



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Bronnen van blootstelling van werknemers aan elektromagnetische velden: nieuwe ontwikkelingen

RIVM-briefrapport 2022-0109
R. Stam



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Bronnen van blootstelling van werknemers aan elektromagnetische velden: nieuwe ontwikkelingen

RIVM-briefrapport 2022-0109
R. Stam

Colofon

© RIVM 2022

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

Het RIVM hecht veel waarde aan toegankelijkheid van zijn producten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om dit document volledig toegankelijk aan te bieden. Als een onderdeel niet toegankelijk is, wordt dit vermeld. Zie ook www.rivm.nl/toegankelijkheid.

DOI 10.21945/RIVM-2022-0109

R. Stam (auteur), RIVM

Contact:
Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid
info@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van Het Ministerie voor Sociale Zaken en Werkgelegenheid in het kader van Z/110071/22.

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Bronnen van blootstelling van werknemers aan elektromagnetische velden: nieuwe ontwikkelingen

Werknemers kunnen tijdens hun werk aan elektromagnetische velden worden blootgesteld. Soms kunnen de velden sterker zijn dan de velden waaraan de Nederlandse bevolking wordt blootgesteld. Dit kan schadelijk zijn voor de gezondheid of indirect onveilige situaties veroorzaken, bijvoorbeeld door te vallen na een schrikreactie. Om werknemers hiertegen te beschermen heeft de overheid ongeveer tien jaar geleden wettelijke regels met grenswaarden opgesteld. Ook is er een overzicht gemaakt van werkplekken waarvoor bedrijven de risico's van een blootstelling moeten beoordelen.

De afgelopen jaren is de technologie sterk ontwikkeld waardoor apparaten of processen op het werk kunnen zijn veranderd. Hierdoor is het mogelijk dat de aard, hoogte, complexiteit of variatie van de blootstelling van werknemers aan elektromagnetische velden is veranderd.

Het RIVM vindt het belangrijk om deze nieuwe ontwikkelingen in bronnen van elektromagnetische velden te blijven volgen. Dan blijven werknemers goed beschermd. Het RIVM heeft de ontwikkelingen daarom geïnventariseerd. Het overzicht is gemaakt op basis van wetenschappelijke literatuur en gesprekken met deskundigen. Op basis hiervan kunnen beleidsmakers bepalen of het nodig is om de voorlichting over bronnen van elektromagnetische velden aan te passen.

Er zijn nieuwe of veranderde bronnen van elektromagnetisch velden op het werk gevonden bij het gebruik van draadloze communicatie (5G, RFID), energieopwekking en -transport (omvormers, gelijkstroom), lassen, vervoer (elektrisch rijden, radar) en medische of wetenschappelijke technieken (medische beeldvorming zoals MRI, cosmetische behandelingen, materiaalonderzoek).

Bij sommige van deze bronnen kunnen mogelijk grenswaarden worden overschreden. Dit geldt bijvoorbeeld voor magnetisch pulsslassen in de metaalindustrie, draadloos opladen van grote voertuigen en cosmetische behandelingen met elektromagnetische velden. Verder blijft bijzondere aandacht nodig voor werknemers met medische hulpmiddelen, zoals een pacemaker. Zij hebben ook bij een blootstelling onder de grenswaarde al kans op gezondheids- of veiligheidseffecten.

Kernwoorden: elektromagnetische velden, werknemers, gezondheid, veiligheid, nieuwe technologieën

Synopsis

Sources of worker exposure to electromagnetic fields: new developments

Workers can be exposed to electromagnetic fields during the course of their work. Sometimes the strength of these fields can exceed that of the fields to which the general Dutch population is exposed. This can be harmful to health or indirectly give rise to unsafe situations, such as falls following a startle reaction. In order to protect employees from these risks, the Government drew up statutory regulations encompassing exposure limits around a decade ago. In addition, an overview was created of workplaces for which companies are required to assess the risks of exposure.

Substantial technological developments in recent years mean that equipment or processes in the workplace may have changed. This makes it possible that the nature, extent and complexity of or variation in workers' exposure to electromagnetic fields has changed.

The National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) deems it important to keep track of these new developments in sources of electromagnetic fields. This ensures proper protection of employees. RIVM has therefore analysed the developments. This overview has been created on the basis of scientific literature and interviews with experts. This will enable policymakers to decide whether it is necessary to adapt the information on sources of electromagnetic fields.

New or changed sources of electromagnetic fields have been identified in workplaces where wireless communication (5G, RFID), energy generation and energy transport (converters, direct current), welding, transport (electric vehicles, radar) and medical or scientific technologies (medical imaging such as MRI, cosmetic treatments, materials research) are being used.

Limits might be exceeded in the case of some of these sources, such as magnetic pulse welding in the metal industry, wireless charging of large vehicles and cosmetic treatments involving electromagnetic fields. Particular attention should also continue to be paid to employees with medical devices, such as pacemakers. They could experience adverse health or safety effects even when exposed to levels below the limit.

Keywords: electromagnetic fields, workers, health, safety, new technologies

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 11

- 1.1 Elektromagnetische velden — 11
- 1.2 Bescherming van werknemers — 11
- 1.3 Nieuwe ontwikkelingen — 12
- 1.4 Leeswijzer — 12

2 Methode — 13

- 2.1 Literatuuronderzoek — 13
- 2.2 Raadplegen deskundigen — 13
- 2.3 Uitwerking bevindingen — 13

3 Bevindingen — 15

- 3.1 Draadloze communicatie, infrastructuur, beveiliging — 15
- 3.2 Elektriciteitsvoorziening — 16
- 3.3 Industrie — 18
- 3.4 Vervoer — 19
- 3.5 Medisch, wetenschappelijk — 20

4 Discussie — 23

Referenties — 25

Bijlage 1 Zoekmethoden literatuur — 33

Bijlage 2 Geraadpleegde deskundigen — 35

Samenvatting

Elektromagnetische velden (EMV) waaraan werknemers worden blootgesteld kunnen in bepaalde gevallen sterker zijn dan de velden waaraan leden van de bevolking worden blootgesteld en kunnen risico's voor de gezondheid of veiligheid geven. De wettelijke voorschriften en grenswaarden voor EMV in arbeidssituaties beschermen werknemers tegen deze risico's. Bij invoering van deze wetgeving zijn richtsnoeren gepubliceerd met een overzicht van werkomgevingen waarin een beoordeling van de risico's van EMV nodig is. Nieuwe technologische en maatschappelijke ontwikkelingen in de afgelopen 10 jaar sinds de invoering zouden kunnen leiden tot verandering in de aard, hoogte, complexiteit of diversiteit van de blootstelling van werknemers aan EMV in arbeidssituaties. Op basis van literatuuronderzoek en gesprekken met deskundigen wordt in dit briefrapport per categorie werkomgeving samengevat welke nieuwe ontwikkelingen zijn gevonden.

In de categorie 'Draadloze communicatie, infrastructuur, beveiliging' zorgen nieuwe 5G-telecommunicatiesystemen voor blootstelling aan EMV in hogere frequentiebanden dan voorheen, die complexer en variabel in de tijd kan zijn, maar in het algemeen lager zal zijn dan de grenswaarden. Dat geldt naar verwachting ook voor nieuwe RFID- en radartoepassingen in deze werkomgevingen. Voor (onderhouds-) medewerkers of dakwerkers die dicht in de buurt van zenders op daken of in zendmasten kunnen komen is er wel een potentieel risico op overschrijding van de grenswaarden.

In de categorie 'Elektriciteitsvoorziening' leidt de energietransitie tot toenemend gebruik van gelijkstroom voor energietransport (met zwakke statische magnetische velden) en de productie van waterstof (met sterke statische en laagfrequente velden). Voor het omzetten van spanning en frequentie bij opwekking en transport van elektrische energie worden omvormers gebruikt, die relatief sterke EMV met hogere frequenties kunnen produceren. Over de overschrijding van grenswaarden voor werknemers zijn nog geen gegevens gevonden.

In de categorie 'Industrie' worden omvormers ook in toenemende mate toegepast bij elektrisch lassen. Bij magnetisch pulsslassen kunnen mogelijk grenswaarden worden overschreden. Andere industriële toepassingen met mogelijke gewijzigde EMV-blootstelling zijn het gebruik van lasrobots en -cobots, draadloze energieoverdracht in machines en magnetische mengsystemen.

In de categorie 'Vervoer' zijn elektrische voertuigen in opkomst, waarbij draadloos opladen met sterkere EMV gepaard kan gaan dan opladen via de kabel. Ook worden omvormers in toenemende mate toegepast in elektrische voertuigen. Daarnaast wordt radar toegepast voor verkeersveiligheid en autonoom rijden. De blootstelling van werknemers blijft daarbij naar verwachting onder de grenswaarden.

