld het innemen van medicijnen dan ook niet worden afgedwongen. Er is dus ook geen sprake van een inbreuk op de onaantastbaarheid van het lichaam (artikel 11 van de Grondwet en artikel 8 EVRM). Binnen de kaders van een bredere behandeling bestaan er daarentegen wel goede mogelijkheden tot vrijwillige behandeling met medicatie, waaronder libidoremmende medicatie. Dit onderdeel van de behandeling is uiteraard niet vrijblijvend. Hier is, evenals het geval is met betrekking tot de voorwaarde opname in een zorginstelling, dan weliswaar geen sprake van dwang, maar wel van drang voortkomend uit de aard van de opgelegde voorwaarde.*'
>
> (*Kamerstukken II* 2013-14, 33 816, 3, p. 30. Zie ook *Kamerstukken II* 2009-10, 32 319, 3, p. 10.)

De enige uitzondering op de regel dat behandeling in een strafrechtelijk kader niet kan worden afgedwongen is dat behandeling in het kader van TBS met dwangverpleging als 'uiterste middel' kan plaatsvinden ondanks verzet van de verpleegde indien het gevaar anders niet binnen redelijke termijn kan worden weggenomen of indien dit nodig is om het gevaar dat een persoon binnen de TBS-instelling veroorzaakt af te wenden (art. 16b Bvt). Deze laatste ingreep heeft vooral het karakter van gedwongen geestelijke gezondheidszorg zoals deze ook in het kader van de Wet verplichte geestelijke gezondheidszorg wordt verleend.

(c) Neuro-interventies en het EVRM

(i) Neuro-interventies en het verbod van onmenselijke of vernederende behandeling of bestraffing

Interventies met een medisch en/of rehabiliterend karakter kunnen spanning met artikel 3 EVRM oproepen (Schabas, 2015, p. 183). Artikel 3 EVRM bevat een absoluut verbod op marteling en onmenselijke of vernederende behandeling of bestraffing. Een inbreuk daarop is nooit gerechtvaardigd. Het gaat in artikel 3 EVRM overigens om behandeling – bejegening – in het algemeen, niet (uitsluitend) om medische behandeling. Gedwongen kaalscheren van gedetineerden is bijvoorbeeld aangemerkt als een vernederende behandeling in strijd met artikel 3 EVRM (EHRM 11 december 2003, 39084/97 (*Yankov* t. *Bulgarije*), par. 108-122). Om binnen het bereik van artikel 3 EVRM te vallen moet een minimumniveau van *ill-treatment* worden overschreden. Deze beoordeling

vindt plaats aan de hand van een groot aantal factoren, waaronder de duur en de fysieke en psychische effecten van de behandeling of bestraffing en (soms) de aard van het slachtoffer, bijvoorbeeld als sprake is van een bijzondere kwetsbaarheid (Schabas, 2015, p. 171-174).

Medische dwangbehandeling van wilsonbekwame patiënten waarvoor een medische noodzaak bestaat, valt niet binnen het bereik van artikel 3 EVRM. In *Herczegfalvy* t. *Oostenrijk* (EHRM 24 september 1992, 10533/83, par. 79-84) oordeelt het EHRM dat dwangvoeding, gedwongen toediening van neuroleptica (antipsychotische middelen) aan en de isolatie en het geboeid zijn aan een 'veiligheidsbed' van een gedwongen opgenomen psychiatrische patiënt wegens de medische noodzaak van deze interventies geen onmenselijke of vernederende behandeling was. In *V.C.* t. *Slowakije* (EHRM 8 november 2011, 18968/07, par. 106-120) oordeelt het EHRM dat sterilisatie van een wilsbekwame patiënte zonder volwaardige instemming en terwijl geen sprake was van '*imminent risk of irreparable damage to the applicant's life or health*' in strijd was met het respect voor menselijke vrijheid en waardigheid en daarmee met artikel 3 EVRM. Daaraan doet niet af dat het medisch personeel niet met de bedoeling handelde de patiënte te benadelen.

Justitiële neuro-interventies met een rehabilitatief doel en die het minimumniveau van ernst van artikel 3 EVRM overstijgen, dienen echter niet om een acuut gevaar af te wenden op grond van een medische noodzaak en voldoen daarom in veel gevallen niet aan de eisen die artikel 3 EVRM aan medische dwangbehandeling stelt. Onzeker is of het EHRM de eis van medische noodzakelijkheid zal laten varen voor gedwongen behandeling in een strafrechtelijk kader, inclusief rehabilitatieve neuro-interventies (Forsberg, 2021). Om die reden staan gedwongen neuro-interventies met meer ingrijpende fysieke of mentale gevolgen gericht op rehabilitatie minstgenomen op gespannen voet met artikel 3 EVRM. Gezien de ingrijpende fysieke en mentale gevolgen van in ieder geval sommige neuro-interventies is goed denkbaar dat het zonder medische noodzaak fysiek afdwingen ervan, maar met een rehabilitatief doel, een onmenselijke en vernederende behandeling of bestraffing oplevert (Bublitz, 2018, p. 299-300; Kirchmair, 2019, p. 29-31; Shaw 2018, p. 257-261). Het uitgangspunt van het Nederlandse recht dat gedwongen interventies met een medisch karakter maar met een rehabilitatief doel, zoals neuro-interventies, in beginsel (voor zover zij het minimumniveau van *ill treatment* overstijgen), niet zijn toegelaten is daarom juist.

Neuro-interventies met *uitsluitend* bestraffing in de vorm van leedtoevoeging als doel (vergelding) zijn onmenselijk en vernederend, en moeten vermoedelijk als marteling worden beschouwd (Shaw, 2018, p. 261-262). Dergelijke interventies kent het Nederlandse recht ook niet.

De vraag is of *drang* (in plaats van dwang) om een neuro-interventie te ondergaan in strijd is met artikel 3 EVRM, bijvoorbeeld doordat vrijheidsbeneming (verder) ten uitvoer wordt gelegd indien ondergaan van de interventie geweigerd wordt (Shaw, 2018, p. 459). Dat is niet zonder meer het geval. In *Dvoracek* t. *Slowakije* (EHRM 6 november 2014, 12927/13) werd de in een psychiatrisch ziekenhuis opgenomen patiënt voor de keuze geplaatst tussen gebruik van libidoremmende medicatie en psychotherapie ter behandeling van een met een genetische afwijking samenhangende parafilie. De psychotherapeutische behandeling zou relatief lang duren en daardoor een langduriger opname in de kliniek tot gevolg hebben, waardoor Dvoracek zich gedwongen voelde de medicatie te gebruiken. Volgens het EHRM was echter geen sprake van dwangmedicatie (par. 106). Dat Dvoracek voor een moeilijke keuze werd gesteld tussen het gebruiken van medicatie en een onaantrekkelijk alternatief is niet zonder meer strijd op met artikel 3 EVRM. Daarbij is misschien van belang geweest dat de aan Dvoracek aangeboden behandeling een medische reden had en niet in een strafrechtelijk kader plaatsvond (par. 94. Zie ook Forsberg 2018, 60; 2021, 396; Shaw 2018, p. 258-259). Tegelijkertijd is er ook jurisprudentie die suggereert dat in het geval van mensen die zich in handen van de strafvorderlijke

autoriteiten bevinden ook drang kan leiden tot een schending van artikelen 3 en 8 EVRM (zie daarover de volgende paragraaf).

Artikel 3 EVRM bevat niet alleen een verbod op onmenselijke of vernederende behandeling of bestraffing door de overheid, maar ook de positieve verplichting van de overheid om te voorkomen dat burgers andere burgers aan onmenselijke of vernederende behandeling onderwerpen, bijvoorbeeld in de vorm van delicten die de lichamelijke integriteit schaden (deze verplichting hangt ook samen met artikel 2 EVRM, dat het recht op leven beschermt) (Schabas, 2015, p. 127-129; 191-194). Artikel 3 EVRM vereist onder meer dat de overheid zorgdraagt voor een effectief systeem van strafrechtelijke handhaving waarmee recidive kan worden voorkomen (EHRM 25 juni 2009, 46423/06 (*Beganovic* t. *Kroatië*), par. 85-86). Indien neuro-interventies zo kunnen worden toegepast dat zij recidivegevaar verminderen, kunnen zij bijdragen aan het voldoen aan de positieve verplichting neergelegd in artikel(en) 3 (en 2) EVRM.

Afgedwongen strafrechtelijke neuro-interventies zonder acute medische noodzaak en neuro-interventies met vergelding – leedtoevoeging – als doel zijn in strijd met artikel 3 EVRM. Het Nederlandse strafrecht biedt voor dergelijke interventies momenteel ook geen basis. Artikel 3 EVRM lijkt ruimte te laten voor het verbinden van een neuro-interventie als bijzondere voorwaarde aan sancties. Dat de dreigende (verdere) tenuitvoerlegging van een straf of maatregel drang op de verdachte uitoefent om de interventie te ondergaan is niet zonder meer bezwaarlijk. Zoals in de volgende paragraaf wordt besproken staat het EHRM op grond van artikelen 3 en 8 EVRM echter niet alle vormen van drang toe. Denkbaar is ook dat de specifieke aard van sommige neuro-interventies het EHRM aanleiding geeft om drangsituaties strenger beoordelen, bijvoorbeeld omdat een bepaalde neuro-interventie een hersenoperatie vergt.

(ii) Neuro-interventies en het recht op respect voor privéleven

Artikel 8 EVRM beschermt het recht op respect voor privéleven. De noties van zelfbeschikking en persoonlijke autonomie zijn belangrijk voor de interpretatie van artikel 8 EVRM door het EHRM (EHRM 29 april 2002, 2346/02 (*Pretty* t. *Verenigd Koninkrijk*), par. 61). Beslissingen over medische behandeling worden mede daarom beschermd door het recht op privéleven (Schabas, 2015, p. 371-374). Deze bescherming is verreikend:

> '*The freedom to accept or refuse specific medical treatment, or to select an alternative form of treatment, is vital to the principles of self-determination and personal autonomy. A competent adult patient is free to decide, for instance, whether or not to undergo surgery or treatment or, by the same token, to have a blood transfusion. However, for this freedom to be meaningful, patients must have the right to make choices that accord with their own views and values, regardless of how irrational, unwise or imprudent such choices may appear to others. […] It was emphasised that free choice and self-determination were themselves fundamental constituents of life and that, absent any indication of the need to protect third parties – for example, mandatory vaccination during an epidemic, the State must abstain from interfering with the individual freedom of choice in the sphere of health care, for such interference can only lessen and not enhance the value of life […].*'
>
> (EHRM 10 juni 2010, 320/02 (*Jehova's Getuigen van Moskou e.a.* t. *Rusland*), par. 136.)

Neuro-interventies hebben een medisch karakter en maken een inbreuk op de fysieke en psychische integriteit van een persoon. De fysieke en psychische integriteit valt onder de bescherming van artikel 8 EVRM (EHRM 12 november 2013, 5786/08 (*Söderman* t. *Zweden*), par. 78-85; Schabas, 2015, 369-370). Hoewel het EHRM psychische integriteit niet precies definieert, valt daaronder in ieder geval ook de geestelijke gezondheid (EHRM 26 november 2009, 25282/06 (*Dolenec* t. *Kroatië*), par. 165). Neuro-interventies kunnen de mentale gezondheid van betrokkenen raken en daarmee kunnen zij een inbreuk maken op het recht op privéleven (Ligthart et al*.,* 2021). Daarnaast geniet de persoonlijkheid in bredere zin bescherming onder artikel 8 EVRM (EHRM 10 juni 2010, 320/02 (*Jehova's Getuigen van Moskou e.a.* t. *Rusland*), par. 117).

Gedwongen medische behandeling is zonder meer inmenging in het recht op privéleven, in het bijzonder van het recht op fysieke integriteit (EHRM 3 juli 2012, 34806/04 (*X.* t. *Finland*), par. 212). Medische dwangbehandeling beoordeelt het EHRM primair aan de hand van de maatstaven van artikel 3 EVRM (vgl. EHRM 8 november 2011, 18968/07, (*V.C.* t. *Slowakije*), par. 144).

Niet alleen dwangbehandeling kan echter een beperking zijn van het recht op privéleven, ook het uitoefenen van sterke drang om een medische behandeling te ondergaan kan daaronder vallen (EHRM 8 november 2011, 18968/07, (*V.C.* t. *Slowakije*)). Dat geldt in het bijzonder indien sprake is van personen die zich in de handen van de strafvorderlijke overheid bevinden en als aan niet-meewerken negatieve gevolgen zijn verbonden (zie onder meer EHRM 22 juli 2003, 24209/94 (*Y.F. t. Turkije*); EHRM 14 april 2020, 75229/10 (*Dragan Petrovic* t. *Servië*)). Zo oordeelde het EHRM dat de instemming met een gynaecologisch onderzoek van een gedetineerde nadat zware druk op haar was uitgeoefend niet vrijwillig was en dus een inbreuk op het recht op privéleven betekende (EHRM 13 augustus 2008, 52515/99 (*Juhnke* t. *Turkije*)). Hoewel geen aanleiding bestaat om te denken dat neuro-interventies die als bijzondere voorwaarde aan een sanctie worden verbonden altijd een inbreuk op artikel 8 EVRM maken, is duidelijk dat in sommige gevallen van drang een inbreuk kan ontstaan. Het onderscheid dat in het Nederlandse recht tussen dwang (onvrijwillig) en drang (vrijwillig) wordt gemaakt is daarom te grofmazig, terwijl de jurisprudentie van het EHRM te casuïstisch is om meer algemene uitspraken te doen over dit onderwerp (Bijlsma & Ligthart, geaccepteerd).

Voor zover het stellen van een neuro-interventie als bijzondere voorwaarde een inbreuk is op artikel 8 EVRM, moet zij voldoen aan de eisen die artikel 8 lid 2 EVRM stelt. Ten eerste moet de inbreuk op het grondrecht bij wet zijn voorzien en die wet moet met voldoende waarborgen omkleed zijn (vgl. EHRM 3 juli 2012, 34806/04 (*X.* t. *Finland*), par. 216). Eerder zijn de diverse sanctiemodaliteiten geschetst waaraan neuro-interventies als bijzondere voorwaarde kunnen worden verbonden. In die gevallen zijn de interventies dus bij wet voorzien. Ten tweede moet de beperking noodzakelijk zijn in een democratische samenleving en in het belang zijn van een van de in het tweede lid genoemde legitieme doelen. De beperking moet voortvloeien uit een *pressing social need* en in verhouding staan tot het ermee nagestreefde doel. Legitieme doelen die in artikel 8 lid 2 EVRM zijn opgenomen zijn het voorkomen van strafbare feiten en bescherming van de gezondheid.

Rehabilitatieve neuro-interventies kunnen bijdragen aan het legitieme doel van het voorkomen van strafbare feiten. Denkbaar is dat (onder omstandigheden) neuro-interventies die onder drang worden ondergaan een inbreuk vormen op artikel 8 EVRM, maar gerechtvaardigd zijn op grond van het tweede lid (vgl. Bijlsma 2019, p. 69-70). Diverse factoren zullen een rol spelen bij de beoordeling of een neuro-interventie noodzakelijk is in een democratische samenleving. Het al of niet bestaan van minder ingrijpende alternatieven is van belang. De grootte van de inbreuk die de interventie maakt op de fysieke en psychische integriteit van de betrokkene moet in proportionele verhouding staan tot de aard van het strafbare feit dat met de interventie voorkomen moet worden. De effectiviteit van een interventie kan bij de noodzakelijkheidsbeoordeling een rol spelen (Forsberg, 2021, 399-403). Ten

slotte is ook relevant dat sommige neuro-interventies de psyche van de betrokkene beïnvloeden. Gezien de nadruk die het EHRM legt op zelfbeschikking en persoonlijke autonomie, is niet ondenkbaar dat het strenge eisen stelt aan de rechtvaardiging van dergelijke interventies (vgl. Bublitz, 2018, 301-302), hoewel deze kwestie ook aan de orde zou kunnen komen in verband met het door artikel 9 EVRM beschermde recht op vrijheid van gedachte en geweten.

Het is onduidelijk in hoeverre strafrechtelijke neuro-interventies een inbreuk maken op het recht op privéleven dat beschermd wordt door artikel 8 EVRM. Omdat de verdachte er zelf voor kiest om de voorwaarde al of niet na te leven, is niet evident dat een inbreuk op artikel 8 EVRM wordt gemaakt. Tegelijkertijd kan de drang die uitgaat van de (verdere) tenuitvoerlegging van vrijheidsbeneming toch maken dat sprake is van een inbreuk op artikel 8 EVRM. Die inbreuk kan gerechtvaardigd zijn op grond van het tweede lid van artikel 8 EVRM, maar dat is sterk afhankelijk van de omstandigheden van het geval. Bij die beoordeling speelt waarschijnlijk ook de specifieke aard van neuro-interventies een rol.

(iii) Neuro-interventies en de vrijheid van gedachte en geweten

Artikel 9 EVRM beschermt de vrijheid van gedachte, geweten en godsdienst, het *forum internum*. De jurisprudentie van het EHRM over dit artikel heeft vooral betrekking op beperkingen van de uitoefening van godsdienst (Schabas, 2015, 419-420). In verband met opsporingsmethoden en neuro-interventies zijn echter vooral de vrijheid van gedachten en geweten aan de orde (Bublitz, 2014; Ligthart, 2021, p. 114-152). Een neuro-interventie die de hersenen stimuleert kan potentieel gedachtevorming beïnvloeden. Artikel 9 EVRM geniet absolute bescherming:

> *'The fundamental nature of the rights guaranteed in Article 9 § 1 of the Convention is also reflected in the wording of the paragraph providing for limitations on them. Unlike the second paragraphs of Articles 8, 10 and 11 of the Convention, which cover all the rights mentioned in the first paragraphs of those Articles, that of Article 9 of the Convention refers only to 'freedom to manifest one's religion or belief'. In so doing, it recognises that in democratic societies, in which several religions coexist within one and the same population, it may be necessary to place restrictions on this freedom in order to reconcile the interests of the various groups and ensure that everyone's beliefs are respected […]. At the same time, it emphasises the primary importance of the right to freedom of thought, conscience and religion and the fact that a State cannot dictate what a person believes or take coercive steps to make him change his beliefs.'*
>
> (EHRM 12 april 2007, 52435/99 (*Ivanova* t. *Bulgarije*), par. 79.)

Vermeulen & Van Roosmalen (2018, 748) schrijven hierover:

> *'This protection guarantees that the state may never interfere in this most intimate and inner sphere, for instance by dictating what a person has to believe, by taking coercive steps to make him change his beliefs ('brain washing' etc.), or by using inquisitorial methods to discover what his personal thoughts and convictions are.'*

Van belang is dat onbekend is wat de precieze reikwijdte is die het EHRM aan de begrippen 'gedachte' en 'geweten' toekent. Zij moeten een '*level of cogency, seriousness, cohesion and importance'* kennen om beschermd te zijn door artikel 9 EVRM (EHRM 1 juli 2014, 43835/11 (*S.A.S.* t. *Frankrijk*), par. 55).

Artikel 9 EVRM lijkt daarom niet *iedere* gedachte en morele notie, hoe triviaal ook, te beschermen (Ligthart, 2020).

Rehabilitatieve neuro-interventies hebben als doel de psyche te beïnvloeden en kunnen daarom raken aan gedachten, gedachtevorming en geweten. Of dat laatste in het geval van neuro-interventies echt aan de orde is, is momenteel onduidelijk. De absolute bescherming die artikel 9 EVRM op dat terrein biedt, maakt dat gedwongen neuro-interventies met een effect op gedachten en geweten in strijd kunnen zijn met artikel 9 EVRM (Bublitz, 2014, 9). Vereist is dan wel dat het gaat om gedachten *etc.* die binnen het bereik van artikel 9 lid 1 EVRM vallen. Omdat de reikwijdte van deze begrippen onduidelijk is, staat niet vast in onder welke omstandigheden neuro-interventies in strijd zijn met artikel 9 lid 1 EVRM (Ligthart, 2020; Ligthart et al., 2021). Evenmin is duidelijk hoe ingrijpend neuro-interventies in dit opzicht zijn. Bijzonder aan sommige neuro-interventies is dat zij *direct* (fysiek) de hersenen beïnvloeden. Zij werken niet op *indirecte* (psychologische) wijze, zoals argumenten of psychotherapie. Omdat neuro-interventies buiten de rationele controle van de betrokkene om gedachten kunnen beïnvloeden, zijn zij mogelijk problematischer vanuit het oogpunt van artikel 9 EVRM dan meer 'klassieke' methoden van beïnvloeding (vgl. Bublitz, 2020a; Ligthart et al., 2021).

Mogelijk is ook hier het doel van de interventie relevant. Waar het gaat om medisch-noodzakelijke interventies lijkt enige ruimte te bestaan voor beperking van de in artikel 9 EVRM neergelegde rechten (Bublitz, 2014, 10). In *Mockute* t. *Litouwen* (EHRM 27 februari 2018, 66490/09) wordt de drang die op een gedwongen opgenomen psychiatrische patiënt in het kader van haar behandeling werd uitgeoefend om haar religieuze denkbeelden te veranderen als inmenging beschouwd in het recht op vrijheid van religie. Het EHRM toetst vervolgens of deze inmenging gerechtvaardigd was op grond van het tweede lid van artikel 9 EVRM. Hoewel het antwoord daarop negatief is (mede onder verwijzing naar de hiervoor geciteerde overweging uit *Ivanova* t. *Bulgarije*), suggereert de toetsing dat onder zeer bijzondere omstandigheden een beperking gerechtvaardigd kan zijn. De vraag is of dit ook geldt voor strafrechtelijke neuro-interventies, waarbij niet zozeer het therapeutische belang van de betrokkene centraal staat, maar vooral het belang van de maatschappij om recidive te voorkomen.

Het is onduidelijk of neuro-interventies op zodanige wijze interfereren met het mentale leven van de betrokkene dat artikel 9 EVRM in het geding is. Voor zover dat het geval zou zijn, lijkt (vrijwel) geen ruimte te bestaan voor gedwongen neuro-interventies. Ook in verband met artikel 9 EVRM speelt de vraag of de keuze die een veroordeelde heeft tussen de interventie en (verdere) vrijheidsbeneming maakt dat van een beperking geen sprake is, of dat de druk die de vrijheidsbeneming op de veroordeelde uitoefent zodanig is dat toch van een beperking moet worden gesproken.

(iv) Neuro-interventies en de vrijheid van meningsuiting

Artikel 10 EVRM beschermt het recht van vrijheid van meningsuiting. Neuro-interventies waarbij hersenscans worden gebruikt brengen hersenprocessen in kaart. Het EHRM sluit niet uit dat artikel 10 EVRM ook het recht bevat om *af te zien* van het verspreiden van meningen, ideeën en informatie (EHRM 23 oktober 2018, 26892/12 (*Wanner* t. *Duitsland*), par. 39). Voor zover neuro-interventies inzicht (gaan) bieden in de mentale processen van een betrokkene, zouden zij kunnen raken aan een eventueel negatief recht op vrije meningsuiting (Ligthart, 2020). Niet evident is echter dat de geregistreerde hersenprocessen moeten worden gezien als meningen, ideeën of informatie (Ligthart et al., 2021). Het recht op vrijheid van meningsuiting kan worden beperkt indien dat noodzakelijk is in een democratische samenleving met het oog op een van de doelen omschreven in het tweede lid (waaronder begrepen voorkomen van strafbare feiten en de bescherming van de gezondheid).

(v) Neuro-interventies en de positieve verplichting tot rehabilitatie

In verband met detentie die (mede) gebaseerd is op het recidivegevaar dat van een persoon uitgaat, heeft het EHRM bepaald dat op de overheid de positieve verplichting rust de betrokkene de mogelijkheid tot rehabilitatie te bieden (Meijer, 2017). De tenuitvoerlegging van een levenslange gevangenisstraf kan op den duur in strijd raken met artikel 3 EVRM als de veroordeelde geen toegang krijgt tot een behandeling die kan bijdragen aan rehabilitatie (EHRM 26 april 2016, 10511/10 (*Murray* t. *Nederland*), par. 108). Een dergelijke verplichting kan ook aan de orde zijn in geval van beveiligingsmaatregelen zoals de TBS. Het EHRM heeft geoordeeld dat het in strijd kan zijn met artikel 5 EVRM om detentie uitsluitend op grond van recidivegevaar voort te zetten als geen geschikte therapieën worden aangeboden om het gevaar te verminderen. De veroordeelde moet een kans op rehabilitatie en daarmee op invrijheidstelling hebben (EHRM 7 september 2017, 45953/10 (*D.J.* t. *Duitsland*), par. 58). Deze redenering is mogelijk ook van belang voor andere sancties, hoewel het EHRM zich daar niet over heeft uitgelaten. Een reden om een voorwaardelijke straf op te leggen kan immers zijn dat de rechter vrijheidsbeneming niet nodig vindt als door middel van behandeling (bijvoorbeeld een neuro-interventie) het recidivegevaar voldoende wordt verminderd. De vraag kan worden opgeworpen of vrijheidsbeneming gerechtvaardigd is als de veroordeelde niet de mogelijkheid krijgt een alternatief daarvoor te benutten.

De positieve verplichting tot rehabilitatie kan tot gevolg hebben dat de overheid gehouden is bepaalde neuro-interventies aan te bieden indien een veroordeelde daarmee in staat gesteld kan worden zijn of haar recidivegevaar zodanig te verminderen dat rehabilitatie en dus invrijheidstelling mogelijk is.

(d) Discussie

In het voorafgaande zijn grondrechtelijke kwesties besproken die samenhangen met neuro-interventies in een justitiële context. Duidelijk is dat het om een complex krachtenveld gaat. Enerzijds zijn er grondrechten die nopen tot terughoudendheid of misschien soms tot het afzien van het gebruik van neuro-interventies (art. 3, 8, 9 en 10 EVRM), anderzijds kunnen positieve verplichtingen er soms juist toe dwingen neuro-interventies aan te bieden (vooral art. 5 EVRM). Het samenspel tussen deze deels conflicterende normen moet nog verder uitkristalliseren in jurisprudentie. Daarbij is van belang op te merken dat het EHRM iedere zaak op haar merites beoordeelt. Door deze casuïstische benadering, waarin ook de nationale context een belangrijke rol speelt, is het moeilijk om algemene uitspraken te doen over de (on)toelaatbaarheid van vormen van neuro-interventies in een justitiële context. Daarbij is het ook nog eens zo dat neuro-interventies het mogelijk maken om direct in te grijpen in hersenprocessen op wijzen die voorheen niet mogelijk waren. Daardoor kan een nieuwe, onvoorspelbare dynamiek in de ERHM-jurisprudentie ontstaan. Zo is denkbaar dat het voorheen weinig geprononceerde recht op vrijheid van gedachte en geweten van groter belang wordt (Bublitz, 2014; Ligthart et al., 2021).

Binnen deze beperkingen is het mogelijk om op basis van de analyse in de voorafgaande paragrafen factoren te benoemen die waarschijnlijk van belang zullen zijn bij de beoordeling hoe een justitiële neuro-interventie zich verhoudt tot de door het EVRM beschermde grondrechten:

- *Het doel van de interventie.* In uitzonderlijke gevallen, waarin sprake is van acuut gevaar, is het mogelijk om een behandeling met een puur medisch doel af te dwingen. In een strafrechtelijke context, waarin het doel is gelegen in rehabilitatie door middel van het beperken van recidiverisico, zijn fysiek afgedwongen neuro-interventies zeer problematisch en vermoedelijk

niet toegelaten. Neuro-interventies met uitsluitend een bestraffend doel (leedtoevoeging) zijn niet toegestaan.

- *De ingrijpendheid van de interventie, inclusief eventuele bijwerkingen en risico's.* Neuro-interventies zijn hiervoor gedefinieerd als 'technieken die de hersenen veranderen met het doel om gevaar te verminderen'. Daaronder vallen niet-invasieve technieken als tDCS, TMS en FUS, maar ook technieken die een hersenoperatie vergen, zoals DBS. Sommige van deze technieken zouden kunnen worden toegepast met als doel of als neveneffect beïnvloeding van gedachten of mogelijk zelfs de persoonlijkheid. Naar mate een interventie ingrijpender is en de effecten langer beklijven, zal een inbreuk op grondrechten eerder aan de orde zijn. Zowel de fysieke als de mentale effecten zijn bij deze factor van belang.