In de categorie 'Medisch, wetenschappelijk' worden nog steeds sterkere magneten ontwikkeld voor beeldvorming bij mensen en voor materiaalonderzoek. Die kunnen vooral bij open systemen (bijvoorbeeld

MRI) blootstelling van werknemers boven de grenswaarden geven. Bij diagnostische radar is de radiofrequente blootstelling lager dan de grenswaarden, maar toekomstige beeldvorming met 'magnetic particle imaging' kan sterkere laagfrequente EMV opwekken met mogelijk blootstelling boven de grenswaarden. Ook bij apparatuur voor nieuwe cosmetische toepassingen (huidbehandeling, vetreductie) kunnen laagfrequente en radiofrequente EMV tot blootstelling boven de grenswaarden leiden.

Bij toekomstige actualisering van de wetgeving en praktische richtsnoeren is het raadzaam om aandacht te besteden aan deze nieuwe ontwikkelingen in bronnen van EMV-blootstelling van werknemers. Als daarbij rekening wordt gehouden met de nieuwste wetenschappelijke aanbevelingen voor beperking van de blootstelling, kan het nodig zijn om zowel de nieuwere als oudere bronnen van EMV op het werk opnieuw te beoordelen.

1 Inleiding

1.1 Elektromagnetische velden

Elektrische velden ontstaan door een elektrische lading of door veranderende magnetische velden. Magnetische velden ontstaan door een bewegende elektrische lading of door veranderende elektrische velden, zoals die bij een geleider waar wisselstroom door loopt. Het aantal golfbewegingen in de sterkte van de velden per seconde noemt men de frequentie (eenheid: hertz, afkorting Hz). De afstand tussen twee pieken in de golfbeweging noemt men de golflengte. De geleider, het apparaat of de zender die de velden produceert noemt men 'de bron'. Op een bepaalde afstand, als vuistregel meer dan tien keer de golflengte vanaf de bron (in het 'verre veld'), zijn het elektrische en magnetische veld volledig gekoppeld en in fase en spreekt men formeel van een elektromagnetisch veld. In de rest van dit briefrapport wordt de term 'elektromagnetische velden' (afkorting: EMV) gebruikt als afkorting voor elektrische velden, magnetische velden of elektromagnetische velden. EMV ontstaan onder andere bij opwekking, transport of gebruik van elektriciteit, het opwarmen van materialen door inductie en het draadloos verzenden van informatie.

1.2 Bescherming van werknemers

Sterke EMV kunnen direct na de blootstelling gezondheidseffecten of veiligheidsrisico's veroorzaken. Sterke statische magnetische velden (frequentie 0 Hz) kunnen leiden tot effecten op de zintuigen (misselijkheid, duizeligheid, verlies van evenwicht). Daardoor kunnen veiligheidsrisico's ontstaan, zoals valgevaar of verlies aan controle over machines. Sterke laagfrequente velden (frequenties tussen 0 Hz en 100 kHz) kunnen elektrische velden en stromen in het lichaam opwekken, die zintuigen, zenuwcellen of spieren kunnen prikkelen. Daardoor kunnen lichtflitsen, tintelingen, pijn of spiertrekkingen ontstaan. EMV met frequenties van 100 kHz tot 300 GHz ('hoogfrequente velden' of 'radiofrequente velden') kunnen het lichaam of delen daarvan opwarmen. Daardoor kan hittestress of schade aan weefsels en organen ontstaan. Naast het risico op deze gezondheidseffecten kunnen EMV ook indirecte effecten op de gezondheid of veiligheid hebben, door beïnvloeding van voorwerpen en apparatuur. Voorbeelden hiervan zijn contactstromen of vonkontladingen door nadering of aanraking van geleidende voorwerpen die zijn opgeladen door EMV; storing van actieve geïmplanteerde medische toestellen, zoals pacemakers; opwarming of verplaatsing van metalen voorwerpen of deeltjes in het lichaam zoals een botpen, piercing of tatoeage; projectielwerking van ferromagnetische voorwerpen in een statisch magnetisch veld.

EMV waaraan werknemers worden blootgesteld kunnen in bepaalde gevallen sterker zijn dan de velden waaraan leden van de bevolking buiten het werk worden blootgesteld. In 2013 zijn daarom in de Europese richtlijn 2013/35/EU (verder genoemd 'EU-richtlijn') minimumvoorschriften inzake gezondheid en veiligheid met betrekking tot de blootstelling van werknemers aan EMV vastgesteld. De bepalingen in de EU-richtlijn dienen ervoor om alle werknemers in de Europese Unie

een gelijkwaardig beschermingsniveau tegen de risico's van EMV te geven. De EU-richtlijn bevat grenswaarden voor blootstelling, die de sterkte van de fysische effecten in het lichaam (elektrische prikkeling, opwarming) beperken. Daaruit zijn actieniveaus voor de sterkte van de velden buiten het lichaam afgeleid, die makkelijker te meten is. Er zijn ook actieniveaus ter bescherming tegen indirecte effecten van EMV. Als de actieniveaus worden overschreden, moet de werkgever maatregelen nemen om de blootstelling te verlagen, tenzij hij kan aantonen dat de grenswaarden niet worden overschreden en veiligheidsrisico's zijn uitgesloten. De bepalingen in de EU-richtlijn zijn in Nederland geïmplementeerd door een wijziging van het Arbobesluit op 1 juli 2016 (Hoofdstuk 6, Afdeling 4b). Voor de grenswaarden en actieniveaus verwijst het Arbobesluit naar de tekst van de EU-richtlijn.

1.3 Nieuwe ontwikkelingen

Ter ondersteuning van de risico-inventarisatie en evaluatie (RI&E) is door de Europese Commissie een niet-bindende gids met goede praktijken uitgegeven (Europese Commissie 2015a, 2015b). Er is ook een beknoptere praktische gids voor de Nederlandse situatie uitgegeven door het Ministerie van SZW (Stam et al. 2016). Daarin is een tabel opgenomen waarin van werkomgevingen per categorie (bedrijfstaking) wordt aangegeven of er bij de RI&E een nadere beoordeling nodig is vanwege mogelijke overschrijding van actieniveaus, of voor werknemers met een verhoogd risico, zoals dragers van een medisch hulpmiddel. De inventarisatie van werkomgevingen voor deze tabel is gebaseerd op gegevens die inmiddels meer dan 10 jaar oud zijn. De technologie en soorten toepassingen van EMV staan niet stil. Voorbeelden daarvan zijn toepassingen in de transitie naar duurzame elektriciteitsopwekking en de invoering van 5G-telecommunicatiesystemen. Het is daarom mogelijk dat er in de laatste 10 jaar nieuwe of gewijzigde bronnen van EMV in arbeidsomstandigheden in gebruik zijn gekomen, of dat bestaande toepassingen breder of in nieuwe situaties worden gebruikt. Deze ontwikkelingen zouden gevolgen kunnen hebben voor de hoogte van de blootstelling aan EMV en de risico's, of voor het soort werkomgeving waar deze risico's kunnen optreden.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt beschreven hoe de informatie is verzameld en verwerkt. In hoofdstuk 3 worden de bevindingen over nieuwe en gewijzigde bronnen van EMV beschreven per categorie werkomgeving. Deze indeling is ruwweg gebaseerd op die in de praktische gidsen van de Europese Commissie en SZW. In Hoofdstuk 4 worden enkele algemene discussiepunten besproken.

2 Methode

2.1 Literatuuronderzoek

Er is voor de periode van januari 2011 tot juli 2021 in de databases PubMed (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>) en Scopus (<https://www.scopus.com/>) gezocht naar Engelstalige overzichtsartikelen (reviews) in 'peer reviewed' wetenschappelijke tijdschriften (voor zoektermen zie Bijlage 1). Daarbij is gezocht met combinaties van een set algemene zoektermen voor EMV, voor arbeidssituaties en voor nieuwe ontwikkelingen. Daarnaast is met dezelfde sets zoektermen als voor Pubmed en Scopus gezocht naar relevante rapporten of websites via Google en databases voor grijze literatuur (zie Bijlage 1). Ook werd in de periode van januari 2011 tot mei 2021 naar relevante rapporten gezocht op internationale websites van overheidsinstellingen en beroepsverenigingen op het gebied van EMV in arbeidsomstandigheden. Deze websites werden door het RIVM bezocht in het kader van de jaarlijkse update van een database over buitenlands beleid voor EMV. Daarbij werden rapporten met bruikbare gegevens over nieuwe ontwikkelingen in bronnen van blootstelling van werknemers gevonden bij: ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Frankrijk), Bundesamt für Strahlenschutz (Duitsland), Bundesamt für Umwelt (Zwitserland), European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), Europese Commissie, Health and Safety Executive (UK), National Academy of Sciences (USA), Strahlenschutzkommission (Duitsland) en TNO (Nederland).

2.2 Raadplegen deskundigen

Ter aanvulling van het literatuuronderzoek is een aantal deskundigen, geselecteerd op hun kennis van het gebied van nieuwe technologieën en risico's van EMV in arbeidsomstandigheden, geïnterviewd over nieuwe ontwikkelingen in bronnen en blootstelling (zie Bijlage 2). Voor specifieke EMV-bronnen die door het literatuuronderzoek of de deskundigen waren geïdentificeerd is in Google (https://www.google.com/advanced_search) en Scopus (<https://www.scopus.com/>) waar nodig aanvullend gezocht naar websites en wetenschappelijke artikelen met specifieke informatie over de eigenschappen van de bron en de sterkte van de EMV, met additionele zoektermen voor de bron en velden in kwestie.

2.3 Uitwerking bevindingen

De bevindingen worden samengevat per categorie werkomgeving. Hierbij wordt ruwweg de indeling van werkomgevingen in de niet-bindende gids van de Europese Commissie (Europese Commissie 2015a) en de praktische gids van SZW (Stam et al. 2016) aangehouden. Tenzij dat expliciet is vermeld is daarbij niet bekend of, en in welke omvang, een nieuwe ontwikkeling ook in Nederland wordt toegepast.

3 Bevindingen

3.1 Draadloze communicatie, infrastructuur, beveiliging

Een recente ontwikkeling in draadloze communicatie is de introductie van 5G-systemen. Naast de nieuwe 700 MHz-band worden daarbij ook hogere frequentiebanden gebruikt dan voor de eerdere generaties (2G tot 4G), namelijk die rond 3,5 GHz, 26 GHz en 66 GHz. Omdat die hogere frequenties een korter bereik dan de lagere frequenties hebben, worden in toenemende mate 'small cells' (kleinere antennes in gebouwen en op drukke plaatsen buiten) toegepast. Daarnaast worden zowel binnen als buiten 'massive multiple-input multiple-output' (massive MIMO)-systemen gebruikt. Dit zijn arrays van antennes met meerdere, digitaal afzonderlijk aanstuurbare, antenne-elementen in een rooster, die bundels vormen waarmee verschillende gebruikers dynamisch worden gevolgd (beam forming). De nieuwe eigenschappen van 5G-systemen maken verbeterde mobiele breedband, betrouwbare communicatie tussen toestellen met een kortere latentietijd (responstijd tussen draadloze apparaten) en gelijktijdige communicatie over een groter aantal kanalen en toestellen mogelijk (het 'Internet of Things'). Tot de introductie van 5G werden daarvoor ook oudere lokale draadloze communicatiesystemen gebruikt in de frequentiebanden 900 MHz tot 2,4 GHz (Bluetooth, WiFi, LoRa, ZigBee, SigFox) (Jawad et al. 2017).

Voorbeelden van toepassingen van deze nieuwe draadloze communicatietechnieken in de werkomgeving zijn die in de sectoren elektriciteitsvoorziening (slimme meternetwerken, 'grid communication'), industrie (voorwerpen volgen, magazijnbeheer, inspectierobots, slimme helmen), landbouw (autonome machines voor wieden en oogsten, drones, bodemsensoren, diersensoren), vervoer (autonoom vervoer, connected driving, op afstand ondersteunen), en gezondheidszorg (pillcam, hybride operatiekamers, telechirurgie, telemetrie in ambulances). Hierbij wordt gebruik gemaakt van hetzij private netwerken of een 'network slice' van een publiek netwerk. Ook wordt er extra, rechtstreekse communicatie tussen allerlei (gebruikers)toestellen onderling verwacht, zonder tussenkomst van netwerken (European Commission 2019, TNO 2020). Voor het railvervoer wordt het Future Railway Mobile Communication System ontwikkeld, dat gebruik maakt van 5G-technologieën en het GSM-R (GSM for Railways) moet gaan vervangen voor verkeerscontrole, communicatie binnen treinen en communicatie in noodgevallen (5GRAIL 2021). Naar verwachting zal de blootstelling van werknemers bij het gebruik van al deze draadloze communicatiesystemen bij ontwerp lager zijn dan de grenswaarden, maar er kunnen dicht bij de zender wel risico's zijn voor dragers van actieve medische hulpmiddelen. Ook kan de beoordeling van de blootstelling ingewikkelder worden, bijvoorbeeld doordat MIMO-antennes meerdere bewegende bundels in verschillende richtingen kunnen uitzenden, die bovendien van het gedrag van de gebruiker gaan afhangen (wisselend in plaats en tijd) (Stam et al. 2019). De complexiteit kan ook toenemen door de cumulatie van bijdragen uit verschillende EMV-bronnen. Voor (onderhouds) medewerkers of dakwerkers, die dicht in de buurt van zenders op daken

of in zendmasten kunnen komen, is er net als bij eerdere generaties mobiele communicatie wel een potentieel risico op overschrijding van de grenswaarden.

Radiofrequency identification (RFID) is een draadloze techniek die in toenemende mate wordt gebruikt voor het uitlezen op afstand van productinformatie, procesinformatie, monitoring van gebouwen, voertuigen, bodem, gewassen en vee en medische gegevens over lichaamsfuncties. Hierbij worden EMV met frequenties tussen 800 MHz en 2,5 GHz gebruikt, maar in de toekomst mogelijk ook millimetergolven (frequenties van 30 GHz tot 300 GHz) (Chandrasekar en Dutta 2021, CEPT 2021, Kang et al. 2021). Voor RFID-scanners werd in recent literatuuronderzoek door het RIVM gevonden dat de blootstelling van werknemers dichtbij de bron weliswaar kortstondig hoger kan zijn dan de actieniveaus, maar na de door ICNIRP aanbevolen middeling over 6 minuten in het algemeen lager zal zijn dan de actieniveaus (Stam 2021, zie ook Hirtl et al. 2018). Er is wel een nadere beoordeling nodig voor werknemers met een actief medisch hulpmiddel.

De verschillende vormen van draadloze communicatie (mobiele telefonie, bluetooth, RFID) vinden inmiddels ook toepassing in het gebruik als 'wearables', draagbare toestellen voor het monitoren, volgen, assisteren of informeren van werknemers tijdens hun werkzaamheden (Svertoka et al. 2021). De EMV-blootstelling zal daarbij in het algemeen bij ontwerp lager zijn dan de actieniveaus, maar er zouden wel risico's kunnen zijn voor dragers van een actief medisch hulpmiddel.

Op het terrein van beveiliging zijn de afgelopen 10 jaar 'bodyscanners' met frequenties rond 24 GHz in gebruik gekomen voor het detecteren van verborgen voorwerpen op het lichaam. Als werknemers daar bij toegangscontrole aan worden blootgesteld, is de blootstelling altijd lager dan de grenswaarden (ANSES 2012). Radarscanners met frequenties van 1 tot 3 GHz kunnen ook worden gebruikt door politie, brandweer en reddingsdiensten voor het detecteren van mensen door muren (Nkwari et al. 2018). Hiervoor zou nog moeten worden onderzocht of (eventueel onbedoelde) blootstelling van de gebruiker hoger kan zijn dan de grenswaarden.

3.2 Elektriciteitsvoorziening

De maatschappelijke transitie naar duurzame energieopwekking kan op verschillende onderdelen gevolgen hebben voor de aard of sterkte van de blootstelling van werknemers, met name door het gebruik van omvormers, tijdelijke opslag, transport met gelijkstroom en draadloze communicatie (National Academies of Sciences 2021). De omvormers, een toepassing van vermogenselektronica, zijn nodig om de opgewekte variabele of gelijkstroom om te zetten in stabiele 50 Hz wisselstroom. Bij werkzaamheden in de buurt van windturbines en omvormers van zonnepanelen kunnen daardoor EMV met frequenties van 5-100 kHz ontstaan. Volgens de niet-bindende gids en relevante onderzoekspublicaties worden hierbij geen actieniveaus voor gezondheidseffecten overschreden (Tell et al. 2015, Karanikas et al. 2021, Klaus 2013) maar zouden er wel indirecte risico's voor dragers

van medische hulpmiddelen kunnen ontstaan. Omvormers gaan ook een rol spelen bij uitbreiding van het langeafstandtransport van elektrische energie met gelijkstroom, voor het converteren van de spanning en de aansluiting op het wisselstroomnet (Bianchi et al. 2020). In dergelijke 'converterstations' kunnen relatief sterke EMV optreden met frequenties tot 10 MHz (China Electric Power Research Institute 2017). Er zijn echter nog geen publicaties gevonden met metingen van de veldsterkte op plaatsen waar werknemers kunnen komen. Omvormers worden ook op kleinere schaal toegepast, zoals bij connectoren in de woonwijk, buurtbatterijen, warmtepompen en airco-installaties. Voor de gebruiker blijft de veldsterkte naar verwachting onder de limieten voor de algemene bevolking en werknemers, maar mogelijk kunnen er bij installatie en onderhoud wel risico's zijn voor werknemers met een actief medisch hulpmiddel.