- *De mate van drang die wordt toegepast.* In een justitiële context gaat het niet om de normale situatie waarin een patiënt een beslissing dient te nemen over het wel of niet volgen van een behandeling, maar staat de betrokkene vaak onder druk doordat weigeren de interventie te ondergaan tot (voortzetting van) vrijheidsbeneming leidt. Volgens de Nederlandse wetgever staat deze drang niet in de weg aan de vrijwilligheid van het ondergaan van de interventie, maar het EHRM is daar genuanceerder over. De mate van drang die wordt uitgeoefend op een betrokkene varieert. Een betrekkelijk lichte voorwaardelijke straf oefent op een veroordeelde minder drang uit om een interventie te ondergaan dan een dreigende plaatsing in een *long stay*-afdeling of voortzetting van een levenslange gevangenisstraf omdat buiten de interventie om geen andere behandelingen meer bestaan die kunnen leiden tot een voldoende reductie van recidivegevaar om tot invrijheidsstelling over te gaan. Naar mate minder drang op de betrokkene wordt uitgeoefend en de keuzevrijheid van de betrokkene meer voorop staat, zal een interventie minder problematisch zijn. Daarbij kan de context van belang zijn. In verband met levenslang gestraften en TBS-gestelden kan een verplichting bestaan een bepaalde interventie aan te bieden, ook al is het alternatief voortzetting van de vrijheidsbeneming.

- *De beschikbaarheid van (minder ingrijpende) alternatieve interventies (subsidiariteit) en verhouding tussen middel en doel (proportionaliteit)*. Bij de beoordeling of een inbreuk op een grondrecht noodzakelijk is in een democratische samenleving toetst het EHRM aan de beginselen van subsidiariteit en proportionaliteit.

- *De effectiviteit van de interventie.* Naar mate een interventie effectiever is in het reduceren van gevaar zal de toepassing ervan eerder gerechtvaardigd kunnen zijn. Daarmee kan de toepassing immers beter voldoen aan het daarmee nagestreefde doel en zal daardoor eerder noodzakelijk worden geacht of een beperking van grondrechten kunnen rechtvaardigen.

De genoemde factoren werken op elkaar in. Niet ondenkbaar is dat voor neuro-interventies die een zeer beperkte inbreuk op grondrechten maken geen toestemming van de betrokkene nodig is. Voeding lijkt bijvoorbeeld agressie in penitentiaire inrichtingen (en mogelijk ook recidiverisico) te kunnen reduceren (Zaalberg, 2018). Omdat de wijze waarop hersenen functioneren wordt beïnvloed door voedingsstoffen, kan het vervangen van een ongezond voedselaanbod in een penitentiaire inrichting door een gevarieerd, gezond aanbod worden aangemerkt als een neuro-interventie zoals hiervoor gedefinieerd. Eenzijdige aanpassing van het voedselaanbod in een gevangenis om geweldsincidenten te verminderen lijkt vanuit grondrechtelijk oogpunt weinig problematisch, mede gelet op de positieve verplichting tot rehabilitatie (Ligthart et al., 2019). Deze afweging zal mogelijk al anders uitvallen indien het gaat om toediening van voedingssupplementen waaraan gedetineerden zich niet kunnen onttrekken. De niet-invasieve vormen van hersenstimulatie (tDCS, TMS) die in een justitiële context toegepast kunnen worden om (bijvoorbeeld) agressie te verminderen (Sergiou et al., 2021) zijn wellicht

denkbaar als bijzondere voorwaarde bij diverse sanctiemodaliteiten. Daarmee moet de verdachte vanzelfsprekend wel instemmen.

Aan de andere kant van het spectrum staan de interventies die een hersenoperatie vergen waarmee elektroden in de hersenen wordt geplaatst (zoals bij DBS). Daarmee wordt diep ingegrepen in de lichamelijke en mentale integriteit van de betrokkene. Situaties waarin zo een risicovolle ingreep zonder toestemming mag worden verricht zijn eigenlijk niet denkbaar, tenzij misschien als laatste redmiddel in een medische noodsituatie. Tegelijkertijd is niet uitgesloten dat een dergelijke ingreep (in de toekomst) een laatste kans is om een levenslang gestrafte te rehabiliteren of om te voorkomen dat een TBS-gestelde op een *long stay*-afdeling belandt. In dat geval kan het op grond van 5 EVRM juist problematisch zijn deze behandeling aan de betrokkene te onthouden, ook al kan niet gezegd worden dat de beslissing de interventie te ondergaan zonder sterke drang plaatsvindt (het alternatief is immers potentieel levenslange detentie). Het stellen van een dergelijke ingreep als bijzondere voorwaarde aan (bijvoorbeeld) een voorwaardelijke straf lijkt dan weer problematisch te zijn. Moeilijk denkbaar is dat in dat geval geen minder ingrijpende alternatieven beschikbaar zijn en bovendien gaat het dan om recidivegevaar van heel andere aard dan aan de orde is in geval van een levenslang gestrafte of TBS-gestelde. Om in die context via dreiging met tenuitvoerlegging van een gevangenisstraf drang uitoefenen op een veroordeelde om een implantaat te laten plaatsen is problematisch vanuit mensenrechtelijk oogpunt.

(e) Slotopmerking: nieuwe grondrechten

Dit onderzoek is toegespitst op het bestaande mensenrechtelijke kader. Daarbij moet de kanttekening worden geplaatst dat in de literatuur betoogd wordt dat dit kader wel eens te weinig bescherming zou kunnen bieden tegen de toepassing van neurotechnologie, ook in een strafrechtelijk kader. In Spanje en Chili worden daarom grondwetswijzigingen voorbereid die moeten leiden tot de codificatie van nieuwe grondrechten die bescherming bieden tegen bepaalde vormen van gebruik van neurotechnologie (en kunstmatige intelligentie) (Ligthart et al., 2021, 1790). De gedachte hierachter is dat de bestaande grondrechtelijke kaders burgers onvoldoende bescherming bieden. Hoewel justitiële neurotechnologieën op verschillende wijzen in verband zijn te brengen met klassieke grondrechten als het recht op een eerlijk proces, het verbod van onmenselijke of vernederende behandeling of bestraffing en het recht op respect voor privéleven, is de precieze bescherming die deze grondrechten bieden tegen het gebruik van neurotechnologie (vooralsnog) onduidelijk (zie de voorafgaande hoofdstukken). De klassieke grondrechten beschermen met name de fysieke, externe sfeer (fysieke integriteit, uitingsvrijheid, *etc.*). Neurotechnologieën maken het echter mogelijk om *direct* in de interne sfeer in te grijpen, niet alleen fysiek in de hersenen (*brain*), maar ook in de psyche (*mind*). Daarom worden voorstellen gedaan voor het erkennen van een grondrecht op mentale vrijheid, privacy en/of integriteit, dat het recht beschermt om zelf over de psyche te beschikken en te beslissen over de toepassing van neurotechnologieën (Bublitz, 2013; 2018; 2020; Bublitz & Merkel, 2014; Douglas, 2020, p. 381-382; Douglas & Forsberg, 2021; Ienca & Andorno, 2017; Sententia, 2006). Andere voorstellen bepleiten aanpassing van bestaande grondrechten. In het bijzonder een herformulering en uitwerking van het op dit moment onderontwikkelde recht op vrijheid van gedachte en geweten zou bescherming kunnen bieden tegen onvrijwillige toepassing van neurotechnologie (Bublitz, 2014; McCarthy-Jones, 2019). Ten slotte wordt het standpunt verdedigd dat (dynamische interpretatie van) het geheel aan bestaande grondrechten (in het bijzonder art. 3, 6, 8 en 10 EVRM) voldoende bescherming kan bieden (Ligthart et al., 2021; Michalowski, 2020. In verband met *brain reading*: Ligthart, 2020; Ligthart et al., 2020).

11. Ethiek

Het deel van de ethiek dat de normatieve aspecten van neurotechnologie onderzoekt, wordt wel aangeduid met *neuro-ethiek* (Clausen & Levy, 2015; Ienca, 2021b). De neuro-ethiek houdt zich bezig met ethische dimensies van het gebruik van neurotechnologie op allerlei terreinen binnen de samenleving, waaronder gezondheidszorg, oorlogsvoering, strafrecht, en commerciële producten (Clausen & Levy, 2015). De ethische relevantie van (toekomstige) toepassing van neurotechnologie binnen het justitie-domein wordt breed gezien (Petersen & Kragh, 2017a; Petersen & Kragh, 2017b; Canavero, 2014; Umbach et al., 2015; Kirchmair, 2019; Meynen, 2019a, b, 2014; NIH, 2019; Greely, 2013; Chew et al., 2018). Gesteld kan worden dat de ethische overwegingen hierbij geregeld raken aan de juridische, maar vaak in net iets andere bewoordingen en terminologie. Bijvoorbeeld, waar juristen kunnen spreken over mensenrechten, zoals bijvoorbeeld in het Europese Verdrag voor de Rechten van de Mens (EVRM) vervat, kunnen ethici verwijzen naar ethische waarden en principes of fundamentele rechten (Ienca & Andorno, 2017; Lavazza, 2018). Ook werken ethici en juristen soms samen in hun onderzoek waardoor de gedachtegang deels juridisch, deels ethisch is (Ienca and Andorno, 2017). Soms ook schrijft een jurist een neuro-ethische bijdrage, dan weer schrijft een ethicus over het EVRM. Kortom, wat een ethische en wat een juridische analyse is, laat zich niet steeds goed afbakenen. In onderstaande tekst zal in elk geval primair naar ethische waarden en principes gekeken worden en worden niet de juridische kaders als uitgangspunt genomen; meer precies, de tekst is geordend volgens de ethische principes, niet volgens de drie domeinen *opsporing en waarheidsvinding*, *risicotaxatie* en *interventie*.

Centrale thema's vanuit de ethiek zijn: privacy, autonomie, lichamelijke en mentale integriteit, en menselijke waardigheid. Dit zijn overigens niet de enige ethische thema's die genoemd worden in relatie tot opkomende neurotechnologieën; zo wordt ook geregeld over *agency*, identiteit, en vrijheid van gedachte gesproken (Goering et al., 2021; Yuste et al., 2017; Ienca, 2021b).[11] Daarnaast zijn de verschillende begrippen niet altijd duidelijk van elkaar af te grenzen. [12] In het navolgende wordt niet getracht een uitputtend overzicht van de ethische discussie te geven; het doel is kort enkele ethische kernpunten voor het justitie- en veiligheidsdomein te identificeren. Duidelijk wordt dat elk van de ethische waarden, althans in beginsel, relevant is voor *opsporing en waarheidsvinding*, *risicotaxatie*, als ook *interventie*.

(a) Menselijke waardigheid

Een van de geïnterviewde experts gaf aan dat menselijke waardigheid datgene is waar het *uiteindelijk om gaat* bij de bescherming van fundamentele rechten ten aanzien van deze neurotechnologieën: mensen niet als objecten zien, maar als doelen in zichzelf, waarbij deze expert aan de verlichtingsfilosoof Immanuel Kant refereerde. Je zou dus de menselijke waardigheid als een

[11] Bijvoorbeeld: *identity*, *agency* (Yuste et al. 2017), psychological continuity ('*a special neuro-focused instance of the right to identity*',) en ook 'cognitive liberty' (Ienca 2021b, a). Wij focussen in onze analyse op de normatieve begrippen privcacy, autonomie, mentale en fysieke integriteit en menselijke waardigheid. Overigens zijn er ook duidelijke connecties tussen de eerder genoemde termen en de begrippen die wij bespreken, zoals tussen 'cognitive liberty' en autonomie: '*there is a general consensus in the literature that cognitive liberty entails a person's autonomous, unhindered control over their mind*' (Ienca 2021b).

[12] Lavazza verbindt privacy met autonomie (Lavazza 2018). Zie voor een dergelijke link ook (Rainey et al. 2020). Wajnerman Paz verbindt mental privacy met psychological integrity (Wajnerman Paz epub ahead of print) En 'mental privacy' is door auteurs ook verbonden met 'freedom of thought' (Ienca 2021b).

overkoepelend – of zo je wilt funderend – begrip kunnen zien voor de in het vervolg te bespreken ethische waarden. Zo lijken Shaw (2018), Sieber (2019) en Holmen (2021) het bijvoorbeeld ook te gebruiken. Hoewel het thema wordt genoemd (Lavazza, 2018; Müller & Rotter, 2017; Shaw, 2018), is het, althans naar onze indruk, in het algemeen wel minder uitgewerkt in de ethische[13] literatuur over neurotechnologie dan bijvoorbeeld privacy, autonomie (waaronder consent), en mentale en lichamelijke integriteit. Tegelijkertijd is het als funderend dan wel overkoepelend begrip hiermee ten nauwste verbonden. Menselijke waardigheid is voor zowel de *opsporing en waarheidsvinding*, als de *risicotaxatie* en *interventie* relevant.

(b) Privacy

Goering et al. (2021) definiëren privacy als volgt: '*a right that others not access one's personal information and personal space*'. Het gaat wat betreft neurotechnologie vooral om die technieken die 'informatie uit het brein halen', hetgeen ook wel met *brain reading* wordt aangeduid (Roelfsema et al., 2018). Iets preciezer gaat het om technieken *voor zover* ze informatie uit het brein halen (zie het technische deel waarin onderscheid wordt gemaakt tussen technieken die hersenactiviteit meten, zowel meten als stimuleren, of enkel stimuleren). Het ligt namelijk voor de hand dat sommige technieken zowel in het brein interveniëren als er informatie uit halen. Een voorbeeld is *adaptive* of *closed loop deep brain stimulation* (Gilbert et al., 2018). Hierbij wordt enerzijds hersenactiviteit geregistreerd en geanalyseerd, anderzijds wordt het brein – (mede) op basis van deze input – gestimuleerd en zo veranderd. Er wordt bij deze techniek dus ook informatie over iemands brein verkregen, en in zoverre is privacy relevant. Dit betekent dat privacy, hoewel primair relevant voor de *opsporing en waarheidsvinding* en *risicotaxatie* (die immers informatie verzamelen) ook relevant kan zijn voor *interventie*.

Het idee is wel dat het bij *brain reading* niet zomaar gaat om informatie die privé is, maar om informatie die bij uitstek privé is, namelijk gegevens over onze geest, welke raken aan onze gedachten en intenties/neigingen (Meynen, 2020b; Goering et al., 2021). Overigens, op dit moment kunnen we gedachten en intenties/neigingen niet zomaar uit hersensignalen aflezen, maar er wordt wel onderzoek naar gedaan. In elk geval is privacy een centraal ethisch punt van zorg bij deze technologieën (Lavazza, 2018).[14] Voor de privacy die bij neurotechnologie met name in het geding is, wordt ook wel de term *mentale privacy* gebruikt (Ienca & Andorno, 2017). Deze kan als volgt worden opgevat: '*Mental privacy is the expression generally used to denote people's right against the unconsented intrusion by third parties into their brain data as well as against the unauthorized collection of those data*' (Ienca, 2021b). Ienca en Andorno wijzen erop dat er met neurotechnieken niet alleen mentale informatie uit het brein gehaald kan worden, maar dat mensen op grond van hun brein(activiteit) ook *identificeerbaar* kunnen zijn (over identificeerbaarheid en hersenscans, zie ook Eke et al., 2021), zoals dat nu gebeurt met DNA of vingerafdrukken – dat voegt dus nog een dimensie aan de privacyoverwegingen toe.

Volgens Roskies (2015) zijn er twee vragen relevant voor een neuro-ethische analyse van privacy in het licht van '*brain reading*', de eerste kwalificeert zij als wetenschappelijk, de tweede als ethisch: 1) Welke

[13] Een juridisch artikel waarin dignity duidelijke gethematiseerd wordt in relatie tot Art. 3 EVRM is (Kirchmair 2019)
[14] Voor zover het gaat om toepassingen binnen het medische domein, kan overigens ook gesproken worden van vertrouwelijkheid (*confidentiality*) van de informatie (Meynen 2019a).

informatie wordt er verkregen met een bepaalde techniek? 2) Wat wordt er vervolgens mee gedaan? Roskies (2015) benadrukt dat voor een analyse van wat mag en niet mag ten aanzien van een bepaalde neurotechniek, een goed begrip van de mogelijkheden en beperkingen van de technologie essentieel is. Daarbij speelt, naast de foutmarge van de meting en de generaliseerbaarheid ervan, onder meer de ecologische validiteit een rol. Dit laatste punt behelst de vraag of een techniek die misschien in een laboratoriumsetting goed werkt, ook in de *context van feitelijk gebruik* – wellicht de rechtszaal – goed functioneert. Die situatie kan namelijk heel anders zijn, bijvoorbeeld omdat – in geval van een strafzaak – een verdachte probeert een meting te manipuleren, terwijl proefpersonen in een laboratoriumsetting dit (waarschijnlijk) niet doen (Meynen, 2019a). Het gaat hier dus om generaliseerbaarheid van de resultaten. Vervolgens zijn van belang de eventuele schadelijkheid van de techniek, consent (het maakt uit of iemand instemt of niet met de techniek – zie ook bij *autonomie*) en alternatieve wijzen om dezelfde informatie te verkrijgen (Roskies, 2015).

Er is discussie over of de informatie die via neurotechnologie verkregen wordt wel als zo uniek of bijzonder gezien moet worden (Schick, 2005). Bijvoorbeeld, DNA kan ook zeer gevoelige persoonlijke informatie bevatten, en het is ook niet uitgesloten dat in de toekomst nog veel meer persoonlijke informatie – ook ten aanzien van verlangens en voorkeuren die mensen hebben – via DNA beschikbaar kan komen. Overigens, ook niet-biologische data kunnen persoonlijke info bevatten die veel over onze voorkeuren kan laten zien, zoals ons internet-gedrag (Meynen, 2020b). Of de neuro-gegevens nu uniek zijn of niet t.o.v. andere informatiebronnen, privacy is een centraal ethisch punt ten aanzien van deze technologie.

Er zijn zorgen dat de huidige juridische kaders (met name EVRM) mensen onvoldoende beschermen tegen inbreuken op privacy door neurotechnologie (zie ook de juridische hoofdstukken). Ienca en Andorno (2017) bepleiten daarom een recht op mentale privacy – of brein privacy – dat '*aims to protect people against illegitimate access to their brain information and to prevent the indiscriminate leakage of brain data across the infosphere.*' Wanneer je een dergelijk fundamenteel recht onderschrijft is vervolgens wel de vraag of dit recht ook *absoluut* moet zijn (Roskies, 2015). Ienca en Andorno (2017) wijzen erop dat er natuurlijk al wel andere manieren zijn waarop onvrijwillig biologische informatie van mensen verkregen wordt, zoals DNA in het kader van opsporing. De vraag is dan of er een argument gegeven kan worden dat laat zien dat brein-gegevens zó bijzonder zijn dat die volledig buiten het bereik van justitie zouden moeten blijven.

(c) Autonomie

Respect voor iemands autonomie is een centraal bio-ethisch principe (Beauchamp & Childress, 2019). We willen dat mensen *zelf* beslissingen kunnen nemen over hun leven, bijvoorbeeld over hun medische behandeling. Een medische behandeling kan daarom in beginsel alleen maar gegeven worden wanneer iemand hier *informed consent* voor geeft.[15] Die persoon dient dus goed voorgelicht te worden en er dan in vrijheid zelf voor te kiezen – geïnformeerde toestemming te geven.

[15] Er zijn uitzonderingen, zoals wanneer een patient buiten bewustzijn is en er wel gehandeld moet worden.

Ook ten aanzien van neurotechnologie speelt autonomie een belangrijke rol. Het gaat hierbij om de autonomie van degene die de technologie ondergaat, op wie het wordt toegepast, bijvoorbeeld een veroordeelde. Diens autonomie is, zo blijkt, op verschillende manieren ethisch relevant.

Ten eerste gaat het om de keuze van een verdachte of veroordeelde om neurotechnologie toe te staan. Je zou kunnen zeggen dat zolang een veroordeelde zelf *instemt* met het gebruik van de techniek – bijvoorbeeld een hersenscan om recidiverisico in te schatten – het gebruik van de techniek toelaatbaar is. Er is immers *consent*. Maar er zijn hierbij bedenkingen. In hoeverre wordt de *autonome* keuze van de veroordeelde bedreigd door het feit dat het aanbod om een neurotechniek toe te passen wordt gedaan in een onvrijwillige context, zoals in een gevangenis, bijvoorbeeld als voorwaarde voor vervroegde vrijlating? Kun je de keuze dan wel echt als vrijwillig zien, of heb je in feite te maken met, in de woorden van de *godfather*, *'an offer you can't refuse'*? (Meynen, 2020a)

In feite maakt het gedwongen karakter van de strafrechtelijke context de autonome keuze tot een centraal punt van zorg (Douglas, 2014). Zo stellen Fuss en zijn collega's (2015) in een artikel over de toepassing van diepe hersenstimulatie bij zedendelinquenten dat het gebruik ervan op geen enkele manier verbonden mag zijn met vervroegde vrijlating (overigens, op dit moment is er geen diepe hersenstimulatie voor deze indicatie beschikbaar, dus het gaat om een hypothetische overweging). Maar de vraag is of hun voorstel realistisch is (Meynen, 2019b). Immers, als het risico daalt door toepassing van een techniek, dan zou iemand toch eerder naar buiten kunnen. En als die persoon eerder naar buiten kan, waarom zouden we die persoon dan niet eerder naar buiten laten gaan? En zouden we die heel belangrijke consequentie voor een persoon dan onbenoemd moeten laten – ook als die persoon er bijvoorbeeld zelf naar vraagt? En meer in het algemeen, wanneer je met iemand die bijvoorbeeld gedwongen in een forensische instelling verblijft een neurotechniek bespreekt om recidive te verminderen, dan ligt het toch voor de hand om een zo ingrijpende techniek ook te bespreken in het licht van resocialisatie, iets waar binnen een forensische instelling voortdurend naar wordt toegewerkt? (Zie hierover ook (Meynen, 2020a)) Daarbij, resocialisatie is niet alleen voor justitie en samenleving van belang, het is ook iets wat voor de betrokkene vermoedelijk zeer relevant is. Maar wanneer je deze technologieën in het kader van resocialisatie – en meer precies vervroegde vrijlating – gaat bespreken, dan dreigt dus mogelijk wel een '*offer you can't refuse*'. En dan is de vraag of je wel met echt *consent* te maken hebt. Dit punt geldt voor zowel *opsporing en waarheidsvinding* als *risicotaxatie* en *interventie*.

Naast het perspectief van *consent* is er nog een tweede manier waarop autonomie in relatie tot deze interventies relevant is. De neuro-interventie zelf zou namelijk iemands autonomie kunnen beïnvloeden. Hierboven werd reeds de *closed-loop deep brain stimulation* genoemd, waarbij het apparaat zelf – bijvoorbeeld via een algoritme – de hersenstimulatie kan regelen. Bij die stimulatie staat de persoon zelf dus buiten spel, het diepe hersenstimulatie apparaat-apparaat is 'in control'. De vraag is dan wat het doet met iemands autonomie wanneer het apparaat in feite 'aan de knoppen' zit (Gilbert et al., 2018; Kellmeyer et al., 2016; Ligthart et al., geaccepteerd). Voor het beoordelen van de impact van DBS op iemands autonomie is bepleit ook naar de ervaringen van patiënten te kijken (Roelfsema et al., 2018). Meer in het algemeen zouden neuro-interventies kunnen beïnvloeden hoe iemand beslissingen neemt, en dat kan ethisch bezwaarlijke invloed op iemands autonomie hebben. Het is duidelijk dat deze ethische zorg over de autonomie voor *interventie* van belang is.

Er is nog een derde punt naar voren gebracht ten aanzien van autonomie. Namelijk in scenario's waarin de neuro-interventie iemands *toekomstige* autonomie versterkt, doordat deze een persoon beter in staat is controle te hebben over zijn eigen leven (Ligthart et al., geaccepteerd). Ligthart et al. schrijven: '*For example, suppose the rehabilitation of an offender has failed several times because of behavioural patterns that he apparently cannot shake off – much to the offender's own regret. In this way, he will*

never be able to build the life in the community he desires. If a correctional CBD [closed-loop brain device] targets those mental/brain states that undermine the offender's rehabilitation, the CBD might be considered to empower the offender, increasing his autonomy, at least in the sense of having control over one's life.' Dus hoewel er in het heden een probleem gezien wordt met autonomie (is je keuze wel echt autonoom en het consent geldig?), zou de autonomie in de toekomst er juist versterkt door kunnen worden. Ook dit mogelijk positieve effect op iemands autonomie is ethisch relevant. Hoewel het voorbeeld zich toespitst op een interventie (*closed loop* DBS), zouden in beginsel bepaalde vormen van neurotechnologische monitoring in het kader van *risicotaxatie* veroordeelden bij resocialisatie in staat kunnen stellen om meer controle over hun leven te krijgen. Immers, deze monitoring zou de persoon de gelegenheid kunnen bieden zijn gedrag bij te sturen voordat er iets misgaat waardoor zijn resocialisatie zou mislukken.

Een van de geïnterviewden benoemde ten aanzien van de autonomie ook de 'dubbele kwetsbaarheid' van mensen met een stoornis in detentie, meer specifiek bij forensische patiënten: zij zijn detentie/vast en hebben ook mentale stoornis. Welke invloed heeft dit op het consent dat zij kunnen geven?

Een aan autonomie gerelateerd punt dat hier nog kort benoemd wordt, betreft de verantwoordelijkheid voor het handelen. Wanneer iemand onder invloed van een neurotechnologisch (*closed loop*) apparaat een bepaalde (wellicht zelfs criminele) handeling verricht, wie is daar dan verantwoordelijk voor – de producent van het device of de persoon die de handeling verricht? (Clausen et al., 2017; Yuste et al., 2017) Met andere woorden, als het apparaat autonoom wordt, wat doet dat met de verantwoordelijkheid van de persoon?

(d) Mentale en fysiek integriteit

Ook mentale en fysieke integriteit is een centraal thema, dat verbonden kan worden met *'freedom of thought*', de vrijheid van het denken (Douglas, 2014, 2019; Lavazza, 2018; Yuste, et al., 2017; Petersen & Kragh, 2017a).

Het onderscheid tussen mentale en fysieke integriteit kan dualistisch overkomen, alsof er een strakke scheiding gemaakt wordt tussen geest en lichaam, maar zo is het niet bedoeld. Het gaat meer om twee typen ethische zorgen. Eén betreft de onaantastbaarheid van het lichaam. Het ander betreft het punt dat we willen dat ons denken, of breder, ons mentale leven *vrij* is, zonder beïnvloeding. Dat zijn twee typen zorgen, waarmee op zichzelf niets bedoeld is te zeggen over de samenhang tussen geest en lichaam. Zorgen over fysieke integriteit gelden met name jegens interventies in het brein, dus technieken die iets veranderen, maar in principe zouden *neuroimaging* technieken ook de integriteit van het lichaam kunnen schenden wanneer ze bijvoorbeeld een operatie vergen.

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen twee manieren waarop de fysieke integriteit geschonden kan worden, namelijk de bedoelde brein-verandering (dus veranderingen in de structuur van het brein of de functie van neuronen), en bijkomende veranderingen, zoals een operatie om DBS-elektroden in te brengen. Daarbij zal bijvoorbeeld een incisie in de huid gemaakt moeten worden en de schedel worden doorboord. Dit is nodig om de elektroden op de juiste plaats te brengen zodat zij de beoogde verandering in het brein kunnen bewerkstelligen.

Ook kan er een onderscheid worden gemaakt tussen omkeerbare en onomkeerbare veranderingen. Waar traditionele psychochirurgie (zoals bijvoorbeeld lobotomie) onomkeerbare veranderingen in het brein veroorzaakte (door destructie van weefsel), kan tegenwoordig bij DBS omkeerbaar worden

ingegrepen, in die zin dat de stimulatie ook weer gestopt (of veranderd) kan worden (hoewel over de mate van omkeerbaarheid discussie bestaat (Pugh, 2019); chirurgisch geplaatste onderdelen zijn vanzelfsprekend lastiger 'omkeerbaar' dan de stimulatie).

Douglas (2014) heeft geargumenteerd dat het niet gezegd is dat opgelegde medische interventies in het kader van resocialisatie van veroordeelden altijd onacceptabel zijn. Hij wijst erop dat er nu ook al interventies plaatsvinden binnen het justitie- en veiligheidsdomein: veroordeelden met een verslaving dienen in sommige rechtssystemen medicatie te gebruiken, en zedendelinquenten dienen soms libido-verlagende medicatie in te nemen.

Hoewel de fysieke integriteit zeker relevant is voor neurotechnologie, is het de mentale integriteit die het meest specifiek is voor de neurotechnieken. Ienca en Andorno (2017) betogen dat juist de mentale integriteit betere bescherming verdient dan zij nu juridisch heeft. Zij erkennen dat mentale integriteit in Europa op zich al beschermd wordt: '*The right to personal physical and mental integrity is protected by the EU's Charter of fundamental rights (Article 3), stating that 'everyone has the right to respect for his or her physical and mental integrity.*' Hun bezwaar is evenwel dat er geen expliciete verwijzing is naar neurotechnologie: '*The provision focuses in particular on four requirements: free and informed consent, the noncommercialization of body elements, and the prohibition of eugenic practices and human reproductive cloning. No explicit reference is made to neurotechnology-related practices.*' Naar hun idee dient er dus specifieke aandacht te zijn voor neurotechnologie ten aanzien van de mentale integriteit. Zij geven ook een definitie van wat een aantasting van de *mentale integriteit* inhoudt: '*For an action X, to qualify as a threat to mental integrity, it has to: (i) involve the direct access to and manipulation of neural signaling (ii) be unauthorized –i.e. must occur in absence of the informed consent of the signal generator, (iii) result in physical and/or psychological harm*'[16] (Ienca & Andorno, 2017). Een iets andere formulering van mentale integriteit die meer focust op cognitive vermogens is te vinden bij (Lavazza 2018): '*Mental integrity is the ability to formulate thoughts, judgments and intentions, make plans and implement them without direct external interference of any kind due to neurotechnology.*' In feite komt deze formulering ook dicht in de buurt van autonomie.[17] (Overigens is duidelijk dat mentale integriteit en autonomie aan elkaar raken, of deels overlappen. Wanneer iemands brein of *mind* wordt gemanipuleerd of wanneer er wordt geïnterfereerd met iemands gedachten dan kan dit natuurlijk de autonomie van die persoon beïnvloeden, ondermijnen.)

Het recht op mentale privacy en het recht op mentale integriteit hoeven niet absoluut te zijn (Lavazza, 2018; Ienca & Andorno, 2017). Wanneer je stelt dat het recht absoluut is, dan ben je in zekere zin snel klaar. Echter, het probleem is dat een dergelijke absolute positie lastig te verdedigen kan zijn, bijvoorbeeld omdat het moeilijk kan zijn precies aan te geven waarom deze bron van informatie nu absolute bescherming verdient en andere – zoals DNA, internet(zoek)gedrag – niet. En ten aanzien van de mentale integriteit kun je stellen dat er nu al met medicatie behandeld wordt binnen de forensische psychiatrie (Petersen & Kragh, 2017a). Zo wordt libido-remmende medicatie in de forensische psychiatrie bij sommige mensen gebruikt, wat impact heeft (of kan hebben) op (de intensiteit van)

[16] We merken op dat het derde criterium specifiek over *harm* (schade) gaat, dit gaat dus verder dan alleen verandering van psyche of lichaam.

[17] In een paper over autonomie in het licht van (neuro)technologie verwijst McCarty Jones (McCarthy-Jones 2019)naar de volgende formulering van Metzinger ten aanzien van mentale autonomie: '*the specific ability to control one's own mental functions, like attention, episodic memory, planning, concept formation, rational deliberation, or decision making, etc.*' (Metzinger 2013)

iemands seksuele verlangens. Wanneer je daarentegen stelt dat het een relatief recht is, dien je aan te geven waar dan exact de grens ligt.

(e) Bijkomende ethische overwegingen

Een punt van meer algemene aard dat de ethicus Ryberg (2021) benadrukt is dat we oog moeten houden voor de *feitelijke* toepassing van neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein. Hij wijst er bijvoorbeeld op dat sommige interventies – psychofarmacologie en psychochirurgie – in theorie (in een ideale situatie) misschien wel te verdedigen waren, maar dat de geschiedenis laat zien dat het in de praktijk toch mis kan gaan. Tegelijkertijd is zijn visie niet dat, *omdat* het in het verleden misgegaan is, dergelijke technieken nooit meer acceptabel zouden zijn. Aandacht voor feitelijke toepassing en omstandigheden maakt ook dat we, wat Ryberg (2020) betreft, goed moeten kijken naar de tekortkomingen van de huidige manier van omgaan met misdaad, straf en het voorkomen van recidive. Zo wijst hij op omstandigheden in gevangenissen die ook niet ideaal – of verre van ideaal – zijn, hoewel dat per land verschillen kan. En hij noemt nog een ander interessant punt, namelijk de rol van artsen. Voor zover de neurotechnologieën in de praktijk dienen te worden toegepast door artsen, geldt hun medische ethiek. En wanneer er *medisch-ethische* bezwaren blijken te zijn tegen toepassing door dokters, dan kan dit de facto een blokkade opleveren van het gebruik van deze technieken (Ryberg, 2020). Tegelijkertijd merkte een geïnterviewde op dat wanneer interventies gebruikt zouden worden om stoornissen, ziektes te behandelen dit minder problematisch zou zijn dan wanneer de technieken gebruikt zouden worden puur om gedrag te beïnvloeden.

Een geïnterviewde gaf aan dat het belangrijk is wanneer we meer zicht willen krijgen op de praktische toelaatbaarheid van technieken in het justitiële domein om ook met de mensen die het betreft of kan betreffen (bijvoorbeeld forensische patiënten) in gesprek te gaan over hoe zij hier tegenover staan en ook met slachtoffers en behandelaars, advocaten en rechters. Beschrijf technieken dan voor hen op enigszins realistische manier voor dit moment. Je kunt dan beter gaan begrijpen hoe zij denken over het 'lezen' en interventies. Het gaat er dan niet zozeer om of ze vinden dat het wel of niet kan, maar hoe denken/redeneren mensen hierover? Welke argumenten hebben ze? Er is in lijn met deze suggestie recent ook onderzoek met een specifieke groep forensische patiënten gedaan (Knack et al., 2020). Hieruit bleek onder meer het belang van volledig *informed consent*.

Er werd door een deskundige ook genoemd dat technieken aanvankelijk een experimenteel karakter kunnen/zullen hebben, en dat die technieken voor de maatschappij mogelijk positief werken maar dat ze voor de groep die de interventie ondergaat wellicht minder goed kunnen uitpakken. Tegelijkertijd, onderzoeksethiek vraagt bescherming van de proefpersoon, niet van maatschappij. Dat kan consequenties hebben voor de toelaatbaarheid van bepaalde experimentele toepassingen.

Ook kun je je voorstellen dat *neuroimaging* met het oog op recidive bij de betreffende persoon een medisch probleem (zoals een tumor) aan het licht brengt. Stel dat je onder dwang *neuroimaging* hebt toegepast, dien je iemand (een verdachte/veroordeelde) dan van deze medische aandoening op de hoogte te stellen? Heeft hij of zij het recht om het (niet) te weten?

Een bijkomende zorg ten aanzien van neurotechnologie is *bias* door algoritmes (kunstmatige intelligentie) (Goering et al., 2021; Ienca, 2021b, a). Zo is gerapporteerd dat er bij bepaalde, binnen het justitie domein ingezette algoritmen sprake was van bias, bijvoorbeeld ten aanzien van ras en geslacht (Tortora et al., 2020). Dit is vanzelfsprekend een essentieel punt van aandacht. Tegelijkertijd, omdat deze zorg niet specifiek is voor *neuro*technologie – maar breder geldt voor toepassingen van kunstmatige intelligentie – zullen we er hier niet nader op ingaan. Desalniettemin is het goed om hier

oog voor te hebben omdat de kans groot is dat neurotechnologie die uiteindelijk binnen het strafrecht toepasbaar is, met algoritmes werkt.

Daarbij geldt dat de neurotechnologieën waar over wordt nagedacht in het algemeen nog in ontwikkeling zijn. Je zou dus kunnen stellen: wacht eerst maar tot ze er zijn, dan kunnen we erover gaan nadenken. Een argument om toch al eerder met een ethische/juridische analyse te beginnen is dat, wanneer je wacht tot de technieken er zijn, je in feite te laat bent: '*If we wait for this technology to be fully developed before deciding how to regulate it, by the time it is already developed, the technical features and social practices associated with it may become too culturally entrenched to be easily modified.*' (Wajnerman Paz, epub ahead of print, zie ook Mecacci & Haselager, 2019). Wajnerman Paz noemt *Facebook* en *Cambridge Analytica* als voorbeeld van een situatie waarin we 'te laat' waren met ethisch en juridisch nadenken over de normatieve aspecten en regulering van nieuwe technologie.

(f) Conclusie

Er wordt al volop nagedacht over de ethische aspecten van (opkomende) neurotechnologieën, onder meer ten aanzien van het justitie- en veiligheidsdomein. Het gaat hierbij zowel om technieken die hersenactiviteit registreren als technieken die deze veranderen. De privacy is een centraal punt – waarbij er wel enige discussie is in hoeverre brein-data nu als 'uniek' gezien moeten worden in vergelijking met bijvoorbeeld DNA-gegevens. Om de specifieke aard van de privacy zorgen te articuleren wordt ook van mentale privacy gesproken. Het gaat hierbij om het registreren van de gegevens, de opslag ervan, en eventuele verspreiding.

Autonomie is op (minimaal) drie manieren relevant. Ten eerste: is bij de instemming (consent) van een verdachte of veroordeelde met neurotechnologie wel echt sprake van een vrije, autonome keuze? Of bestaat er het risico op het accepteren van '*an offer you can't refuse*'? Ten tweede, neurotechnologie die het brein verandert, kan ook iemands keuzeproces beïnvloeden. Op die manier zou de autonomie van die persoon bedreigd/ondermijnd kunnen worden. Ten derde, wanneer neurotechnologie mensen helpt om op termijn hun leven meer in te richten zoals ze dat zelf graag zien, dan ondersteunt de neurotechnologie hun toekomstige autonomie.

Mentale en fysieke integriteit zijn met name aan de orde bij *interventie*. In de literatuur is bepleit om de mentale integriteit via neurorechten beter te beschermen dan nu het geval is. Daarbij speelt direct ook de vraag of een dergelijke bescherming dan absoluut zou moeten zijn, of dat inbreuken mogelijk moeten zijn onder omstandigheden.

De menselijke waardigheid lijkt vooral een overkoepelende – of funderende – rol te spelen bij de hierboven genoemde overwegingen. Met andere woorden: met het oog op respect voor de menselijke waardigheid wordt over de implicaties van neurotechnologie voor privacy, autonomie, en mentale/fysieke integriteit nagedacht.

Als bijkomende ethische punten kunnen worden genoemd: heb oog voor hoe technologieën in de praktijk van het justitie- en veiligheidsdomein werken – benader de normatieve vragen niet alleen vanuit een theoretisch perspectief, maar kijk bijvoorbeeld naar de (soms harde) werkelijkheid van gevangenissen. Hou daarnaast rekening met *bias* wanneer bij de neurotechnologie van algoritmes gebruik wordt gemaakt.

Sectie 3. Synthese

In dit rapport staan de kansen en risico's van neurotechnologieën voor het justitie- en veiligheidsdomein centraal. Zoals eerder beschreven, biedt een techniek een kans indien deze effectief (en in enige mate efficiënt) is voor het bereiken van een of meer van de doelen die centraal staan in de domeinen die behandeld worden: *opsporing en waarheidsvinding*, *risicotaxatie* en *interventie*. Risico's bestaan uit spanningen met juridische en ethische normen en eventuele onbedoelde, negatieve bij- en neveneffecten van het toepassen van nieuw ontwikkelde kennis en technologieën.

In sectie 1 zijn we ingegaan op de technologieën zelf. We beschreven de huidige neurotechnologieën en het gebruik ervan in het klinisch en neurowetenschappelijk domein, maar ook de nieuwste ontwikkelingen in het verbeteren van bestaande technologieën en de meer recent verschenen technologieën. In de beschrijving is onderscheid gemaakt tussen technieken die werken op basis van magnetische, elektrische en metabole signalen en technieken die hersensignalen kunnen meten, stimuleren of beide. Ook hebben we technologieën besproken die de anatomische structuur van de hersenen in beeld kunnen brengen.

Een aantal van de in sectie 1 beschreven technologieën hebben relevantie voor het justitie- en veiligheidsdomein. Zo wordt er onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om misleiding of daderkennis op te sporen met bijvoorbeeld fMRI of EEG, of om neuroimaging te gebruiken voor het vaststellen van neurologische aandoeningen of het inschatten van recidiverisico. Daarnaast wordt onderzocht of hersenstimulatie het ziektebeeld van forensisch psychiatrische patiënten kan verbeteren of meer in algemene zin kan bijdragen aan het verminderen van recidiverisico. Hoewel neurotechnologieën conceptueel een breed scala aan kansen kunnen bieden voor het verbeteren of het vergemakkelijken van de rechtspleging worden ze nog nauwelijks toegepast voor *opsporing en waarheidsvinding, risicotaxatie* of *interventie*, met uitzondering van het gebruik van neuroimaging voor het vaststellen van neurologische aandoeningen bij verdachten, volgens medisch-diagnostische procedures. Het TRL van de meeste van de technologieën met relevantie voor het justitie- en veiligheidsdomein werd dan ook geschat op niveau 4: *technology validated in lab*. Enerzijds kan dit verklaard worden doordat de effectiviteit en betrouwbaarheid van neurotechnologieën voor de rechtspleging nog onvoldoende is aangetoond en doordat onze kennis over de hersenen nog relatief beperkt is. Anderzijds zijn er belangrijke intrinsieke beperkingen aan de verschillende neurotechnologieën die het gebruik ervan binnen de rechtspleging lastig maken. Tegelijkertijd bleek dat een aantal technieken in de niet al te verre toekomst (<5 jaar of 5-10 jaar) mogelijk in de praktijk kan worden toegepast.

In sectie 2 beschreven we juridische, ethische en maatschappelijke aspecten van de mogelijke toepassing van neurotechnologie. In de juridische analyse zijn spanningsvelden in kaart gebracht met fundamentele rechten zoals die in het Europees Verdrag voor de Rechten van de Mens (EVRM) zijn neergelegd. Ten eerste is van belang te vermelden dat, indien neurotechnologie een inbreuk maakt op fundamentele rechten, het EVRM daarvoor een wettelijke grondslag vereist. Voor sommige toepassingen (bijvoorbeeld neuro-interventies) kan die grondslag al in de wet worden gevonden. Voor andere toepassingen (bijvoorbeeld neurogeheugendetectie) bestaat een dergelijke grondslag momenteel niet en zal deze moeten worden ingevoerd alvorens tot toepassing van neurotechnologie kan worden overgegaan. Een inbreuk op grondrechten moet volgens de systematiek van het EVRM ook noodzakelijk zijn in een democratische samenleving en gerechtvaardigd kunnen worden. De toepassing van neurotechnologie kan gerechtvaardigd zijn doordat daarmee strafbare feiten kunnen

worden voorkomen. Voor alle domeinen is vastgesteld dat de toepassing van bepaalde vormen van neurotechnologie op gespannen voet kan staan met het verbod op onmenselijke en vernederende behandeling (art. 3 EVRM). Dit verbod staat geen uitzonderingen toe. Per toepassingswijze van neurotechnologie moet worden beoordeeld of deze binnen de grenzen van artikel 3 EVRM blijft. De toepassing van neurotechnologie kan een inbreuk maken op het recht op privéleven, omdat de lichamelijke en psychische integriteit in het geding kan zijn. Specifiek voor *neuro-interventies* geldt dat artikelen 3 en 8 EVRM vrijwel geen ruimte laten om deze tegen de wil van de betrokkene toe te passen, waarbij een nog openstaande vraag is in hoeverre daadwerkelijk vrije instemming met een neuro-interventie in het strafrecht mogelijk is. Voor de domeinen *opsporing en waarheidsvinding* en *risicotaxatie* is het recht op een eerlijk proces van belang (art. 6 EVRM). Artikel 6 EVRM houdt onder meer een verbod in om iemand te dwingen een verklaring af te leggen over zijn of haar betrokkenheid bij een strafbaar feit: het zwijgrecht. In het bijzonder neuroleugendetectie staat daarmee op gespannen voet. Het zwijgrecht, zoals dat nu wordt uitgelegd, staat niet zonder meer in de weg aan gedwongen medewerking aan *risicotaxatie*. Ten slotte bespraken we enkele voorstellen om specifiek met het oog op neurotechnologie nieuwe grondrechten in het leven te roepen, bijvoorbeeld een recht op mentale integriteit. De gedachte daarachter is dat het bestaande grondrechtelijke kader onvoldoende bescherming biedt tegen het gebruik van neurotechnologie.

Uit de ethische analyse bleek dat de toepassing van neurotechnologie in het strafrecht (in elk geval) raakt aan vier ethische waarden: privacy, autonomie, lichamelijke en mentale integriteit en menselijke waardigheid. De discussie daarover overlapt deels met de juridische analyse, maar voegt daar ook gezichtspunten aan toe. In het kader van menselijke autonomie is van belang dat neurotechnologie enerzijds autonomie kan beperken (doordat de techniek gedrag 'stuurt'), maar anderzijds is gesteld dat het die ook juist kan bevorderen (bijvoorbeeld doordat mensen meer grip krijgen op hun gedrag/leven).

Op basis van sectie 1 en sectie 2 brengen we hier een aantal aanbevelingen in kaart voor het in de toekomst verantwoord implementeren van neurotechnologieën in het justitie- en veiligheidsdomein.

Effectiviteit en betrouwbaarheid

Voordat neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein wordt toegepast, moeten de effectiviteit en de betrouwbaarheid ervan voldoende zijn aangetoond. Omdat de rechtspleging zich veelal afspeelt op het niveau van de individuele verdachte/veroordeelde zullen neurotechnologieën die daarvoor worden ingezet dus ook op *individueel niveau* voldoende effectief en betrouwbaar moeten zijn. Dat geldt zowel voor technieken die gebruikt worden om kennis over de verdachte/veroordeelde te verzamelen (binnen *opsporing en waarheidsvinding* en *risicotaxatie*) als voor technieken die mogelijk gebruikt worden voor vermindering van recidive, bijvoorbeeld binnen de behandeling van forensische psychiatrische aandoeningen (*interventie*). Het is daarom belangrijk dat toekomstig onderzoek zich niet (alleen) richt op correlaties en het vergelijken van groepen (zoals nu vaak gedaan wordt), maar ook expliciet ingaat op individuele effectiviteit en betrouwbaarheid. Het vaststellen van causale verbanden, bijvoorbeeld tussen afwijkingen in hersensignalen- of structuren en het risico op delinquent gedrag, kan daarbij uiteraard van toegevoegde waarde zijn. In het onderzoek hieromtrent moet ook aandacht worden besteed aan het feit dat de hersenen functioneren als een netwerk en dat het onwaarschijnlijk is dat afwijkingen in één hersengebied, of één type hersensignaal, volledig voorspellend zijn voor bijvoorbeeld de kans op recidive. Daarnaast spelen *generaliseerbaarheid en diversiteit* een rol. Dit betekent dat onderzoek in kaart zal moeten brengen of er individuele eigenschappen zijn die de effectiviteit en betrouwbaarheid van bepaalde typen neurotechnologie veranderen. In dit licht is ook van belang dat een risico op ongerechtvaardigde ongelijke behandeling kan ontstaan als effectiviteit en betrouwbaarheid variëren op basis van

persoonskenmerken, een gevaar dat bijvoorbeeld problematisch is als het gaat om kenmerken als geslacht of etniciteit. Verder is het nodig dat meer begrip wordt verkregen over de *specificiteit* van hersenmaten: Is het optreden van een bepaald hersenactivatiepatroon, of hersensignaal zoals de EEG-P300-respons, specifiek genoeg om een leugen of daderkennis vast te stellen, of kunnen er ook andere processen ten grondslag liggen aan de betreffende reacties in de hersenen? Ten laatste moet worden vastgesteld in hoeverre neurotechnologieën die gebruikt worden voor *opsporing en waarheidsvinding*, of voor *risicotaxatie*, kwetsbaar zijn voor het *manipuleren* van de uitkomst of de bruikbaarheid van de gegevens door verdachten die niet willen meewerken.

Veiligheid

Naast effectiviteit en betrouwbaarheid is *veiligheid* een belangrijke factor die moet worden meegewogen bij het verantwoord implementeren van neurotechnologie. Bijvoorbeeld in geval van technieken die bedoeld zijn om de hersensignalen te veranderen (hersenstimulatie), moet worden bepaald of ze, naast het gewenste effect, ongewenste fysieke of psychische *bijwerkingen* hebben. Dit geldt altijd, maar vooral wanneer het gaat om *invasieve* neurotechnologieën die een chirurgische ingreep vereisen. Dan is het cruciaal om de risico's daarvan nauwkeurig in kaart te brengen en vast te stellen of de voordelen opwegen tegen de nadelen. Daarbij zal steeds ook moeten worden overwogen of hetzelfde doel niet bereikt kan worden met een minder ingrijpende, niet-invasieve (en/of conventionele) aanpak. Een andere factor die moet worden meegewogen bij het vaststellen van de veiligheid is in hoeverre de effecten en de bijwerkingen reversibel zijn: een techniek die een blijvend effect in de hersenen bewerkstelligt zal in het algemeen minder lichtvaardig kunnen worden toegepast dan een techniek met een kortdurend effect.

Uit bovenstaande wordt duidelijk dat er nog belangrijke vragen beantwoord moeten worden voordat specifieke neurotechnologieën kunnen worden ingezet in het justitie- en veiligheidsdomein. Voor het beantwoorden van die vragen is onderzoek nodig. De opzet en uitvoering van dergelijk onderzoek moet uiteraard vallen binnen de vastgestelde ethische en juridische kaders.

Implementatie

Naast het *onderzoeken* van de effectiviteit, betrouwbaarheid en veiligheid van neurotechnologieën is het nodig dat de *juridische en ethische kaders verhelderd* worden. De minimale eisen die vanuit mensenrechtelijk oogpunt gelden voor het gebruik van neurotechnologie in het strafrecht hebben we in sectie 2 in kaart gebracht en zijn eerder in deze synthese al beschreven. Daar bleek echter ook dat belangrijke vragen nog onbeantwoord zijn. Het EHRM heeft zich niet direct over de (on)toelaatbaarheid van de inzet van neurotechnologie in het strafrecht uitgelaten. Het is bovendien denkbaar dat door de specifieke aard van neurotechnologie een nieuwe dynamiek in het mensenrechtelijke discours ontstaat, bijvoorbeeld doordat het recht op vrijheid van gedachte en geweten meer nadruk krijgt of zelfs door de invoering van nieuwe fundamentele (neuro)rechten. Omdat de juridische context per land verschilt, is het van belang een eigen visie op de toepassing van neurotechnologie in het strafrecht te ontwikkelen die ook specifiek op het Nederlandse strafrecht is toegesneden. Het ethische debat zoals dat in sectie 2 is beschreven kan daarbij behulpzaam zijn, omdat daarin reeds concreet over de grenzen aan de toepassing van neurotechnologie in het strafrecht is nagedacht. We noemen hier enkele punten waarover nadere gedachtevorming noodzakelijk is, maar waarop binnen de kaders van dit onderzoek geen antwoord kon worden gegeven.

Ten eerste is de vraag wat de minimale eisen moeten zijn aan de betrouwbaarheid van neurotechnologie. Deze keuze is niet triviaal. Neurowetenschappers stellen bijvoorbeeld in het algemeen hoge eisen aan betrouwbaarheid van de uitkomsten van onderzoek, zo bleek tijdens de interviews in dit onderzoek. Juridisch is echter niet altijd eenzelfde mate van zekerheid nodig. Een

strafbaar feit moet 'buiten redelijke twijfel' worden aangetoond, maar een bewijsmiddel moet in het licht worden gezien van het *geheel* aan bewijsmiddelen. Een in wetenschappelijk opzicht relatief geringe betrouwbaarheid kan in een individuele strafzaak ‘gecompenseerd’ worden door andere bewijsmiddelen, zoals getuigenverklaringen. Daarbij is het belangrijk op te merken dat de voorwaarde van bewijs buiten redelijke twijfel niet geldt voor de vaststelling van het risico op recidive of voor de effectiviteit van een *interventie*. Voor *risicotaxatie* geldt dat voorspellingen met bestaande risicotaxatie-instrumenten niet zeer nauwkeurig zijn. Als deze voorspellingen verbeterd kunnen worden met het gebruik van neurotechnologie, dan hoeft een in absolute zin betrekkelijk beperkte betrouwbaarheid in wetenschappelijk opzicht daar niet aan in de weg te staan. Tegelijkertijd is het zo dat hieraan het meer fundamentele probleem ten grondslag ligt dat het problematisch kan zijn strafrechtelijke sancties te baseren op relatief onnauwkeurige voorspellingen, of deze nu met of zonder hulp van neurotechnologie worden gemaakt. Een aanzienlijke foutmarge betekent dat relatief veel mensen ten onrechte een op preventie gebaseerde sanctie opgelegd kunnen krijgen.

Bij de implementatie moet ook worden overwogen of een bepaalde techniek wel of niet ingezet mag worden tegen de wil van de verdachte. Specifiek is nadere gedachtevorming vereist over de wijze waarop neurotechnieken zich verhouden tot het zwijgrecht. Ook bleek uit dit onderzoek dat de jurisprudentie van het EHRM strengere eisen lijkt te stellen dan het Nederlandse recht aan vrijwillige toestemming bij neuro-interventies, hoewel uit de EHRM-jurisprudentie geen scherpe grenzen kunnen worden afgeleid. Ook hier is nadere gedachtevorming noodzakelijk, waarbij de ethische discussie over de betekenis van consent bij neuro-interventies behulpzaam kan zijn.

Ten laatste stellen wij dat het essentieel is dat rechters adequaat geïnformeerd worden over de effectiviteit, betrouwbaarheid en veiligheid van neurotechnologieën op het moment dat deze in de praktijk worden toegepast. Dit is in essentie belangrijk bij elke techniek die wordt aangewend in de rechtspleging, maar gezien de hype die zich kan afspelen rondom vormen van neurotechnologie is een adequate informatieverstrekking bij uitstek van belang.

Ten slotte

Dit rapport bevat een eerste inventarisatie van de kansen en risico’s van neurotechnologie in het justitie- en veiligheidsdomein. Het wordt duidelijk dat er belangrijke vervolgvragen zijn en dat voor het beantwoorden daarvan nog veel onderzoek nodig is op technologisch vlak (bijvoorbeeld voor het aantonen van effectiviteit, betrouwbaarheid en veiligheid), maar ook met betrekking tot de meest prangende ethische en juridische vragen omtrent de daadwerkelijke implementatie van neurotechnologie voor *opsporing en waarheidsvinding*, *risicotaxatie* en *interventie*. De resultaten van dit onderzoek kunnen richting geven aan het ontwerpen van de nodige nieuwe wetgeving voor het verantwoord implementeren van neurotechnologie in deze drie domeinen.