Voor het elektriciteitstransport van wind- en zonneparken over lange afstanden hebben gelijkstroom-hoogspanningslijnen technische voordelen boven wisselstroomlijnen (stabiliteit, lagere verliezen) (Rahman et al. 2021). De sterkte van het statische magnetische veld in de buurt van gelijkstroomlijnen ligt in dezelfde grootteorde als het aardmagnetisch veld (in Nederland 50 microtesla), dat wil zeggen een factor 40.000 onder de grenswaarde voor effecten op de zintuigen. De elektrische energie kan ook tijdelijk worden opgeslagen in andere energiedragers zoals waterstof, dat ook als alternatieve brandstof voor vervoersmiddelen en industrie kan dienen (National Academies of Sciences 2021). Bij de productie van waterstof met elektrische energie kunnen in principe dezelfde EMV-risico's optreden als bij andere elektrolyseprocessen: mogelijke overschrijding van actieniveaus voor zowel directe als indirecte effecten. Het elektrolyseproces kan worden versneld door het aanbrengen van een statisch magnetisch veld, maar de sterkte daarvan ligt onder de grenswaarde (Garcés-Pineda et al. 2019).

In de toekomst kan kernfusie gaan bijdragen aan de energievoorziening, maar deze toepassing bevindt zich nu nog in de onderzoeksfase. Ook Nederlandse onderzoeksgroepen dragen hieraan bij (DIFFER 2021). Bij de meest gangbare methode voor kernfusie worden waterstofatomen in hun plasmavorm ingesloten en samengedrukt door een sterk statisch magnetisch veld dat door een elektromagneet wordt opgewekt. De magnetische fluxdichtheid op voor werknemers toegankelijke plaatsen in de omgeving van de reactor is minder dan 1% van de grenswaarde voor effecten op de zintuigen, en ook lager dan het actieniveau voor actieve medische hulpmiddelen. Ook de laagfrequente velden (60 Hz) van de stroomvoorziening zijn lager dan de actieniveaus (Cadwallader 2019, Uda et al. 2012). Voor het opwarmen van het plasma worden radiofrequente EMV met frequenties van 30 tot 70 MHz gebruikt. Voor een experimentele reactor in Japan (vermogen 3 MW) was de sterkte van de radiofrequente lekvelen in de buurt van transmissiekabels en versterker ongeveer 50% van de actieniveaus. Voor grootschaliger reactoren zoals die van de in aanbouw zijnde ITER in Frankrijk (20 MW) zou de veldsterkte opnieuw moeten worden vergeleken met de actieniveaus (Tanaka et al. 2021).

3.3 Industrie

Voor lassen is in de niet-bindende gids geconstateerd dat overschrijdingen van actieniveaus kunnen plaatsvinden in de twee hoofdcategorieën booglassen en weerstandlassen. Hierbij wordt in de afgelopen 10 jaar, net als in de sector 'Elektriciteitsvoorziening', in toenemende mate gebruik gemaakt van omvormers. Deze nieuwere lasapparatuur is energiezuiniger en geeft een betere controle over het lasproces. Bij de omvormer ontstaan echter ook gepulseerde EMV met frequenties tot 100 kHz, die de beoordeling van de blootstelling complexer maken (Melton en Shaw 2014). In de laatste 15 jaar is ook een nieuwere lastechniek in opkomst: magnetisch pulslassen, een vorm van druklassen. Hierbij wordt met een elektrische spoel een sterke magnetische puls opgewekt, die een inductiestroom in het metalen voorwerp opwekt. Door de ontstane Lorentzkracht wordt het metalen voorwerp zodanig versneld het bij de botsing met het tweede voorwerp wordt verbonden door een combinatie van druk en temperatuurverhoging (Kapil en Sharma 2015). Een vergelijkbare techniek is het gebruik van magnetische pulsen voor het vervormen van metalen platen (Trzepieciński 2020). Op de plaats van het werkstuk kan de sterkte van het magnetische veld een factor 100.000 boven het actieniveau liggen (Stankevic et al. 2020). Er zijn aanwijzingen dat de actieniveaus ook kunnen worden overschreden op een afstand tot 2 meter van het werkstuk, waar de werknemer zich mogelijk kan bevinden (Bouldi et al. 2016). Het proces zou in principe ook geautomatiseerd in een afgesloten cabine kunnen plaatsvinden, waardoor de veldsterkte in de omgeving lager wordt. In een Europees onderzoeksproject is vastgesteld dat de blootstelling beoordeeld moet worden volgens de limieten in de EU-richtlijn en dat daarvoor geschikte Europese technische normen moeten worden ontwikkeld (JOIN'EM 2018). Bij het volledig geautomatiseerd lassen met een lasrobot hoeft in principe geen werknemer blootgesteld te worden aan EMV, maar deze systemen zijn alleen rendabel voor grootschalige industriële lasprocessen. Voor kleinschaliger lasprocessen is de 'lascobot', een kleiner, flexibeler en goedkoper tafelmodel lasrobot, in opkomst. Deze kan routinematige taken van de lasser overnemen, waardoor deze niet meer op korte afstand van lastang en werkstuk hoeft te staan waar de EMV-blootstelling hoger dan de actieniveaus kan zijn (Verlinde en Kempeneers 2019).

Inductieverwarming is volgens de niet-bindende gids en eerder literatuuronderzoek van het RIVM een categorie werkomgeving waarbij overschrijding van actieniveaus en grenswaarden kan optreden (Stam 2014). Er worden in de laatste 15 jaar ook steeds nieuwe toepassingen voor ontwikkeld, zoals bij het sinteren (doen versmelten) van korrels voor het vormen van metaal, teflon of keramiek (Alem et al. 2020) en de productie van gas uit biomassa (Guo et al. 2020). Een nieuwe ontwikkeling bij industriële inductieverwarming van metalen is het toepassen van meerdere inductiespoelen tegelijk met beweegbare magnetische schermen en 'flux concentrators' om een homogener opwarming van het metaal te krijgen ('multiphase inductors') (Lucia et al. 2014). Het is de vraag of deze verfijndere controle over de opwarming zou kunnen helpen om de sterkte van EMV in de omgeving

te verminderen, waardoor de kans op overschrijding van actieniveaus kleiner wordt. Metingen hiervan zijn nog niet gevonden.

Er zijn ook nieuwe industriële toepassingen waar draadloze energieoverdracht voordelen biedt ten opzichte van energievoorziening via kabels. Dit betreft bijvoorbeeld machines met glijdende of roterende delen waar kabels bewegingen over een langere afstand of grotere hoek zouden beperken of gevaarlijke situaties kunnen opleveren. Voor deze toepassingen van inductieve energieoverdracht op korte afstand worden EMV met frequenties van tientallen tot honderden kHz toegepast en in de buurt van deze apparaten kunnen potentieel actieniveaus worden overschreden (Trevisan en Costanzo 2014, Song et al. 2017, Zhang et al. 2021).

In de chemische, farmaceutische en biotechnologische industrie moet de inhoud van reactievaten gemengd worden zonder dat daarbij vervuiling of besmetting optreedt. In de laatste 15 jaar zijn daarvoor magnetische roertoestellen ontwikkeld, waarin een magnetische roerstaaf wordt aangedreven door een roterende permanente magneet of door een supergeleidende magnetische spoel buiten het reactorvat (Schirmer et al. 2021). Het statische veld van de permanente magneet bedraagt maximaal 1,4 T, maar over de sterkte van de magnetische wisselvelden die door rotatie (frequentie 50-100 Hz) of aan- en uitschakelen van de magneet buiten het reactorvat kunnen ontstaan zijn geen gegevens gevonden (Rekena et al. 2019). De precieze blootstelling aan wisselvelden in de buurt van deze reactievaten zou dus nog moeten worden bepaald.

3.4 Vervoer

In de categorie vervoer zijn in de afgelopen 10 jaar elektrische (oplaadbare) voertuigen voor wegvervoer en bedrijfsterreinen in opkomst. De sterkte van EMV door de elektrische systemen in elektrische auto's, bedrijfsvoertuigen (slepers), hybride vrachtauto's en bussen zal voor inzittenden in het algemeen lager dan de actieniveaus zijn. Er kan potentieel een hogere blootstelling optreden bij werknemers die werkzaamheden aan zo'n voertuig verrichten, met name in de buurt van de omvormer (Concha Moreno-Torres et al. 2013). Het opladen van elektrische voertuigen kan gebeuren via een kabel of draadloos, via elektrische spoelen in het wegdek op de parkeerplaats of op de vaste rijroute (Triviño et al. 2021). Voor de draadloze energieoverdracht worden laagfrequente EMV met frequenties van 15 tot 150 kHz gebruikt (Dürrenberger et al. 2014). Bij het opladen via een kabel is de blootstelling lager dan de actieniveaus. Tijdens het draadloos opladen komt de sterkte buiten, direct naast of onder het voertuig in het 'worst case' scenario mogelijk boven de actieniveaus, maar blijft het geïnduceerde elektrische veld in het lichaam in de onderzochte scenario's (waaronder een elektrische bus) onder de grenswaarden (Hirtl et al. 2018). Het vermogen (en daarmee de snelheid) waarmee elektrische bussen en vrachtwagens draadloos kunnen worden opgeladen neemt echter steeds toe, inmiddels tot meer dan 10 keer het vermogen in de onderzochte scenario's (Heavy Duty Trucking 2021). Daarmee neemt ook de afstand tot de spoelen waarbinnen de grenswaarden kunnen worden overschreden toe (Zhao et al. 2020). Bij

het verder uitbreiden en doorontwikkelen van het draadloos opladen blijft daarom aandacht voor de blootstelling van werknemers aan EMV nodig.