Appendix 1 – Verklarende woordenlijst

Brain-computer interface	Een systeem waarbij een gebruiker op basis van directe feedback met hersensignalen een computer aan kan sturen.
Cortex	De buitenste laag van de hersenen. De cortex bestaat voornamelijk uit grijze stof.
Craniotomie	Een luikje in de schedel, gemaakt tijdens een hersenoperatie, zodat elektroden op of in de hersenen geplaatst kunnen worden.
Elektroden	Plaatjes of naaldjes van geleidend materiaal waarmee hersenactiviteit gemeten kan worden of waarmee de hersenen elektrisch gestimuleerd kunnen worden.
Grijze stof	Hersenweefsel dat voornamelijk uit de cellichamen en dendrieten van neuronen bestaat. Deze zijn op MRI-scans als grijs te zien.
Hyperscanning	Het meten van hersensignalen van meerdere proefpersonen tegelijkertijd. Wordt voornamelijk gebruikt in de studie van sociale interactie.
Neuron	Zenuwcel in de hersenen.
Witte stof	Hersenweefsel dat voornamelijk uit de axonen van neuronen bestaat. Deze zijn omgeven met het isolerend materiaal, myeline, en dat is op MRI-scans als wit te zien.

Appendix 2 – Interpretatie van de TRLs

Tabel A1 - Interpretatie van de technology readiness levels zoals beschreven in het Horizon-2020 programma.

TRL	Definitie	Interpretatie
1	*Basic principles observed*	Fundamenteel onderzoek uitgevoerd
2	*Technology concept formulated*	Praktische toepassingen van de techniek geformuleerd
3	*Experimental proof of concept*	Eerste *proof of concept* gedemonstreerd
4	*Technology validated in lab*	*Proof of concept* uitgebreid getest in het lab
5	*Technology validated in relevant environment*	Werking van de techniek onderzocht in relevante testomgeving
6	*Technology demonstrated in relevant environment*	Uitgebreide tests en demonstratie van techniek in relevante testomgeving
7	*System prototype demonstration in operational environment*	Demonstratie van de techniek in de gebruikersomgeving
8	*System complete and qualified*	De techniek heeft definitieve vorm gekregen, de werking is sterk onderbouwd
9	*Actual system proven in operational environment*	De techniek is gebruikt in de gebruikersomgeving

Appendix 3a – Geïnterviewde experts (Sectie 1)

Tabel A2 - De voor sectie 1 geïnterviewde experts en hun affiliaties

Geïnterviewde	Affiliatie
Bart van Berckel	Hoogleraar *Moleculair Brain Imaging* aan het Amsterdam UMC
Hilleke Hulshoff Pol	Hoogleraar Neurowetenschappen aan het UMC Utrecht
Jason Farquhar	CTO bij Mindaffect
Jonathan Wolpaw	Hoogleraar Biomedische Wetenschappen aan de *State University* van New York, directeur van het *National Center for Adaptive Neurotechnologies*
José del R Millán	Hoogleraar Elektrische- & Computertechniek en Neurologie aan de Universiteit van Texas, Austin
Philip Starr	Hoogleraar Neurochirurgie aan de Universiteit van Californië, San Francisco
Pieter Roelfsema	Hoogleraar Cognitieve Neurowetenschappen van Hersenstimulatie aan het Amsterdam UMC en de VU, Directeur van het Nederlands Herseninstituut
Rainer Goebel	Hoogleraar Cognitieve Neurowetenschappen, Universiteit Maastricht
Tim Denison	Hoogleraar Technische Wetenschappen en Klinische Neurowetenschappen aan de Universiteit van Oxford
Wiro Niessen	Hoogleraar Medische Beeldvorming aan het Erasmus MC en TU Delft

Appendix 3b – Geïnterviewde experts (Sectie 2)

Tabel A3 - De voor sectie 2 geïnterviewde experts en hun affiliaties

Geïnterviewde	Affiliatie
Chris Bublitz	Post-doc, *Faculty of Law - Dept of Criminal Law & Philosophy of Law*, University of Hamburg
Dorothee Horstkötter	Universitair Docent Faculteit Health, *Medicine and Life Sciences*, Universiteit Maastricht
Roberto Andorno	*Associate Professor of Bioethics and Biomedical Law at the Faculty of Law & Senior Research Fellow and Coordinator of the PhD Program in Biomedical Ethics and Law, Faculty of Medicine, University of Zurich, Switzerland*
Thomas Douglas	*Professor of Applied Philosophy, Oxford Uehiro Centre for Practical Ethics, University of Oxford*

Appendix 3c – Proeflezers

Tabel A4 – Experts uit de neurotechnologie, recht en ethiek die een proeflezen van de conceptversie van het rapport hebben uitgevoerd om het te controleren op juistheid en compleetheid

Geïnterviewde	**Affiliatie**
Leon Kenemans	Hoogleraar Biopsychologie en Psychofarmacologie, Universiteit Utrecht
Pim Haselager	*Professor of Artificial Intelligence, Donders Institute for Brain, Cognition, and Behaviour, Radboud University Nijmegen*
Richard van Wezel	*Professor in Visual Neuroscience, Donders Institute for Brain, Cognition, and Behaviour, Radboud University Nijmegen*
Sjors Ligthart	*Assistant Professor, Department of Criminal Law, Tilburg University*

Literatuur Inleiding

Aharoni, E., Vincent, G. M., Harenski, C. L., Calhoun, V. D., Sinnott-Armstrong, W., Gazzaniga, M. S., & Kiehl, K. A. (2013). Neuroprediction of future rearrest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(15), 6223–6228. https://doi.org/10.1073/pnas.1219302110

Beauchamp, T. L., & Childress, J. F. (2019). *Principles of biomedical ethics.* Eighth edition. Oxford University Press.

Bijlsma, J. (2021). Het is Tijd voor een Ongevaarlijkheidspresumptie. Beschouwing naar Aanleiding van J.H.B. Bemelmans, Totdat het Tegendeel is Bewezen. *Rechtsgeleerd Magazijn Themis*, 81-92.

Corbyn, Z. (2019, September 22). Are brain implants the future of thinking? *The Observer*. https://www.theguardian.com/science/2019/sep/22/brain-computer-interface-implants-neuralink-braingate-elon-musk

De Jong, F. (2021). Het Mensbeeld van het Risicostrafrecht. Delikt en Delinkwent, 683-693.

European Commission. (2014). Horizon 2020 Work Programme(s) General Annex G "Technology readiness levels (TRL)." https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf

Ligthart, S., Douglas, T., Bublitz, C., Kooijmans, T., Meynen, G. (2020). Forensic Brain-Reading and Mental Privacy in European Human Rights Law: Foundations and Challenges. Neuroethics. https://doi.org/10.1007/s12152-020-09438-4.

Meynen, G. (2020). Neuroscience-based Psychiatric Assessments of Criminal Responsibility: Beyond Self-Report? *Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics*, *29*(3), 446–458. https://doi.org/10.1017/S0963180120000195

Moses, D. A., Metzger, S. L., Liu, J. R., Anumanchipalli, G. K., Makin, J. G., Sun, P. F., Chartier, J., Dougherty, M. E., Liu, P. M., Abrams, G. M., Tu-Chan, A., Ganguly, K., & Chang, E. F. (2021). Neuroprosthesis for Decoding Speech in a Paralyzed Person with Anarthria. *New England Journal of Medicine*, *385*(3), 217–227. https://doi.org/10.1056/NEJMoa2027540

Ramsey, N. F., & Millán, J. del R. (Eds.). (2020). *Brain-Computer Interfaces*. Elsevier. https://www.elsevier.com/books/brain-computer-interfaces/ramsey/978-0-444-63934-9

Regalado, A. (2021). *Facebook is ditching plans to make an interface that reads the brain*. MIT Technology Review. https://www.technologyreview.com/2021/07/14/1028447/facebook-brain-reading-interface-stops-funding/

Ryberg, J. (2020). Neurointerventions, crime, and punishment: ethical considerations. Oxford University Press.

PubMed. (n.d.). PubMed. Retrieved February 21, 2022, from https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/

Sergiou, C. S., Santarnecchi, E., Franken, I. H. A., & van Dongen, J. D. M. (2020). The effectiveness of Transcranial Direct Current Stimulation as an intervention to improve empathic abilities and reduce violent behavior: A literature review. *Aggression and Violent Behavior*, *55*, 101463. https://doi.org/10.1016/j.avb.2020.101463

Tortora, L., Meynen, G., Bijlsma, J., Tronci, E., & Ferracuti, S. (2020). Neuroprediction and A.I. in Forensic Psychiatry and Criminal Justice: A Neurolaw Perspective. *Frontiers in Psychology*, *11*, 220. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00220

Van Toor, D. (2017). *Het schuldige geheugen? Een onderzoek naar het gebruik van hersenonderzoek als opsporingsmethode in het licht van eisen van instrumentaliteit en rechtsbescherming*. Wolters Kluwer.

Vincent, N. A., Nadelhoffer, T., & McCay, A. (Eds.). (2020). Neurointerventions and the Law: Regulating Human Mental Capacity. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780190651145.001.0001

Literatuur Sectie 1

Aaslid, R., Markwalder, T.-M., & Nornes, H. (1982). Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries. Journal of Neurosurgery, 57(6), 769–774. https://doi.org/10.3171/jns.1982.57.6.0769

Abderezaei, J., Pionteck, A., Terem, I., Dang, L., Scadeng, M., Morgenstern, P., Shrivastava, R., Holdsworth, S. J., Yang, Y., & Kurt, M. (2021). Development, calibration, and testing of 3D amplified MRI (aMRI) for the quantification of intrinsic brain motion. Brain Multiphysics, 100022. https://doi.org/10.1016/j.brain.2021.100022

Abiri, R., Borhani, S., Sellers, E. W., Jiang, Y., & Zhao, X. (2019). A comprehensive review of EEG-based brain-computer interface paradigms. Journal of Neural Engineering, 16(1), 011001. https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaf12e

Adamantidis, A. R., Zhang, F., Aravanis, A. M., Deisseroth, K., & de Lecea, L. (2007). Neural substrates of awakening probed with optogenetic control of hypocretin neurons. Nature, 450(7168), 420–424. https://doi.org/10.1038/nature06310

Adams, R. J. (2005). TCD in sickle cell disease: An important and useful test. Pediatric Radiology, 35(3), 229–234. https://doi.org/10.1007/s00247-005-1409-7

Aharoni, E., Vincent, G. M., Harenski, C. L., Calhoun, V. D., Sinnott-Armstrong, W., Gazzaniga, M. S., & Kiehl, K. A. (2013). Neuroprediction of future rearrest. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(15), 6223–6228. https://doi.org/10.1073/pnas.1219302110

Aloui, K., Nait-Ali, A., & Naceur, M. S. (2018). Using brain prints as new biometric feature for human recognition. Pattern Recognition Letters, 113, 38–45. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.10.001

Armenta Salas, M., Bashford, L., Kellis, S., Jafari, M., Jo, H., Kramer, D., Shanfield, K., Pejsa, K., Lee, B., Liu, C. Y., & Andersen, R. A. (2018). Proprioceptive and cutaneous sensations in humans elicited by intracortical microstimulation. ELife, 7, e32904. https://doi.org/10.7554/eLife.32904

Azevedo, F. A. C., Carvalho, L. R. B., Grinberg, L. T., Farfel, J. M., Ferretti, R. E. L., Leite, R. E. P., Jacob Filho, W., Lent, R., & Herculano-Houzel, S. (2009). Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain. The Journal of Comparative Neurology, 513(5), 532–541. https://doi.org/10.1002/cne.21974

Banghart, M., Borges, K., Isacoff, E., Trauner, D., & Kramer, R. H. (2004). Light-activated ion channels for remote control of neuronal firing. Nature Neuroscience, 7(12), 1381–1386. https://doi.org/10.1038/nn1356

Barbieri, F., Trauchessec, V., Caruso, L., Trejo-Rosillo, J., Telenczuk, B., Paul, E., Bal, T., Destexhe, A., Fermon, C., Pannetier-Lecoeur, M., & Ouanounou, G. (2016). Local recording of biological magnetic fields using Giant Magneto Resistance-based micro-probes. Scientific Reports, 6(1), 39330. https://doi.org/10.1038/srep39330

Barker, A. T., Jalinous, R., & Freeston, I. L. (1985). Non-Invasive Magnetic Stimulation Of Human Motor Cortex. The Lancet, 325(8437), 1106–1107. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(85)92413-4

Barrese, J. C., Rao, N., Paroo, K., Triebwasser, C., Vargas-Irwin, C., Franquemont, L., & Donoghue, J. P. (2013). Failure mode analysis of silicon-based intracortical microelectrode arrays in non-human primates. Journal of Neural Engineering, 10(6), 066014. https://doi.org/10.1088/1741-2560/10/6/066014

Bax, M., Tydeman, C., & Flodmark, O. (2006). Clinical and MRI correlates of cerebral palsy: The European Cerebral Palsy Study. JAMA, 296(13), 1602–1608. https://doi.org/10.1001/jama.296.13.1602

Benabid, A. L., Costecalde, T., Eliseyev, A., Charvet, G., Verney, A., Karakas, S., Foerster, M., Lambert, A., Morinière, B., Abroug, N., Schaeffer, M., Moly, A., Sauter-Starace, F., Ratel, D., Moro, C., Torres-Martinez, N., Langar, L., Oddoux, M., Polosan, M., … Chabardes, S. (2019). An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain-machine interface in a tetraplegic patient: A proof-of-concept demonstration. The Lancet. Neurology, 18(12), 1112–1122.

Benabid, A. L., Costecalde, T., Torres, N., Moro, C., Aksenova, T., Eliseyev, A., Charvet, G., Sauter, F., Ratel, D., Mestais, C., Pollak, P., & Chabardes, S. (2011). Chapter 5 - Deep brain stimulation: BCI at large, where are we going to? In J. Schouenborg, M. Garwicz, & N. Danielsen (Eds.), Progress in Brain Research (Vol. 194, pp. 71–82). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53815-4.00016-9

Bennett, C. M., & Miller, M. B. (2010). How reliable are the results from functional magnetic resonance imaging? Annals of the New York Academy of Sciences, 1191, 133–155. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05446.x

Bercoff, J., Montaldo, G., Loupas, T., Savery, D., Mézière, F., Fink, M., & Tanter, M. (2011). Ultrafast compound doppler imaging: Providing full blood flow characterization. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 58(1), 134–147. https://doi.org/10.1109/TUFFC.2011.1780

Berezutskaya, J., Freudenburg, Z. V., Ambrogioni, L., Güçlü, U., van Gerven, M. A. J., & Ramsey, N. F. (2020). Cortical network responses map onto data-driven features that capture visual semantics of movie fragments. Scientific Reports, 10(1), 12077. https://doi.org/10.1038/s41598-020-68853-y

Bhola, R., Kinsella, E., Giffin, N., Lipscombe, S., Ahmed, F., Weatherall, M., & Goadsby, P. J. (2015). Single-pulse transcranial magnetic stimulation (sTMS) for the acute treatment of migraine: Evaluation of outcome data for the UK post market pilot program. The Journal of Headache and Pain, 16(1), 51. https://doi.org/10.1186/s10194-015-0535-3

Bikson, M., Grossman, P., Thomas, C., Zannou, A. L., Jiang, J., Adnan, T., Mourdoukoutas, A. P., Kronberg, G., Truong, D., Boggio, P., Brunoni, A. R., Charvet, L., Fregni, F., Fritsch, B., Gillick, B., Hamilton, R. H., Hampstead, B. M., Jankord, R., Kirton, A., … Woods, A. J. (2016). Safety of Transcranial Direct Current Stimulation: Evidence Based Update 2016. Brain Stimulation: Basic, Translational, and Clinical Research in Neuromodulation, 9(5), 641–661. https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.06.004

Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 44, 58–75. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.10.003

Borton, D. A., Yin, M., Aceros, J., & Nurmikko, A. (2013). An implantable wireless neural interface for recording cortical circuit dynamics in moving primates. Journal of Neural Engineering, 10(2), 026010. https://doi.org/10.1088/1741-2560/10/2/026010

Bosking, W. H., Beauchamp, M. S., & Yoshor, D. (2017). Electrical Stimulation of Visual Cortex: Relevance for the Development of Visual Cortical Prosthetics. Annual Review of Vision Science, 3, 141–166. https://doi.org/10.1146/annurev-vision-111815-114525

Bossong, M. G., Mehta, M. A., van Berckel, B. N. M., Howes, O. D., Kahn, R. S., & Stokes, P. R. A. (2015). Further human evidence for striatal dopamine release induced by administration of Δ9-tetrahydrocannabinol (THC): Selectivity to limbic striatum. Psychopharmacology, 232(15), 2723–2729. https://doi.org/10.1007/s00213-015-3915-0

Boto, E., Holmes, N., Leggett, J., Roberts, G., Shah, V., Meyer, S. S., Muñoz, L. D., Mullinger, K. J., Tierney, T. M., Bestmann, S., Barnes, G. R., Bowtell, R., & Brookes, M. J. (2018). Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system. Nature, 555(7698), 657–661. https://doi.org/10.1038/nature26147

Bottomley, P. A., Edelstein, W. A., Foster, T. H., & Adams, W. A. (1985). In vivo solvent-suppressed localized hydrogen nuclear magnetic resonance spectroscopy: A window to metabolism?

Proceedings of the National Academy of Sciences, 82(7), 2148–2152. https://doi.org/10.1073/pnas.82.7.2148
Botvinik-Nezer, R., Holzmeister, F., Camerer, C. F., Dreber, A., Huber, J., Johannesson, M., Kirchler, M., Iwanir, R., Mumford, J. A., Adcock, R. A., Avesani, P., Baczkowski, B. M., Bajracharya, A., Bakst, L., Ball, S., Barilari, M., Bault, N., Beaton, D., Beitner, J., … Schonberg, T. (2020). Variability in the analysis of a single neuroimaging dataset by many teams. Nature, 582(7810), 84–88. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2314-9
Brainwave Science—Crime-fighting Technology for law enforcement. (n.d.). Brainwave Science. Retrieved June 24, 2021, from https://brainwavescience.com/
Brouwer, A.-M. (2021). Challenges and Opportunities in Consumer Neuroergonomics. Frontiers in Neuroergonomics, 2, 3. https://doi.org/10.3389/fnrgo.2021.606646
Brouwer, A.-M., & van Erp, J. B. F. (2010). A tactile P300 brain-computer interface. Frontiers in Neuroscience, 4, 19. https://doi.org/10.3389/fnins.2010.00019
Brunner, C., Birbaumer, N., Blankertz, B., Guger, C., Kübler, A., Mattia, D., Millán, J. del R., Miralles, F., Nijholt, A., Opisso, E., Ramsey, N., Salomon, P., & Müller-Putz, G. R. (2015). BNCI Horizon 2020: Towards a roadmap for the BCI community. Brain-Computer Interfaces, 2(1), 1–10. https://doi.org/10.1080/2326263X.2015.1008956
Brunoni, A. R., Nitsche, M. A., Bolognini, N., Bikson, M., Wagner, T., Merabet, L., Edwards, D. J., Valero-Cabre, A., Rotenberg, A., Pascual-Leone, A., Ferrucci, R., Priori, A., Boggio, P. S., & Fregni, F. (2012). Clinical research with transcranial direct current stimulation (tDCS): Challenges and future directions. Brain Stimulation, 5(3), 175–195. https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.03.002
Buch, E., Weber, C., Cohen, L. G., Braun, C., Dimyan, M. A., Ard, T., Mellinger, J., Caria, A., Soekadar, S., Fourkas, A., & Birbaumer, N. (2008). Think to Move: A Neuromagnetic Brain-Computer Interface (BCI) System for Chronic Stroke. Stroke, 39(3), 910–917. https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.107.505313
Buchanan, D. M., Bogdanowicz, T., Khanna, N., Lockman-Dufour, G., Robaey, P., & D'Angiulli, A. (2021). Systematic Review on the Safety and Tolerability of Transcranial Direct Current Stimulation in Children and Adolescents. Brain Sciences, 11(2), 212. https://doi.org/10.3390/brainsci11020212
Buchert, R., Buhmann, C., Apostolova, I., Meyer, P. T., & Gallinat, J. (2019). Nuclear Imaging in the Diagnosis of Clinically Uncertain Parkinsonian Syndromes. Deutsches Arzteblatt International, 116(44), 747–754. https://doi.org/10.3238/arztebl.2019.0747
Cakulev, I., Efimov, I. R., & Waldo, A. L. (2009). Cardioversion: Past, Present, and Future. Circulation, 120(16), 1623–1632. https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.109.865535
Campbell, B. C. V., & Khatri, P. (2020). Stroke. Lancet (London, England), 396(10244), 129–142. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31179-X
Canolty, R. T., Edwards, E., Dalal, S. S., Soltani, M., Nagarajan, S. S., Kirsch, H. E., Berger, M. S., Barbaro, N. M., & Knight, R. T. (2006). High Gamma Power Is Phase-Locked to Theta Oscillations in Human Neocortex. Science, 313(5793), 1626–1628. https://doi.org/10.1126/science.1128115
Carmena, J. M., Lebedev, M. A., Crist, R. E., O'Doherty, J. E., Santucci, D. M., Dimitrov, D. F., Patil, P. G., Henriquez, C. S., & Nicolelis, M. A. L. (2003). Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates. PLoS Biology, 1(2), E42. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0000042
Caruso, L., Wunderle, T., Lewis, C. M., Valadeiro, J., Trauchessec, V., Trejo Rosillo, J., Amaral, J. P., Ni, J., Jendritza, P., Fermon, C., Cardoso, S., Freitas, P. P., Fries, P., & Pannetier-Lecoeur, M. (2017). In Vivo Magnetic Recording of Neuronal Activity. Neuron, 95(6), 1283-1291.e4. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.08.012
Casson, A. J. (2019). Wearable EEG and beyond. Biomedical Engineering Letters, 9(1), 53–71. https://doi.org/10.1007/s13534-018-00093-6

Caton, R. (1875). Forty-Third Annual Meeting of the British Medical Association. BMJ, 2(765), 257–279. https://doi.org/10.1136/bmj.2.765.257

Chan, H.-L., Kuo, P.-C., Cheng, C.-Y., & Chen, Y.-S. (2018). Challenges and Future Perspectives on Electroencephalogram-Based Biometrics in Person Recognition. Frontiers in Neuroinformatics, 12. https://doi.org/10.3389/fninf.2018.00066

Chang, E. F. (2015). Towards Large-Scale, Human-Based, Mesoscopic Neurotechnologies. Neuron, 86(1), 68–78. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.03.037

Chen, X., Wang, F., Fernandez, E., & Roelfsema, P. R. (2020). Shape perception via a high-channel-count neuroprosthesis in monkey visual cortex. Science, 370(6521), 1191–1196. https://doi.org/10.1126/science.abd7435

Chimowitz, M. I., Lynn, M. J., Derdeyn, C. P., Turan, T. N., Fiorella, D., Lane, B. F., Janis, L. S., Lutsep, H. L., Barnwell, S. L., Waters, M. F., Hoh, B. L., Hourihane, J. M., Levy, E. I., Alexandrov, A. V., Harrigan, M. R., Chiu, D., Klucznik, R. P., Clark, J. M., McDougall, C. G., … Cloft, H. J. (2011). Stenting versus Aggressive Medical Therapy for Intracranial Arterial Stenosis. New England Journal of Medicine, 365(11), 993–1003. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1105335

Cohen, D. (1968). Magnetoencephalography: Evidence of Magnetic Fields Produced by Alpha-Rhythm Currents. Science, 161(3843), 784–786. https://doi.org/10.1126/science.161.3843.784

Colachis, S. C., Dunlap, C. F., Annetta, N. V., Tamrakar, S. M., Bockbrader, M., & Friedenberg, D. A. (2021). Long-term intracortical microelectrode array performance in a human: A five-year retrospective analysis. Journal of Neural Engineering. https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac1add

Collinger, J. L., Wodlinger, B., Downey, J. E., Wang, W., Tyler-Kabara, E. C., Weber, D. J., McMorland, A. J., Velliste, M., Boninger, M. L., & Schwartz, A. B. (2013). High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. The Lancet, 381(9866), 557–564. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61816-9

Compère, L., Siegle, G. J., & Young, K. (2021). Importance of test–retest reliability for promoting fMRI based screening and interventions in major depressive disorder. Translational Psychiatry, 11(1), 1–9. https://doi.org/10.1038/s41398-021-01507-3

Corthout, E., Uttl, B., Ziemann, U., Cowey, A., & Hallett, M. (1998). Two periods of processing in the (circum)striate visual cortex as revealed by transcranial magnetic stimulation. Neuropsychologia, 37(2), 137–145. https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00088-8

Crowell, A. L., Riva-Posse, P., Holtzheimer, P. E., Garlow, S. J., Kelley, M. E., Gross, R. E., Denison, L., Quinn, S., & Mayberg, H. S. (2019). Long-Term Outcomes of Subcallosal Cingulate Deep Brain Stimulation for Treatment-Resistant Depression. The American Journal of Psychiatry, 176(11), 949–956. https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2019.18121427

Cui, M., Zhou, Y., Wei, B., Zhu, X.-H., Zhu, W., Sanders, M. A., Ugurbil, K., & Chen, W. (2017). A proof-of-concept study for developing integrated two-photon microscopic and magnetic resonance imaging modality at ultrahigh field of 16.4 tesla. Scientific Reports, 7(1), 2733. https://doi.org/10.1038/s41598-017-02864-0

Cuocolo, A., Pappatà, S., Zampella, E., & Assante, R. (2018). Chapter Three—Advances in SPECT Methodology. In M. Politis (Ed.), International Review of Neurobiology (Vol. 141, pp. 77–96). Academic Press. https://doi.org/10.1016/bs.irn.2018.08.001

Czeszumski, A., Eustergerling, S., Lang, A., Menrath, D., Gerstenberger, M., Schuberth, S., Schreiber, F., Rendon, Z. Z., & König, P. (2020). Hyperscanning: A Valid Method to Study Neural Inter-brain Underpinnings of Social Interaction. Frontiers in Human Neuroscience, 14, 39. https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00039

DaSilva, A. F. M., Tuch, D. S., Wiegell, M. R., & Hadjikhani, N. (2003). A primer on diffusion tensor imaging of anatomical substructures. Neurosurgical Focus, 15(1), 1–4. https://doi.org/10.3171/foc.2003.15.1.4

Datta, A., Bansal, V., Diaz, J., Patel, J., Reato, D., & Bikson, M. (2009). Gyri –precise head model of transcranial DC stimulation: Improved spatial focality using a ring electrode versus

conventional rectangular pad. Brain Stimulation, 2(4), 201–207. https://doi.org/10.1016/j.brs.2009.03.005
de Kogel, C. H., & Westgeest, E. J. M. C. (2015). Neuroscientific and behavioral genetic information in criminal cases in the Netherlands. Journal of Law and the Biosciences, lsv024. https://doi.org/10.1093/jlb/lsv024
Dehais, F., Karwowski, W., & Ayaz, H. (2020). Brain at Work and in Everyday Life as the Next Frontier: Grand Field Challenges for Neuroergonomics. Frontiers in Neuroergonomics, 1, 1. https://doi.org/10.3389/fnrgo.2020.583733
Delbeke, J., Hoffman, L., Mols, K., Braeken, D., & Prodanov, D. (2017). And Then There Was Light: Perspectives of Optogenetics for Deep Brain Stimulation and Neuromodulation. Frontiers in Neuroscience, 11, 663. https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00663
Delfin, C., Krona, H., Andiné, P., Ryding, E., Wallinius, M., & Hofvander, B. (2019). Prediction of recidivism in a long-term follow-up of forensic psychiatric patients: Incremental effects of neuroimaging data. PLOS ONE, 14(5), e0217127. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217127
Demene, C., Baranger, J., Bernal, M., Delanoe, C., Auvin, S., Biran, V., Alison, M., Mairesse, J., Harribaud, E., Pernot, M., Tanter, M., & Baud, O. (2017). Functional ultrasound imaging of brain activity in human newborns. Science Translational Medicine, 9(411), eaah6756. https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aah6756
Demuru, M., & Fraschini, M. (2020). EEG fingerprinting: Subject-specific signature based on the aperiodic component of power spectrum. Computers in Biology and Medicine, 120, 103748. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.103748
Deng, Z.-D., Lisanby, S. H., & Peterchev, A. V. (2013). Electric field depth–focality tradeoff in transcranial magnetic stimulation: Simulation comparison of 50 coil designs. Brain Stimulation, 6(1), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.02.005
Deppe, M., Knecht, S., Papke, K., Lohmann, H., Fleischer, H., Heindel, W., Ringelstein, E. B., & Henningsen, H. (2000). Assessment of hemispheric language lateralization: A comparison between fMRI and fTCD. Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism: Official Journal of the International Society of Cerebral Blood Flow and Metabolism, 20(2), 263–268. https://doi.org/10.1097/00004647-200002000-00006
Di Flumeri, G., Aricò, P., Borghini, G., Sciaraffa, N., Di Florio, A., & Babiloni, F. (2019). The Dry Revolution: Evaluation of Three Different EEG Dry Electrode Types in Terms of Signal Spectral Features, Mental States Classification and Usability. Sensors (Basel, Switzerland), 19(6). https://doi.org/10.3390/s19061365
Dobelle, W. H. (2000). Artificial vision for the blind by connecting a television camera to the visual cortex. ASAIO Journal (American Society for Artificial Internal Organs: 1992), 46(1), 3–9. https://doi.org/10.1097/00002480-200001000-00002
Dockree, P. M., Barnes, J. J., Matthews, N., Dean, A. J., Abe, R., Nandam, L. S., Kelly, S. P., Bellgrove, M. A., & O'Connell, R. G. (2017). The Effects of Methylphenidate on the Neural Signatures of Sustained Attention. Biological Psychiatry, 82(9), 687–694. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2017.04.016
Dubey, A., & Ray, S. (2019). Cortical Electrocorticogram (ECoG) Is a Local Signal. Journal of Neuroscience, 39(22), 4299–4311.
Duriez, P., Bou Khalil, R., Chamoun, Y., Maatoug, R., Strumila, R., Seneque, M., Gorwood, P., Courtet, P., & Guillaume, S. (2020). Brain Stimulation in Eating Disorders: State of the Art and Future Perspectives. Journal of Clinical Medicine, 9(8), E2358. https://doi.org/10.3390/jcm9082358
Durston, S., Pol, H. E. H., Schnack, H. G., Buitelaar, J. K., Steenhuis, M. P., Minderaa, R. B., Kahn, R. S., & van engeland, H. (2004). Magnetic Resonance Imaging of Boys With Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder and Their Unaffected Siblings. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry, 43(3), 332–340. https://doi.org/10.1097/00004583-200403000-00016

Editorial. (2008, November). Deceiving the law. Nature Neuroscience. http://www.nature.com/articles/nn1108-1231

Ehlis, A.-C., Schneider, S., Dresler, T., & Fallgatter, A. J. (2014). Application of functional near-infrared spectroscopy in psychiatry. NeuroImage, 85 Pt 1, 478–488. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.03.067

Ehman, E. C., Johnson, G. B., Villanueva-Meyer, J. E., Cha, S., Leynes, A. P., Larson, P. E. Z., & Hope, T. A. (2017). PET/MRI: Where might it replace PET/CT? Journal of Magnetic Resonance Imaging: JMRI, 46(5), 1247–1262. https://doi.org/10.1002/jmri.25711

Elliott, M. L., Knodt, A. R., Ireland, D., Morris, M. L., Poulton, R., Ramrakha, S., Sison, M. L., Moffitt, T. E., Caspi, A., & Hariri, A. R. (2020). What Is the Test-Retest Reliability of Common Task-Functional MRI Measures? New Empirical Evidence and a Meta-Analysis. Psychological Science, 31(7), 792–806. https://doi.org/10.1177/0956797620916786

Farah, M. J., Hutchinson, J. B., Phelps, E. A., & Wagner, A. D. (2014). Functional MRI-based lie detection: Scientific and societal challenges. Nature Reviews Neuroscience, 15(2), 123–131. https://doi.org/10.1038/nrn3665

Faria, P., Hallett, M., & Miranda, P. C. (2011). A finite element analysis of the effect of electrode area and inter-electrode distance on the spatial distribution of the current density in tDCS. Journal of Neural Engineering, 8(6), 066017. https://doi.org/10.1088/1741-2560/8/6/066017

Farwell, L. A., & Donchin, E. (1988). Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 70(6), 510–523. https://doi.org/10.1016/0013-4694(88)90149-6

Farwell, L. A., Richardson, D. C., Richardson, G. M., & Furedy, J. J. (2014). Brain fingerprinting classification concealed information test detects US Navy military medical information with P300. Frontiers in Neuroscience, 8, 410. https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00410

Fazel, S., Singh, J. P., Doll, H., & Grann, M. (2012). Use of risk assessment instruments to predict violence and antisocial behaviour in 73 samples involving 24 827 people: Systematic review and meta-analysis. BMJ, 345, e4692. https://doi.org/10.1136/bmj.e4692

Fernández, A., Maestú, F., Amo, C., Gil, P., Fehr, T., Wienbruch, C., Rockstroh, B., Elbert, T., & Ortiz, T. (2002). Focal temporoparietal slow activity in Alzheimer's disease revealed by magnetoencephalography. Biological Psychiatry, 52(7), 764–770. https://doi.org/10.1016/s0006-3223(02)01366-5

Fernández, E., Alfaro, A., Soto-Sánchez, C., Gonzalez-Lopez, P., Lozano, A. M., Peña, S., Grima, M. D., Rodil, A., Gómez, B., Chen, X., Roelfsema, P. R., Rolston, J. D., Davis, T. S., & Normann, R. A. (2021). Visual percepts evoked with an intracortical 96-channel microelectrode array inserted in human occipital cortex. The Journal of Clinical Investigation, 131(23). https://doi.org/10.1172/JCI151331

Fernandez, L., Rogasch, N. C., Do, M., Clark, G., Major, B. P., Teo, W.-P., Byrne, L. K., & Enticott, P. G. (2020). Cerebral Cortical Activity Following Non-invasive Cerebellar Stimulation—A Systematic Review of Combined TMS and EEG Studies. The Cerebellum, 19(2), 309–335. https://doi.org/10.1007/s12311-019-01093-7

Ferradal, S. L., Eggebrecht, A. T., Hassanpour, M., Snyder, A. Z., & Culver, J. P. (2014). Atlas-based head modeling and spatial normalization for high-density diffuse optical tomography: In vivo validation against fMRI. NeuroImage, 85, 117–126. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.03.069

Flesher, S. N., Collinger, J. L., Foldes, S. T., Weiss, J. M., Downey, J. E., Tyler-Kabara, E. C., Bensmaia, S. J., Schwartz, A. B., Boninger, M. L., & Gaunt, R. A. (2016). Intracortical microstimulation of human somatosensory cortex. Science Translational Medicine, 8(361), 361ra141-361ra141. https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aaf8083

Flesher, S. N., Downey, J. E., Weiss, J. M., Hughes, C. L., Herrera, A. J., Tyler-Kabara, E. C., Boninger, M. L., Collinger, J. L., & Gaunt, R. A. (2021). A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control. Science, 372(6544), 831–836. https://doi.org/10.1126/science.abd0380

Flow tDCS device—Flow Neuroscience. (n.d.). Retrieved August 19, 2021, from https://flowneuroscience.com/product/flow-device/

Folloni, D., Verhagen, L., Mars, R. B., Fouragnan, E., Constans, C., Aubry, J.-F., Rushworth, M. F. S., & Sallet, J. (2019). Manipulation of Subcortical and Deep Cortical Activity in the Primate Brain Using Transcranial Focused Ultrasound Stimulation. Neuron, 101(6), 1109-1116.e5. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.01.019

Fomenko, A., Neudorfer, C., Dallapiazza, R. F., Kalia, S. K., & Lozano, A. M. (2018). Low-intensity ultrasound neuromodulation: An overview of mechanisms and emerging human applications. Brain Stimulation, 11(6), 1209–1217. https://doi.org/10.1016/j.brs.2018.08.013

Freight, S. (n.d.). Neurable. Neurable. Retrieved June 24, 2021, from https://neurable.com/headphones

Fry, F. J., Ades, H. W., & Fry, W. J. (1958). Production of Reversible Changes in the Central Nervous System by Ultrasound. Science, 127(3289), 83–84. https://doi.org/10.1126/science.127.3289.83

Gamer, M. (2014). Mind Reading Using Neuroimaging. European Psychologist, 19(3), 172–183. https://doi.org/10.1027/1016-9040/a000193

Gamer, M., Klimecki, O., Bauermann, T., Stoeter, P., & Vossel, G. (2012). FMRI-activation patterns in the detection of concealed information rely on memory-related effects. Social Cognitive and Affective Neuroscience, 7(5), 506–515. https://doi.org/10.1093/scan/nsp005

Ganis, G. (2014). Deception Detection Using Neuroimaging. In Detecting Deception (pp. 105–121). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781118510001.ch5

Ganis, G., Kosslyn, S. M., Stose, S., Thompson, W. L., & Yurgelun-Todd, D. A. (2003). Neural correlates of different types of deception: An fMRI investigation. Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991), 13(8), 830–836. https://doi.org/10.1093/cercor/13.8.830

Ganis, G., Rosenfeld, P. J., Meixner, J., Kievit, R. A., & Schendan, H. E. (2011). Lying in the scanner: Covert countermeasures disrupt deception detection by functional magnetic resonance imaging. NeuroImage, 55(1), 312–319. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.025

Gaubert, J. (2021, August 10). World's most powerful MRI scanner delivers its first images—Of the inside of a pumpkin. https://www.euronews.com/next/2021/10/08/world-s-most-powerful-mri-scanner-delivers-its-first-images-from-inside-a-pumpkin

Gazzaniga, M., Ivry, R., & Mangun, G. (2009). Cognitive Neuroscience: The Biology of the Mind. Norton Press.

George, D. D., Ojemann, S. G., Drees, C., & Thompson, J. A. (2020). Stimulation Mapping Using Stereoelectroencephalography: Current and Future Directions. Frontiers in Neurology, 11. https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00320

Gerboni, G., John, S. E., Ronayne, S. M., Rind, G. S., May, C. N., Oxley, T. J., Grayden, D. B., Opie, N. L., & Wong, Y. T. (2018). Cortical Brain Stimulation with Endovascular Electrodes. 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 3088–3091. https://doi.org/10.1109/EMBC.2018.8512971

Ghanouni, P., Pauly, K. B., Elias, W. J., Henderson, J., Sheehan, J., Monteith, S., & Wintermark, M. (2015). Transcranial MRI-Guided Focused Ultrasound: A Review of the Technologic and Neurologic Applications. American Journal of Roentgenology, 205(1), 150–159. https://doi.org/10.2214/AJR.14.13632

Gholipour, T., Koubeissi, M. Z., & Shields, D. C. (2020). Stereotactic electroencephalography. Clinical Neurology and Neurosurgery, 189, 105640. https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2019.105640

Giridharadas, A. (2008, September 15). India's Novel Use of Brain Scans in Courts Is Debated. The New York Times. https://www.nytimes.com/2008/09/15/world/asia/15brainscan.html

Gompel, J. J. V., Noe, K., & Zimmerman, R. S. (2021). Intracranial EEG Monitoring. In Epilepsy (pp. 381–399). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781119431893.ch21

Grande, K. M., Ihnen, S. K. Z., & Arya, R. (2020). Electrical Stimulation Mapping of Brain Function: A Comparison of Subdural Electrodes and Stereo-EEG. Frontiers in Human Neuroscience, 0. https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.611291

Gratton, G., & Fabiani, M. (1998). Dynamic brain imaging: Event-related optical signal (EROS) measures of the time course and localization of cognitive-related activity. Psychonomic Bulletin & Review, 5(4), 535–563. https://doi.org/10.3758/BF03208834

Greenberg, B. D., Malone, D. A., Friehs, G. M., Rezai, A. R., Kubu, C. S., Malloy, P. F., Salloway, S. P., Okun, M. S., Goodman, W. K., & Rasmussen, S. A. (2006). Three-Year Outcomes in Deep Brain Stimulation for Highly Resistant Obsessive–Compulsive Disorder. Neuropsychopharmacology, 31(11), 2384–2393. https://doi.org/10.1038/sj.npp.1301165

Grosenick, L., Marshel, J. H., & Deisseroth, K. (2015). Closed-Loop and Activity-Guided Optogenetic Control. Neuron, 86(1), 106–139. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.03.034

Gross, J. (2019). Magnetoencephalography in Cognitive Neuroscience: A Primer. Neuron, 104(2), 189–204. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.07.001

Gross, J., Baillet, S., Barnes, G. R., Henson, R. N., Hillebrand, A., Jensen, O., Jerbi, K., Litvak, V., Maess, B., Oostenveld, R., Parkkonen, L., Taylor, J. R., van Wassenhove, V., Wibral, M., & Schoffelen, J.-M. (2013). Good practice for conducting and reporting MEG research. NeuroImage, 65, 349–363. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.10.001

Grossman, N., Bono, D., Dedic, N., Kodandaramaiah, S. B., Rudenko, A., Suk, H.-J., Cassara, A. M., Neufeld, E., Kuster, N., Tsai, L.-H., Pascual-Leone, A., & Boyden, E. S. (2017). Noninvasive Deep Brain Stimulation via Temporally Interfering Electric Fields. Cell, 169(6), 1029-1041.e16. https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.05.024

Gruzelier, J. H. (2014). EEG-neurofeedback for optimising performance. I: A review of cognitive and affective outcome in healthy participants. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 44, 124–141. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.09.015

Gui, Q., Ruiz-Blondet, M. V., Laszlo, S., & Jin, Z. (2019). A Survey on Brain Biometrics. ACM Computing Surveys, 51(6), 112:1-112:38. https://doi.org/10.1145/3230632

Habets, J. G. V., Heijmans, M., Kuijf, M. L., Janssen, M. L. F., Temel, Y., & Kubben, P. L. (2018). An update on adaptive deep brain stimulation in Parkinson's disease: Update On Adaptive DBS in Parkinson's Disease. Movement Disorders, 33(12), 1834–1843. https://doi.org/10.1002/mds.115

Haijma, S. V., Van Haren, N., Cahn, W., Koolschijn, P. C. M. P., Hulshoff Pol, H. E., & Kahn, R. S. (2013). Brain Volumes in Schizophrenia: A Meta-Analysis in Over 18 000 Subjects. Schizophrenia Bulletin, 39(5), 1129–1138. https://doi.org/10.1093/schbul/sbs118

Hakun, J. G., Seelig, D., Ruparel, K., Loughead, J. W., Busch, E., Gur, R. C., & Langleben, D. D. (2008). FMRI investigation of the cognitive structure of the Concealed Information Test. Neurocase, 14(1), 59–67. https://doi.org/10.1080/13554790801992792

Hallett, M. (2007). Transcranial Magnetic Stimulation: A Primer. Neuron, 55(2), 187–199. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.06.026

Hamani, C., McAndrews, M. P., Cohn, M., Oh, M., Zumsteg, D., Shapiro, C. M., Wennberg, R. A., & Lozano, A. M. (2008). Memory enhancement induced by hypothalamic/fornix deep brain stimulation. Annals of Neurology, 63(1), 119–123. https://doi.org/10.1002/ana.21295

Hameroff, S., Trakas, M., Duffield, C., Annabi, E., Gerace, M. B., Boyle, P., Lucas, A., Amos, Q., Buadu, A., & Badal, J. J. (2013). Transcranial Ultrasound (TUS) Effects on Mental States: A Pilot Study. Brain Stimulation, 6(3), 409–415. https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.05.002

Hampson, R. E., Song, D., Robinson, B. S., Fetterhoff, D., Dakos, A. S., Roeder, B. M., She, X., Wicks, R. T., Witcher, M. R., Couture, D. E., Laxton, A. W., Munger-Clary, H., Popli, G., Sollman, M. J., Whitlow, C. T., Marmarelis, V. Z., Berger, T. W., & Deadwyler, S. A. (2018). Developing a hippocampal neural prosthetic to facilitate human memory encoding and recall. Journal of Neural Engineering, 15(3), 036014. https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaaed7

Hardy, S., Bastick, L., O'Neill-Kerr, A., Sabesan, P., Lankappa, S., & Palaniyappan, L. (2016). Transcranial magnetic stimulation in clinical practice. BJPsych Advances, 22(6), 373–379. https://doi.org/10.1192/apt.bp.115.015206

Harmsel, J. F. T., & Molendijk, T. (2016). Rapportages pro Justitia van het Nederlands Instituut voor Forensische Psychiatrie en Psychologie in retrospectief; toepassingen van genetische en neurowetenschappelijke inzichten, in 2000 en 2009. Tijdschrift voor Psychiatrie, 10.

Harmsen, I. E., Elias, G. J. B., Beyn, M. E., Boutet, A., Pancholi, A., Germann, J., Mansouri, A., Lozano, C. S., & Lozano, A. M. (2020). Clinical trials for deep brain stimulation: Current state of affairs. Brain Stimulation, 13(2), 378–385. https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.11.008

Hellwag, C. F., & Jacobi, M. (1802). Erfahrungen über die Heilkräfte des Galvanismus, und Betrachtungen über desselben chemische und physiologische Wirkungen. Friedrich Perthes.

Herff, C., Krusienski, D. J., & Kubben, P. (2020). The Potential of Stereotactic-EEG for Brain-Computer Interfaces: Current Progress and Future Directions. Frontiers in Neuroscience, 14, 123. https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00123

Hermes, D., & Miller, K. (2020). IEEG: Dura-lining electrodes. Handbook of Clinical Neurology, 168, 263–277.

Hill, R. M., Boto, E., Rea, M., Holmes, N., Leggett, J., Coles, L. A., Papastavrou, M., Everton, S. K., Hunt, B. A. E., Sims, D., Osborne, J., Shah, V., Bowtell, R., & Brookes, M. J. (2020). Multi-channel whole-head OPM-MEG: Helmet design and a comparison with a conventional system. NeuroImage, 219, 116995. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116995

Hiremath, S. V., Tyler-Kabara, E. C., Wheeler, J. J., Moran, D. W., Gaunt, R. A., Collinger, J. L., Foldes, S. T., Weber, D. J., Chen, W., Boninger, M. L., & Wang, W. (2017). Human perception of electrical stimulation on the surface of somatosensory cortex. PLOS ONE, 12(5), e0176020. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176020

Hirsch, J., Zhang, X., Noah, J. A., & Ono, Y. (2017). Frontal temporal and parietal systems synchronize within and across brains during live eye-to-eye contact. NeuroImage, 157, 314–330. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.06.018

Hogendoorn, H., & Burkitt, A. N. (2018). Predictive coding of visual object position ahead of moving objects revealed by time-resolved EEG decoding. NeuroImage, 171, 55–61. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.12.063

Höhne, J., & Tangermann, M. (2014). Towards User-Friendly Spelling with an Auditory Brain-Computer Interface: The CharStreamer Paradigm. PLoS ONE, 9(6), e98322. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098322

Hong, X., Lu, Z. K., Teh, I., Nasrallah, F. A., Teo, W. P., Ang, K. K., Phua, K. S., Guan, C., Chew, E., & Chuang, K.-H. (2017). Brain plasticity following MI-BCI training combined with tDCS in a randomized trial in chronic subcortical stroke subjects: A preliminary study. Scientific Reports, 7(1), 9222. https://doi.org/10.1038/s41598-017-08928-5

Horvath, J. C., Forte, J. D., & Carter, O. (2015). Evidence that transcranial direct current stimulation (tDCS) generates little-to-no reliable neurophysiologic effect beyond MEP amplitude modulation in healthy human subjects: A systematic review. Neuropsychologia, 66, 213–236. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.11.021

Huber, L., Finn, E. S., Handwerker, D. A., Bönstrup, M., Glen, D. R., Kashyap, S., Ivanov, D., Petridou, N., Marrett, S., Goense, J., Poser, B. A., & Bandettini, P. A. (2020). Sub-millimeter fMRI reveals multiple topographical digit representations that form action maps in human motor cortex. NeuroImage, 208, 116463. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116463

Hughes, C. L., Flesher, S. N., Weiss, J. M., Downey, J. E., Boninger, M., Collinger, J. L., & Gaunt, R. A. (2021). Neural stimulation and recording performance in human sensorimotor cortex over 1500 days. Journal of Neural Engineering, 18(4), 045012. https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac18ad

humm. (2019). White Paper. https://2matic.files.wordpress.com/2019/12/1fac7-humm-whitepaper.pdf

Humphries, M. (2021). Mercedes-Benz Is Experimenting With Mind Control in Vehicles. PCMAG. https://www.pcmag.com/news/mercedes-benz-is-experimenting-with-mind-control-in-vehicles

Iida, K., & Otsubo, H. (2017). Stereoelectroencephalography: Indication and Efficacy. Neurologia Medico-Chirurgica, 57(8), 375–385. https://doi.org/10.2176/nmc.ra.2017-0008

Imbault, M., Chauvet, D., Gennisson, J.-L., Capelle, L., & Tanter, M. (2017). Intraoperative Functional Ultrasound Imaging of Human Brain Activity. Scientific Reports, 7(1), 7304. https://doi.org/10.1038/s41598-017-06474-8

Jackson, A. (2020). Neuralink: Brain hacking is exceptionally hard, no matter what Elon Musk says. The Conversation. http://theconversation.com/neuralink-brain-hacking-is-exceptionally-hard-no-matter-what-elon-musk-says-145711

Jacobs, J., & Kahana, M. J. (2010). Direct brain recordings fuel advances in cognitive electrophysiology. Trends in Cognitive Sciences, 14(4), 162–171. https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.01.005

Jansma, J. M., Ramsey, N., & Rutten, G. J. (2015). A comparison of brain activity associated with language production in brain tumor patients with left and right sided language laterality. Journal of Neurosurgical Sciences, 59(4), 327–335.

Jarosiewicz, B., Sarma, A. A., Bacher, D., Masse, N. Y., Simeral, J. D., Sorice, B., Oakley, E. M., Blabe, C., Pandarinath, C., Gilja, V., Cash, S. S., Eskandar, E. N., Friehs, G., Henderson, J. M., Shenoy, K. V., Donoghue, J. P., & Hochberg, L. R. (2015). Virtual typing by people with tetraplegia using a self-calibrating intracortical brain-computer interface. Science Translational Medicine, 7(313), 313ra179. https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aac7328

Jones, K. E., Campbell, P. K., & Normann, R. A. (1992). A glass/silicon composite intracortical electrode array. Annals of Biomedical Engineering, 20(4), 423–437. https://doi.org/10.1007/BF02368134

Jones, T., & Townsend, D. (2017). History and future technical innovation in positron emission tomography. Journal of Medical Imaging, 4(1), 011013. https://doi.org/10.1117/1.JMI.4.1.011013

Kahana, M. J., Wanda, P. A., Ezzyat, Y., Solomon, E. A., Adamovich-Zeitlin, R., Lega, B., Jobst, B. C., Gross, R. E., Ding, K., & Diaz-Arrastia, R. R. (2021). Biomarker-guided neuromodulation aids memory in traumatic brain injury [Preprint]. Neurology. https://doi.org/10.1101/2021.05.18.21256980

Karim, A. A., Schneider, M., Lotze, M., Veit, R., Sauseng, P., Braun, C., & Birbaumer, N. (2010). The truth about lying: Inhibition of the anterior prefrontal cortex improves deceptive behavior. Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991), 20(1), 205–213. https://doi.org/10.1093/cercor/bhp090

Kelly, R. C., Smith, M. A., Samonds, J. M., Kohn, A., Bonds, A. B., Movshon, J. A., & Lee, T. S. (2007). Comparison of Recordings from Microelectrode Arrays and Single Electrodes in the Visual Cortex. Journal of Neuroscience, 27(2), 261–264. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4906-06.2007

Kempes, M. (2019, March 7). De zin en onzin van hersenscans bij verdachten in het Pieter Baan Centrum—Weblogs—NIFP [Webpagina]. Ministerie van Algemene Zaken. https://www.nifp.nl/actueel/weblogs/weblogberichten/2019/de-zin-en-onzin-van-hersenscans-bij-verdachten-in-het-pieter-baan-centrum

Kernel: Flow. (2021). https://www.kernel.com/flow?web=1&wdLOR=c80F93C83-B9F1-47BF-843F-624F1E44E2CC

Kerous, B., Skola, F., & Liarokapis, F. (2018). EEG-based BCI and video games: A progress report. Virtual Reality, 22(2), 119–135. https://doi.org/10.1007/s10055-017-0328-x

Khodagholy, D., Gelinas, J. N., Thesen, T., Doyle, W., Devinsky, O., Malliaras, G. G., & Buzsáki, G. (2015). NeuroGrid: Recording action potentials from the surface of the brain. Nature Neuroscience, 18(2), 310–315. https://doi.org/10.1038/nn.3905

Kogan, M., McGuire, M., & Riley, J. (2019). Deep Brain Stimulation for Parkinson Disease. Neurosurgery Clinics of North America, 30(2), 137–146. https://doi.org/10.1016/j.nec.2019.01.001

Koganemaru, S., Mikami, Y., Maezawa, H., Ikeda, S., Ikoma, K., & Mima, T. (2018). Neurofeedback Control of the Human GABAergic System Using Non-invasive Brain Stimulation. Neuroscience, 380, 38–48. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2018.03.051

Kohl, S. H., Mehler, D. M. A., Lührs, M., Thibault, R. T., Konrad, K., & Sorger, B. (2020). The Potential of Functional Near-Infrared Spectroscopy-Based Neurofeedback—A Systematic Review and Recommendations for Best Practice. Frontiers in Neuroscience, 14. https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00594

Koolschijn, P. C. M. P., van Haren, N. E. M., Lensvelt-Mulders, G. J. L. M., Hulshoff Pol, H. E., & Kahn, R. S. (2009). Brain volume abnormalities in major depressive disorder: A meta-analysis of magnetic resonance imaging studies. Human Brain Mapping, 30(11), 3719–3735. https://doi.org/10.1002/hbm.20801

Kozel, F. A., Johnson, K. A., Mu, Q., Grenesko, E. L., Laken, S. J., & George, M. S. (2005). Detecting deception using functional magnetic resonance imaging. Biological Psychiatry, 58(8), 605–613. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2005.07.040

Kragel, P., Han, X., Kraynak, T., Gianaros, P. J., & Wager, T. (2020). FMRI can be highly reliable, but it depends on what you measure. PsyArXiv. https://doi.org/10.31234/osf.io/9eaxk

Krainik, A., Lehéricy, S., Duffau, H., Vlaicu, M., Poupon, F., Capelle, L., Cornu, P., Clemenceau, S., Sahel, M., Valery, C.-A., Boch, A.-L., Mangin, J.-F., Bihan, D. L., & Marsault, C. (2001). Role of the supplementary motor area in motor deficit following medial frontal lobe surgery. Neurology, 57(5), 871–878. https://doi.org/10.1212/WNL.57.5.871

Krauss, J. K., Lipsman, N., Aziz, T., Boutet, A., Brown, P., Chang, J. W., Davidson, B., Grill, W. M., Hariz, M. I., Horn, A., Schulder, M., Mammis, A., Tass, P. A., Volkmann, J., & Lozano, A. M. (2021). Technology of deep brain stimulation: Current status and future directions. Nature Reviews. Neurology, 17(2), 75–87. https://doi.org/10.1038/s41582-020-00426-z

Krepel, N., Egtberts, T., Sack, A. T., Heinrich, H., Ryan, M., & Arns, M. (2020). A multicenter effectiveness trial of QEEG-informed neurofeedback in ADHD: Replication and treatment prediction. NeuroImage. Clinical, 28, 102399. https://doi.org/10.1016/j.nicl.2020.102399

Krishnan, P., Murphy, A., & Aviv, R. I. (2017). CT-based Techniques for Brain Perfusion. Topics in Magnetic Resonance Imaging: TMRI, 26(3), 113–119. https://doi.org/10.1097/RMR.0000000000000129

Kropotov, J. D. (2016). Chapter 4.3—Electroconvulsive Therapy. In J. D. Kropotov (Ed.), Functional Neuromarkers for Psychiatry (pp. 267–271). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410513-3.00017-6

Kubanek, J. (2018). Neuromodulation with transcranial focused ultrasound. Neurosurgical Focus, 44(2), E14. https://doi.org/10.3171/2017.11.FOCUS17621

Kurz, M. J., Wilson, T. W., & Arpin, D. J. (2014). An fNIRS exploratory investigation of the cortical activity during gait in children with spastic diplegic cerebral palsy. Brain & Development, 36(10), 870–877. https://doi.org/10.1016/j.braindev.2014.01.003

Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Chesler, D. A., Goldberg, I. E., Weisskoff, R. M., Poncelet, B. P., Kennedy, D. N., Hoppel, B. E., Cohen, M. S., & Turner, R. (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 89(12), 5675–5679. https://doi.org/10.1073/pnas.89.12.5675

La Tona, G., Terranova, M. C., Vernuccio, F., Lo Re, G., Salerno, S., Zerbo, S., & Argo, A. (2020). Lie Detection: FMRI. In G. Lo Re, A. Argo, M. Midiri, & C. Cattaneo (Eds.), Radiology in Forensic Medicine: From Identification to Post-mortem Imaging (pp. 197–202). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96737-0_18

Labruna, L., Merrick, C., Inglis, B., Ivry, R., & Sheltraw, D. (2021). kTMP: A New Non-invasive Magnetic Induction Method to Modulate Cortical Excitability (p. 2021.11.17.465477). https://doi.org/10.1101/2021.11.17.465477

Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Salazar, W., Crews, D. J., Kubitz, K. A., Gannon, T. L., & Han, M. (1991). The influence of electrocortical biofeedback on performance in pre-elite archers. Medicine and Science in Sports and Exercise, 23(1), 123–129.