Ook nieuwe toepassingen van radiofrequente EMV in het vervoer zijn de afgelopen 10 jaar in opkomst. Naast nieuwe toepassingen voor telecommunicatie (zie paragraaf 3.1) worden ze in het wegvervoer ook gebruikt voor de verkeersveiligheid, autonoom rijden en signaaloverdracht van sensoren en sleutels. Voor het voorkomen van botsingen ('anti-collision system') en automatisch afstand houden en snelheid aanpassen ('adaptive cruise control') wordt langeafstandradar ('long range radar') gebruikt. Voor het parkeren en de dodehoekbewaking wordt korteafstandradar ('short range radar') gebruikt. Deze radars maken gebruik van de frequentiebanden rond 24 GHz, 77 GHz en 96 GHz (Strahlenschutzkommission 2019b, CEPT 2021, Yeong et al. 2021, Zhou et al. 2020). Er is ook een radarsysteem ontwikkeld dat de aanwezigheid van mensen onder de auto kan detecteren als beveiliging tegen te hoge blootstelling tijdens het draadloos elektrisch opladen (Poguntke et al. 2017). De fabrikanten van deze radarsystemen ontwerpen ze in principe zodanig dat ze voldoen aan de blootstellingslimieten voor leden van de algemene bevolking (en dus ook aan de grenswaarden voor werknemers), in overeenstemming met de Europese Telecomcode en de daarmee geharmoniseerde productnormen. Er zijn echter in het literatuuronderzoek nog geen publicaties over de blootstelling van inzittenden of omstanders gevonden, die dit kunnen bevestigen.

3.5 Medisch, wetenschappelijk

Een nieuwe medische beeldvormende techniek die in de afgelopen 10 jaar is ontwikkeld is 'magnetic particle imaging'. Hierbij wordt de locatie en concentratie in het lichaam van tracers die zijn gelabeld met superparamagnetische ijzeroxidedeeltjes bepaald. Een sinusoïde magnetisch wisselveld (5 tot 50 kHz) veroorzaakt een regelmatige variatie in het magnetisch moment van de deeltjes, waardoor een nieuw magnetisch wisselveld wordt opgewekt dat een stroom opwekt in de omringende metalen spoelen (detector). De lokalisatie van het signaal wordt net als bij MRI bepaald door het extra aanbrengen van een in de ruimte variërend statisch magnetisch veld. Omdat met deze techniek alleen de tracer zichtbaar is, kan zij in combinatie met MRI of CT worden toegepast om ook het omringende weefsel in beeld te brengen. Voordelen ten opzichte van functionele MRI, PET en ultrasound zijn dat er geen storing door luchtholten optreedt, het signaal niet vervalt met de tijd en de tracer niet toxisch is (Zhou et al. 2018, Saritas et al. 2013). De techniek is vooral getest op proefdieren, maar kan in de toekomst bij de mens worden toegepast. Omdat deze apparatuur magnetische velden gebruikt die sterker zijn dan de actieniveaus voor zenuwstimulatie, zijn er potentieel risico's voor werknemers die handelingen dichtbij de patiënt of het proefdier verrichten (Billings et al. 2021, Dössel en Bohnert 2013, Tay et al. 2020).

Een andere diagnostische techniek in opkomst is het gebruik van radar (frequenties 1 tot 15 GHz) voor het monitoren van vitale functies en voor beeldvorming van oppervlakkige organen, zoals borstweefsel

(Mahmud et al. 2018). Potentiële voordelen ervan zijn de kleinere, goedkopere en minder beperkende (comfort, risico's) apparatuur die er voor nodig is. Van deze radartechnieken is al in 2015 door het RIVM vastgesteld dat de blootstelling van patiënten, en dus ook eventuele blootstelling van medisch personeel in hun omgeving, lager is dan de referentieniveaus voor de algemene bevolking en dus ook lager dan de actieniveaus voor werknemers (de Waard-Schalkx et al. 2015).

In de afgelopen 10 jaar zijn nieuwe behandelingen met EMV voor cosmetische toepassingen in opkomst, waarbij potentieel blootstelling van werknemers (behandelaars) kan optreden. Gepulseerde laagfrequente magnetische velden (frequentie 15 Hz) worden gebruikt voor de behandeling van slappe huid of rimpels. De sterkte ter plaatse van de behandelde cliënt kan hoger zijn dan de actieniveaus. Laagfrequente gepulseerde velden met frequenties tussen 4 en 1700 Hz worden ook gebruikt voor alternatieve behandeling van pijn, gewrichts- en ademhalingsklachten en 'wellness', maar de sterkte ter plaatse van de cliënt is daarbij lager dan de actieniveaus (Strahlenschutzkommission 2019a). Radiofrequente EMV met diathermie-frequentie (27 MHz) worden inmiddels ook toegepast voor vetreductie. Microgolven (5,8 GHz), die oorspronkelijk werden toegepast bij behandeling van overmatig zweeten, worden inmiddels ook gebruikt voor ontharing. Omdat beide soorten radiofrequente EMF tot opwarming van het lichaam van de cliënt leiden, is het mogelijk dat voor werknemers in de buurt van de cliënt de sterkte hoger is dan de actieniveaus (ICNIRP 2020b).

Nieuwe toepassingen van EMV in de tandheelkunde in de afgelopen 10 jaar zijn het gebruik van statische velden van permanente magneten als steun bij gebitsreconstructie en (gepuleerde) laagfrequente velden bij het stimuleren van botgroei rond breuken en protheses (Qi et al. 2021). De verwachting is dat door de zeer lokale toepassing de blootstelling van werknemers lager dan de actieniveaus zal zijn, maar publicaties met specifieke metingen die dit kunnen bevestigen, zijn niet gevonden.

MRI voor medische diagnostiek en wetenschappelijk onderzoek met statische magnetische velden van 7 T en 9.4 T was 10 jaar geleden al beschikbaar gekomen en inmiddels zijn er wereldwijd nog steeds minder dan 100 van deze scanners in gebruik (Cosottini en Roccatagliata 2021). Deze 'ultra-high field' MRI biedt voordelen ten opzichte van zwakkere scanners (hogere resolutie en signaal-ruisverhouding) maar ook nadelen (beeldartefacten, sterkere effecten op de zintuigen, ontstaan van 'hot spots' bij de hogere radiofrequenties die met de sterkere statische velden worden gebruikt) (Ladd et al. 2018). Er zijn in de afgelopen 10 jaar geen nog sterkere magneten in gebruik genomen voor medische toepassingen. Er wordt de komende jaren, ook in Nederland, wel gewerkt aan de ontwikkeling van MRI-systemen met statische magnetische velden van 11,7 T en 14 T, die in eerste instantie alleen voor wetenschappelijk onderzoek zullen worden gebruikt. Die brengen potentieel hogere risico's met zich mee voor opwarming, prikkeling van zintuigen en zenuwen, effecten op de bloedsomloop en indirecte effecten (NWO 2021a, Budinger en Bird 2018, Quettier et al. 2020). Aan de andere kant zijn MRI-scanners met statische magnetische velden van 0,5 T en lager, waarbij gezondheidseffecten en effecten op de zintuigen niet voorkomen, inmiddels weer aantrekkelijker geworden. De slechtere

signaal-ruisverhouding en inhomogeniteiten van MRI met zwakkere magneten zijn door verbeteringen in beeldreconstructie en 'machine learning' namelijk aanzienlijk verbeterd. Laagveldmagnetten hebben als voordelen lagere kosten, afwezigheid van koeling, laag energiegebruik en een open spoel die toegankelijker is voor interventies en ook in verticale positie kan worden gebruikt, b.v. bij onderzoek van het bewegingsapparaat (Klein 2020, Marques et al. 2019).