Langleben, D. D., Schroeder, L., Maldjian, J. A., Gur, R. C., McDonald, S., Ragland, J. D., O'Brien, C. P., & Childress, A. R. (2002). Brain Activity during Simulated Deception: An Event-Related Functional Magnetic Resonance Study. NeuroImage, 15(3), 727–732. https://doi.org/10.1006/nimg.2001.1003

Le Bihan, D., Breton, E., Lallemand, D., Grenier, P., Cabanis, E., & Laval-Jeantet, M. (1986). MR imaging of intravoxel incoherent motions: Application to diffusion and perfusion in neurologic disorders. Radiology, 161(2), 401–407. https://doi.org/10.1148/radiology.161.2.3763909

Leamy, D. J., & Ward, T. E. (2010). A novel co-locational and concurrent fNIRS/EEG measurement system: Design and initial results. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference, 2010, 4230–4233. https://doi.org/10.1109/IEMBS.2010.5627377

Lee, T. M. C., Liu, H.-L., Tan, L.-H., Chan, C. C. H., Mahankali, S., Feng, C.-M., Hou, J., Fox, P. T., & Gao, J.-H. (2002). Lie detection by functional magnetic resonance imaging. Human Brain Mapping, 15(3), 157–164. https://doi.org/10.1002/hbm.10020

Lee, W., Chung, Y. A., Jung, Y., Song, I.-U., & Yoo, S.-S. (2016). Simultaneous acoustic stimulation of human primary and secondary somatosensory cortices using transcranial focused ultrasound. BMC Neuroscience, 17(1), 68. https://doi.org/10.1186/s12868-016-0303-6

Lee, W., Kim, H.-C., Jung, Y., Chung, Y. A., Song, I.-U., Lee, J.-H., & Yoo, S.-S. (2016). Transcranial focused ultrasound stimulation of human primary visual cortex. Scientific Reports, 6(1), 34026. https://doi.org/10.1038/srep34026

Lefaucheur, J.-P., André-Obadia, N., Antal, A., Ayache, S. S., Baeken, C., Benninger, D. H., Cantello, R. M., Cincotta, M., de Carvalho, M., De Ridder, D., Devanne, H., Di Lazzaro, V., Filipović, S. R., Hummel, F. C., Jääskeläinen, S. K., Kimiskidis, V. K., Koch, G., Langguth, B., Nyffeler, T., … Garcia-Larrea, L. (2014). Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS). Clinical Neurophysiology, 125(11), 2150–2206. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.05.021

Legon, W., Adams, S., Bansal, P., Patel, P. D., Hobbs, L., Ai, L., Mueller, J. K., Meekins, G., & Gillick, B. T. (2020). A retrospective qualitative report of symptoms and safety from transcranial focused ultrasound for neuromodulation in humans. Scientific Reports, 10(1), 5573. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62265-8

Legon, W., Ai, L., Bansal, P., & Mueller, J. (2018). Neuromodulation with single-element transcranial focused ultrasound in human thalamus. https://doi.org/10.1002/hbm.23981

Legon, W., Bansal, P., Tyshynsky, R., Ai, L., & Mueller, J. K. (2018). Transcranial focused ultrasound neuromodulation of the human primary motor cortex. Scientific Reports, 8(1), 10007. https://doi.org/10.1038/s41598-018-28320-1

Legon, W., Sato, T. F., Opitz, A., Mueller, J., Barbour, A., Williams, A., & Tyler, W. J. (2014). Transcranial focused ultrasound modulates the activity of primary somatosensory cortex in humans. Nature Neuroscience, 17(2), 322–329. https://doi.org/10.1038/nn.3620

Lesser, R. P., Lueders, H., Dinner, D. S., Hahn, J., & Cohen, L. (1984). The location of speech and writing functions in the frontal language area: Results of extraoperative cortical stimulation. Brain, 107(1), 275–291. https://doi.org/10.1093/brain/107.1.275

Leue, A., & Beauducel, A. (2019). A meta-analysis of the P3 amplitude in tasks requiring deception in legal and social contexts. Brain and Cognition, 135, 103564. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2019.05.002

Levkovitz, Y., Isserles, M., Padberg, F., Lisanby, S. H., Bystritsky, A., Xia, G., Tendler, A., Daskalakis, Z. J., Winston, J. L., Dannon, P., Hafez, H. M., Reti, I. M., Morales, O. G., Schlaepfer, T. E., Hollander, E., Berman, J. A., Husain, M. M., Sofer, U., Stein, A., … Zangen, A. (2015). Efficacy and safety of deep transcranial magnetic stimulation for major depression: A prospective

multicenter randomized controlled trial. World Psychiatry, 14(1), 64–73. https://doi.org/10.1002/wps.20199
Li, M., He, D., Li, C., & Qi, S. (2021). Brain–Computer Interface Speller Based on Steady-State Visual Evoked Potential: A Review Focusing on the Stimulus Paradigm and Performance. Brain Sciences, 11(4), 450. https://doi.org/10.3390/brainsci11040450
Liao, Y., Huang, X., Wu, Q., Yang, C., Kuang, W., Du, M., Lui, S., Yue, Q., Chan, R. C. K., Kemp, G. J., & Gong, Q. (2013). Is depression a disconnection syndrome? Meta-analysis of diffusion tensor imaging studies in patients with MDD. Journal of Psychiatry & Neuroscience : JPN, 38(1), 49–56. https://doi.org/10.1503/jpn.110180
Lin, E., & Alessio, A. (2009). What are the basic concepts of temporal, contrast, and spatial resolution in cardiac CT? Journal of Cardiovascular Computed Tomography, 3(6), 403–408. https://doi.org/10.1016/j.jcct.2009.07.003
Linden, D. E. J. (2005). The P300: Where in the Brain Is It Produced and What Does It Tell Us? The Neuroscientist, 11(6), 563–576. https://doi.org/10.1177/1073858405280524
Lloyd-Fox, S., Begus, K., Halliday, D., Pirazzoli, L., Blasi, A., Papademetriou, M., Darboe, M. K., Prentice, A. M., Johnson, M. H., Moore, S. E., & Elwell, C. E. (2017). Cortical specialisation to social stimuli from the first days to the second year of life: A rural Gambian cohort. Developmental Cognitive Neuroscience, 25, 92–104. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.11.005
Lloyd-Fox, S., Blasi, A., & Elwell, C. E. (2010). Illuminating the developing brain: The past, present and future of functional near infrared spectroscopy. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 34(3), 269–284. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.07.008
Lopes da Silva, F. (2013). EEG and MEG: Relevance to Neuroscience. Neuron, 80(5), 1112–1128. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.10.017
Lozano, A. M., Lipsman, N., Bergman, H., Brown, P., Chabardes, S., Chang, J. W., Matthews, K., McIntyre, C. C., Schlaepfer, T. E., Schulder, M., Temel, Y., Volkmann, J., & Krauss, J. K. (2019). Deep brain stimulation: Current challenges and future directions. Nature Reviews Neurology, 15(3), 148–160. https://doi.org/10.1038/s41582-018-0128-2
Lu, F.-M., & Yuan, Z. (2015). PET/SPECT molecular imaging in clinical neuroscience: Recent advances in the investigation of CNS diseases. Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, 5(3), 15.
Luigjes, J., Segrave, R., de Joode, N., Figee, M., & Denys, D. (2019). Efficacy of Invasive and Non-Invasive Brain Modulation Interventions for Addiction. Neuropsychology Review, 29(1), 116–138. https://doi.org/10.1007/s11065-018-9393-5
Macé, E., Montaldo, G., Cohen, I., Baulac, M., Fink, M., & Tanter, M. (2011). Functional ultrasound imaging of the brain. Nature Methods, 8(8), 662–664. https://doi.org/10.1038/nmeth.1641
Madrigal, A. (2010a). Brain Scan Evidence Rejected by Brooklyn Court. Wired. https://www.wired.com/2010/05/fmri-in-court-update/
Madrigal, A. (2010b). Brain Scan Lie-Detection Deemed Far From Ready for Courtroom. Wired. https://www.wired.com/2010/06/fmri-lie-detection-in-court/
Madrigal, A. (2010c). Jury Reaches Decision in Brain-Scan Test Case. Wired. https://www.wired.com/2010/05/jury-finds-against-plaintiff/
Mahmood, M., Kwon, S., Kim, H., Kim, Y.-S., Siriaraya, P., Choi, J., Otkhmezuri, B., Kang, K., Yu, K. J., Jang, Y. C., Ang, C. S., & Yeo, W.-H. (2021). Wireless Soft Scalp Electronics and Virtual Reality System for Motor Imagery-Based Brain–Machine Interfaces. Advanced Science. https://doi.org/10.1002/advs.202101129
Maidan, I., Nieuwhof, F., Bernad-Elazari, H., Reelick, M. F., Bloem, B. R., Giladi, N., Deutsch, J. E., Hausdorff, J. M., Claassen, J. A. H., & Mirelman, A. (2016). The Role of the Frontal Lobe in Complex Walking Among Patients With Parkinson's Disease and Healthy Older Adults: An fNIRS Study. Neurorehabilitation and Neural Repair, 30(10), 963–971. https://doi.org/10.1177/1545968316650426

Majid, D. S. A., Lewis, C., & Aron, A. R. (2015). Training voluntary motor suppression with real-time feedback of motor evoked potentials. Journal of Neurophysiology, 113(9), 3446–3452. https://doi.org/10.1152/jn.00992.2014

Mameli, F., Mrakic-Sposta, S., Vergari, M., Fumagalli, M., Macis, M., Ferrucci, R., Nordio, F., Consonni, D., Sartori, G., & Priori, A. (2010). Dorsolateral prefrontal cortex specifically processes general – but not personal – knowledge deception: Multiple brain networks for lying. Behavioural Brain Research, 211(2), 164–168. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2010.03.024

Manias, K. A., & Peet, A. (2018). What is MR spectroscopy? Archives of Disease in Childhood. Education and Practice Edition, 103(4), 213–216. https://doi.org/10.1136/archdischild-2017-312839

Manuel, R. (2021). Neuralink Brain Chip Will End Language in Five to 10 Years, Elon Musk Says. Science Times. https://www.sciencetimes.com/articles/31428/20210528/neuralink-brain-chip-will-end-language-five-10-years-elon.htm

Martinez-Ramirez, D., Jimenez-Shahed, J., Leckman, J. F., Porta, M., Servello, D., Meng, F.-G., Kuhn, J., Huys, D., Baldermann, J. C., Foltynie, T., Hariz, M. I., Joyce, E. M., Zrinzo, L., Kefalopoulou, Z., Silburn, P., Coyne, T., Mogilner, A. Y., Pourfar, M. H., Khandhar, S. M., … Okun, M. S. (2018). Efficacy and Safety of Deep Brain Stimulation in Tourette Syndrome: The International Tourette Syndrome Deep Brain Stimulation Public Database and Registry. JAMA Neurology, 75(3), 353. https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2017.4317

Matsuda, I., Ogawa, T., & Tsuneoka, M. (2019). Broadening the Use of the Concealed Information Test in the Field. Frontiers in Psychiatry, 10, 24. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2019.00024

McCathern, A. G., Mathai, D. S., Cho, R. Y., Goodman, W. K., & Storch, E. A. (2020). Deep transcranial magnetic stimulation for obsessive compulsive disorder. Expert Review of Neurotherapeutics, 20(10), 1029–1036. https://doi.org/10.1080/14737175.2020.1798232

Mehler, D. M. A., Sokunbi, M. O., Habes, I., Barawi, K., Subramanian, L., Range, M., Evans, J., Hood, K., Lührs, M., Keedwell, P., Goebel, R., & Linden, D. E. J. (2018). Targeting the affective brain—A randomized controlled trial of real-time fMRI neurofeedback in patients with depression. Neuropsychopharmacology, 43(13), 2578–2585. https://doi.org/10.1038/s41386-018-0126-5

Meijer, E. H., Ben-Shakhar, G., Verschuere, B., & Donchin, E. (2013). A comment on Farwell (2012): Brain fingerprinting: a comprehensive tutorial review of detection of concealed information with event-related brain potentials. Cognitive Neurodynamics, 7(2), 155–158. https://doi.org/10.1007/s11571-012-9217-x

Meijer, E. H., Selle, N. K., Elber, L., & Ben-Shakhar, G. (2014). Memory detection with the Concealed Information Test: A meta analysis of skin conductance, respiration, heart rate, and P300 data. Psychophysiology, 51(9), 879–904. https://doi.org/10.1111/psyp.12239

Mele, A. (2020). Free Will and Neuroscience: Decision Times and the Point of No Return. In B. Feltz, M. Missal, & A. Sims (Eds.), Free Will, Causality, and Neuroscience (Vol. 338, pp. 83–96). Brill. https://www.jstor.org/stable/10.1163/j.ctvrxk31x.9

Mellinger, J., Schalk, G., Braun, C., Preissl, H., Rosenstiel, W., Birbaumer, N., & Kübler, A. (2007). An MEG-based brain-computer interface (BCI). NeuroImage, 36(3), 581–593. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.019

Meyer, J. H., Cervenka, S., Kim, M.-J., Kreisl, W. C., Henter, I. D., & Innis, R. B. (2020). Neuroinflammation in psychiatric disorders: PET imaging and promising new targets. The Lancet. Psychiatry, 7(12), 1064–1074. https://doi.org/10.1016/S2215-0366(20)30255-8

Meynen, G. (2020). Neurorecht: Hoop of hersenschim. Boom juridisch.

Mihelj, E., Bächinger, M., Kikkert, S., Ruddy, K., & Wenderoth, N. (2021). Mental individuation of imagined finger movements can be achieved using TMS-based neurofeedback. NeuroImage, 242, 118463. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118463

Mimenza-Alvarado, A. J., Aguilar-Navarro, S. G., Martinez-Carrillo, F. M., Ríos-Ponce, A. E., & Villafuerte, G. (2021). Use of Fast Gamma Magnetic Stimulation Over the Left Prefrontal Dorsolateral Cortex for the Treatment of MCI and Mild Alzheimer's Disease: A Double-Blind,

Randomized, Sham-Controlled, Pilot Study. Frontiers in Neurology, 12, 1543. https://doi.org/10.3389/fneur.2021.729872
MindAffect—Home. (n.d.). MindAffect. Retrieved June 30, 2021, from https://www.mindaffect.nl/
Mirifar, A., Beckmann, J., & Ehrlenspiel, F. (2017). Neurofeedback as supplementary training for optimizing athletes' performance: A systematic review with implications for future research. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 75, 419–432. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.02.005
Mitra, P. P., Ogawa, S., Hu, X., & Uğurbil, K. (1997). The nature of spatiotemporal changes in cerebral hemodynamics as manifested in functional magnetic resonance imaging. Magnetic Resonance in Medicine, 37(4), 511–518. https://doi.org/10.1002/mrm.1910370407
Monti, M. M., Schnakers, C., Korb, A. S., Bystritsky, A., & Vespa, P. M. (2016). Non-Invasive Ultrasonic Thalamic Stimulation in Disorders of Consciousness after Severe Brain Injury: A First-in-Man Report. Brain Stimulation, 9(6), 940–941. https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.07.008
Monti, M. M., Vanhaudenhuyse, A., Coleman, M. R., Boly, M., Pickard, J. D., Tshibanda, L., Owen, A. M., & Laureys, S. (2010). Willful Modulation of Brain Activity in Disorders of Consciousness. New England Journal of Medicine, 362(7), 579–589. https://doi.org/10.1056/NEJMoa0905370
Mori, S., & Zhang, J. (2006). Principles of Diffusion Tensor Imaging and Its Applications to Basic Neuroscience Research. Neuron, 51(5), 527–539. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.08.012
Morrell, M. J. (2011). Responsive cortical stimulation for the treatment of medically intractable partial epilepsy. Neurology, 77(13), 1295–1304. https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3182302056
Moseley, M. E., Cohen, Y., Kucharczyk, J., Mintorovitch, J., Asgari, H. S., Wendland, M. F., Tsuruda, J., & Norman, D. (1990). Diffusion-weighted MR imaging of anisotropic water diffusion in cat central nervous system. Radiology, 176(2), 439–445. https://doi.org/10.1148/radiology.176.2.2367658
Moses, D. A., Metzger, S. L., Liu, J. R., Anumanchipalli, G. K., Makin, J. G., Sun, P. F., Chartier, J., Dougherty, M. E., Liu, P. M., Abrams, G. M., Tu-Chan, A., Ganguly, K., & Chang, E. F. (2021). Neuroprosthesis for Decoding Speech in a Paralyzed Person with Anarthria. New England Journal of Medicine, 385(3), 217–227. https://doi.org/10.1056/NEJMoa2027540
Mukherjee, P., Miller, J. H., Shimony, J. S., Philip, J. V., Nehra, D., Snyder, A. Z., Conturo, T. E., Neil, J. J., & McKinstry, R. C. (2002). Diffusion-Tensor MR Imaging of Gray and White Matter Development during Normal Human Brain Maturation. American Journal of Neuroradiology, 23(9), 1445–1456.
Murphy, E. (2009). No Lie MRI being offered as evidence in court. Stanford Law School. https://law.stanford.edu/2009/03/14/no-lie-mri-being-offered-as-evidence-in-court/
MuseTM—Meditation Made Easy with the Muse Headband. (n.d.). Retrieved June 24, 2021, from https://choosemuse.com/
Musk, E. & Neuralink. (2019). An Integrated Brain-Machine Interface Platform With Thousands of Channels. Journal of Medical Internet Research, 21(10), e16194. https://doi.org/10.2196/16194
Nair, D. R., Laxer, K. D., Weber, P. B., Murro, A. M., Park, Y. D., Barkley, G. L., Smith, B. J., Gwinn, R. P., Doherty, M. J., Noe, K. H., Zimmerman, R. S., Bergey, G. K., Anderson, W. S., Heck, C., Liu, C. Y., Lee, R. W., Sadler, T., Duckrow, R. B., Hirsch, L. J., … Morrell, M. J. (2020). Nine-year prospective efficacy and safety of brain-responsive neurostimulation for focal epilepsy. Neurology, 95(9), e1244–e1256. https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000010154
Naqvi, J., Yap, K. H., Ahmad, G., & Ghosh, J. (2013). Transcranial Doppler Ultrasound: A Review of the Physical Principles and Major Applications in Critical Care. International Journal of Vascular Medicine, 2013, 1–13. https://doi.org/10.1155/2013/629378
Nasiriavanaki, M., Xia, J., Wan, H., Bauer, A. Q., Culver, J. P., & Wang, L. V. (2014). High-resolution photoacoustic tomography of resting-state functional connectivity in the mouse brain.

Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(1), 21–26. https://doi.org/10.1073/pnas.1311868111
Nederlandse Vereniging voor Psychiatrie. (2010). Elektroconvulsietherapie—Richtlijn. https://richtlijnendatabase.nl/richtlijn/elektroconvulsietherapie/elektroconvulsietherapie_-_startpagina.html
Neggers, S. F. W., Huijbers, W., Vrijlandt, C. M., Vlaskamp, B. N. A., Schutter, D. J. G. L., & Kenemans, J. L. (2007). TMS Pulses on the Frontal Eye Fields Break Coupling Between Visuospatial Attention and Eye Movements. Journal of Neurophysiology, 98(5), 2765–2778. https://doi.org/10.1152/jn.00357.2007
Neudorfer, C., Bhatia, K., Boutet, A., Germann, J., Elias, G. J., Loh, A., Paff, M., Krings, T., & Lozano, A. M. (2020). Endovascular deep brain stimulation: Investigating the relationship between vascular structures and deep brain stimulation targets. Brain Stimulation, 13(6), 1668–1677. https://doi.org/10.1016/j.brs.2020.09.016
Nichols, T. E., Das, S., Eickhoff, S. B., Evans, A. C., Glatard, T., Hanke, M., Kriegeskorte, N., Milham, M. P., Poldrack, R. A., Poline, J.-B., Proal, E., Thirion, B., Van Essen, D. C., White, T., & Yeo, B. T. T. (2017). Best practices in data analysis and sharing in neuroimaging using MRI. Nature Neuroscience, 20(3), 299–303. https://doi.org/10.1038/nn.4500
Niketeghad, S., & Pouratian, N. (2019). Brain Machine Interfaces for Vision Restoration: The Current State of Cortical Visual Prosthetics. Neurotherapeutics, 16(1), 134–143. https://doi.org/10.1007/s13311-018-0660-1
Noordmans, H. J., van Blooijs, D., Siero, J. C. W., Zwanenburg, J. J. M., Klaessens, J. H. G. M., & Ramsey, N. F. (2018). Detailed view on slow sinusoidal, hemodynamic oscillations on the human brain cortex by Fourier transforming oxy/deoxy hyperspectral images. Human Brain Mapping, 39(9), 3558–3573. https://doi.org/10.1002/hbm.24194
Norman, S. L., Maresca, D., Christopoulos, V. N., Griggs, W. S., Demene, C., Tanter, M., Shapiro, M. G., & Andersen, R. A. (2021). Single-trial decoding of movement intentions using functional ultrasound neuroimaging. Neuron, 109(9), 1554-1566.e4. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.03.003
O'Connell, N. E., Marston, L., Spencer, S., DeSouza, L. H., & Wand, B. M. (2018). Non-invasive brain stimulation techniques for chronic pain. Cochrane Database of Systematic Reviews, 4. https://doi.org/10.1002/14651858.CD008208.pub5
O'Connell, R. G., Dockree, P. M., Robertson, I. H., Bellgrove, M. A., Foxe, J. J., & Kelly, S. P. (2009). Uncovering the neural signature of lapsing attention: Electrophysiological signals predict errors up to 20 s before they occur. Journal of Neuroscience, 29(26), 8604–8611. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5967-08.2009
Oberman, L. M., Enticott, P. G., Casanova, M. F., Rotenberg, A., Pascual-Leone, A., & McCracken, J. T. (2016). Transcranial magnetic stimulation in autism spectrum disorder: Challenges, promise, and roadmap for future research. Autism Research : Official Journal of the International Society for Autism Research, 9(2), 184–203. https://doi.org/10.1002/aur.1567
Obrig, H., Neufang, M., Wenzel, R., Kohl, M., Steinbrink, J., Einhäupl, K., & Villringer, A. (2000). Spontaneous low frequency oscillations of cerebral hemodynamics and metabolism in human adults. NeuroImage, 12(6), 623–639. https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0657
Ogawa, S., Tank, D. W., Menon, R., Ellermann, J. M., Kim, S. G., Merkle, H., & Ugurbil, K. (1992). Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: Functional brain mapping with magnetic resonance imaging. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 89(13), 5951–5955. https://doi.org/10.1073/pnas.89.13.5951
Oliveri, M., Finocchiaro, C., Shapiro, K., Gangitano, M., Caramazza, A., & Pascual-Leone, A. (2004). All Talk and No Action: A Transcranial Magnetic Stimulation Study of Motor Cortex Activation during Action Word Production. Journal of Cognitive Neuroscience, 16(3), 374–381. https://doi.org/10.1162/089892904322926719
Onderzoek naar OCD - ZonMw Digitale Publicaties. (n.d.). Retrieved August 16, 2021, from https://publicaties.zonmw.nl/onderzoek-naar-ocd/

OpenBCI - Open Source Biosensing Tools (EEG, EMG, EKG, and more). (n.d.). Retrieved June 24, 2021, from https://openbci.com/

Osaka, N., Minamoto, T., Yaoi, K., Azuma, M., Shimada, Y. M., & Osaka, M. (2015). How Two Brains Make One Synchronized Mind in the Inferior Frontal Cortex: FNIRS-Based Hyperscanning During Cooperative Singing. Frontiers in Psychology, 6. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01811

Osugi, A. (2011). Daily application of the Concealed Information Test: Japan. In B. Verschuere, G. Ben-Shakhar, & E. Meijer (Eds.), Memory Detection (pp. 253–275). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511975196.015

Oxley, T. J., Opie, N. L., John, S. E., Rind, G. S., Ronayne, S. M., Wheeler, T. L., Judy, J. W., McDonald, A. J., Dornom, A., Lovell, T. J. H., Steward, C., Garrett, D. J., Moffat, B. A., Lui, E. H., Yassi, N., Campbell, B. C. V., Wong, Y. T., Fox, K. E., Nurse, E. S., … O'Brien, T. J. (2016). Minimally invasive endovascular stent-electrode array for high-fidelity, chronic recordings of cortical neural activity. Nature Biotechnology, 34(3), 320–327. https://doi.org/10.1038/nbt.3428

Oxley, T. J., Yoo, P. E., Rind, G. S., Ronayne, S. M., Lee, C. M. S., Bird, C., Hampshire, V., Sharma, R. P., Morokoff, A., Williams, D. L., MacIsaac, C., Howard, M. E., Irving, L., Vrljic, I., Williams, C., John, S. E., Weissenborn, F., Dazenko, M., Balabanski, A. H., … Opie, N. L. (2021). Motor neuroprosthesis implanted with neurointerventional surgery improves capacity for activities of daily living tasks in severe paralysis: First in-human experience. Journal of NeuroInterventional Surgery, 13(2), 102–108. https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2020-016862

Paek, A. Y., Kilicarslan, A., Korenko, B., Gerginov, V., Knappe, S., & Contreras-Vidal, J. L. (2020). Towards a Portable Magnetoencephalography Based Brain Computer Interface with Optically-Pumped Magnetometers. 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 3420–3423. https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9176159

Pantano, P., Mainero, C., Lenzi, D., Caramia, F., Iannetti, G. D., Piattella, M. C., Pestalozza, I., Di Legge, S., Bozzao, L., & Pozzilli, C. (2005). A longitudinal fMRI study on motor activity in patients with multiple sclerosis. Brain, 128(9), 2146–2153. https://doi.org/10.1093/brain/awh549

Park, H. R., Kim, I. H., Kang, H., Lee, D. S., Kim, B.-N., Kim, D. G., & Paek, S. H. (2017). Nucleus accumbens deep brain stimulation for a patient with self-injurious behavior and autism spectrum disorder: Functional and structural changes of the brain: report of a case and review of literature. Acta Neurochirurgica, 159(1), 137–143. https://doi.org/10.1007/s00701-016-3002-2

Pascual-Leone, A., Bartres-Fazf, D., & Keenan, J. P. (1999). Transcranial magnetic stimulation: Studying the brain--behaviour relationship by induction of 'virtual lesions.' Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 354(1387), 1229–1238. https://doi.org/10.1098/rstb.1999.0476

Paulk, A. C., Kfir, Y., Khanna, A., Mustroph, M., Trautmann, E. M., Soper, D. J., Stavisky, S. D., Welkenhuysen, M., Dutta, B., Shenoy, K. V., Hochberg, L. R., Richardson, M., Williams, Z. M., & Cash, S. S. (2021). Large-scale neural recordings with single-cell resolution in human cortex using high-density Neuropixels probes [Preprint]. Neuroscience. https://doi.org/10.1101/2021.06.20.449152

Paulus, W. (2011). Transcranial electrical stimulation (tES – tDCS; tRNS, tACS) methods. Neuropsychological Rehabilitation, 21(5), 602–617. https://doi.org/10.1080/09602011.2011.557292

Peet, A. C., Arvanitis, T. N., Auer, D. P., Davies, N. P., Hargrave, D., Howe, F. A., Jaspan, T., Leach, M. O., Macarthur, D., MacPherson, L., Morgan, P. S., Natarajan, K., Payne, G. S., Saunders, D., & Grundy, R. G. (2008). The value of magnetic resonance spectroscopy in tumour imaging. Archives of Disease in Childhood, 93(9), 725–727. https://doi.org/10.1136/adc.2007.125237

Pinti, P., Tachtsidis, I., Hamilton, A., Hirsch, J., Aichelburg, C., Gilbert, S., & Burgess, P. W. (2020). The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive

neuroscience. Annals of the New York Academy of Sciences, 1464(1), 5–29. https://doi.org/10.1111/nyas.13948
Pinton, G., Aubry, J.-F., Bossy, E., Muller, M., Pernot, M., & Tanter, M. (2012). Attenuation, scattering, and absorption of ultrasound in the skull bone. Medical Physics, 39(1), 299–307. https://doi.org/10.1118/1.3668316
Poldrack, R. A., Baker, C. I., Durnez, J., Gorgolewski, K. J., Matthews, P. M., Munafò, M. R., Nichols, T. E., Poline, J.-B., Vul, E., & Yarkoni, T. (2017). Scanning the horizon: Towards transparent and reproducible neuroimaging research. Nature Reviews Neuroscience, 18(2), 115–126. https://doi.org/10.1038/nrn.2016.167
Poulon, F., Pallud, J., Varlet, P., Zanello, M., Chretien, F., Dezamis, E., Abi-Lahoud, G., Nataf, F., Turak, B., Devaux, B., & Abi Haidar, D. (2018). Real-time Brain Tumor imaging with endogenous fluorophores: A diagnosis proof-of-concept study on fresh human samples. Scientific Reports, 8(1), 14888. https://doi.org/10.1038/s41598-018-33134-2
Pratt, E. J., Ledbetter, M., Jiménez-Martínez, R., Shapiro, B., Iwata, G. Z., Garber, S., Gormley, J., Decker, D., Delgadillo, D., Dellis, A. T., Phillips, J., Sundar, G., Leung, J., Coyne, J., McKinley, M., Lopez, G., Homan, S., Marsh, L., Zhang, M., … Alford, J. K. (2021). Kernel Flux: A whole-head 432-magnetometer optically-pumped magnetoencephalography (OP-MEG) system for brain activity imaging during natural human experiences. 19.
Priori, A., Mameli, F., Cogiamanian, F., Marceglia, S., Tiriticco, M., Mrakic-Sposta, S., Ferrucci, R., Zago, S., Polezzi, D., & Sartori, G. (2008). Lie-Specific Involvement of Dorsolateral Prefrontal Cortex in Deception. Cerebral Cortex, 18(2), 451–455. https://doi.org/10.1093/cercor/bhm088
Products Overview | g.tec medical engineering. (n.d.). G.Tec Medical Engineering GmbH. Retrieved June 24, 2021, from https://www.gtec.at/product/
Proudfoot, M., Woolrich, M. W., Nobre, A. C., & Turner, M. R. (2014). Magnetoencephalography. Practical Neurology, 14(5), 336–343. https://doi.org/10.1136/practneurol-2013-000768
Puffer, R. C., Mustafa, W., & Lanzino, G. (2013). Venous sinus stenting for idiopathic intracranial hypertension: A review of the literature. Journal of NeuroInterventional Surgery, 5(5), 483–486. https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2012-010468
Purkayastha, S., & Sorond, F. (2013). Transcranial Doppler Ultrasound: Technique and Application. Seminars in Neurology, 32(04), 411–420. https://doi.org/10.1055/s-0032-1331812
Pyatigorskaya, N., Habert, M.-O., & Rozenblum, L. (2020). Contribution of PET-MRI in brain diseases in clinical practice. Current Opinion in Neurology, 33(4), 430–438. https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000000841
Rabut, C., Yoo, S., Hurt, R. C., Jin, Z., Li, H., Guo, H., Ling, B., & Shapiro, M. G. (2020). Ultrasound Technologies for Imaging and Modulating Neural Activity. Neuron, 108(1), 93–110. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2020.09.003
Rampersad, S., Roig-Solvas, B., Yarossi, M., Kulkarni, P. P., Santarnecchi, E., Dorval, A. D., & Brooks, D. H. (2019). Prospects for transcranial temporal interference stimulation in humans: A computational study. NeuroImage, 202, 116124. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116124
Rawji, V., Ciocca, M., Zacharia, A., Soares, D., Truong, D., Bikson, M., Rothwell, J., & Bestmann, S. (2018). TDCS changes in motor excitability are specific to orientation of current flow. Brain Stimulation, 11(2), 289–298. https://doi.org/10.1016/j.brs.2017.11.001
Rayshubskiy, A., Wojtasiewicz, T. J., Mikell, C. B., Bouchard, M. B., Timerman, D., Youngerman, B. E., McGovern, R. A., Otten, M. L., Canoll, P., McKhann, G. M., & Hillman, E. M. C. (2014). Direct, intraoperative observation of ~0.1 Hz hemodynamic oscillations in awake human cortex: Implications for fMRI. NeuroImage, 87, 323–331. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.10.044
Reddy, L., Zoefel, B., Possel, J. K., Peters, J. C., Dijksterhuis, D., Poncet, M., Straaten, E. C. W. van, Baayen, J. C., Idema, S., & Self, M. W. (2020). Human hippocampal neurons track moments in

a sequence of events. BioRxiv, 2020.12.17.423193. https://doi.org/10.1101/2020.12.17.423193
Regalado, A. (2021). Facebook is ditching plans to make an interface that reads the brain. MIT Technology Review. https://www.technologyreview.com/2021/07/14/1028447/facebook-brain-reading-interface-stops-funding/
Reinhart, R. M. G., & Woodman, G. F. (2015). The surprising temporal specificity of direct-current stimulation. Trends in Neurosciences, 38(8), 459–461. https://doi.org/10.1016/j.tins.2015.05.009
Ridding, M. C., & Rothwell, J. C. (2007). Is there a future for therapeutic use of transcranial magnetic stimulation? Nature Reviews Neuroscience, 8(7), 559–567. https://doi.org/10.1038/nrn2169
Rigamonti, A., Ackery, A., & Baker, A. J. (2008). Transcranial Doppler monitoring in subarachnoid hemorrhage: A critical tool in critical care. Canadian Journal of Anaesthesia = Journal Canadien D'anesthesie, 55(2), 112–123. https://doi.org/10.1007/BF03016323
Riggs, A., Patel, V., Paneri, B., Portenoy, R. K., Bikson, M., & Knotkova, H. (2018). At-Home Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) With Telehealth Support for Symptom Control in Chronically-Ill Patients With Multiple Symptoms. Frontiers in Behavioral Neuroscience, 12. https://doi.org/10.3389/fnbeh.2018.00093
Ritter, W., & Vaughan, H. G. (1969). Averaged evoked responses in vigilance and discrimination: A reassessment. Science (New York, N.Y.), 164(3877), 326–328. https://doi.org/10.1126/science.164.3877.326
Rosenfeld, P. J. (2005). Brain Fingerprinting: A Critical Analysis. Scientific Review of Mental Health Practice, 4(1). https://srmhp.org/0401/brain-fingerprinting.html
Rosenfeld, P. J., Soskins, M., Bosh, G., & Ryan, A. (2004). Simple, effective countermeasures to P300-based tests of detection of concealed information. Psychophysiology, 41(2), 205–219. https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2004.00158.x
Rossi, S., Hallett, M., Rossini, P. M., & Pascual-Leone, A. (2009). Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research. Clinical Neurophysiology, 120(12), 2008–2039. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.08.016
RTMS Behandeling Amsterdam. (n.d.). Neurowave.nl. Retrieved July 2, 2021, from https://neurowave.nl/
Ruddy, K., Balsters, J., Mantini, D., Liu, Q., Kassraian-Fard, P., Enz, N., Mihelj, E., Subhash Chander, B., Soekadar, S. R., & Wenderoth, N. (2018). Neural activity related to volitional regulation of cortical excitability. ELife, 7, e40843. https://doi.org/10.7554/eLife.40843
Rusconi, E., & Mitchener-Nissen, T. (2013). Prospects of functional magnetic resonance imaging as lie detector. Frontiers in Human Neuroscience, 7, 594. https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00594
Rush, A. D., & Troyk, P. R. (2012). A power and data link for a wireless-implanted neural recording system. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 59(11), 3255–3262. https://doi.org/10.1109/TBME.2012.2214385
Sahel, J.-A., Boulanger-Scemama, E., Pagot, C., Arleo, A., Galluppi, F., Martel, J. N., Esposti, S. D., Delaux, A., de Saint Aubert, J.-B., de Montleau, C., Gutman, E., Audo, I., Duebel, J., Picaud, S., Dalkara, D., Blouin, L., Taiel, M., & Roska, B. (2021). Partial recovery of visual function in a blind patient after optogenetic therapy. Nature Medicine. https://doi.org/10.1038/s41591-021-01351-4
Sato, T., Nambu, I., Takeda, K., Aihara, T., Yamashita, O., Isogaya, Y., Inoue, Y., Otaka, Y., Wada, Y., Kawato, M., Sato, M., & Osu, R. (2016). Reduction of global interference of scalp-hemodynamics in functional near-infrared spectroscopy using short distance probes. NeuroImage, 141, 120–132. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.06.054
Scangos, K. W., Makhoul, G. S., Sugrue, L. P., Chang, E. F., & Krystal, A. D. (2021). State-dependent responses to intracranial brain stimulation in a patient with depression. Nature Medicine, 27(2), 229–231. https://doi.org/10.1038/s41591-020-01175-8

Schain, M., & Kreisl, W. C. (2017). Neuroinflammation in Neurodegenerative Disorders-a Review. Current Neurology and Neuroscience Reports, 17(3), 25. https://doi.org/10.1007/s11910-017-0733-2

Schellekens, W., van Wezel, R. J. A., Petridou, N., Ramsey, N. F., & Raemaekers, M. (2016). Predictive coding for motion stimuli in human early visual cortex. Brain Structure and Function, 221(2), 879–890. https://doi.org/10.1007/s00429-014-0942-2

Schoffelen, J.-M., Hultén, A., Lam, N., Marquand, A. F., Uddén, J., & Hagoort, P. (2017). Frequency-specific directed interactions in the human brain network for language. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114(30), 8083–8088. https://doi.org/10.1073/pnas.1703155114

Senden, M., Emmerling, T. C., van Hoof, R., Frost, M. A., & Goebel, R. (2019). Reconstructing imagined letters from early visual cortex reveals tight topographic correspondence between visual mental imagery and perception. Brain Structure and Function, 224(3), 1167–1183. https://doi.org/10.1007/s00429-019-01828-6

Seo, D., Neely, R. M., Shen, K., Singhal, U., Alon, E., Rabaey, J. M., Carmena, J. M., & Maharbiz, M. M. (2016). Wireless Recording in the Peripheral Nervous System with Ultrasonic Neural Dust. Neuron, 91(3), 529–539. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.06.034

Sergiou, C. S., Santarnecchi, E., Franken, I. H. A., & van Dongen, J. D. M. (2020). The effectiveness of Transcranial Direct Current Stimulation as an intervention to improve empathic abilities and reduce violent behavior: A literature review. Aggression and Violent Behavior, 55, 101463. https://doi.org/10.1016/j.avb.2020.101463

Sergiou, C. S., Santarnecchi, E., Romanella, S. M., Wieser, M. J., Franken, I. H. A., Rassin, E. G. C., & van Dongen, J. D. M. (2021). TDCS targeting the Ventromedial Prefrontal Cortex reduces reactive aggression and modulates electrophysiological responses in a forensic population. Biological Psychiatry. Cognitive Neuroscience and Neuroimaging, S2451-9022(21)00147-6. https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2021.05.007

Shambroom, J. R., Fábregas, S. E., & Johnstone, J. (2012). Validation of an automated wireless system to monitor sleep in healthy adults. Journal of Sleep Research, 21(2), 221–230. https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2011.00944.x

Shokoueinejad, M., Park, D.-W., Jung, Y., Brodnick, S., Novello, J., Dingle, A., Swanson, K., Baek, D.-H., Suminski, A., Lake, W., Ma, Z., & Williams, J. (2019). Progress in the Field of Micro-Electrocorticography. Micromachines, 10(1), 62. https://doi.org/10.3390/mi10010062

Simeral, J. D., Hosman, T., Saab, J., Flesher, S. N., Vilela, M., Franco, B., Kelemen, J., Brandman, D. M., Ciancibello, J. G., Rezaii, P. G., Eskandar, E. N., Rosler, D. M., Shenoy, K. V., Henderson, J. M., Nurmikko, A. V., & Hochberg, L. R. (2021). Home Use of a Percutaneous Wireless Intracortical Brain-Computer Interface by Individuals With Tetraplegia. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1–1. https://doi.org/10.1109/TBME.2021.3069119

Simpson, J. R. (2008). Functional MRI Lie Detection: Too Good to be True? The Journal of the American Academy of Psychiatry and the Law, 36(4), 8.

Sladky, R., Baldinger, P., Kranz, G. S., Tröstl, J., Höflich, A., Lanzenberger, R., Moser, E., & Windischberger, C. (2013). High-resolution functional MRI of the human amygdala at 7 T. European Journal of Radiology, 82(5), 728–733. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2011.09.025

Smith, K. (2012). Brain imaging: FMRI 2.0. Nature, 484(7392), 24–26. https://doi.org/10.1038/484024a

Soloukey, S., Vincent, A. J. P. E., Satoer, D. D., Mastik, F., Smits, M., Dirven, C. M. F., Strydis, C., Bosch, J. G., van der Steen, A. F. W., De Zeeuw, C. I., Koekkoek, S. K. E., & Kruizinga, P. (2019). Functional Ultrasound (fUS) During Awake Brain Surgery: The Clinical Potential of Intra-Operative Functional and Vascular Brain Mapping. Frontiers in Neuroscience, 13, 1384. https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01384

Somers, M., Neggers, S. F. W., Diederen, K. M., Boks, M. P., Kahn, R. S., & Sommer, I. E. (2011). The Measurement of Language Lateralization with Functional Transcranial Doppler and

Functional MRI: A Critical Evaluation. Frontiers in Human Neuroscience, 5. https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00031
Song, D., Hampson, R. E., Robinson, B. S., Marmarelis, V. Z., Deadwyler, S. A., & Berger, T. W. (2016). Decoding memory features from hippocampal spiking activities using sparse classification models. 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 1620–1623. https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591023
Song, D., She, X., Hampson, R. E., Deadwyler, S. A., & Berger, T. W. (2017). Multi-resolution multi-trial sparse classification model for decoding visual memories from hippocampal spikes in human. 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 1046–1049. https://doi.org/10.1109/EMBC.2017.8037006
Soon, C. S., Brass, M., Heinze, H.-J., & Haynes, J.-D. (2008). Unconscious determinants of free decisions in the human brain. Nature Neuroscience, 11(5), 543–545. https://doi.org/10.1038/nn.2112
Sorger, B., Reithler, J., Dahmen, B., & Goebel, R. (2012). A real-time fMRI-based spelling device immediately enabling robust motor-independent communication. Current Biology: CB, 22(14), 1333–1338. https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.05.022
Spence, S. A., Farrow, T. F., Herford, A. E., Wilkinson, I. D., Zheng, Y., & Woodruff, P. W. (2001). Behavioural and functional anatomical correlates of deception in humans. Neuroreport, 12(13), 2849–2853. https://doi.org/10.1097/00001756-200109170-00019
Sporns, O., Honey, C. J., & Kötter, R. (2007). Identification and Classification of Hubs in Brain Networks. PLoS ONE, 2(10), e1049. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001049
Stam, M. K., Verwer, E. E., Booij, J., Adriaanse, S. M., de Bruin, C. M., & de Wit, T. C. (2018). Performance evaluation of a novel brain-dedicated SPECT system. EJNMMI Physics, 5(1), 4. https://doi.org/10.1186/s40658-018-0203-1
Steele, V. R., Claus, E. D., Aharoni, E., Vincent, G. M., Calhoun, V. D., & Kiehl, K. A. (2015). Multimodal imaging measures predict rearrest. Frontiers in Human Neuroscience, 9, 425. https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00425
Steven, D. A., Andrade-Souza, Y. M., Burneo, J. G., McLachlan, R. S., & Parrent, A. G. (2007). Insertion of subdural strip electrodes for the investigation of temporal lobe epilepsy: Technical note. Journal of Neurosurgery, 106(6), 1102–1106. https://doi.org/10.3171/jns.2007.106.6.1102
Stocco, A., & Baizabal-Carvallo, J. F. (2014). Deep brain stimulation for severe secondary stereotypies. Parkinsonism & Related Disorders, 20(9), 1035–1036. https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2014.06.019
Stufflebeam, S. M. (2011). Clinical magnetoencephalography for neurosurgery. Neurosurgery Clinics of North America, 22(2), 153–167, vii–viii. https://doi.org/10.1016/j.nec.2010.11.006
Sturm, V., Fricke, O., Bührle, C. P., Lenartz, D., Maarouf, M., Treuer, H., Mai, J. K., & Lehmkuhl, G. (2013). DBS in the basolateral amygdala improves symptoms of autism and related self-injurious behavior: A case report and hypothesis on the pathogenesis of the disorder. Frontiers in Human Neuroscience, 6, 341. https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00341
Sudbrack-Oliveira, P., Razza, L. B., & Brunoni, A. R. (2021). Non-invasive cortical stimulation: Transcranial direct current stimulation (tDCS). In International Review of Neurobiology. Academic Press. https://doi.org/10.1016/bs.irn.2021.01.001
Suthana, N., Haneef, Z., Stern, J., Mukamel, R., Behnke, E., Knowlton, B., & Fried, I. (2012). Memory Enhancement and Deep-Brain Stimulation of the Entorhinal Area. New England Journal of Medicine, 366(6), 502–510. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1107212
Tae, W.-S., Ham, B.-J., Pyun, S.-B., Kang, S.-H., & Kim, B.-J. (2018). Current Clinical Applications of Diffusion-Tensor Imaging in Neurological Disorders. Journal of Clinical Neurology, 14(2), 129. https://doi.org/10.3988/jcn.2018.14.2.129
Talbot, M. (2010, May 25). Brain Scans on Trial. The New Yorker. http://www.newyorker.com/news/news-desk/brain-scans-on-trial

Tanter, M., & Fink, M. (2014). Ultrafast imaging in biomedical ultrasound. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 61(1), 102–119. https://doi.org/10.1109/TUFFC.2014.2882

Terem, I., Dang, L., Champagne, A., Abderezaei, J., Pionteck, A., Almadan, Z., Lydon, A., Kurt, M., Scadeng, M., & Holdsworth, S. J. (2021). 3D amplified MRI (aMRI). Magnetic Resonance in Medicine, mrm.28797. https://doi.org/10.1002/mrm.28797

The Bitbrain Team. (2018, October 1). Nissan's Brain-to-Vehicle technology communicates our brains with vehicles. Bitbrain. https://www.bitbrain.com/blog/nissan-brain-to-vehicle-technology

Toor, D. van. (2017). Het schuldige geheugen? Een onderzoek naar het gebruik van hersenonderzoek als opsporingsmethode in het licht van eisen van instrumentaliteit en rechtsbescherming. Wolters Kluwer.

Torres, C. V., Blasco, G., García, M. N., Ezquiaga, E., Pastor, J., Vega-Zelaya, L., Rivas, P. P., Rodrigo, S. P., & Manzanares, R. (2020). Deep brain stimulation for aggressiveness: Long-term follow-up and tractography study of the stimulated brain areas. Journal of Neurosurgery, 134(2), 366–375. https://doi.org/10.3171/2019.11.JNS192608

Trambaiolli, L. R., Kohl, S. H., Linden, D. E. J., & Mehler, D. M. A. (2021). Neurofeedback training in major depressive disorder: A systematic review of clinical efficacy, study quality and reporting practices. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 125, 33–56. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.02.015

Tsubokawa, T., Katayama, Y., Yamamoto, T., Hirayama, T., & Koyama, S. (1993). Chronic motor cortex stimulation in patients with thalamic pain. Journal of Neurosurgery, 78(3), 393–401. https://doi.org/10.3171/jns.1993.78.3.0393

Tufail, Y., Matyushov, A., Baldwin, N., Tauchmann, M. L., Georges, J., Yoshihiro, A., Tillery, S. I. H., & Tyler, W. J. (2010). Transcranial pulsed ultrasound stimulates intact brain circuits. Neuron, 66(5), 681–694. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.05.008

Valizadeh, S. A., Liem, F., Mérillat, S., Hänggi, J., & Jäncke, L. (2018). Identification of individual subjects on the basis of their brain anatomical features. Scientific Reports, 8(1), 5611. https://doi.org/10.1038/s41598-018-23696-6

van Boxtel, G. J. M., Denissen, A. J. M., Jäger, M., Vernon, D., Dekker, M. K. J., Mihajlović, V., & Sitskoorn, M. M. (2012). A novel self-guided approach to alpha activity training. International Journal of Psychophysiology, 83(3), 282–294. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.11.004

van den Boom, M. A., Vansteensel, M. J., Koppeschaar, M. I., Raemaekers, M. A. H., & Ramsey, N. F. (2019). Towards an intuitive communication-BCI: Decoding visually imagined characters from the early visual cortex using high-field fMRI. Biomedical Physics & Engineering Express, 5(5), 055001. https://doi.org/10.1088/2057-1976/ab302c

van der Loo, L. E., Schijns, O. E. M. G., Hoogland, G., Colon, A. J., Wagner, G. L., Dings, J. T. A., & Kubben, P. L. (2017). Methodology, outcome, safety and in vivo accuracy in traditional frame-based stereoelectroencephalography. Acta Neurochirurgica, 159(9), 1733–1746. https://doi.org/10.1007/s00701-017-3242-9

Van Ettinger-Veenstra, H. M., Huijbers, W., Gutteling, T. P., Vink, M., Kenemans, J. L., & Neggers, S. F. W. (2009). fMRI-Guided TMS on Cortical Eye Fields: The Frontal But Not Intraparietal Eye Fields Regulate the Coupling Between Visuospatial Attention and Eye Movements. Journal of Neurophysiology, 102(6), 3469–3480. https://doi.org/10.1152/jn.00350.2009

Van Gerven, M., Farquhar, J., Schaefer, R., Vlek, R., Geuze, J., Nijholt, A., Ramsey, N., Haselager, P., Vuurpijl, L., Gielen, S., Desain, P., van Gerven, M., Farquhar, J., Schaefer, R., Vlek, R., Geuze, J., Nijholt, A., Ramsey, N., Haselager, P., … Desain, P. (2009). The brain-computer interface cycle. Journal of Neural Engineering, 6(4).

Vanderwert, R. E., & Nelson, C. A. (2014). The use of near-infrared spectroscopy in the study of typical and atypical development. NeuroImage, 85, 264–271. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.10.009

Vansteensel, M. J., Pels, E. G. M., Bleichner, M. G., Branco, M. P., Denison, T., Freudenburg, Z. V., Gosselaar, P., Leinders, S., Ottens, T. H., Van Den Boom, M. A., Van Rijen, P. C., Aarnoutse, E.

J., & Ramsey, N. F. (2016). Fully Implanted Brain–Computer Interface in a Locked-In Patient with ALS. New England Journal of Medicine, 375(21), 2060–2066. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1608085

Viessmann, O., & Polimeni, J. R. (2021). High-resolution fMRI at 7Tesla: Challenges, promises and recent developments for individual-focused fMRI studies. Current Opinion in Behavioral Sciences, 40, 96–104. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2021.01.011

Vink, M., Kahn, R. S., Raemaekers, M., Van Den Heuvel, M., Boersma, M., & Ramsey, N. F. (2005). Function of striatum beyond inhibition and execution of motor responses. Human Brain Mapping, 25, 336–344. https://doi.org/10.1002/hbm.20111

Viviani, G., & Vallesi, A. (2021). EEG-neurofeedback and executive function enhancement in healthy adults: A systematic review. Psychophysiology, 58(9), e13874. https://doi.org/10.1111/psyp.13874

Vöröslakos, M., Takeuchi, Y., Brinyiczki, K., Zombori, T., Oliva, A., Fernández-Ruiz, A., Kozák, G., Kincses, Z. T., Iványi, B., Buzsáki, G., & Berényi, A. (2018). Direct effects of transcranial electric stimulation on brain circuits in rats and humans. Nature Communications, 9(1), 483. https://doi.org/10.1038/s41467-018-02928-3

Voytek, B., Kramer, M. A., Case, J., Lepage, K. Q., Tempesta, Z. R., Knight, R. T., & Gazzaley, A. (2015). Age-Related Changes in 1/f Neural Electrophysiological Noise. Journal of Neuroscience, 35(38), 13257–13265. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2332-14.2015

Waal, M. van der, Severens, M., Geuze, J., & Desain, P. (2012). Introducing the tactile speller: An ERP-based brain–computer interface for communication. Journal of Neural Engineering, 9(4), 045002. https://doi.org/10.1088/1741-2560/9/4/045002

Wang, G. (2019). High Temporal-Resolution Dynamic PET Image Reconstruction Using a New Spatiotemporal Kernel Method. IEEE Transactions on Medical Imaging, 38(3), 664–674. https://doi.org/10.1109/TMI.2018.2869868

Wang, G.-J., Wiers, C. E., Shumay, E., Tomasi, D., Yuan, K., Wong, C. T., Logan, J., Fowler, J. S., & Volkow, N. D. (2019). Expectation effects on brain dopamine responses to methylphenidate in cocaine use disorder. Translational Psychiatry, 9(1), 93. https://doi.org/10.1038/s41398-019-0421-x

Wang, W., Collinger, J., Degenhart, A., Tyler-Kabara, E., Schwartz, A., Moran, D., Weber, D., Wodlinger, B., Vinjamuri, R., Ashmore, R., Kelly, J., & Boninger, M. (2013). An electrocorticographic brain interface in an individual with tetraplegia. PloS One, 8(2), e55344.

Wei, P., He, W., Zhou, Y., & Wang, L. (2013). Performance of Motor Imagery Brain-Computer Interface Based on Anodal Transcranial Direct Current Stimulation Modulation. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 21(3), 404–415. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2013.2249111

Weiskopf, N., Veit, R., Erb, M., Mathiak, K., Grodd, W., Goebel, R., & Birbaumer, N. (2003). Physiological self-regulation of regional brain activity using real-time functional magnetic resonance imaging (fMRI): Methodology and exemplary data. NeuroImage, 19(3), 577–586. https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00145-9

Weiss, J. M., Gaunt, R. A., Franklin, R., & Boninger, M. (2020). Demonstration of a portable intracortical brain-computer interface.