Voor wetenschappelijk onderzoek naar eigenschappen van materialen of biologische monsters worden steeds sterkere elektromagnetten ontwikkeld (Sun et al. 2012). In het algemeen zijn deze installaties afgeschermd van de buitenwereld. Het statisch magnetisch strooiveld van de sterkste van deze onderzoeksmagnetten, in de Verenigde Staten (45 T), is op 1 meter afstand 1,5 T, dat wil zeggen lager dan de grenswaarde voor effecten op de zintuigen (2 T). De afstand waarbinnen het actieniveau van 0,5 mT voor actieve medische hulpmiddelen wordt overschreden ligt rond de 10 meter (National High Magnetic Field Laboratory 2021). In Nederland heeft het High Field Magnet Laboratory van de Radboud Universiteit afgesloten systemen die statische magnetische velden tot 38 T kunnen opwekken (Radboud University 2021, Wijnen et al. 2016). Een 45 T-systeem is in aanbouw (Den Ouden et al. 2016). Voor spectroscopisch onderzoek (ook wel 'NMR' genoemd) is bij de Universiteit Utrecht een 28 T-systeem in aanbouw (NWO 2021b). Er worden echter ook goedkopere tafelmodel NMR-apparaten ontwikkeld die juist met zwakkere magnetten kunnen werken (Grootveld et al. 2019).

4 Discussie

De niet-bindende gids van de Europese Commissie (2015) bevat een overzicht van werkomgevingen waarin een beoordeling van de risico's van EMV nodig is. Nieuwe technologische en maatschappelijke ontwikkelingen in de afgelopen 10 jaar kunnen leiden tot verandering in de aard, hoogte, complexiteit of diversiteit van de blootstelling van werknemers aan EMV in arbeidssituaties. In dit briefrapport wordt per categorie werkomgeving samengevat welke nieuwe ontwikkelingen zijn gevonden. Bij een toekomstige herziening van de niet-bindende gids en daarvan afgeleide nationale richtsnoeren kan aan deze nieuwe of gewijzigde situaties aandacht worden besteed. Daarbij zal naar verwachting rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat de EU-richtlijn in de toekomst ook kan worden aangepast aan de actuele stand van zaken op het gebied van de risico's van EMV en de beschermingsmaatregelen daartegen.

Bij het eventuele actualiseren van de EU-richtlijn en het ontwikkelen van geschikte beoordelingsmethoden kan in de toekomst rekening worden gehouden met de meest recente ICNIRP aanbevelingen, die ook geschikt zijn voor nieuwere EMV-bronnen met hogere frequenties, korte pulsen en complexe blootstellingspatronen zoals die van 5G-systemen (ICNIRP 2020a). Mogelijk moeten dan ook oudere toepassingen met kortdurende, gepulseerde blootstelling, zoals beveiligingspoortjes in winkels en luchthavens, opnieuw worden beoordeeld. In principe zouden nieuwe (Europese) technische normen kunnen helpen bij de beoordeling van de nieuwere vormen van blootstelling en risico's. Een praktisch probleem daarbij is echter dat die worden ontwikkeld met vertegenwoordigers van de industrie en vaak gericht zijn op één categorie product of apparaat en daardoor onvoldoende rekening houden met realistische, complexe blootstellingspatronen van meerdere bronnen op de werkvloer. Meer aandacht voor zulke realistische blootstellingsscenario's in deze normen zou daarom nuttig kunnen zijn.

Door de toename in de diversiteit en complexiteit van de bronnen van EMV op de werkplek en de toename in het aantal dragers van actieve medische hulpmiddelen in de laatste 10 jaar (Mattei et al. 2021) blijft ook in de toekomst bijzondere aandacht nodig voor werknemers die drager zijn van deze hulpmiddelen. Dit geldt ook in situaties waarin de sterkte van EMV lager is dan de actieniveaus in de EU-richtlijn. Het is raadzaam om richtsnoeren met overzichten van bronnen waarbij risico's voor dragers van medische hulpmiddelen kunnen optreden af te stemmen op actuele informatie over nieuwe of gewijzigde bronnen van EMV.

Referenties

- 5GRAIL (2021) Bringing worldwide 5G standard for railway operational communications [Online]. Available: <https://5grail.eu/> [Accessed 16 December 2021].
- Alem, S. A. A., Latifi, R., Angizi, S., Hassanaghaei, F., Aghaahmadi, M., Ghasali, E. & Rajabi, M. (2020) Microwave sintering of ceramic reinforced metal matrix composites and their properties: a review. *Mater Manuf Process*, 35, 303-327.
- ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) (2012) Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation du scanner corporel à ondes « millimétriques » Eqo. Maisons-Alfort: ANSES.
- Bianchi, R., Verboon, T. & van Klink, L. (2020) Update gelijkspanning. Utrecht: Berenschot.
- Billings, C., Langley, M., Warrington, G., Mashali, F. & Johnson, J. A. (2021) Magnetic Particle Imaging: Current and Future Applications, Magnetic Nanoparticle Synthesis Methods and Safety Measures. *Int J Mol Sci*, 22.
- Bouldi, M., Demaret, P., & Fleury, G. (2016) Workers exposition near electromagnetic forming process: an experimental and simulation study. In: *BioEM 2016, Ghent, Belgium, 5-10 June 2016: abstract collection - complete collection*. New York: Curran Associates, 547-551.
- Budinger, T. F. & Bird, M. D. (2018) MRI and MRS of the human brain at magnetic fields of 14T to 20T: Technical feasibility, safety, and neuroscience horizons. *Neuroimage*, 168, 509-531.
- Cadwallader, L. C. (2019) Personnel safety at magnetic fusion experiments. *IEEE T Plasma Sci*, 47, 869-873.
- CEPT (2021) ERC recommendation 70-03 relating to the use of short range devices (SRD). Copenhagen: CEPT.
- Chandrasekar, P. & Dutta, A. (2021) Recent Developments in Near Field Communication: A Study. *Wireless Pers Commun*, 116, 2913-2932.
- China Electric Power Research Institute (2017) UHV Transmission Technology. London: Academic Press.
- Concha Moreno-Torres, P., Lourd, J., Lafoz, M. & Arribas, J. R. (2013) Evaluation of the magnetic field generated by the inverter of an electric vehicle. *IEEE T Magn*, 49, 837-844.
- Cosottini, M. & Roccatagliata, L. (2021) Neuroimaging at 7 T: are we ready for clinical transition? *Eur Radiol Exp*, 5, 37.

de Waard-Schalkx, I., Stam, R., van der Schaaf, M. & Bijwaard, H. (2015) Recent developments in medical techniques involving ionising or non-ionising radiation: update 2014. RIVM Report 2014-0070, Bilthoven, National Institute for Public Health and the Environment.

Den Ouden, A., Wulffers, C. A., Hussey, N. E., Laureijs, G., Wijnen, F. J. P., Wulterkens, G. F. A. J., Bird, M. D., Dixon, I. R. & Perenboom, J. A. A. J. (2016) Progress in the Development of the HFML 45 T Hybrid Magnet. *IEEE T Appl Supercon*, 26.

DIFFER (2021) Magnum PSI [Online]. Available: <https://www.differ.nl/research/fusion-facilities-and-instrumentation/magnum-psi> [Accessed 16 December 2021].

Dössel, O. & Bohnert, J. (2013) Safety considerations for magnetic fields of 10 mT to 100 mT amplitude in the frequency range of 10 kHz to 100 kHz for magnetic particle imaging. *Biomed T*, 58, 611-621.

Dürrenberger, G., Fröhlich, J. & Leuchtmann, P. (2014) Wireless Power Transfer für Elektrofahrzeuge. Bern: Bundesamt für Umwelt.

European Commission (2019) Study on using millimetre waves bands for the deployment of the 5G ecosystem in the Union. Brussels: European Commission.

Europees Parlement en Raad (2013) Richtlijn 2013/35/EU van het Europees Parlement en de Raad van 26 juni 2013 betreffende de minimumvoorschriften inzake gezondheid en veiligheid met betrekking tot de blootstelling van werknemers aan de risico's van fysieke agentia (elektromagnetische velden). Publicatieblad van de Europese Unie, L179, 1-21.

Europese Commissie (2015a) Niet-bindende gids van goede praktijken voor de tenuitvoerlegging van Richtlijn 2013/35/EU Elektromagnetische velden. Deel 1: Praktische gids. Brussel: Europese Commissie.

Europese Commissie (2015b) Niet-bindende gids van goede praktijken voor de tenuitvoerlegging van Richtlijn 2013/35/EU Elektromagnetische velden. Deel 2: Praktijkvoorbeelden. Brussel: Europese Commissie.

Garcés-Pineda, F. A., Blasco-Ahicart, M., Nieto-Castro, D., López, N. & Galán-Mascarós, J. R. (2019) Direct magnetic enhancement of electrocatalytic water oxidation in alkaline media. *Nat Energy*, 4, 519-525.

Grootveld, M., Percival, B., Gibson, M., Osman, Y., Edgar, M., Molinari, M., Mather, M. L., Casanova, F. & Wilson, P. B. (2019) Progress in low-field benchtop NMR spectroscopy in chemical and biochemical analysis. *Anal Chim Acta*, 1067, 11-30.

Guo, F., Dong, Y., Tian, B., Du, S., Liang, S., Zhou, N., Wang, Y., Chen, P. & Ruan, R. (2020) Applications of microwave energy in gas production and tar removal during biomass gasification. *Sustain Energy Fuels*, 4, 5927-5946.