Willett, F. R., Avansino, D. T., Hochberg, L. R., Henderson, J. M., & Shenoy, K. V. (2021). High-performance brain-to-text communication via handwriting. Nature, 593(7858), 249–254. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03506-2

Woeppel, K., Hughes, C., Herrera, A. J., Eles, J. R., Tyler-Kabara, E. C., Gaunt, R. A., Collinger, J. L., & Cui, X. T. (2021). Explant Analysis of Utah Electrode Arrays Implanted in Human Cortex for Brain-Computer-Interfaces. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 9. https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fbioe.2021.759711

Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain–computer interfaces for communication and control. Clinical Neurophysiology, 113(6), 767–791. https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3

Yin, M., Borton, D. A., Aceros, J., Patterson, W. R., & Nurmikko, A. V. (2013). A 100-channel hermetically sealed implantable device for chronic wireless neurosensing applications. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 7(2), 115–128. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2013.2255874

Yin, M., Borton, D. A., Komar, J., Agha, N., Lu, Y., Li, H., Laurens, J., Lang, Y., Li, Q., Bull, C., Larson, L., Rosler, D., Bezard, E., Courtine, G., & Nurmikko, A. V. (2014). Wireless neurosensor for full-spectrum electrophysiology recordings during free behavior. Neuron, 84(6), 1170–1182. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.11.010

Youngerman, B. E., Khan, F. A., & McKhann, G. M. (2019). Stereoelectroencephalography in epilepsy, cognitive neurophysiology, and psychiatric disease: Safety, efficacy, and place in therapy. Neuropsychiatric Disease and Treatment, Volume 15, 1701–1716. https://doi.org/10.2147/NDT.S177804

Yu, K., Liu, C., Niu, X., & He, B. (2021). Transcranial Focused Ultrasound Neuromodulation of Voluntary Movement-Related Cortical Activity in Humans. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 68(6), 1923–1931. https://doi.org/10.1109/TBME.2020.3030892

Zaeimbashi, M., Nasrollahpour, M., Khalifa, A., Romano, A., Liang, X., Chen, H., Sun, N., Matyushov, A., Lin, H., Dong, C., Xu, Z., Mittal, A., Martos-Repath, I., Jha, G., Mirchandani, N., Das, D., Onabajo, M., Shrivastava, A., Cash, S., & Sun, N. X. (2021). Ultra-compact dual-band smart NEMS magnetoelectric antennas for simultaneous wireless energy harvesting and magnetic field sensing. Nature Communications, 12(1), 3141. https://doi.org/10.1038/s41467-021-23256-z

Zhang, J., Cao, W., Wang, M., Wang, N., Yao, S., & Huang, B. (2019). Multivoxel pattern analysis of structural MRI in children and adolescents with conduct disorder. Brain Imaging and Behavior, 13(5), 1273–1280. https://doi.org/10.1007/s11682-018-9953-6

Zhuo, C., Li, G., Lin, X., Jiang, D., Xu, Y., Tian, H., Wang, W., & Song, X. (2019). The rise and fall of MRI studies in major depressive disorder. Translational Psychiatry, 9, 335. https://doi.org/10.1038/s41398-019-0680-6

Zijlmans, J., Marhe, R., Bevaart, F., Van Duin, L., Luijks, M.-J. A., Franken, I., Tiemeier, H., & Popma, A. (2021). The predictive value of neurobiological measures for recidivism in delinquent male young adults. Journal of Psychiatry & Neuroscience : JPN, 46(2), E271–E280. https://doi.org/10.1503/jpn.200103

Zipfel, W. R., Williams, R. M., & Webb, W. W. (2003). Nonlinear magic: Multiphoton microscopy in the biosciences. Nature Biotechnology, 21(11), 1369–1377. https://doi.org/10.1038/nbt899

Literatuur Sectie 2

Ashworth, A. & Zedner, L. (2012) Preventive Justice. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.

Beauchamp, T. L., & Childress, J. F. (2019). Principles of biomedical ethics. Eighth edition. Oxford University Press.

Bijlsma, J. & Ligthart, S.L.T.J. (geaccepteerd). Strafrechtelijke Neuro-Interventies en Vrijwilligheid. Waarom het Onderscheid tussen Dwang en Drang niet Overtuigd.

Bijlsma, J. (2019). Het Voorwaardelijk Sepot. Normering, Praktijk, Evaluatie. Den Haag: Boom. http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/397618.

Bijlsma, J. (2021). Het is Tijd voor een Ongevaarlijkheidspresumptie. Beschouwing naar Aanleiding van J.H.B. Bemelmans, Totdat het Tegendeel is Bewezen. Rechtsgeleerd Magazijn Themis, 81-92.

Bublitz, J. C. (2013). My Mind is Mine!? Cognitive Liberty as a Legal Concept. In E. Hildt & A. Franke (Eds.), Cognitive Enhancement. Trends in Augmentation of Human Performance, 233-264. Dordrecht: Springer.

Bublitz, J. C. (2014). Freedom of Thought in the Age of Neuroscience. A Plea and a Proposal for the Renaissance of a Forgotten Fundamental Right. Archiv Für Rechts- Und Sozialphilosophie 100 (1): 1–25.

Bublitz, J. C., & Merkel, R. (2014). Crimes against minds: On Mental Manipulations, Harms and a Human Right to Mental Self-Determination. Criminal Law and Philosophy, 8(1), 51–77. https://doi.org/10.1007/s11572-012-9172-y.

Bublitz, J.C. (2018). 'The Soul is the Prison of the Body' – Mandatory Moral Enhancement, Punishment and Rights Against Neuro-Rehabilitation. In D. Birks & T. Douglas (Eds). Treatment for Crime: Philosophical Essays on Neurointerventions in Criminal Justice, 289-320. Oxford: Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780198758617.003.0017

Bublitz, J.C. (2020a). Why Means Matter Legally Relevant Differences Between Direct and Indirect Interventions into Other Minds. In N. Vincent (Ed.), Neurointerventions and the Law: Regulating Human Mental Capacity. New York: Oxford University Press. https://doi.org/ 10.1093/oso/9780190651145.003.0003

Bublitz, J.C. (2020b). The Nascent Right to Psychological Integrity and Mental Self- Determination. In A. von Arnauld, K. von der Decken, & M. Susi (Eds.) The Cambridge Handbook of New Human Rights, 387-403. Cambridge (UK): Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108676106.

Canavero, S. (2014). Criminal minds: neuromodulation of the psychopathic brain. Front Hum Neurosci, 8, 124. https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00124

Chew, C., Douglas, T., & Faber, N. S. (2018). Biological interventions for crime prevention. In D. Birks & T. Douglas (Eds.), Treatment for crime: Philosophical essays on neurointerventions in criminal justice. Oxford University Press.

Clausen, J., & Levy, N. (Eds.). (2015). Handbook of neuroethics. Springer.

Clausen, J., Fetz, E., Donoghue, J., Ushiba, J., Spörhase, U., Chandler, J., . . . Soekadar, S. R. (2017). Help, hope, and hype: Ethical dimensions of neuroprosthetics. Science, 356(6345), 1338-1339. https://doi.org/10.1126/science.aam7731

Cleiren, C.P.M. (1992). De openheid van de wet, de geslotenheid van het recht, Arnhem: Gouda Quint.

Cleiren, C.P.M. (2015). 'Legaliteitsbeginsel', in: Cleiren, C.P.M., Verpalen, M.J.M. & Crijns, J.H. (red.), Tekst & Commentaar Strafvordering, Deventer: Kluwer.

Corstens, G.J.M. (2021). Bewerkt door Borgers, M.J., & Kooijmans, T., Het Nederlandse strafprocesrecht, Deventer: Kluwer.

De Baets, A. (2007). 'A Succesful Utopia: The Doctrine of Human Dignity', Historein, 7.

De Jong, F. (2021). Het Mensbeeld van het Risicostrafrecht. Delikt en Delinkwent, 683-693.
De Kogel, C.H., Haselager, W.F.G., Jonker, C., Leoné, F., & Westgeest E.J.C.M. (2013). Beperkingen van neurowetenschap en gedragsgenetica in de rechtspraktijk. Nederlands Juristen Blad, 45, 3157-3161. [2013: NA; NA]
Douglas, T. (2014). Criminal Rehabilitation Through Medical Intervention: Moral Liability and the Right to Bodily Integrity. The Journal of Ethics 18 (2): 101-122. https:doi.org/10.1007/s10892-014-9161-6.
Douglas, T. (2019). Nonconsensual Neurocorrectives and Bodily Integrity: a Reply to Shaw and Barn. Neuroethics, 12(1), 107-118. https://doi.org/10.1007/s12152-016-9275-6
Douglas, T. (2020). From Bodily Rights to Personal Rights. In A. von Arnauld, K. von der Decken, & M. Susi (Eds.) The Cambridge Handbook of New Human Rights, 378-384. Cambridge (UK): Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108676106.
Douglas, T., & Forsberg, L. (2021). Three Rationales for a Right to Mental Integrity. In S. Ligthart, D. van Toor, T. Kooijmans, T. Douglas, G. Meynen (Eds.). Neurolaw. Advances in Neuroscience, Justice & Security, 180-201. Switzerland: Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69277-3.
Easton, S. (1998). The Case for the Right to Silence, Burlington: VT: Ashgate Publishing 1998.
Eke E., Aasebø I.E.J., Akintoye S., Knight W., Karakasidis A., Mikulan E., Ochang P., Ogoh G., Oostenveld R., Pigorini A., Carsten Stahl B., White T. &, Zehl T. (2021) Pseudonymisation of neuroimages and data protection: Increasing access to data while retaining scientific utility. Neuroimage: Reports, 8 4.
Farahany, N.A. (2011). Searching secrets. University of Pennsylvania Law Review, 160 (6), 1239-1308.
Farahany, N.A. (2012). Incriminating thoughts, Stanford Law Review, 64 (2), 351-408.
Farrell, B. (2010). Can't get you out of my head: The Human Rights Implications of Using Brain Scans as Criminal Evidence. Interdisciplinary Journal of Human Rights Law, 4 (1), 89-95.
Forsberg, L. (2018). Crime-Preventing Neurointerventions and the Law: Learning from Anti-Libidinal Interventions. In D. Birks & T. Douglas (Eds). Treatment for Crime: Philosophical Essays on Neurointerventions in Criminal Justice, 289-320. Oxford: Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780198758617.003.0003
Forsberg, L. (2021). Anti-Libidinal Interventions and Human Rights. Human Rights Law Review, 21, 384-408. https://doi.org/10.1093/hrlr/ngab001.
Fox, D. (2009). The Right to Silence as Protecting Mental Control: Forensic Neuroscience and 'the Spirit and History of the Fight Amendment'. Akron Law Review, 42 (3), p. 763-801.
Fuss, J., Auer, M. K., Biedermann, S. V., Briken, P., & Hacke, W. (2015). Deep brain stimulation to reduce sexual drive. J Psychiatry Neurosci, 40(3), 150003.
Gilbert, F., O'Brien, T., & Cook, M. (2018). The Effects of Closed-Loop Brain Implants on Autonomy and Deliberation: What are the Risks of Being Kept in the Loop? Camb Q Healthc Ethics, 27(2), 316-325. https://doi.org/10.1017/S0963180117000640
Goering, S., Klein, E., Specker Sullivan, L., Wexler, A., Agüera Y Arcas, B., Bi, G., . . . Yuste, R. (2021). Recommendations for Responsible Development and Application of Neurotechnologies. Neuroethics, 1-22. https://doi.org/10.1007/s12152-021-09468-6
Greely, H. T. (2013). Mind reading, neuroscience, and the law. In S. J. Morse & A. L. Roskies (Eds.), A primer on criminal law and neuroscience. A contribution to the law and neuroscience project, supported by the MacArthur Foundation. Oxford University Press.
Harris, D.J., O'Boyle, M., Bates, E.P., & Buckley, C.M., Harris, O'Boyle & Warbrick: Law of the European Convention on Human Rights, Oxford: Oxford University Press 2009.
Haselager, W.F.G. (2021). Implications of neurotechnology: Brain recording and intervention. In: In B. Brozek, J. Hage & N. Vincent (Eds.), *Law and mind: A survey of law and the cognitive sciences* (Law and the Cognitive Sciences) (pp. 353-369). Cambridge: Cambridge University Press doi: https://doi.org/10.1017/9781108623056.017

Haselager, W.F.G., Leoné, F., & van Toor, D. (2013). Data en interpretaties in de cognitieve neurowetenschap (Data and interpretations in cognitive neuroscience. Text in Dutch). Justitiële Verkenningen, 39(1), 78-89.

Holmen, S. J. (2021). Respect, Punishment and Mandatory Neurointerventions. Neuroethics, 14, 167–176.

Ienca, M. & Andorno, R. (2017). Towards New Human Rights in the Age of Neuroscience and Neurotechnology. Life Sciences, Society and Policy 13 (5). https://doi.org/10.1186/s40504-017-0050-1.

Ienca, M. (2021a). Common human rights challenges raised by different applications of neurotechnologies in the biomedical fields. Report commissioned by the Committee on Bioethics (DH-BIO) of the Council of Europe. In: Council of Europe.

Ienca, M. (2021b). On Neurorights. Front Hum Neurosci, 15, 701258. https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.701258

Kellmeyer, P., Cochrane, T., Müller, O., Mitchell, C., Ball, T., Fins, J. J., & Biller-Andorno, N. (2016). The Effects of Closed-Loop Medical Devices on the Autonomy and Accountability of Persons and Systems. Camb Q Healthc Ethics, 25(4), 623-633. https://doi.org/10.1017/S0963180116000359

Kirchmair, L. (2019). Objections to Coercive Neurocorrectives for Criminal Offenders – Why Offenders' Human Rights Should Fundamentally Come First. Criminal Justice Ethics 38 (1): 19–40. https://doi.org/10.1080/0731129X.2019.1586216.

Klaming, L., & Haselager, W.F.G. (2013). Did my brain implant make me do it? Questions raised by DBS regarding psychological continuity, responsibility for action and mental competence. *Neuroethics*, 6(3), 527-539. doi: 10.1007/s12152-010-9093-1

Knack, N., Chandler, J. A., & Fedoroff, J. P. (2020). A qualitative study of forensic patients' perceptions of quasi-coercive offers of biological treatment. Behav Sci Law. https://doi.org/10.1002/bsl.2449

Lavazza, A. (2018). Freedom of Thought and Mental Integrity: The Moral Requirements for Any Neural Prosthesis. Front Neurosci, 12, 82. https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00082

Lieftink, J.J. (2018). Meewerken of Weigeren Gedragskundig Onderzoek: Een Duivels Dilemma. Sancties/51.

Ligthart, S. (2019a) 'Coercive forensic neuroimaging and the prohibition of ill-treatment (article 3 ECHR)', in: L. Reins (ed.), Regulating New Technologies in Uncertain Times, Den Haag: T.M.C. Asser, p. 83-104.

Ligthart, S. (2019b). Coercive neuroimaging, criminal law, and privacy: a European perspective Journal of Law and the Biosciences 6 (1).

Ligthart, S. (2020). Freedom of Thought in Europe: Do Advances in 'Brain-Reading' Technology Call for Revision? Journal of Law and the Biosciences 7 (1). https://doi.org/10.1093/jlb/lsaa048.

Ligthart, S. (2021). Autonomie en Privacy als Rechtsgronden van het Zwijgrecht en het Nemo Tenetur-Beginsel? Nederlands Juristenblad, 2660-2666.

Ligthart, S., Douglas, T., Bublitz, C., Kooijmans, T., Meynen, G. (2020). Forensic Brain-Reading and Mental Privacy in European Human Rights Law: Foundations and Challenges. Neuroethics. https://doi.org/10.1007/s12152-020-09438-4.

Ligthart, S., Kooijmans, T., & Meynen, G. (2021). Neurorechten: Wat Doet Nederland Ermee? Nederlands Juristenblad, 1790-1797.

Ligthart, S., Kooijmans, T., & Meynen, G., (2017). 'Neurotests in de Nederlandse strafrechtspleging: een verkenning van juridische mogelijkheden en uitdagingen', DD 2017/56.

Ligthart, S., Kooijmans, T., Douglas, T., & Meynen, G. (Geaccepteerd). Closed-Loop Brain Devices in Offender Rehabilitation: Autonomy, Human Rights, and Accountability. Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics.

Ligthart, S., Van Oploo L., Meijers J., Meynen G, Kooijmans T. (2019). Prison and the Brain: Neuropsychological Research in the Light of the European Convention on Human Rights. New Journal of European Criminal Law 10 (3): 287-300.

McCarthy-Jones, S. (2019). The Autonomous Mind: The Right to Freedom of Thought in the Twenty-First Century. Frontiers in Artificial Intelligence 2 (19). https://doi.org/ 10.3389/frai.2019.00019.

Mecacci, G., & Haselager, P. (2019). Identifying Criteria for the Evaluation of the Implications of Brain Reading for Mental Privacy. Sci Eng Ethics, 25(2), 443-461. https://doi.org/10.1007/s11948-017-0003-3

Meijer, E., & Van Toor, D.A.G. (2021). 'Investigation sleeping suspects: P300 research during sleep and the privilege against self-incrimination', in: Ligthart, S.L.T.J., Toor, D.A.G. van, Kooijmans, T., Douglas, T. & Meynen, G. (eds.), Neurolaw: Advances in Neuroscience, Justice & Security, New York: NY: Palgrave Macmillan, p. 101-120.

Meijer, S. (2017). Rehabilitation as a Positive Obligation. European Journal of Crime, Criminal Law and Criminal Justice 25: 145–162.

Metzinger, T. (2013). The myth of cognitive agency: subpersonal thinking as a cyclically recurring loss of mental autonomy. Front Psychol, 4, 931. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00931

Meynen, G. (2014). Neurolaw: Neuroscience, Ethics, and Law. Review Essay. Ethical Theory and Moral Practice. https://doi.org/10.1007/s10677-014-9501-4

Meynen, G. (2019a). Ethical Issues to Consider Before Introducing Neurotechnological Thought Apprehension in Psychiatry. AJOB Neurosci, 10(1), 5-14. https://doi.org/10.1080/21507740.2019.1595772

Meynen, G. (2019b). Forensic psychiatry and neurolaw: Description, developments, and debates. Int J Law Psychiatry, 65. https://doi.org/10.1016/j.ijlp.2018.04.005

Meynen, G. (2020a). Neurorecht: hoop of hersenschim? Boom juridisch.

Meynen, G. (2020b). Neuroscience-based Psychiatric Assessments of Criminal Responsibility: Beyond Self-Report? Camb Q Healthc Ethics, 29(3), 446-458. https://doi.org/10.1017/S0963180120000195

Michalowski, S. (2020). Critical Reflections on the Need for a Right to Mental Self- Determination. In A. von Arnauld, K. von der Decken, & M. Susi (Eds.) The Cambridge Handbook of New Human Rights, 404-411. Cambridge (UK): Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108676106

Müller, O., & Rotter, S. (2017). Neurotechnology: Current Developments and Ethical Issues. Front Syst Neurosci, 11, 93. https://doi.org/10.3389/fnsys.2017.00093

NIH. (2019). The BRAIN Initiative and Neuroethics: Enabling and Enhancing Neuroscience Advances for Society. https://braininitiative.nih.gov/strategic-planning/acd-working-groups/brain-initiative-and-neuroethics-enabling-and-enhancing

Petersen, T. S., & Kragh, K. (2017). Should violent offenders be forced to undergo neurotechnological treatment? A critical discussion of the 'freedom of thought' objection. J Med Ethics, 43(1), 30-34. https://doi.org/10.1136/medethics-2016-103492

Pugh, J. (2019). No going back? Reversibility and why it matters for deep brain stimulation. J Med Ethics, 45(4), 225-230. https://doi.org/10.1136/medethics-2018-105139

Rainey, S., Martin, S., Christen, A., Mégevand, P., & Fourneret, E. (2020). Brain Recording, Mind-Reading, and Neurotechnology: Ethical Issues from Consumer Devices to Brain-Based Speech Decoding. Sci Eng Ethics, 26(4), 2295-2311. https://doi.org/10.1007/s11948-020-00218-0

Roelfsema, P. R., Denys, D., & Klink, P. C. (2018). Mind Reading and Writing: The Future of Neurotechnology. Trends Cogn Sci, 22(7), 598-610. https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.04.001

Roskies, A. L. (2015). Mind reading, lie detection, and privacy. In J. Clausen & N. Levy (Eds.), Handbook of Neuroethics (pp. 679-695). Springer.

Ryberg, J. (2020). Neurointerventions, crime, and punishment: ethical considerations. Oxford University Press.

Ryberg, J. (2021). Neurointerventions and crime prevention: On ideal and non-ideal considerations. In S. Ligthart, D. Van Toor, T. Kooijmans, T. Douglas, & G. Meynen (Eds.), Neurolaw: Advances in neuroscience, justice & security. Palgrave Macmillan.

Schabas, W.A. (2015). The European Convention on Human Rights: A Commentary. Oxford: Oxford University Press. https://doi.org/ 10.1093/law/9780199594061.001.0001.
Schick, A. (2005). Neuro exceptionalism? Am J Bioeth, 5(2), 36-38; discussion W33-34. https://doi.org/10.1080/15265160590960410
Sententia, W. (2016). Cognitive Liberty and Converging Technologies for Improving Human Cognition. Annals of the New York Academy of Sciences 1013 (1): 221-228. https://doi.org/10.1196/annals.1305.014.
Sergiou, C.S. et al. (2020). Transcranial direct current stimulation (tDCS) as an intervention to improve empathic abilities and reduce violent behavior in forensic offenders: study protocol for a randomized controlled trial. Trials 21 (1). https://doi.org/10.1186/s13063-020-4074-0.
Shaw, E. (2018). Against the Mandatory Use of Neurointerventions in Criminal Sentencing In D. Birks & T. Douglas (Eds.), Treatment for Crime: Philosophical Essays on Neurointerventions in Criminal Justice. Oxford University Press.
Shaw, E. (2018). Retributivism and the Moral Enhancement of Criminals Through Brain Interventions. Royal Institute of Philosophy Supplement 83 (10): 251-270.
Shulztiner D., & Carmi G.E. (2014). 'Human Dignity in National Constitutions: Functions, Promises and Dangers', American Journal of Comparative Law, 2.
Sieber, A. (2019). Souled out of rights? - predicaments in protecting the human spirit in the age of neuromarketing. Life Sci Soc Policy, 15(1), 6. https://doi.org/10.1186/s40504-019-0095-4
Taylor Parkins - Ozephius, C.M., De Wit, I.M., van Toor, D.A.G., & Beekhuis, T. (2021). 'De politie als winkelier van smartphones met 'versleutelde' communicatiemiddelen: de inzet van de opsporingshandelingen getoetst aan het legaliteitsbeginsel', TBS&H 2021, 5.
Tortora, L, Meynen G., Bijlsma, J., Tronci E., & Ferracuti, S. (2020). Neuroprediction and A.I. in Forensic Psychiatry and Criminal Justice: A Neurolaw Perspective. Frontiers in Psychology. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00220.
Umbach, R., Berryessa, C., & Raine, A. (2015). Brain Imaging Research on Psychopathy: Implications for Punishment, Prediction, and Treatment in Youth and Adults. Journal of Criminal Justice, 43(4), 295-306.
Van Toor, D.A.G. (2016). 'Het nemo-teneturbeginsel: rechtspraak van het Europese Hof voor de Rechten van de Mens en de Hoge Raad vergeleken', TBS&H, 1, p. 28-43
Van Toor, D.A.G. (2020). Annotatie bij Ćwik t. Polen (EHRM, 31454/10) – Bewijsuitsluiting na schending art. 3 EVRM, in het bijzonder bij onrechtmatigheid door andere burgers, EHRC.
Vermeulen, B. & Roosmalen, M. van (2018). Freedom of Thought, Conscience and Religion. In P. van Dijk et al. (Eds.) Theory and Practice of the European Convention on Human Rights, 735-763. Cambridge (UK): Intersentia.
Vermeulen, B. & Roosmalen, M. van (2018). Freedom of Thought, Conscience and Religion. In P. van Dijk et al. (Eds.) Theory and Practice of the European Convention on Human Rights, 735-763. Cambridge (UK): Intersentia.
Wajnerman Paz, A. (epub ahead of print). Is Your Neural Data Part of Your Mind? Exploring the Conceptual Basis of Mental Privacy. Minds and Machines.
Yuste, R., Goering, S., Arcas, B. A. Y., Bi, G., Carmena, J. M., Carter, A., . . . Wolpaw, J. (2017). Four ethical priorities for neurotechnologies and AI. Nature, 551(7679), 159-163. https://doi.org/10.1038/551159a
Zaalberg, A. (2018). Voeding en Justitiabelen: Van Strafelement naar Rehabilitatie-Instrument? Den Haag: WODC. http://hdl.handle.net/20.500.12832/206.

Register

A

ACC, 2, 60
aDBS, 2, 42
ALS, 2, 26, 27, 30
Alzheimer, 38, 40, 41, 49, 51, 55, 58
a*mplified* MRI, 54
amyotrofische laterale sclerose. *See* ALS

B

BCI, 2, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 38, 39, 42, 44, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 62, 67, 100, 104
bewustzijnsstoornissen, 40
biometrische identificatie, 21, 56
Brain-computer interface. *See* BCI, *See* BCI
Brainwave Science, 58

C

computertomografie. *See* CT
CT, 2, 18, 49, 52, 59, 63, 64, 72

D

DBS, 2, 26, 29, 41, 42, 65, 66, 68, 71, 91, 99, 105
deep TMS, 38
DeepMind, 63
diffusion tensor imaging. *See* DTI
DTI, 2, 35, 55, 73

E

EcoG, 2
ECoG, 25, 26, 27, 28, 31, 41, 42, 70
ecologische validiteit, 57
ECT, 2, 34
EEG, 2, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 35, 37, 38, 39, 44, 46, 47, 56, 57, 58, 59, 60, 62, 63, 64, 70, 71, 75, 77, 80, 81, 83, 84, 86
electrocorticografie. *See* ECoG
elektroconvulsietherapie. *See* ECT, *See* ECT
elektro-encefalografie. *See* EEG
epilepsie, 20, 23, 25, 26, 28, 40, 42, 55

F

Facebook, 27, 47, 62
Flow, 35
fMRI, 2, 37, 39, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 56, 57, 60, 68, 72, 75, 77, 80, 81, 83, 84
fNIRS, 2, 46, 47, 72
focused ultrasound imaging. *See* fUSI
foto-akoestiek, 48
fTCD, 48
fTDC, 2, 72
Functionele transcraniële Doppler-sonografie. *See* fTCD
FUS, 66, 99
fUSI, 2, 48, 62, 67

G

Google, 62

H

high-density ECoG, 27
high-density tDCS, 35, 61
Humm, 35

K

Kernel, 47
kunstmatige intelligentie, 11, 63, 65, 100, 107

L

leugendetectie, 56, 57

M

machine learning, 11, 22, 90
Magnetic resonance spectroscopy. *See* MRS
Magneto-encefalografie. *See* MEG
MEG, 2, 23, 24, 70
micro-elektroden, 31, 32, 33
MRI, 2, 18, 23, 28, 35, 37, 43, 49, 52, 53, 54, 55, 59, 62, 63, 64, 65, 113
MRS, 2, 54
MS, 2, 44, 55

N

neural dust, 33, 62
Neuralink, 32, 33, 62, 63
neurapixels, 33
neurobewijs, 58
neuro-ergonomie, 20
neurofeedback, 18, 21, 24, 25, 30, 31, 38, 39, 42, 44, 46, 48, 50, 51, 52
Neurofeedback, 18, 20, 24, 26, 29, 30, 31, 35, 38, 39, 42, 44, 46, 48, 50, 51, 52
neuromarketing, 21, 62

O

optically pumped magnometers, 24
optogenetica, 62, 67, 68

P

P300, 20, 56, 57, 58, 64, 75
Parkinson, 24, 38, 40, 41, 42, 46, 51
PET, 2, 37, 49, 50, 51, 52, 58, 59, 64, 72
positron emissie tomografie. *See* PET
psychofarmaca, 65

R

recidiverisico, 59, 60, 65
resting-state fMRI, 45
rTMS, 37, 38, 65

S

schizofrenie, 20, 34, 51, 53
sEEG, 2, 28, 29
single positron emission computed tomography. *See* SPECT
SPECT, 2, 51, 60, 72
Stentrode, 30
stereotactische EEG. *See* sEEG
structurele MRI
Structurele MRI, 52, 54
Structurele MRI, 53, 73

T

tDCS, 2, 34, 35, 61, 62, 65, 66, 71, 91, 99
technology readiness level. *See TRL*
TI, 35
TMS, 2, 37, 38, 65, 66, 71, 99
transcranial alternating current stimulation, 34
Transcranial direct current stimulation. *See* tDCS
transcranial random noise current stimulation, 34
Transcraniële magnetische stimulatie. *See* TMS
TRL, 2, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 114
TFUS, 2, 39, 40
twee-foton microscopie, 62

W

WODC, 2, 58

© 2022; Wetenschappelijk Onderzoek- en Documentatiecentrum. Auteursrechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, digitale verwerking of anderszins, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het WODC.