Heavy Duty Trucking (2021) DOE Project to develop Class 8 Wireless Charging System [Online]. Available: <https://www.truckinginfo.com/10153091/doe-project-aims-to-develop-class-8-wireless-charging-system> [Accessed 16 December 2021].

Hirtl, R., Bodewein, L., Schmiedchen, K., Dechent, D., Stunder, D., Gräfrath, D., Winter, L., Kraus, T., Driessen, S. & Schmid, G. (2018) Exposition und Wirkungen der elektromagnetischen Felder neuartiger Technologien im Zwischenfrequenzbereich. Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz.

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation) (2020a) Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys*, 118, 483-524.

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation) (2020b) Intended Human Exposure to Non-ionizing Radiation for Cosmetic Purposes. *Health Phys*, 118, 562-579.

Jawad, H. M., Nordin, R., Gharghan, S. K., Jawad, A. M. & Ismail, M. (2017) Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. *Sensors (Basel)*, 17.

JOIN'EM (2018) Deliverable D7.5 Standardisation recommendation document. Brussels: European Commission.

Kang, S. G., Song, M. S., Kim, J. W., Lee, J. W. & Kim, J. (2021) Near-field communication in biomedical applications. *Sensors (Switzerland)*, 21, 1-18.

Kapil, A. & Sharma, A. (2015) Magnetic pulse welding: An efficient and environmentally friendly multi-material joining technique. *J Clean Prod*, 100, 35-58.

Karanikas, N., Steele, S., Bruschi, K., Robertson, C., Kass, J., Popovich, A. & MacFadyen, C. (2021) Occupational health hazards and risks in the wind industry. *Energ Rep*, 7, 3750-3759.

Klaus, G. (2013) Literaturrecherche zu den Emissionen von nichtionisierender Strahlung von Photovoltaikanlagen. Bern: Bundesamt für Umwelt.

Klein, H. M. (2020) Low-Field Magnetic Resonance Imaging. *Rofo*, 192, 537-548.

Ladd, M. E., Bachert, P., Meyerspeer, M., Moser, E., Nagel, A. M., Norris, D. G., Schmitter, S., Speck, O., Straub, S. & Zaiss, M. (2018) Pros and cons of ultra-high-field MRI/MRS for human application. *Prog Nucl Magn Reson Spectrosc*, 109, 1-50.

Lucia, O., Maussion, P., Dede, E. J. & Burdío, J. M. (2014) Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges. *IEEE T Ind Electron*, 61, 2509-2520.

Mahmud, M. Z., Islam, M. T., Misran, N., Almutairi, A. F. & Cho, M. (2018) Ultra-Wideband (UWB) Antenna Sensor Based Microwave Breast Imaging: A Review. *Sensors (Basel)*, 18.

Marques, J. P., Simonis, F. F. J. & Webb, A. G. (2019) Low-field MRI: An MR physics perspective. *J Magn Reson Imaging*, 49, 1528-1542.

Mattei, E., Censi, F., Calcagnini, G. & Falsaperla, R. (2021) Workers with cardiac aimed exposed to emf: Methods and case studies for risk analysis in the framework of the european regulations. *Int J Environ Res Pu*, 18.

Melton, G. & Shaw, R. (2014) *Electromagnetic fields (EMF) in the welding environment*. Norwich: Health and Safety Executive.

National Academies of Sciences, E., and Medicine (2021) *The Future of Electric Power in the United States*. Washington, DC: National Academies Press.

National High Magnetic Field Laboratory (2021) 45 Tesla, 32 mm Bore Hybrid Magnet (Cell 15) [Online]. Available: <https://nationalmaglab.org/user-facilities/dc-field/instruments-dcfield/hybrid-magnets/45-tesla-2> [Accessed 16 December 2021].

Nkwari, P. K. M., Sinha, S. & Ferreira, H. C. (2018) Through-the-Wall Radar Imaging: A Review. *IETE Tech Rev*, 35, 631-639.

NWO (2021a) DYNAMIC. Dutch National 14 Tesla Initiative in MRI and Cognition [Online]. Available: <https://onderzoeksfaciliteiten.nl/node/3911> [Accessed 16 December 2021].

NWO (2021b) uNMR-NL [Online]. Available: <https://onderzoeksfaciliteiten.nl/node/3896> [Accessed 16 December 2021].

Poguntke, T., Schumann, P. & Ochs, K. (2017) Radar-based living object protection for inductive charging of electric vehicles using two-dimensional signal processing. *Wirel Power Transf*, 4, 88-97.

Qi, Y., Zhang, S., Zhang, M., Zhou, Z., Zhang, X., Li, W., Cai, H., Zhao, B. C., Lee, E. S. & Jiang, H. B. (2021) Effects of Physical Stimulation in the Field of Oral Health. *Scanning*, 2021, 5517567.

Quettier, L., Aubert, G., Belorgey, J., Berriaud, C., Bredy, P., Dilasser, G., Dubois, O., Gilgrass, G., Guihard, Q., Jannot, V., Juster, F. P., Lannou, H., Molinie, F., Nunio, F., Roger, A., Schild, T., Scola, L., Sinanna, A., Stepanov, V. & Vedrine, P. (2020) Commissioning Completion of the Iseult Whole Body 11.7 T MRI System. *IEEE T Appl Supercon*, 30.

Radboud University (2021) High Field Magnet Laboratory (HFML). Magnet specifications. [Online]. Available: <https://www.ru.nl/hfml/our-facility/magnet-specifications/#c2> [Accessed 16 December 2021].

Rahman, S., Khan, I., Alkhamash, H. I. & Nadeem, M. F. (2021) A comparison review transmission mode for onshore integration of offshore wind farms: HVDC or HVAC—A comparison review. *Electronics (Switzerland)*, 10.

Rekena, A., Didrihsone, E. & Vegere, K. (2019) The role of magnetic field in the biopharmaceutical production: Current perspectives. *Biotechnol Rep (Amst)*, 22, e00334.

Saritas, E. U., Goodwill, P. W., Croft, L. R., Konkle, J. J., Lu, K., Zheng, B. & Conolly, S. M. (2013) Magnetic particle imaging (MPI) for NMR and MRI researchers. *J Magn Reson*, 229, 116-26.

Schirmer, C., Maschke, R. W., Pörtner, R. & Eibl, D. (2021) An overview of drive systems and sealing types in stirred bioreactors used in biotechnological processes. *Appl Microbiol Biotechnol*, 105, 2225-2242.

Smith, Y. R., Nagel, J. R. & Rajamani, R. K. (2019) Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review. *Miner Eng*, 133, 149-159.

Song, M., Belov, P. & Kapitanova, P. (2017) Wireless power transfer inspired by the modern trends in electromagnetics. *Appl Phys Rev*, 4.

Stam, R. (2014) The revised electromagnetic fields directive and worker exposure in environments with high magnetic flux densities. *Ann Occup Hyg*, 58, 529-41.

Stam, R. (2021) Occupational exposure to radiofrequency electromagnetic fields. *Ind Health*, 60, 201-215.

Stam, R., Bolte, J. F. B., Pruppers, M. J. M. (2016) Elektromagnetische velden in arbeidssituaties. Beknopte gids voor de Nederlandse situatie. Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid, Den Haag.

Stam, R., Bolte, J. F. B., Pruppers, M. J. M., Robijns, J. J., Kamer, J. & Colussi, L. C. (2019) Verkenning van de blootstelling aan elektromagnetische velden afkomstig van 5G-systemen. Small cells en massive MIMO. Bilthoven & Groningen: RIVM & Agentschap Telecom.

Stankevic, V., Lueg-Altho, J., Hahn, M., Erman Tekkaya, A., Zurauskiene, N., Dilys, J., Klimantavicius, J., Kersulis, S., Simkevicius, C. & Balevicius, S. (2020) Magnetic field measurements during magnetic pulse welding using cmr-b-scalar sensors. *Sensors (Switzerland)*, 20, 1-14.

Strahlenschutzkommission (2019a) Anwendungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder (EMF) zu nichtmedizinischen Zwecken am Menschen. Bonn: Strahlenschutzkommission.

Strahlenschutzkommission (2019b) Elektromagnetische Felder im Automobil durch Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren. Bonn: Strahlenschutzkommission.

- Sun, Z. H. I., Guo, M., Vleugels, J., Van Der Biest, O. & Blanpain, B. (2012) Strong static magnetic field processing of metallic materials: A review. *Curr Opin Solid State Mater Sci*, 16, 254-267.
- Svertoka, E., Saafi, S., Rusu-Casandra, A., Burget, R., Marghescu, I., Hosek, J. & Ometov, A. (2021) Wearables for Industrial Work Safety: A Survey. *Sensors (Basel)*, 21
- Tanaka, M., Seki, T., Wang, J., Kamimura, Y., Uda, T. & Fujiwara, O. (2021) A New Wide-Area Monitoring System of Electromagnetic Fields around Megawatt-Class Amplifiers for Ion Cyclotron Range of Frequency Heating at a Fusion Test Facility. *IEEE T Plasma Sci*, 49, 1475-1483.
- Tay, Z. W., Hensley, D. W., Chandrasekharan, P., Zheng, B. & Conolly, S. M. (2020) Optimization of Drive Parameters for Resolution, Sensitivity and Safety in Magnetic Particle Imaging. *IEEE T Med Imaging*, 39, 1724-1734
- Tell, R. A., Hooper, H. C., Sias, G. G., Mezei, G., Hung, P. & Kavet, R. (2015) Electromagnetic Fields Associated with Commercial Solar Photovoltaic Electric Power Generating Facilities. *J Occup Environ Hyg*, 12, 795-803.
- TNO (2020) Monitor draadloze technologie. Najaar 2020. Den Haag: TNO.
- Trevisan, R. & Costanzo, A. (2014) State-of-the-art of contactless energy transfer (CET) systems: Design rules and applications. *Wirel Power Transf*, 1, 10-20.
- Triviño, A., González-González, J. M. & Aguado, J. A. (2021) Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: A review. *Energies*, 14.
- Trzepieciński, T. (2020) Recent developments and trends in sheet metal forming. *Metals*, 10, 1-53.
- Uda, T., Tanaka, M., Deji, S., Wang, J. & Fujiwara, O. (2012) Electromagnetic fields measurement and safety consideration in magnetic confinement fusion test facilities. *Plasma Fusion Res*, 7.
- Verlinde, W. & Kempeneers, J. (2019) Wordt het een lasrobot, of toch een lascobot? *Lastechniek*, juli, 20-22.
- Wijnen, F. J. P., Wiegers, S. A. J., Van Velsen, J. M. H., Rook, J., Den Ouden, A., Perenboom, J. A. A. J. & Hussey, N. E. (2016) Construction and Performance of a 38-T Resistive Magnet at the Nijmegen High Field Magnet Laboratory. *IEEE T App Supercony*, 26.
- Yeong, J., Velasco-Hernandez, G., Barry, J. & Walsh, J. (2021) Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review. *Sensors (Basel)*, 21.

Zhang, Y., Yang, J., Jiang, D., Li, D. & Qu, R. (2021) Design, manufacture, and Test of a Rotary Transformer for Contactless Power Transfer System. IEEE T Magn (in press).

Zhao, J., Wu, Z. J., Li, N. L. & Yang, T. (2020) Study on safe distance between human body and wireless charging system of electric vehicles with different power and frequencies. Electr Eng, 102, 2281-2293.

Zhou, T., Yang, M., Jiang, K., Wong, H. & Yang, D. (2020) MMW Radar-Based Technologies in Autonomous Driving: A Review. Sensors (Basel), 20.

Zhou, X. Y., Tay, Z. W., Chandrasekharan, P., Yu, E. Y., Hensley, D. W., Orendorff, R., Jeffris, K. E., Mai, D., Zheng, B., Goodwill, P. W. & Conolly, S. M. (2018) Magnetic particle imaging for radiation-free, sensitive and high-contrast vascular imaging and cell tracking. Curr Opin Chem Biol, 45, 131-138.

Bijlage 1 Zoekmethoden literatuur

1. Pubmed

(magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR "radio frequ*" OR radiofrequ* OR rf OR microwave* OR "millimeter wave*" OR "millimetre wave*" OR "mm wave*" OR radar* OR "low frequ*" OR If OR elf OR "non ioni*" OR nonioni*) AND (field* OR radiat* OR wave*) AND (worker* OR occupation* OR workplace OR employ* OR working OR "work floor") AND (new OR latest OR recent OR future OR modern OR contemporary OR advanced OR "state-of-the-art") NOT (optical OR ultraviolet OR uv OR infrared OR light OR ultrasound)

[time range: last 10 years, extended to 1-1-2011; article type: review, systematic review, meta-analysis; language: English]

2. Scopus

(magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR "radio frequ*" OR radiofrequ* OR rf OR microwave* OR "millimeter wave*" OR "millimetre wave*" OR "mm wave*" OR radar* OR "low frequ*" OR If OR elf OR "non ioni*" OR nonioni*) AND (field* OR radiat* OR wave*) AND (worker* OR occupation* OR workplace OR employ* OR working OR "work floor") AND (new OR latest OR "recent" OR future OR modern OR contemporary OR advanced OR "state-of-the-art") AND NOT (optical OR ultraviolet OR uv OR infrared OR light OR ultrasound)

[title/abstract/keywords; time range: last 10 years, extended to 1-1-2011; article type: review; language: English]

3. Grijze literatuur

a. *Open Grey* (<http://www.opengrey.eu>)

(magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR "radio frequ*" OR radiofrequ* OR rf OR microwave* OR "millimeter wave*" OR "millimetre wave*" OR "mm wave*" OR radar* OR "low frequ*" OR If OR elf OR "non ioni*" OR nonioni*) AND (field* OR radiat* OR wave*) AND (worker* OR occupation* OR workplace OR employ* OR working OR "work floor") AND (new OR latest OR recent OR future OR modern OR contemporary OR advanced OR "state-of-the-art")

(magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR "radio frequ*" OR radiofrequ* OR rf OR microwave* OR "millimeter wave*" OR "millimetre wave*" OR "mm wave*" OR radar* OR "low frequ*" OR If OR elf OR "non ioni*" OR nonioni*) AND (field* OR radiat* OR wave*) AND (worker* OR occupation* OR workplace OR employ* OR working OR "work floor")

(magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR "radio frequ*" OR radiofrequ* OR rf OR microwave* OR "millimeter wave*" OR "millimetre wave*" OR "mm wave*" OR radar* OR "low frequ*" OR If OR elf OR "non ioni*" OR nonioni*) AND (field* OR radiat* OR wave*) AND (new OR latest OR recent OR future OR modern OR contemporary OR advanced OR "state-of-the-art")

b. National Technical Information Service (<https://ntrl.ntis.gov/NTRL/>)
[title/keyword] (magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR "radio frequ*" OR radiofrequ* OR rf OR microwave* OR "millimeter wave*" OR "millimetre wave*" OR "mm wave*" OR radar* OR "low frequ*" OR lf OR elf OR "non ioni*" OR nonioni*) AND (field* OR radiat* OR wave*) AND (worker* OR occupation* OR workplace OR employ* OR working OR "work floor") [pubyear 2011-2021]

[title/keyword] (magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR "radio frequ*" OR radiofrequ* OR rf OR microwave* OR "millimeter wave*" OR "millimetre wave*" OR "mm wave*" OR radar* OR "low frequ*" OR lf OR elf OR "non ioni*" OR nonioni*) AND (field* OR radiat* OR wave*) AND (new OR latest OR recent OR future OR modern OR contemporary OR advanced OR "state-of-the-art") [pubyear 2011-2021]

c. Google (<http://www.google.co.uk/>)
(magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR "radio frequency" OR radiofrequency OR rf OR microwave OR "millimeter wave" OR "millimetre wave" OR "mm wave" OR radar OR "low frequency" OR lf OR elf) AND (field OR radiation OR wave) AND (worker OR occupation OR workplace OR employee OR working OR "work floor") [1 Jan 2011 - Today]

(magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR "radio frequency" OR radiofrequency OR rf OR microwave OR "millimeter wave" OR "millimetre wave" OR "mm wave" OR radar OR "low frequency" OR lf OR elf) AND (new OR latest OR recent OR future OR modern OR contemporary OR advanced OR "state-of-the-art") [1 Jan 2011 - Today]

Bijlage 2 Geraadpleegde deskundigen

De auteur bedankt de volgende geraadpleegde deskundigen voor hun suggesties en inzichten over nieuwe technologieën, bronnen en blootstelling in arbeidssituaties. RIVM is verantwoordelijk voor de uiteindelijke informatie in dit briefrapport.

Dr. John Bolte, Lector Smart Sensor Systems, Haagse Hogeschool, Delft.

Ing. Lucien Hammen, Laboratoire Electromagnetisme, Vibration & Optique, Département Ingénierie des Equipements de Travail, Institut National de Sécurité et Santé au Travail (INRS), Paris.

Dr. Peter Jeschke, scientific consultant, Physical Agents Group, Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA), Dortmund.

Ing. Leo Lagendijk, Principal consultant, DNV, Arnhem.

Prof.dr.ir. Frank Leferink, Chair for EMC, Dept. Electrical Engineering, University of Twente, Enschede / Director EMC, Thales Nederland B.V., Hengelo.

Dr. Klaus Schiessl, investigator and accident prevention specialist, expert group on physics for safety at the workplace, Austrian Workers' Compensation Board (AUVA), Vienna.

Ing. Leo Vermeulen, Senior lastechnisch adviseur, Nederlands Instituut voor Lastechniek, Zoetermeer.

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag