
Radiofrequente elektromagnetische velden (300 Hz - 300 GHz)

Radiofrequency electromagnetic fields (300 Hz - 300 GHz)



Aan de Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport
Postbus 5406
2280 HK RIJSWIJK

Onderwerp : aanbieding advies
Uw kenmerk : -
Ons kenmerk : U-319/EvR/RA/358-K
Bijlagen : 1
Datum : 28 januari 1997

In 1975 deed de Gezondheidsraad aanbevelingen met betrekking tot blootstelling aan radiofrequente elektromagnetische velden. Sedertdien hebben wetenschappelijke ontwikkelingen die aanbevelingen achterhaald. Daarom heeft de voorzitter van de Raad een op 15 februari 1995 door hem ingestelde commissie opgedragen de wetenschappelijke stand van zaken op dit gebied te inventariseren en nieuwe aanbevelingen voor maximaal aanvaardbare blootstelling aan dergelijke velden te doen. Het resultaat van de beraadslagingen van de commissie bied ik u - gehoord de Beraadsgroep Stralingshygiëne - hierbij aan in de vorm van een advies met als titel *Radiofrequente elektromagnetische velden (300 Hz - 300 GHz)*.

Er zijn twee punten waarvoor ik bijzondere aandacht wil vragen.

De aanbevelingen van de commissie - die ik onderschrijf - zijn voor frequenties hoger dan 10 MHz gebaseerd op thermische effecten. Er zijn in de literatuur ook niet-thermische effecten gerapporteerd, zoals directe schade aan het erfelijk materiaal. De commissie geeft echter aan dat de resultaten van deze onderzoeken niet voldoende betrouwbaar zijn om daarop blootstellingslimieten te kunnen baseren. Zij deelt wat dit betreft de opvatting van de internationale wetenschappelijke gemeenschap. Er vindt thans nader onderzoek plaats naar deze effecten en hun betekenis voor de gezondheid. Mochten de resultaten van dat onderzoek daartoe aanleiding geven, dan zal de Gezondheidsraad zijn huidige aanbevelingen opnieuw in overweging nemen.

De commissie signaleert een discrepantie tussen haar aanbevelingen en die van de commissie die het Gezondheidsraadadvies *Optische straling* (publicatie nr 1993/09) opstelde. Deze laatste heeft, voor het frequentiegebied dat aan de onderzijde grenst aan het in het voorliggende advies beschouwde (de scheiding ligt bij 300 GHz), maximale blootstellingswaarden aanbevolen die een factor tien hoger liggen dan de thans voorgestelde. Omdat ook enkele Amerikaanse organisaties maximale blootstellingswaarden



Onderwerp : aanbieding advies
Ons kenmerk : U-319/EvR/RA/358-K
Pagina : 2
Datum : 28 januari 1997

voor het frequentiegebied boven 300 GHz aanbevelen die een factor tien lager liggen dan die uit het advies *Optische straling*, is voor dit frequentiegebied nadere studie over dit onderwerp gewenst. Ik ben voornemens die studie binnenkort te laten uitvoeren.



prof. dr JA Knottnerus

Radiofrequente elektromagnetische velden (300 Hz - 300 GHz)

Gezondheidsraad: Commissie Radiofrequente straling

aan:

de Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport

de Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer

de Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid

de Minister van Verkeer en Waterstaat

Nr. 1997/01, Rijswijk, 28 januari 1997

Tweede, herziene, druk.

Deze publicatie kan als volgt worden aangehaald:

Gezondheidsraad. Commissie Radiofrequente straling. Radiofrequente elektromagnetische velden (300 Hz - 300 GHz). Rijswijk: Gezondheidsraad, 1997; publicatie nr. 1997/01.

auteursrecht voorbehouden

ISBN: 90-5549-151-9

Inhoud

Samenvatting, conclusies en aanbevelingen *11*

1 Inleiding *17*

1.1 Eerdere adviezen *17*

1.2 De commissie en haar taak *18*

1.3 Opzet van dit advies *19*

2 Algemeen *21*

2.1 Definities, bronnen *21*

2.2 Meten en berekenen van EM velden *25*

2.3 Berekening van de SAR in het menselijk lichaam *26*

2.4 Blootstellingsniveaus *26*

2.5 Biologische mechanismen *27*

2.6 Experimenteel onderzoek naar de biologische effecten van EM velden *34*

2.7 Epidemiologisch onderzoek *43*

2.8 Specifieke risicogroepen *49*

3 Basisbeperkingen: huidige aanbevelingen *53*

3.1 Stroomdichtheid *54*

3.2 SAR *54*

3.3 Aanbevelingen van verschillende organisaties *56*

3.4 Huidige situatie in Nederland *59*

4	Conclusies en voorgestelde gezondheidskundige advieswaarden	61
4.1	Thermische en niet-thermische effecten	61
4.2	Onderscheid tussen bevolkingsgroepen of gebieden	62
4.3	Afleiding van richtlijnen: basisbeperkingen	62
4.4	Afgeleide eenheden: maximale blootstellingswaarden	64
4.5	Blootstelling van delen van het lichaam	69
4.6	Kortdurende blootstelling	69
4.7	Blootstelling aan verscheidene frequenties tegelijk	70
4.8	Gepulste EM velden	70
4.9	Contactstroom	71
4.10	Specifieke toepassingen	72

Literatuur 173

Lijst van eenheden 79

	Bijlagen	81
A	De commissie	83
B	Elektromagnetische bronnen en milieus	85
C	Modellen en berekeningen	89
D	Blootstelling in specifieke situaties	95
E	Elektromagnetische interferentie van pacemakers	97

Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

Steeds meer worden mensen blootgesteld aan elektromagnetische velden in het radio-frequente gebied, in dit rapport gedefinieerd als het gebied tussen 300 hertz (Hz) en 300 gigahertz (GHz = 10^9 Hz). Voorbeelden van bronnen zijn radio- en televisiezenders, draagbare telefoons en radarinstallaties. Onder bepaalde omstandigheden kan een dergelijke blootstelling negatieve gevolgen voor de gezondheid hebben. Het in acht nemen van blootstellingslimieten zorgt ervoor dat de kans daarop klein is. In dit advies beveelt een commissie van de Gezondheidsraad limieten aan voor blootstelling onder verschillende omstandigheden. Het is een actualisering van een advies van de Gezondheidsraad uit 1975 over dit onderwerp.

Frequentiegebieden

De werking van elektromagnetische velden op levende organismen verloopt via verschillende mechanismen, afhankelijk van de frequentie van de velden.

In het gebied van de lage frequenties, 300 Hz tot 1 megahertz (MHz = 10^6 Hz), worden elektrische stromen in het lichaam opgewekt. Deze kunnen biologische systemen beïnvloeden. Zij kunnen bijvoorbeeld invloed hebben op de informatieverwerkende processen in het centrale zenuwstelsel. Dit kan tot uitdrukking komen in stimulatie van zenuwen en spieren en in onvrijwillige bewegingen. De relevante dosimetrische eenheid in dit frequentiebereik is de stroomdichtheid, uitgedrukt in ampère per vierkante meter (A/m^2) of milliampère per vierkante meter ($mA/m^2 = 10^{-3} A/m^2$).

In het intermediaire frequentiegebied, 100 kilohertz (kHz = 10^3 Hz) tot 10 GHz, resulteert de absorptie van elektromagnetische energie in de opwekking van warmte. Het vermogen van een organisme om warmte te verdragen is hier de beperkende factor. De dosimetrische eenheid die hierbij hoort is de 'specific absorption rate' (SAR), de opgenomen hoeveelheid energie per massa-eenheid, uitgedrukt in watt per kilogram (W/kg). In het frequentiegebied tussen 100 kHz en 1 MHz vindt een geleidelijke overgang plaats van stroomdichtheid naar SAR als belangrijkste dosimetrische factor. Daarom zijn in dit gebied beide grootheden van toepassing.

In het bovenste frequentiegebied, 10 GHz tot 300 GHz, wordt de energie van de elektromagnetische velden met toenemende frequentie in toenemende mate geabsorbeerd aan het lichaamsoppervlak. Hierdoor vindt opwarming plaats van vooral de huid. Deze opwarming is direct gerelateerd aan de vermogensdichtheid (de 'stralingssterkte') van de elektromagnetische velden. Daarom wordt in dit frequentiegebied de vermogensdichtheid beschouwd als de relevante dosimetrische eenheid. Deze wordt uitgedrukt in watt per vierkante meter (W/m^2).

Basisbeperkingen

De commissie meent dat, om nadelige gevolgen voor de gezondheid te voorkomen, bepaalde niveaus van de stroomdichtheid, de SAR en de vermogensdichtheid niet zouden moeten worden overschreden. Zij gebruikt voor deze gezondheidskundige advieswaarden de benaming 'basisbeperkingen'.

Bij het vaststellen van deze basisbeperkingen maakt de commissie een onderscheid tussen beroeps- en algemene bevolking. De beroepsbevolking definieert zij als die volwassenen die in het kader van de uitoefening van hun beroep blootgesteld kunnen worden aan elektromagnetische velden en die als gevolg van voorlichting ter zake bekend zijn met de daaraan verbonden risico's en met adequate veiligheidsmaatregelen. In het kader van dit advies vallen dus niet alle werkenden onder het begrip beroepsbevolking. Als regel vormt de beroepsbevolking een homogene groep relatief gezonde mensen, terwijl de algemene bevolking ook bestaat uit oudere, jongere, zieke en zwakke personen bij wie het temperatuurreguleringsmechanisme minder goed kan functioneren. Daarom zijn de in dit advies voorgestelde basisbeperkingen voor de algemene bevolking lager dan die voor de beroepsbevolking.

Tabel 1 geeft een samenvatting van de basisbeperkingen die de commissie voorstelt.

Tabel 1 Basisbeperkingen.

frequentiegebied	stroomdichtheid (mA/m ²)		SAR (W/kg) ^a		vermogensdichtheid (W/m ²) ^b	
	beroeps-bevolking	algemene bevolking	beroeps-bevolking	algemene bevolking	beroeps-bevolking	algemene bevolking
300 Hz - 1 kHz	10	2				
1 kHz - 100 kHz	$f/100$ ^c	$f/500$ ^c				
100 kHz - 10 MHz	$f/100$ ^c	$f/500$ ^c	0,4	0,08		
10 MHz - 10 GHz			0,4	0,08		
10 GHz - 300 GHz					100	$6,727 \times f^{0,473}$ ^d

^a middelingstijd = 6 minuten

^b middelingstijd = $68 / f^{1,05}$ minuten (frequentie f in GHz)

^c frequentie f in Hz

^d frequentie f in GHz

Afgeleide blootstellingslimieten

In de praktijk is het niet mogelijk om de SAR of de geïnduceerde stroom in een mens te meten. Daarom stelt de commissie voor om eenvoudiger meetbare grootheden te gebruiken: de veldsterktes van het ongestoorde elektrische en magnetische veld. De limieten voor deze grootheden worden afgeleid van de basisbeperkingen.

Bij het bepalen van de blootstellingslimieten voor het elektrische veld heeft de commissie behalve met de basisbeperkingen ook rekening gehouden met mogelijke indirecte effecten. Deze kunnen het gevolg zijn van contactstromen, die optreden bij aanraking van grote niet-geaarde metalen voorwerpen die opgeladen zijn door het elektrische veld.

De door de commissie voorgestelde blootstellingslimieten voor het elektrische en magnetische veld zijn vermeld in de tabellen 2 en 3.

Blootstelling van delen van het lichaam

De commissie meent dat bij gedeeltelijke blootstelling van het lichaam een hogere energieopname per massa-eenheid toelaatbaar is dan wanneer het gehele lichaam blootgesteld wordt. Zij stelt een maximale SAR van 10 W/kg voor, gemiddeld over 10 gram weefsel, voor blootstelling van het hoofd, de nek en de romp, en een SAR van 20 W/kg gemiddeld over 100 gram weefsel voor blootstelling van ledematen. Deze waarden hebben betrekking op de beroepsbevolking. De overeenkomstige SAR-limieten voor de algemene bevolking zijn respectievelijk 2 en 4 W/kg. Een waarde van 2 W/kg gemiddeld

Tabel 2 Voorgestelde maximale sterktes voor het elektrisch veld.

frequentie	elektrische veldsterkte (volt per meter, V/m)			
	beroepsbevolking		algemene bevolking	
	geen indirecte effecten	indirecte effecten mogelijk		
300 Hz - 2,04 kHz	$1250 / f$	$500 / f$	$250 / f$	(f in kHz)
2,04 kHz - 2,58 kHz	614	$500 / f$	$250 / f$	(f in kHz)
2,58 kHz - 2,88 kHz	614	194	$250 / f$	(f in kHz)
2,88 kHz - 1 MHz	614	194	87	
1 MHz - 10 MHz	$614 / f$	$194 / f^{0,5}$	$87 / f^{0,5}$	(f in MHz)
10 MHz - 400 MHz	61	61	28	
400 MHz - 2 GHz	$118 \times f^{0,72}$	$118 \times f^{0,72}$	$53 \times f^{0,72}$	(f in GHz)
2 GHz - 10 GHz	194	194	87	
10 GHz - 300 GHz	194	194	$78 \times f^{0,16}$	(f in GHz)

over 10 gram weefsel is ook van toepassing op blootstelling van de foetus. Ook voor het bepalen van deze SAR-waarden geldt een middelingstijd van zes minuten.

Kortdurende blootstelling

Bij blootstelling gedurende korte tijd, dat wil zeggen minder dan 6 minuten, zijn hogere SAR-waarden toelaatbaar, zolang de SAR gemiddeld over elke periode van 6 minuten de advieswaarden niet overschrijdt.

Tabel 3 Voorgestelde maximale magnetische fluxdichtheid en magnetische veldsterkte.

frequentie	magnetische fluxdichtheid (microtesla, μ T)		magnetische veldsterkte (ampère per meter, A/m)		
	beroepsbevolking	algemene bevolking	beroepsbevolking	algemene bevolking	
300 Hz - 1,0 kHz	$25 / f$	$5 / f$	$20 / f$	$4 / f$	(f in kHz)
1,0 kHz - 80 kHz	25	5	20	4	
80 kHz - 180 kHz	$2,0 / f$	5	$1,6 / f$	4	(f in MHz)
180 kHz - 10 MHz	$2,0 / f$	$0,92 / f$	$1,6 / f$	$0,73 / f$	(f in MHz)
10 MHz - 400 MHz	0,2	0,09	0,16	0,07	
400 MHz - 2 GHz	$0,39 \times f^{0,73}$	$0,17 \times f^{0,73}$	$0,31 \times f^{0,72}$	$0,14 \times f^{0,74}$	(f in GHz)
2 GHz - 10 GHz	0,65	0,29	0,52	0,23	
10 GHz - 300 GHz	0,65	$0,26 \times f^{0,16}$	0,52	$0,21 \times f^{0,16}$	(f in GHz)

Blootstelling aan meerdere frequenties tegelijk

In de praktijk komt meestal gelijktijdige blootstelling aan elektromagnetische velden met verschillende frequenties voor. De commissie beveelt aan voor het bepalen van de blootstellingslimieten in dergelijke gevallen de vermogensdichtheden of de gekwadrateerde elektrische of magnetische veldsterktes voor de verschillende frequenties, uitgedrukt als fractie van de respectievelijke limietwaarden, op te tellen. De uitkomst van die optelling mag niet meer zijn dan 1.

Gepulste velden

De commissie concludeert dat de effectiviteit van gepulste elektromagnetische velden overeenkomt met die van continue velden. Zij stelt daarom voor blootstelling aan gepulste velden dezelfde limieten voor als voor continue velden.

Contactstroom

De commissie doet de volgende aanbevelingen met betrekking tot maximaal toelaatbare waarden voor contactstroom. Voor frequenties tussen 300 Hz en 2,5 kHz dient een stroomsterkte van 1,0 mA niet overschreden te worden, voor het frequentiegebied van 2,5 kHz tot 100 kHz is de limiet $0,4 \times f$ kHz (f = frequentie in kHz) en voor het gebied tussen 100 kHz en 10 MHz geldt een maximumwaarde van 40 mA. Deze waarden gelden voor de beroepsbevolking. De limieten voor de algemene bevolking zijn een factor 2 lager.

0.1 Het gebruik van draagbare telefoons en enkele andere specifieke blootstellingssituaties

De commissie geeft aan het eind van dit advies een korte beschouwing over de gevolgen van de voorgestelde limieten voor enkele specifieke, frequent voorkomende blootstellingssituaties: het gebruik van draagbare telefoons, industriële seal-apparatuur en verwarmingstoestellen bij fysiotherapie.

Zij concludeert dat de beschikbare wetenschappelijke gegevens er niet op duiden dat de absorptie van stralingsenergie afkomstig van draagbare radiotelecommunicatie-apparatuur, zoals draagbare telefoons, een gevaar oplevert voor de gezondheid, mits deze apparatuur op een normale wijze gebruikt wordt. Zij wijst er echter op dat er slechts zeer weinig gegevens over de energieabsorptie zijn. Zij beveelt aan om meer gegevens te verkrijgen over SAR-waarden in het hoofd die het gevolg zijn van blootstelling aan door draagbare telefoons uitgezonden elektromagnetische velden. Hierbij dienen verscheidene types telefoons van elk systeem dat in Nederland in gebruik is, digitaal en

analoog, onderzocht te worden. De commissie acht voorlopig de methode om SAR-waarden te bepalen door middel van metingen in fantomen het meest betrouwbaar. Zij meent dat de ontwikkelde computermodellen voor de berekening van de SAR niet nauwkeurig genoeg zijn om een adequate beschrijving van de SAR in het hoofd te geven en bepleit daarom optimalisering van deze modellen.

De elektromagnetische velden die door draagbare telefoons gegenereerd worden kunnen een indirecte bedreiging vormen voor de gezondheid wanneer zij door middel van elektromagnetische interferentie de werking van vitale medische apparatuur verstoren. De commissie onderschrijft daarom de aanbevelingen die onlangs vanuit de telecommunicatie-industrie zijn gedaan voor regulering van het gebruik van draagbare telefoons in de directe nabijheid van gevoelige medische apparatuur.

De commissie wijst ook op de mogelijke verstoring van de werking van pacemakers door elektromagnetische velden. Hoewel een dergelijke verstoring niet levensbedreigend hoeft te zijn, kan zij toch hinderlijk of beangstigend zijn voor de patiënt. De commissie onderschrijft de recente aanbevelingen ter zake van Wireless Technology Research uit de VS. Voor patiënten met een pacemaker houden die in dat een ingeschaalde draagbare telefoon op een afstand van ten minste 15 cm van een geïmplanteerde pacemaker gehouden dient te worden, tenzij bekend is dat de pacemaker voldoende beschermd is tegen de invloed van de elektromagnetische velden.

Er zijn gegevens waaruit blijkt dat de in dit advies voorgestelde limieten soms aanzienlijk worden overschreden in de directe omgeving van industriële en paramedische apparaten die radiofrequente elektromagnetische velden genereren, zoals seal-apparatuur en in de fysiotherapie gebruikte verwarmingsapparaten. De commissie beveelt daarom aan metingen te verrichten om de elektromagnetische veldsterktes bij dergelijke apparaten te bepalen en in het geval dat de advieswaarden worden overschreden maatregelen te nemen om de blootstelling tot uit gezondheidkundig oogpunt aanvaardbare niveaus terug te brengen.

Inleiding

In de hedendaagse maatschappij worden mensen steeds meer blootgesteld aan elektromagnetische straling, uitgezonden door, bijvoorbeeld, radio- en televisiezenders, draagbare telefoons en andere telecommunicatieapparatuur, bepaalde huishoudelijke, medische en industriële apparaten en radarinstallaties. Dit advies, opgesteld door een commissie van de Gezondheidsraad, gaat over die blootstelling en over de mogelijk daarmee samenhangende negatieve gevolgen voor de gezondheid. De commissie leidt waarden af voor de blootstelling die volgens haar niet zouden moeten worden overschreden, wil men de kans op het optreden van voor de gezondheid nadelige effecten voldoende beperken.

1.1 Eerdere adviezen

In 1992 bracht de Gezondheidsraad een advies uit over de mogelijke negatieve effecten op de gezondheid van blootstelling aan niet-ioniserende elektromagnetische velden* in het frequentiegebied van 0 tot 300 Hz**, het extreem laagfrequente of ELF gebied, waarbij de nadruk lag op de 50 Hz velden die door het elektriciteitsnet worden

* Een elektromagnetische bron genereert elektrische en magnetische velden. Op voldoende grote afstand van de bron, afhankelijk van de golflengte, zijn de elektrische en magnetische velden gekoppeld en kunnen zij als straling worden beschouwd. De commissie behandelt dit uitgebreider in hoofdstuk 2.

** Niet-statische elektromagnetische velden wisselen periodiek van positieve naar negatieve polariteit. De frequentie geeft het aantal wisselingen per tijdseenheid. De SI-eenheid voor frequentie is hertz (1 Hz = 1/s). Zie ook de lijst met afkortingen van de gebruikte eenheden achterin dit advies.

opgewekt (GR92). Het laatste advies van de Raad over radiofrequente straling (frequenties in het MHz en GHz gebied; 1 MHz = 10^6 Hz en 1 GHz = 10^9 Hz) dateert van 1975 (GR75). Op grond van voortschrijdend wetenschappelijk inzicht in de werking van radiofrequente straling op levende organismen hebben sedertdien verscheidene nationale en internationale organisaties blootstellingslimieten voorgesteld die afwijken van de aanbevelingen van de Gezondheidsraad uit 1975. Deze ontwikkelingen, tezamen met de toename van het aantal bronnen die radiofrequente straling genereren, rechtvaardigen de voorliggende herziening van dat advies.

Het in 1975 uitgebrachte advies betrof het frequentiegebied tussen 300 MHz en 300 GHz. Vele bronnen zenden echter straling uit met frequenties lager dan 300 MHz. In het voorliggende advies wordt daarom het gebied tussen 300 Hz en 300 GHz beschouwd. De ondergrens sluit aan bij het advies uit 1992 over elektromagnetische velden in het frequentiegebied van 0 tot 300 Hz, terwijl 300 GHz de algemeen aanvaarde ondergrens is van het gebied van de infrarode straling.

De gezondheidseffecten van blootstelling aan niet-ioniserende elektromagnetische straling met frequenties hoger dan 300 GHz worden behandeld in de Gezondheidsraad-adviezen 'Optische straling' (GR93), 'UV straling. Blootstelling van de mens aan ultraviolette straling' (GR86) en 'UV straling uit zonlicht' (GR94).

1.2 De commissie en haar taak

Op 15 februari 1995 installeerde de Voorzitter van de Gezondheidsraad de Commissie 'Radiofrequente straling', in dit advies aangeduid als 'de commissie'. Haar samenstelling is vermeld in bijlage A. De taak van de commissie was een antwoord te geven op de volgende vragen met betrekking tot (blootstelling aan) elektromagnetische straling:

- 1 Welke aanbevelingen voor gezondheidkundige advieswaarden kunnen worden gegeven met betrekking tot blootstelling aan RF straling, die zoveel mogelijk overeenkomen met internationale normen en richtlijnen? In haar antwoord op deze vraag dient de commissie ook antwoord te geven op de volgende vragen:
 - a Dient een onderscheid gemaakt te worden tussen hoge en lage frequenties en, zo ja, is 10 MHz een aanvaardbare grenswaarde?
 - b Dient in de gezondheidkundige advieswaarden een onderscheid gemaakt te worden tussen de beroeps- en de algemene bevolking, of is het meer gewenst een onderscheid te maken in bepaalde gebieden met betrekking tot de mate van controle van blootstelling, of is het nuttig op basis van het verschil in lichaams grootte een onderscheid te maken tussen volwassenen en kinderen?
 - c Welke veiligheidfactor dient gekozen te worden bij de beperking van de maximale absorptie van energie?
-

- d In hoeverre is een grotere absorptie van energie acceptabel wanneer, in plaats van langdurige blootstelling van het gehele lichaam, slechts delen van het lichaam worden blootgesteld of wanneer de blootstelling slechts gedurende korte tijd plaats vindt?
 - e Wat is het gevolg voor de blootstellingsadvieswaarden wanneer de RF straling gepulseerd of gemoduleerd is?
- 2 Welke gevolgen heeft implementatie van de voor te stellen richtlijnen voor het werken met RF straling of het gebruik van specifieke toepassingen, zoals draadloze telecommunicatieapparatuur of 'sealing' apparaten?

1.3 Opzet van dit advies

In hoofdstuk 2 geeft de commissie een beknopte uitleg over de fysische achtergrond van niet-ioniserende elektromagnetische straling, een overzicht van biologische mechanismen die mogelijk betrokken zijn bij de wisselwerking tussen die straling en levende organismen, en een kort overzicht van de meest relevante experimentele gegevens. Hoofdstuk 3 bevat een samenvatting van de meest recente door verschillende organisaties voorgestelde richtlijnen voor blootstelling aan radiofrequente straling. In hoofdstuk 4 presenteert de commissie de conclusies die zij trekt uit de beschikbare wetenschappelijke gegevens en doet zij voorstellen voor blootstellingslimieten. In enkele bijlagen geeft de commissie over specifieke onderwerpen nadere informatie.

Algemeen

2.1 Definities, bronnen

2.1.1 *Frequenties*

Een elektromagnetische (EM) bron genereert elektrische en magnetische velden. Behalve bij een statisch veld, veranderen die velden golfvormig in de tijd (te vergelijken met de rimpelingen die in een wateroppervlak ontstaan bij beroering hiervan). Op voldoende grote afstand van de bron, die afhangt van de golflengte, zijn de elektrische en magnetische velden gekoppeld en staan zij loodrecht op elkaar. Zij kunnen dan als elektromagnetische straling worden beschouwd (zie 2.1.2).

Elektrische en magnetische velden (en dus ook EM straling) worden gekenmerkt door hun frequentie (f , SI-eenheid Hz) en hun golflengte (λ , SI-eenheid m). Deze twee grootheden zijn onderling gerelateerd door de snelheid waarmee de elektromagnetische golven zich in het medium verplaatsen. In vacuüm geldt de relatie:

$$f = c / \lambda$$

waarin $c = 3 \times 10^8$ m/s, de lichtsnelheid in vacuüm. Het in dit advies beschouwde frequentiegebied van 300 Hz tot 300 GHz kent een aantal deelgebieden. Tabel 4 geeft de internationaal aanvaarde indeling naar frequentie en golflengte.

Tabel 4 Indeling en benaming van de verschillende frequentiegebieden.

benaming	frequentiegebied	golflengtegebied
Statisch	0 Hz	∞
Sub ELF (sub extremely low frequency)	0 - 30 Hz	∞ - 10 000 km
ELF (extremely low frequency)	30 - 300 Hz	10 000 - 1000 km
VF (voice frequency)	300 - 3000 Hz	1000 - 100 km
VLF (very low frequency)	3 - 30 kHz	100 - 10 km
LF (low frequency)	30 - 300 kHz	10 - 1 km
MF (medium frequency)	300 - 3000 kHz	1000 - 100 m
HF (high frequency)	3 - 30 MHz	100 - 10 m
VHF (very high frequency)	30 - 300 MHz	10 - 1 m
UHF (ultrahigh frequency)	300 - 3000 MHz	100 - 10 cm
SHF (superhigh frequency)	3 - 30 GHz	10 - 1 cm
EHF (extremely high frequency)	30 - 300 GHz	10 - 1 mm

2.1.2 Velden en straling

Voor de wisselwerking tussen EM straling en biologische structuren zijn in het kader van dit advies de volgende grootheden van belang:

E : elektrische veldsterkte (eenheid: volt per meter, V/m),

H : magnetische veldsterkte (eenheid: ampère per meter, A/m),

B : magnetische fluxdichtheid (eenheid: tesla, T),

J_e : elektrische stroomdichtheid (eenheid: ampère per vierkante meter, A/m²),

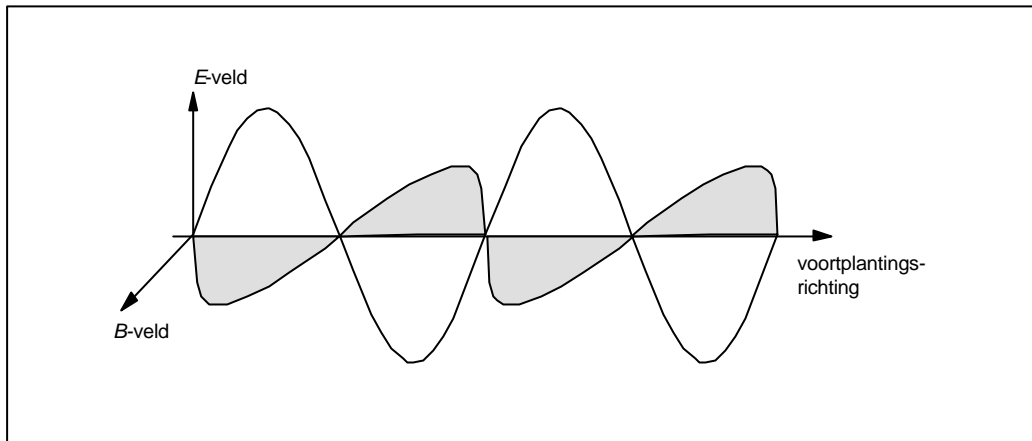
W : energie (eenheid: joule, J)

P : vermogen (eenheid: watt, W, = J/s)

S : vermogensdichtheid (eenheid: watt per vierkante meter, W/m²)

De magnetische veldsterkte en fluxdichtheid zijn onderling uitwisselbare grootheden, gerelateerd volgens $B = \mathbf{m}H$, waarin \mathbf{m} de magnetische permeabiliteit van het medium is. Voor de meeste niet-metallische materialen is \mathbf{m} gelijk aan \mathbf{m}_0 , de magnetische permeabiliteit van lucht, ter grootte van $1,257 \times 10^{-6}$ henry per meter (H/m).

Een andere factor van belang in de wisselwerking tussen EM straling en een object is de afstand tot de bron. Hierbij moet een onderscheid worden gemaakt tussen het



Figuur 1 Schematische voorstelling van een elektromagnetische golf.

gebied in de directe nabijheid van de bron, het zogenoemde nabijheidsveld, en het gebied verderaf, het verre veld. In het verre veld zijn de elektrische en magnetische componenten van het EM veld volledig gekoppeld en staan zij loodrecht op elkaar en op de voortplantingsrichting van het veld. Onder deze voorwaarden wordt de voortplanting van energie straling genoemd (zie figuur 1).

De sterkte van zowel de elektrische als de magnetische veldcomponent neemt in het verre veld omgekeerd evenredig af met de afstand tot de bron. In het nabijheidsveld is de koppeling tussen elektrisch en magnetisch veld slechts zwak en neemt de veldsterkte gemiddeld sterker dan omgekeerd evenredig met de afstand af. De veldsterktes in het nabijheidsveld zijn moeilijk te berekenen vanwege het complexe gedrag van de velden. Derhalve moeten zij doorgaans door middel van metingen worden bepaald. (De commissie besteedt in paragraaf 2.2 aandacht aan het meten van elektrische en magnetische velden.) Er is geen eenduidige grens tussen het nabijheidsveld en het verre veld. Als L de maximale afmeting van de bron is en λ de golflengte, dan is, in het geval dat L groter is dan λ , een algemeen aanvaarde beschrijving van die grens een afstand van $2L^2/\lambda$ vanaf de bron; is L kleiner dan λ , dan geldt een afstand van $\lambda/2\pi$.

Teneinde alle elektrische en magnetische velden in zowel het nabijheids- als het verre veld in één term te vatten, gebruikt de commissie in dit advies alleen de algemene benaming 'EM velden'.

2.1.3 Wisselwerking met blootgestelde objecten

Atomen, moleculen en ionen in weefsel kunnen de variaties in de tijd van een extern elektrisch veld volgen, bijvoorbeeld vanwege de aanwezigheid van interne elektrische dipolen. Als dat gebeurt, wordt een deel van de energie van het EM veld in het weefsel omgezet in warmte. De geleidbaarheid σ (SI-eenheid: siemens per meter, S/m) is de

elektromagnetische eigenschap van een medium die beschouwd kan worden als de macroscopische maat voor deze omzetting. Om de warmteontwikkeling in een medium te kwantificeren, is de Specific Absorption Rate (SAR) geïntroduceerd, de opgenomen energie per massa-eenheid, uitgedrukt in watt per kilogram (W/kg).

De SAR wordt gedefinieerd als de afgeleide naar de tijd van de per massa m geabsorbeerde energie W , waarbij de massa gevat is in een volume V met een gegeven massadichtheid ρ (in kg/m^3) (IEEE92):

$$\text{SAR} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (\text{in W/kg}).$$

Voor sinusvormige EM velden is de SAR gerelateerd aan het interne elektrische veld volgens:

$$\text{SAR} = \frac{\sigma (E_{\text{rms}})^2}{\rho} \quad (\text{in W/kg})$$

waarin E_{rms} de 'root mean square' (rms) waarde* van het interne elektrisch veld is. Hoewel de SAR hier alleen gegeven is als functie van het elektrisch veld, spelen zowel het elektrisch als het magnetisch veld een rol in de interactie met een organisme.

In het bovenste gedeelte van het beschouwde frequentiegebied kunnen objecten gedacht worden zich in het verre veld te bevinden. De elektrische en magnetische componenten zijn dan gekoppeld en de wisselwerking tussen een EM veld en een object kan gezien worden als de inwerking van een elektromagnetische golf op het object. Wanneer echter de frequentie laag genoeg is, d.w.z. wanneer de golflengte ongeveer een grootteorde groter is dan de afmeting van het object, voor de mens bij benadering bij frequenties lager dan 10 MHz, kan de verandering van de magnetische veldsterkte als gevolg van de aanwezigheid van het organisme, door de hoge magnetische permeabiliteit van dat organisme, verwaarloosd worden. De elektromagnetische interactie wordt dan voornamelijk bepaald door de elektrische stromen die door het oscillerende elektrische veld in het organisme worden opgewekt.

2.1.4 Bronnen

Er zijn vele bronnen die EM velden uitzenden. Sommige hiervan zijn van natuurlijke aard, zoals de zon en andere sterren, andere zijn kunstmatig. In het in dit advies

* De rms waarde is een berekende gemiddelde of effectieve waarde van een periodiek wisselende functie. De rms-waarde voor een elektrisch veld met veldsterkte $E(t)$ en periode T ($=1/\text{frequentie}$) wordt berekend volgens:

$$E_{\text{rms}} = \left[(1/T) \int_0^T E(t)^2 dt \right]^{0.5}$$

beschouwde frequentiegebied (300 Hz tot 300 GHz) zijn de niveaus van de straling van natuurlijke (kosmische) bronnen buiten de dampkring verwaarloosbaar klein (WHO93).

De meest gebruikelijke kunstmatige bronnen kan men indelen in bronnen die hun energie in de vrije ruimte afgeven:

- radio- en televisiezenders
- telecommunicatiezenders
- radarinstallaties
- bewakingsapparatuur

en bronnen waarbij de energie binnen een afgesloten ruimte blijft:

- industriële verwarmingsapparatuur
- huishoudelijke verwarmingsapparatuur
- (para)medische toepassingen.

Bijlage B bevat een uitgebreidere opsomming van bronnen van EM velden en van milieus waarin EM velden aanwezig zijn.

2.2 Meten en berekenen van EM velden

Of blootstelling aan een EM veld een negatief effect op de gezondheid heeft hangt vooral af van de door het veld in het lichaam opgewekte elektrische stroom of de SAR. Deze grootheden zijn echter in het menselijk lichaam niet op een eenvoudige wijze te meten. Gegevens over veldsterktes en geïnduceerde elektrische stromen in het lichaam kunnen alleen afgeleid worden van wel te meten grootheden zoals de sterkte van het externe elektrische of magnetische veld, of, vooral voor frequenties boven 200 MHz, uit de externe vermogensdichtheid (NCRP81).

Voor een juiste evaluatie en interpretatie van de meetuitkomsten zijn de volgende punten van belang.

Allereerst moeten, vanzelfsprekend, de grootheden gemeten worden met daartoe geschikte apparatuur. Er is een grote variatie in gevoeligheid en tolerantie van de apparatuur. Het gebruik van een niet-optimaal meetinstrument kan een negatieve invloed hebben op de nauwkeurigheid van de metingen.

Verder zal er altijd een zekere fout in de meetuitkomst aanwezig zijn als gevolg van de gegeven tolerantie van de aflezing van het meetinstrument en van systematische (maar in principe te beperken) instrumentatiefouten. Anisotrope meetsondes, d.w.z. sondes die geen bolvormige gevoeligheidskarakteristiek hebben, bezitten inherent een isotropische fout (een gevolg van verschillen in de gevoeligheid tussen bovenkant en zijkant), een fout die veroorzaakt wordt door de ellipsratio (het effect van het draaien van de sonde om zijn as) en een frequentie-afhankelijke gevoeligheid. Kenmerkende

waarden voor de gecombineerde onzekerheid als gevolg van deze factoren zijn $\pm 1,8$ tot $\pm 4,1$ dB* voor de aflezing van de vermogensdichtheid en $\pm 0,8$ tot $\pm 2,0$ dB voor de aflezing van de spanning of de stroomsterkte. Een onzekerheid van $\pm 0,8$ dB voor de vermogensdichtheid kan behaald worden door de meetsonde steeds zodanig te bewegen en te draaien dat een maximale aflezing wordt verkregen en door nauwkeurig te calibreren. Zonder zulke goede meetpraktijken kan de onzekerheid wel tot $\pm 4,8$ dB oplopen.

Ten slotte kunnen de lokaal heersende veldsterktes en vermogensdichtheid beïnvloed worden door de aanwezigheid van een object of persoon (NCRP81). Dit heeft tweërlei effect. Metingen in de vrije ruimte kunnen beïnvloed worden door de aanwezigheid van personen in de directe nabijheid, bijvoorbeeld degenen die de metingen uitvoeren. Daarnaast zijn de veldsterktes en stromen in een persoon op de plaats waar metingen in het vrije veld zijn uitgevoerd anders dan de in het vrije veld gemeten grootheden. Dit probleem is moeilijker te verhelpen; hiervoor zijn metingen in levensgrote fantomen nodig.

De commissie beveelt aan met betrekking tot het meten van EM velden de richtlijnen van de NCRP** te volgen (NCRP93).

2.3 Berekening van de SAR in het menselijk lichaam

Teneinde een zeker kwantitatief inzicht te verkrijgen in de absorptie van EM velden door het menselijk lichaam, zijn voor de commissie berekeningen uitgevoerd met behulp van een geavanceerd numeriek driedimensionaal model (zie bijlage C). De resultaten komen overeen met resultaten verkregen met eenvoudige wiskundige modellen waarin bollen en ellipsoïden gebruikt worden om de interne SAR in verband te brengen met de intensiteit van het externe EM veld.

2.4 Blootstellingsniveaus

Mensen kunnen blootgesteld worden aan EM velden afkomstig van een grote verscheidenheid aan bronnen (zie 2.1.4). De blootstelling hangt sterk af van het soort bron, van de geometrie van de bron, van de frequentie van de opgewekte EM velden, van de afstand tot de bron en van plaatselijke omstandigheden zoals afscherming. Omdat zoveel factoren van belang zijn, is het niet mogelijk een beschrijving te geven van de

* In de meettechnologie is het gebruikelijk verschillen en fouten in decibel, dB, uit te drukken. De dB-schaal is evenredig met de logarithme van de verhouding tussen twee waarden van dezelfde fysische grootte. Om de fouten uit te drukken in een lineaire schaal, moeten de gemiddelde meetwaarden gedeeld worden door de dB-factor om de ene grenswaarde te verkrijgen en ermee vermenigvuldigd voor het berekenen van de andere grenswaarde. Dit betekent dat, wanneer bijvoorbeeld een gemeten waarde van 1 W/m^2 voor de vermogensdichtheid een fout van $\pm 0,8$ dB heeft, de foutenmarge loopt van $0,8$ tot $1,25 \text{ W/m}^2$.

** De National Council on Radiation Protection and Measurements in de VS.

blootstelling van de Nederlandse bevolking, of van welke populatie dan ook. De commissie volstaat met het geven van enkele voorbeelden van kenmerkende blootstellingssituaties (bijlage D). Een recent door het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid uitgegeven rapport bevat een inventarisatie van de blootstelling van werknemers aan EM velden (Kle95).

2.5 Biologische mechanismen

De effecten van EM velden op biologische structuren kunnen verdeeld worden in thermische en niet-thermische. Thermische effecten zijn goed beschreven en hangen samen met verwarming van het object als gevolg van absorptie van de energie van het EM veld, zoals beschreven in paragraaf 2.1. Niet-thermische effecten zijn vooral geassocieerd met in de biologische structuur geïnduceerde elektrische stromen. In deze paragraaf bespreekt de commissie de biologische mechanismen die door deze verschillende soorten effecten worden beïnvloed.

2.5.1 *Niet-thermische effecten*

Effecten van elektrische stromen

Bij alle dierlijke en menselijke cellen bestaat er een potentiaalverschil over de celmembranen, als gevolg van verschillen in de concentratie van ionen en geladen macromoleculen, zoals eiwitten, in de intra- en intercellulaire ruimte. Dit potentiaalverschil is het duidelijkst aanwezig in cellen die elektrisch gestimuleerd kunnen worden: zenuwcellen en spiercellen. Het verschil in ionenconcentratie wordt actief en passief in stand gehouden door respectievelijk ionenpompen en ionenkanalen. Externe prikkels (bijvoorbeeld een elektrische stroom) kunnen het transport van ionen en daarmee het potentiaalverschil over de celmembranen veranderen. Het gevolg is depolarisatie of hyperpolarisatie, afhankelijk van de richting waarin de balans doorslaat. In zenuwcellen hebben potentiaalveranderingen tijdens fysiologische stimulering een grootte van enkele tientallen millivolt per cel. Na de stimulus wordt de rustpotentiaal hersteld door actief en passief transport van ionen over de celmembranen.

Prikkels die groter zijn dan normaal, zoals sterke elektrische stromen, kunnen leiden tot tijdelijke veranderingen in het functioneren van het zenuwstelsel. Deze kunnen manifest worden in het bewegingsapparaat, bijvoorbeeld door stimulatie van zenuwen en spieren en door onvrijwillige bewegingen. Indien de stimulus langdurig aanhoudt kunnen tetanus (spierverkramping) en spierschade ontstaan. Wanneer dit de hartspier betreft kan hartstilstand optreden.

Tabel 5 Effecten op het menselijk lichaam, opgewekt door verschillende stroomdichtheden in het frequentiegebied van 3 - 300 Hz (WHO87).

stroomdichtheid (mA/m ²)	effect
< 1	geen effecten aangetoond
1 - 10	geringe fysiologische effecten
10 - 100	duidelijke fysiologische effecten
100 - 1000	mogelijk nadelige gezondheidseffecten
> 1000	acuut gevaar door hartfibrillatie (ongecontroleerd samentrekken van de hartspiervezels)

Tabel 5 geeft een overzicht van algemene biologische effecten die door verschillende stroomdichtheden opgewekt worden. De stroomdichtheid waarboven stimulatie van zenuwen en spieren plaats vindt, neemt bij frequenties lager dan enkele Hz en hoger dan 1 kHz gestadig toe (Ber88).

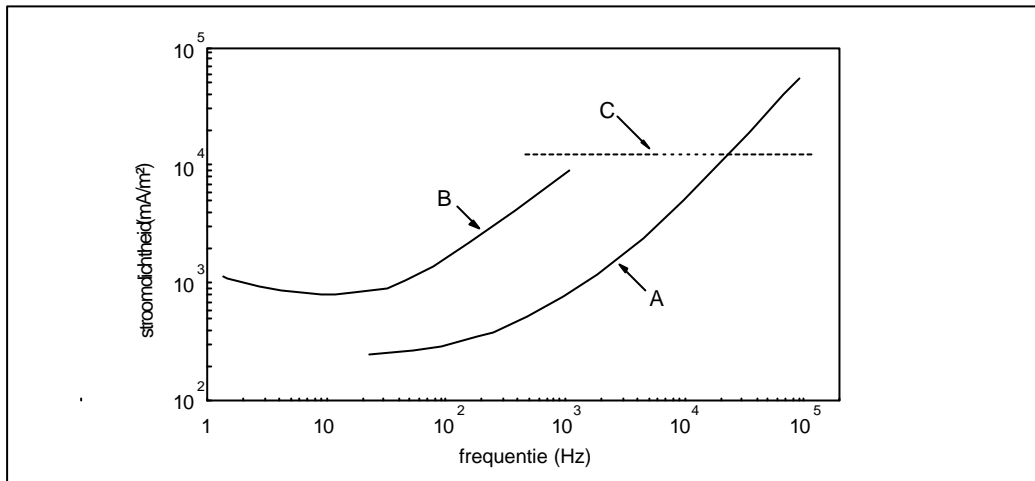
Opwekking van elektrische stromen in de mens door EM velden

De afmeting van het menselijk lichaam is klein in vergelijking met de golflengte van EM velden met frequenties lager dan ruwweg 10 MHz, d.w.z. golflengtes van 30 m en meer. Zoals aangegeven in 2.1.3 vindt bij deze frequenties weinig energieabsorptie door weefsels plaats en zijn biologische effecten, zoals de stimulatie van zenuwen en spieren, het gevolg van elektrische stromen die door de elektrische velden worden geïnduceerd. De veldsterkte die nodig is voor stimulering van zenuwen of spieren is afhankelijk van de frequentie. De stroomdichtheid die aanleiding geeft tot stimuleringseffecten neemt boven ongeveer 1 kHz lineair toe met de frequentie (zie figuur 2). Bij 10 kHz is de waarde ongeveer tien maal hoger dan onder 1 kHz (zie figuur 3 en 4). Boven 100 kHz is de waarde van de stroomdichtheid die resulteert in stimulatie van prikkelbare weefsels hoger dan de waarden die resulteren in een energieabsorptie van ongeveer 1 W/kg. Thermische effecten worden dan belangrijk.

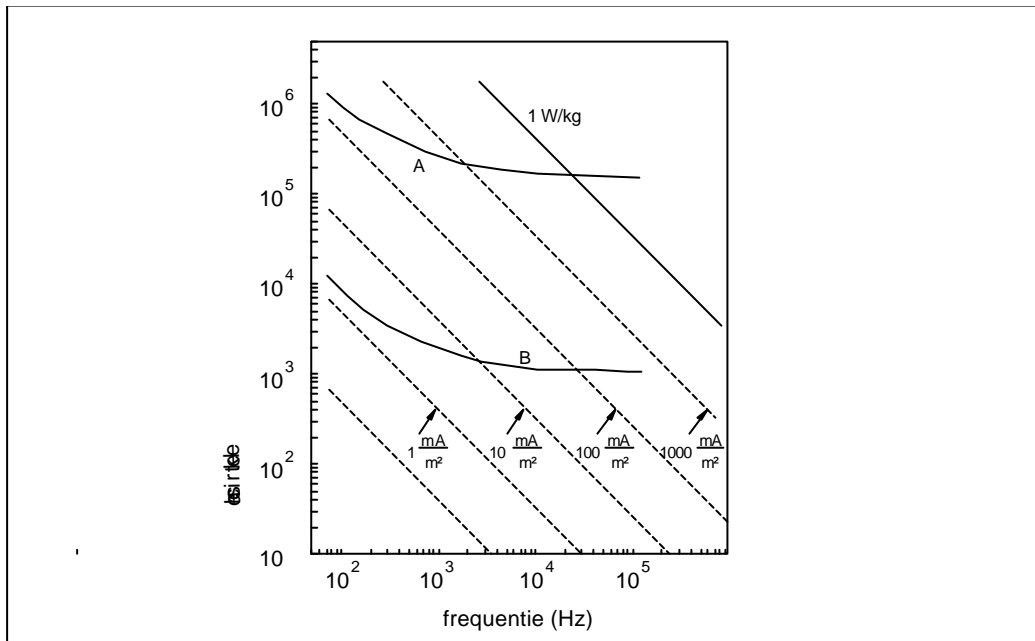
Sterkte van externe velden versus die van natuurlijke interne velden in de mens

De interne elektrische velden of stroomdichtheden die geïnduceerd worden door niet-natuurlijke EM velden zijn vrijwel altijd veel zwakker dan de van nature in de mens voorkomende velden*. Gegevens over interne veldsterktes die het gevolg zijn van externe velden zijn echter voor het frequentiegebied dat in dit advies aan de orde is, 300 Hz

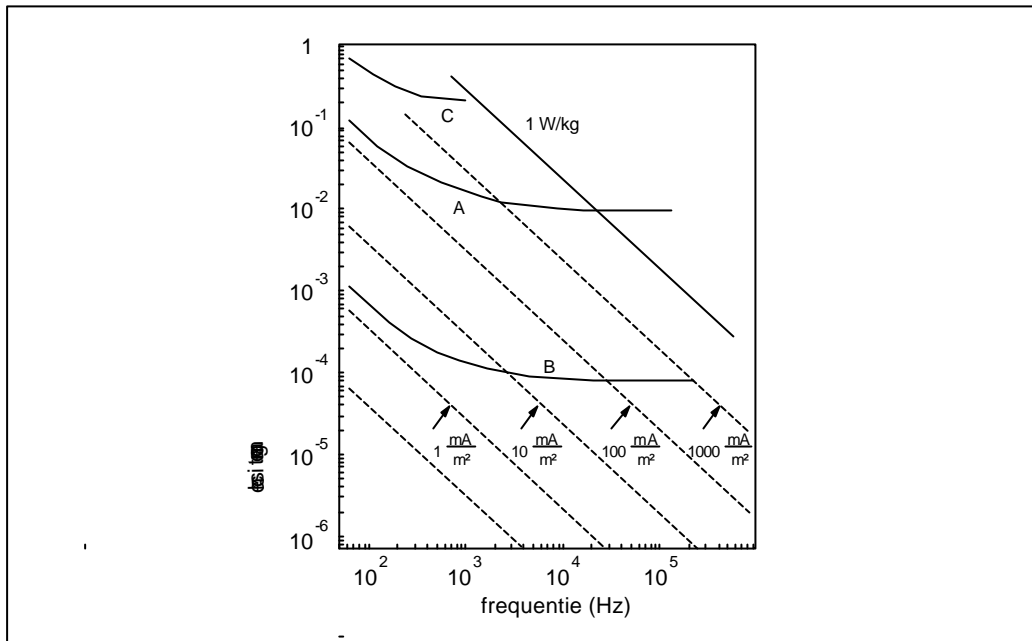
* De elektrische potentiaal over de celmembranen, die doorgaans tussen 10 en 100 mV ligt, komt overeen met een statisch elektrisch veld van 2×10^6 tot 20×10^6 V/m.



Figuur 2 Drempelwaarden voor de stroomdichtheid die leidt tot effecten in exciteerbare cellen. Curve A omvat de drempelwaarden voor stimulering van verschillende cellen onder verschillende omstandigheden. Curve B toont de drempelwaarden voor opwekking van ontijdige samentrekkingen van de hartspier. Curve C is de stroomdichtheid die ongeveer overeenkomt met een SAR van 1 W/kg in spierweefsel. (Aangepast naar Ber85, Ber86 en WHO93.)



Figuur 3 De frequentie-afhankelijkheid van het ongestoorte elektrisch veld dat in het hoofd of in de hartstreek van een in het veld geplaatst persoon de aangegeven stroomdichtheid opwekt. De aangegeven waarden gelden voor blootstelling waarbij de lengteas van het lichaam parallel loopt met de oriëntatie van het elektrisch veld. In andere delen van het lichaam zijn bij gelijke sterkte van het externe veld de stroomdichtheden groter. Curve A geeft de drempelwaarden voor stimulatie van verschillende cellen onder verschillende omstandigheden. Curve B is gelijk aan curve A, maar met toepassing van een veiligheidsfactor 100. (Aangepast naar Ber85 en WHO93.)



Figuur 4 De frequentie-afhankelijkheid van het ongestoorte magnetisch veld dat in de periferie van het hoofd of het hart resulteert in de aangegeven stroomdichtheden. Bij grotere stroomkringen (bijvoorbeeld in de romp) kan bij gelijke magnetische fluxdichtheid de geïnduceerde stroomdichtheid groter zijn. Curve A geeft de drempelwaarden voor stimulering van zenuw- en spierweefsel. Curve B is gelijk aan curve A, maar met een veiligheidsfactor 100 toegepast. Curve C geeft de drempelwaarden voor effecten op de hartspier. (Aangepast naar Ber85 en WHO93.)

tot 300 GHz, niet beschikbaar. De bepaling van de sterkte van de interne velden wordt bemoeilijkt door de grote frequentie-afhankelijkheid van de doordringing van EM velden in biologisch weefsel, in samenhang met de complexe opbouw van biologische structuren.

Andere niet-thermische effecten

De resultaten van sommige experimenten waarin blootstelling aan EM velden plaatsvond, zijn geïnterpreteerd als aanwijzingen dat effecten ook kunnen optreden bij veldsterktes die onder de drempelwaarde voor de stimulatie van exciteerbare weefsels liggen en zonder dat zich belangrijke veranderingen in temperatuur voordoen. Het gaat hier om veranderingen in gedrag of in EEG-patronen ten gevolge van blootstelling aan continue of frequentie-gemoduleerde velden, veranderingen in de uitstroom van calciumionen uit hersenweefsel dat *in vitro* is blootgesteld aan met een extreem-lage frequentie gemoduleerde EM velden en veranderingen in de ontwikkeling van embryo's (zie 2.6.5). Verscheidene theoretische modellen zijn geponneerd ter verklaring van deze

waarnemingen, maar geen enkele daarvan is tot dusverre bevestigd. Daarenboven ontbreken overtuigende experimentele gegevens die deze waarnemingen bevestigen.

2.5.2 *Thermische effecten*

Dosimetrische grootheden

Met toenemende frequentie vindt een geleidelijke verschuiving plaats van de inductie van elektrische stromen naar de afgifte van energie door EM velden. In het frequentiegebied tussen 100 kHz en een paar honderd MHz vindt in de mens een relatief sterke toename plaats van de absorptie van EM velden als gevolg van resonantie tussen het veld en het menselijk lichaam. Dit verschijnsel treedt op wanneer de golflengte in de orde van grootte van de afmetingen van het lichaam is. Boven ongeveer 100 kHz is een hogere veldsterkte nodig om in het lichaam een zodanige stroomdichtheid op te wekken dat exciteerbare weefsels gestimuleerd worden, dan voor een energieafgifte van ongeveer 1 W/kg. Bij frequenties tussen 100 kHz en 10 MHz is het echter mogelijk om met korte pulsen exciteerbare weefsels te stimuleren zonder meetbare temperatuurverandering. Daarom dienen in het gebied tussen 100 kHz en 10 MHz zowel de geïnduceerde stroomdichtheid als de SAR beschouwd te worden als relevante dosimetrische grootheden. Bij frequenties boven 10 MHz is de SAR de relevante grootheid. Boven ongeveer 10 GHz vindt de energieopname in toenemende mate aan het oppervlak van het lichaam plaats en is opwarming direct gerelateerd aan de vermogensdichtheid van het externe EM veld. Daarom is bij deze frequenties de vermogensdichtheid van het externe veld de relevante blootstellingsmaat.

De bij een bepaalde veldsterkte en frequentie geabsorbeerde hoeveelheid energie hangt af van een aantal factoren, zoals de polarisatie van het veld, de afmetingen van de persoon en het feit of hij zit of staat en direct contact met de grond heeft. Elke keuze voor een ondergrens voor frequentiegebied waar thermische effecten optreden is arbitrair (zie paragraaf 4.2).

Resonantie

Met betrekking tot thermische effecten zijn, op grond van de absorptiekenmerken van het menselijk lichaam, verschillende frequentiegebieden te onderscheiden. In feite treedt bij elk organisme resonantie op. Het kenmerk hiervan is een aanzienlijke toename in geabsorbeerde energie wanneer de golflengte van het opvallende EM veld in de orde van grootte van de afmeting van het lichaam is. Hoe kleiner het lichaam, des te hoger de resonantiefrequentie. Op overeenkomstige wijze kan resonantie ook optreden in delen van het lichaam.

Bij blootstelling van het menselijk lichaam in het sub-resonantiegebied (frequenties onder 30 MHz), waarbij de lengte van het lichaam aanzienlijk minder is dan de golflengte, neemt de gemiddelde SAR evenredig met het kwadraat van de frequentie toe.

In het resonantiegebied (30 - 300 MHz) bereikt de gemiddelde SAR in een persoon zijn maximum. Bij een in de vrije ruimte in een verticaal elektrisch veld staande volwassene treedt resonantie op bij een frequentie van ongeveer 70 - 80 MHz*. Is de persoon geaard, dan wordt deze frequentie gehalveerd. Bij kleinere lichaamslengten neemt de resonantiefrequentie toe: voor een niet-geaard kind van vijf jaar is zij ongeveer 160 MHz. Met verder toenemende frequentie wordt de kans op resonantie in delen van het lichaam, zoals benen, armen en hoofd, groter wanneer de golflengte van het EM veld de afmetingen van het betreffende lichaamsdeel benadert, voor het hoofd bijvoorbeeld bij 300 à 400 MHz.

Bij frequenties in het gebied tussen ongeveer 0,4 en 2 GHz kan lokale concentratie van afgifte van energie plaats vinden. Dit frequentiegebied wordt wel aangeduid als 'hot spot'-gebied.

Bij nog verder toenemende frequenties neemt de doordringingsdiepte af en vindt energiedepositie steeds meer aan de oppervlakte plaats. Dit oppervlakte-absorptiegebied ligt tussen ongeveer 2 GHz en 300 GHz.

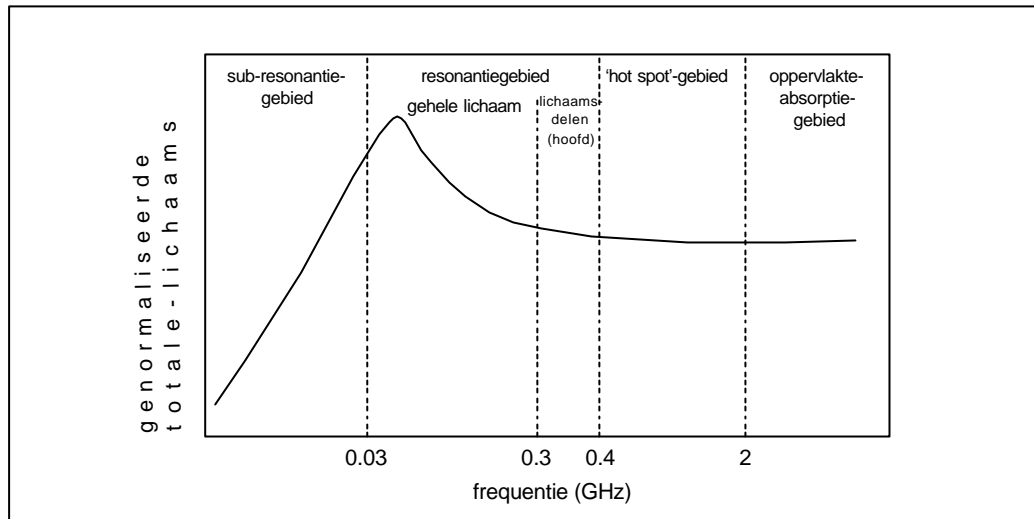
De frequentie-afhankelijkheid van de SAR is schematisch geïllustreerd in figuur 5.

Verwarming

De afgifte van energie door EM velden met frequenties tussen 10 MHz en 300 GHz resulteert in opwarming. Het menselijk lichaam kan deze warmte door middel van verschillende mechanismen detecteren. Waarneming in de huid kan een indicator zijn voor blootstelling bij frequenties van enkele GHz en hoger. In het gebied van de oppervlakte-absorptie, waar de golflengte ongeveer gelijk is aan of kleiner dan de dikte van de huid, wordt de meeste energie geabsorbeerd in de buitenste lagen van de huid waarin zich warmtesensoren bevinden. In de sub-resonantie-, resonantie- en 'hot spot'-frequentiegebieden zal de energie dieper het lichaam binnendringen. Inwendige organen hebben geen warmtedetectoren en kunnen daarom niet, zoals de huid, warmte waarnemen. Alleen als de temperaturen hoog genoeg zijn kan dit pijn veroorzaken. Warmteschade kan echter al optreden bij vermogensdichtheden die nog niet leiden tot pijnsensatie (Jus88).

Een beperkte toename van de inwendige temperatuur ten gevolge van externe prikkels wordt gecompenseerd door verschillende mechanismen, bijvoorbeeld zweten of veranderingen in de bloeddorstrooming van de huid. Een te grote stijging van de

* De golflengte in weefsel hangt af van de diëlektrische constante van het weefsel, de eigenschap die een maat is voor de invloed van een medium op de elektrische fluxdichtheid. De golflengte in weefsel is altijd korter dan die van het externe EM veld.



Figuur 5 Illustratie van de frequentie-afhankelijkheid van de genormaliseerde SAR, gemiddeld over het gehele lichaam, en enkele absorptiekenmerken voor een volwassen mens. (Bron: WHO93, aangepast.)

temperatuur (boven ongeveer 41 °C in de mens) kan niet afdoende worden gecompenseerd en leidt tot onomkeerbare veranderingen in belangrijke cellulaire eiwitten. Oververhitting ('verbranding') resulteert in celdood ten gevolge van denaturatie van eiwitten en verdamping van water. Dit proces is in principe onomkeerbaar, hoewel op de lange duur plaatselijk herstel (wondgenezing) kan optreden. Dit laatste is echter niet mogelijk in hersen- en spierweefsel. Daarnaast hebben bepaalde organen een lage doorbloeding en kunnen daardoor gemakkelijk worden oververhit. Dit geldt vooral voor de testes, waarin te veel warmte de spermatogenese kan afremmen, en voor het oog, waar verwarming tot cataract (staar) kan leiden.

De hierboven genoemde compensatiemechanismen hebben enige tijd nodig om effect te sorteren. Een maat voor deze vertraging is de warmte-evenwichtstijd, gedefinieerd als de tijd waarin een toename van de lichaamstemperatuur tot de helft wordt teruggebracht wanneer de externe warmtebron weggenomen wordt (NRPB93). Bij in rust blootgestelde mensen wordt in ongeveer een uur een warmte-evenwicht bereikt (NRPB93). De commissie beschouwt zes minuten daarom een redelijke schatting voor de warmte-evenwichtstijd. Met een dergelijke halveringstijd zal namelijk de temperatuurtoename na een uur (= 10 halveringstijden) tot ongeveer 0,1% van zijn oorspronkelijke waarde zijn gereduceerd. De commissie gebruikt in haar aanbevelingen een tijdsduur van 6 minuten als de middelingstijd voor het bepalen van de SAR.

2.5.3 *Indirecte effecten: contactstroom*

Grote niet-geaarde metalen voorwerpen kunnen bij blootstelling aan EM velden met frequenties lager dan 100 MHz opgeladen worden. Bij aanraking kunnen dan contactstromen ontstaan. Bij frequenties tussen 300 Hz en 100 kHz kunnen dergelijke stromen resulteren in pijnlijke prikkeling van exciteerbare weefsels (zenuwen en spieren). Bij frequenties tussen ongeveer 100 kHz en 100 MHz kunnen voldoende sterke contactstromen leiden tot verbranding wanneer zij het lichaam via een klein oppervlak, bijvoorbeeld een vingertop, binnendringen (Ber88, WHO93).

2.6 **Experimenteel onderzoek naar de biologische effecten van EM velden**

Er is een grote hoeveelheid wetenschappelijke literatuur over biologische effecten van blootstelling aan EM velden. Er zijn echter verhoudingsgewijs weinig directe aanwijzingen voor schadelijke effecten op de mens, omdat het meeste onderzoek met proefdieren is uitgevoerd. De laatste jaren verschijnen in toenemende mate wetenschappelijke publicaties over de afwezigheid van effecten (zie bijvoorbeeld ICN96, WHO93). Bij de evaluatie van de oudere literatuurgegevens dient derhalve sterker rekening gehouden te worden met de mogelijkheid dat onderzoeken waarin geen effecten werden gevonden niet gepubliceerd zijn dan bij recentere gegevens.

De commissie heeft ervoor gekozen niet elke beschikbare publicatie te bestuderen, maar gebruik te maken van enkele recente overzichten van de effecten van EM velden (Her93, ICN96, NCRP86, Sau91, WHO93), aangevuld met recente publicaties die tot april 1996 uit het MEDLINE-bestand zijn verkregen. In deze paragraaf geeft de commissie een kort overzicht van de betrokken effecten. De aangehaalde publicaties zijn kenmerkend voor de laagste vermogensdichtheden en SAR waarden waarbij nog een meetbaar effect optreedt. Alle gegevens hebben betrekking op onderzoek aan proefdieren, tenzij anders aangegeven.

2.6.1 *Algemene opmerkingen*

Het meeste onderzoek naar de effecten van EM velden is uitgevoerd met frequenties in het MHz- en het GHz-gebied. Er is relatief weinig onderzoek verricht met frequenties in het kHz-gebied. Het WHO-rapport over EM velden vermeldt bijvoorbeeld slechts zes experimenten in het kHz-gebied tegen ongeveer 200 in het MHz- en GHz-gebied (WHO93).

De experimentele gegevens duiden er op dat bij gepulste EM velden effecten in het algemeen bij lagere vermogensdichtheden optreden dan bij continue velden. Waar

mogelijk geeft de commissie afzonderlijke drempelwaarden voor gepulste en continue velden. Indien geen onderscheid wordt gemaakt, zijn alleen gegevens voor continue velden beschikbaar.

De literatuur betreffende biologische effecten van radiofrequente draaggolven die amplitude-gemoduleerd zijn met extreem-lage frequenties is apart vermeld in 2.6.5.

2.6.2 *Effecten op cellulair niveau*

Schade aan DNA

De beschikbare gegevens wijzen erop dat niet voor schade aan het erfelijk materiaal, het DNA, hoeft te worden gevreesd zolang het gaat om blootstelling aan vermogensdichtheden die niet hoog genoeg zijn om een aanzienlijke verhoging van temperatuur te veroorzaken. Blijft de temperatuur binnen fysiologische grenzen dan leidt noch korte noch langdurige blootstelling tot een toename van chromosoomafwijkingen (WHO93).

Recente publicaties suggereren dat relatief kortdurende blootstelling aan radiofrequente EM velden met lage vermogens in hersencellen kan leiden tot enkel- en dubbelstrengsbreuken in DNA (Lai95, Lai96). Gezien de hoeveelheid gegevens, echter, die duiden op het ontbreken van een direct effect van EM velden op DNA en gezien het feit dat de betreffende onderzoeken methodologisch niet geheel zuiver zijn, dienen deze bevindingen in onafhankelijk onderzoek bevestigd te worden alvorens ze bruikbaar zijn bij het bepalen van risico's voor de gezondheid (ICN96).

Carcinogenese

Onderzoek naar het effect van blootstelling aan EM velden bij het ontstaan van kanker heeft tegenstrijdige en in veel gevallen moeilijk te interpreteren resultaten opgeleverd. In een tweetal onderzoeken bevorderde langdurige blootstelling aan continue 2450 MHz EM velden, resulterend in SAR waarden van 2 - 3 W/kg, de ontwikkeling van door chemicaliën geïnduceerde tumoren in muizen (Szm82, Szm88). Als gevolg van diverse tekortkomingen in deze onderzoeken, zoals het ontbreken van adequate controlegroepen, is het echter niet mogelijk definitieve conclusies te trekken (WHO93).

Membraaneffecten

In een overzicht van de effecten op macromoleculaire en cellulaire systemen concludeert de NCRP dat, als er bij frequenties boven 5 MHz al een effect optreedt, dit samenhangt met een verhoogde temperatuur (NCRP86). In een recenter overzicht merkt Cleary op dat een aantal *in vitro*-experimenten sterke aanwijzingen geeft voor de

betrokkenheid van zowel niet-thermische interacties als opwarming bij membraaneffecten (Cle89). Het betreft hier onder meer veranderingen in het transport van kalium- en natriumionen door de plasmamembraan van erythrocyten, veranderingen in transport van calciumionen door membranen en verminderde activiteit van specifieke enzymen (WHO93). Tabel 8 van WHO93 bevat een aantal tegenstrijdige resultaten en gegevens die er op wijzen dat de precieze temperatuur van de membraan een cruciale factor is in het mogelijk optreden van een effect (Lib84). De drempelwaarde voor het optreden van effecten ligt ongeveer bij een SAR van 2 - 3 W/kg en hangt samen met een toename in de uitstroom van natriumionen uit menselijke erythrocyten (Fis82).

2.6.3 *Effecten op orgaanniveau*

Gehoor

Effecten op het gehoor bij blootstelling aan gepulste EM velden zijn uitgebreid onderzocht. Bij frequenties tussen 200 MHz en 6,5 GHz nemen sommige mensen een dergelijke blootstelling waar als geklik, gekraak of gezoem, afhankelijk van de wijze van pulsing en van de vermogensdichtheid. Dit horen van EM velden is het gevolg van de inductie van thermo-elastische golven in het hoofd door een temperatuuroename van niet meer dan 5×10^{-6} °C. De drempelwaarde voor dit effect is voor pulsen korter dan 30 μ s gerelateerd aan de energiedichtheid per puls en voor pulsen tot 500 μ s aan de piekwaarde. Voor de mens is een drempelwaarde voor de energiedichtheid van 16 mJ/kg gevonden (Guy75). Gegevens uit dierexperimenten wijzen op drempelwaarden variërend van 0,9 - 1,8 mJ/kg per 30 μ s-puls voor ratten (overeenkomend met SARs van 30 - 60 W/kg) tot 10 - 16 mJ/kg per 30 μ s-puls (overeenkomend met SARs van 300 - 500 W/kg) voor katten (Guy75, Cho85).

Bij blootstelling van het oor aan continue EM velden is alleen warmtesensatie gerapporteerd.

Oog

Vanwege het geringe vermogen van het oog om warmte af te voeren, kan blootstelling aan EM velden al snel leiden tot een behoorlijke verhoging van de temperatuur. Het ontstaan van cataract ten gevolge van blootstelling aan EM velden is uitgebreid onderzocht. Het soort vertroebeling dat ontstaat kan mede bepaald worden door de blootstellingsomstandigheden. Bij frequenties lager dan 1,5 GHz zijn de afmetingen van de oogkas en het oog te klein om tot lokale concentratie van het EM veld te leiden. Boven 10 GHz neemt de doordringing af en blijft de opname van energie beperkt tot oppervlakkige weefsellagen (NCRP86). Een drempelwaarde voor de vermogensdichtheid van

ongeveer $1,5 \text{ kW/m}^2$ (overeenkomend met een SAR van 100 W/kg) is gerapporteerd voor de ontwikkeling van cataract bij konijnen die gedurende één uur werden blootgesteld aan continue EM velden (WHO93). In primaten zijn echter na blootstelling aan vermogensdichtheden tot 5 kW/m^2 geen cataracten waargenomen (WHO93).

Kues en medewerkers stelden apen bloot aan gepulste EM velden en vonden bij histologisch onderzoek van de irissen een toename in de lekkage van bloedvaten bij een SAR van $2,6 \text{ W/kg}$ (Kue88). Eenzelfde effect is ook waargenomen bij apen die behandeld waren met timolol-maleaat, een middel dat de oogdruk vermindert, na bestraling met een vermogensdichtheid van 10 W/m^2 , overeenkomend met een SAR van slechts $0,26 \text{ W/kg}$ (Mon88).

Teratogene effecten

Uit de literatuur blijkt dat teratogene effecten (geboortefwijkingen) alleen voorkomen na blootstelling aan EM velden met vermogensdichtheden die hoog genoeg zijn om een aanzienlijke verhoging van de lichaamstemperatuur van de moeder te veroorzaken (WHO93). Gerapporteerd zijn onder meer een afname in foetale massa, specifieke afwijkingen (met name exencefalie), een toename van de sterfte van embryo's en foetusen en een toegenomen effectiviteit van chemische teratogenen. Drempelwaarden voor de inductie van deze effecten met continue EM velden zijn SARs ter grootte van $4 - 7 \text{ W/kg}$ bij ratten en muizen (Jen84a, Jen84b, Mar86). Lary en Conover concludeerden dat warmte de oorzaak is van geboortefwijkingen en prenatale sterfte wanneer de temperatuur van het moederdier hoger is dan $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (Lar87).

Eén publicatie beschrijft teratogene effecten in ratten na blootstelling van de moederdieren van de eerste tot de 20e dag van de zwangerschap aan $27,12 \text{ MHz}$ continue EM velden, resulterend in een SAR van slechts $0,1 \text{ mW/kg}$ (Tof86). Deze resultaten zijn echter moeilijk te rijmen met die van andere onderzoeken waarin dezelfde frequentie gebruikt werd. Deze laatste lieten een directe relatie zien tussen enerzijds sterfte van embryo's en teratogene effecten en anderzijds de temperatuur van de moederdieren tijdens de blootstelling aan EM velden na overschrijding van een drempelwaarde ($41,5 \text{ }^\circ\text{C}$ gedurende 40 minuten) en de tijdsduur van de temperatuurverhoging (Bro88, Lar82). Deze dosis-responsrelatie is ook bekend van de directe blootstelling aan warmte bij de mens (Ple81, War86).

Testes

Effecten van blootstelling aan radiofrequente EM velden op de mannelijke vruchtbaarheid zijn voornamelijk het gevolg van verwarming. Een probleem in de meeste onderzoeken is dat proefdieren verdoofd moeten worden, hetgeen van invloed is op de reactie

van het lichaam op verwarming. Bij een dergelijke verminderde thermoregulatie is een drempelwaarde van 30 W/kg gerapporteerd voor een vermindering van het aantal primaire spermatocyten en spermatiden na blootstelling gedurende 30 minuten aan continue EM velden (Kow83, Sau81).

Bij blootstelling aan gepulste EM velden traden deze effecten op boven een drempelwaarde van 8 - 10 W/kg (Leb87).

Waarneming in de huid

In het algemeen vindt pas enige tijd na het begin van blootstelling aan EM velden waarneming van warmte of pijn plaats (Sau91, WHO93). Deze vertraging varieert van fracties van een seconde tot verscheidene secondes. Zowel waarneming als vertraging hangen sterk af van de frequentie, de vermogensdichtheid, de blootstellingsduur, de grootte van het blootgestelde gebied en de plaats daarvan op het lichaam. Bij de mens ligt de pijngrens ongeveer twee ordes van grootte boven de waarnemingsgrens. De grenswaarden voor waarneming van warmte door de mens lopen uiteen van externe vermogensdichtheden van 130 tot 600 W/m² voor zowel gepulste als continue velden. Waarneming in de huid is afhankelijk van de frequentie van het externe EM veld. Bij frequenties in het GHz-gebied zal blootstelling aan EM velden waargenomen worden door een gevoel van warmte in de huid, terwijl bij frequenties in het resonantiegebied in inwendige organen warmteschade kan ontstaan zonder dat tijdens de blootstelling warmte of pijn gevoeld wordt. Waarneming van EM energie door de huid is dus geen betrouwbare detectie maat voor het gehele frequentiegebied dat in dit advies wordt beschouwd.

2.6.4 *Effecten op systemisch niveau*

Effecten van geïnduceerde stroom

Voor frequenties lager dan 100 kHz zijn de resultaten van dierexperimenteel onderzoek en theoretische modelstudies gebruikt om drempelwaarden te bepalen voor stimulatie ten gevolge van blootstelling aan elektrische of magnetische velden in afhankelijkheid van de frequentie. In de figuren 2, 3 en 4 zijn enkele van deze grenswaarden geïllustreerd.

Cardiovasculair systeem

De reactie van het intacte cardiovasculaire systeem op blootstelling aan EM velden komt overeen met die op conventionele verwarming. De gerapporteerde effecten hangen af van de vermogensdichtheid en van omgevingsfactoren.

In verscheidene onderzoeken is in menselijke vrijwilligers het effect bepaald van blootstelling aan EM velden in magnetische-resonantie systemen (MRI). De resultaten zijn tegenstrijdig. Blootstelling gedurende 17 tot 30 minuten aan lage SARs (0,8 - 3 W/kg) resulteerde in een toename van de hartslagfrequentie tot 45% en een stijging van de lichaamstemperatuur van 0,7 °C (Aba85, Kid85), terwijl hogere SARs (2,7 - 4 W/kg) slechts een geringe verhoging van de hartslagfrequentie en lichaamstemperatuur tot gevolg hadden (Sch85, She89). Deze onderzoeken zijn echter verricht met slechts een klein aantal proefpersonen, die zich ook bewust waren van de blootstelling, hetgeen de hartslagfrequentie kan hebben beïnvloed. Er waren geen controles. Het is daarom moeilijk deze resultaten op waarde te schatten.

De laagste gerapporteerde drempelwaarde voor verandering van de hartslagfrequentie in ratten als gevolg van blootstelling aan continue EM velden is een SAR van 2,3 W/kg (McR88). Langdurige blootstelling (enkele uren per dag gedurende zes maanden), resulterend in een SAR van 2,5 W/kg, had geen invloed op het gewicht van het hart (D'An80).

Er zijn geen effecten op het cardiovasculaire systeem gevonden van korte of langdurige blootstelling aan gepulste of gemoduleerde EM velden.

Zenuwstelsel

De meeste experimenten zijn uitgevoerd aan de hersenen. Gerapporteerd zijn onder meer een veranderd EEG, veranderingen in de permeabiliteit van de bloed-hersenbarrière, een toename in de uitstroom van calciumionen en veranderingen in de reactie op medicijnen.

In vele onderzoeken waren de experimentele omstandigheden niet optimaal en kunnen effecten van een elektrische stroom tussen de electrodes, lage temperaturen en een lage zuurstofspanning niet worden uitgesloten (Lid84, NCRP86). De uitkomsten van dergelijke onderzoeken zijn niet bruikbaar bij het bepalen van blootstellingslimieten.

De laagste drempelwaarde bij blootstelling aan continue EM velden is ongeveer 2 W/kg. Deze hangt samen met een toename van de permeabiliteit van de bloed-hersenbarrière (Alb77). Baranski en Edelwejn rapporteerden een versterking van de effecten van medicijnen die op het zenuwstelsel werken door blootstelling aan continue EM velden bij een SAR van 1,2 W/kg (Bar74).

De laagste drempelwaarde voor blootstelling aan gepulste EM velden is gevonden door Lai en medewerkers. Na 45 minuten blootstelling aan 2450 MHz, toegediend in de vorm van pulsen van 2 µs met een puls-frequentie van 500 Hz, resulterend in een SAR van 0,45 W/kg, nam de choline-opname in ratten af (Lai89).

Veranderingen in het EEG-patroon zijn waargenomen in konijnen na langdurige blootstelling aan amplitude-gemoduleerde EM velden, resulterend in een SAR van 0,001

W/kg (Tak79). Dit was echter een klein voorlopig onderzoek met slechts vier proefdieren en het EEG-patroon kan beïnvloed zijn door de toegepaste verdoving. Dit onderzoek is niet voortgezet en de resultaten zijn niet elders bevestigd. Het is daarom moeilijk deze gegevens op waarde te schatten en ze zijn derhalve ook niet bruikbaar bij het vaststellen van blootstellingslimieten.

Hematologische effecten

Er is een groot aantal onderzoeken uitgevoerd naar effecten op het bloedbeeld in aan EM velden blootgestelde dieren. Dergelijke effecten zijn alleen gevonden bij een aanzienlijke stijging van de lichaamstemperatuur (Sau91, WHO93). In een overzicht van tot dan toe verricht onderzoek kon Smialowicz geen consistent patroon ontdekken in de effecten van blootstelling aan EM velden op perifere bloedcellen in jonge ratten (Smi84).

Immunologische effecten

Voor verschillende onderdelen van het immuunsysteem is gerapporteerd dat zij beïnvloed worden door blootstelling aan EM velden. Zowel stimulatie als remming zijn gevonden, maar de effecten waren doorgaans van tijdelijke aard en konden over het algemeen worden toegeschreven aan warmtebelasting. Vaak voorkomende effecten zijn onderdrukking van de activiteit van natural killer cellen en een toename van de reactiviteit van lymfocyten. Soortgelijke effecten vindt men ook na toediening van warmte. De drempel voor deze effecten bij blootstelling aan continue EM velden is in de orde van grootte van 2 - 5 W/kg (Lib79, Pri72).

Langdurige blootstelling (25 maanden) van ratten aan gepulste EM velden met SARs tot 0,4 W/kg had geen effect op het afweersysteem (Guy85b).

Effecten op het hormoonstelsel

De reactie van het endocriene systeem op blootstelling aan EM velden lijkt niet anders te zijn dan die op andere externe stress-opwekkende factoren, zoals lawaai of warmte: de corticosteronspiegel in het bloed stijgt en de thyroxinespiegel daalt. Lu en medewerkers vonden in ratten een verlaging van de corticosteronspiegel na blootstelling aan continue EM velden resulterend in een SAR van 0,2 W/kg, maar in hetzelfde experiment werd een verhoging waargenomen toen de SAR verhoogd werd tot 8,2 W/kg (Lu81).

In primaten (rhesusapen) is bij blootstelling aan gepulste velden voor deze effecten een drempelwaarde van 3 - 4 W/kg gevonden (Lot82, Lot83).

Temperatuurregeling

Blootstelling van menselijke vrijwilligers aan SARs tot 4 W/kg gedurende 20 tot 30 minuten resulteerde in een verhoging van de lichaamstemperatuur met 0,1 - 0,5 °C (Gor86, Kid85, Sch85, She87, She88, She89). Omgevingsfactoren hebben een sterke invloed op de drempelwaarden voor reacties op het gebied van temperatuurregeling.

Bij ratten, muizen en apen zijn temperatuurveranderingen na blootstelling aan continue EM velden al gevonden bij SAR-waarden van 0,3 W/kg (Ada82, Lot88, Ste79).

Temperatuurafhankelijke gedragsveranderingen

Het is bekend dat een hoge omgevingstemperatuur op de werkplek resulteert in een hogere kans op ongelukken en een vermindering van het prestatieniveau (Bel67). Dit verschijnsel is echter niet onderzocht in relatie met blootstelling aan EM velden.

Bij dieren is de drempelwaarde voor de SAR waarbij het aanleren van nieuwe taken wordt beïnvloed lager dan die waarbij het uitvoeren van reeds aangeleerde taken wordt verstoord: respectievelijk 0,7 W/kg en 2,3 W/kg (D'An86b, DeL84, Mit77). Een drempelwaarde van 0,1 W/kg is gevonden voor een vermindering van het aanleren van bepaalde handelingen (D'An86a). Deze resultaten konden echter in later onderzoek niet worden gereproduceerd (DeW87). De drempelwaarde voor blootstelling aan gepulste EM velden bleek bij dit onderzoek in dezelfde orde van grootte te zijn als die voor blootstelling aan continue velden.

Het is niet duidelijk of bij al deze gedragsexperimenten de invloed van geluidseffecten (zie 2.6.3) geheel uitgesloten kan worden.

2.6.5 *Biologische effecten van ELF amplitude-gemoduleerde EM velden*

Er wordt veel onderzoek verricht naar mogelijke effecten van ELF (extreem laagfrequente) EM velden op biologische systemen. Bespreking van dit onderzoek valt weliswaar buiten het bestek van dit advies, maar bij verscheidene van deze onderzoeken zijn radiofrequente EM velden, amplitude-gemoduleerd met ELF frequenties, gebruikt om de doordringing van de ELF signalen in het weefsel te vergroten. Het meest bekend zijn experimenten waarin de uitstroom van calciumionen uit hersenweefsel van kippen is bestudeerd (bijvoorbeeld Bla85, Bla89). Maar ook andere weefsels van diverse diersoorten zijn *in vitro* en *in vivo* onderzocht.

De vraag is nu, of de gerapporteerde effecten van deze ELF amplitude-gemoduleerde EM velden alleen het gevolg zijn van de ELF modulatie of dat er ook een bijdrage is van de radiofrequente EM velden. Verschillende waarnemingen wijzen er op dat dit laatste niet het geval is:

- de effecten van blootstelling aan alleen ELF velden en aan ELF amplitude-gemoduleerde radiofrequente EM velden zijn gelijk
- in experimenten waarin effecten van ELF amplitude-gemoduleerde EM velden zijn gerapporteerd werden geen effecten van alleen radiofrequente EM velden gevonden
- in de meeste experimenten is het weefsel blootgesteld aan zeer lage vermogensdichtheden van 7,5 tot 147 W/m², overeenkomend met SARs van $0,3 \times 10^{-3}$ tot $5,3 \times 10^{-3}$ W/kg (onder aanname van een factor $0,36 \times 10^{-4}$ voor de conversie van W/m² naar W/kg; Bla89).

Tevens is het volgende van belang. In diverse experimenten is, bij gebruik van de veldsterkte als blootstellingsmaat, een ELF veldsterkte-‘venster’ gevonden. Bij zo’n venster wordt een respons waargenomen in een bepaald veldsterktegebied, terwijl bij hogere en lagere veldsterktes de respons veel zwakker of geheel afwezig is. In sommige experimenten is zelfs meer dan één venster waargenomen. Op zichzelf zijn venstereffecten niet nieuw in de biologie. Zij kunnen het gevolg zijn van concurrerende processen zoals celgroei en temperatuur. Het is echter niet eenvoudig om voor het ontstaan van verschillende vensters voor een enkele variabele een verklaring te vinden. Diverse hypothesen zijn voorgesteld, maar tot op heden is geen enkele daarvan bewezen (Bla89, Pos88).

Kortom, er is geen wetenschappelijke overeenstemming over de waarnemingen uit deze experimenten met ELF amplitude-gemoduleerde EM velden en over de interpretatie ervan. De commissie acht deze onderzoeken daarom niet geschikt voor het mede bepalen van blootstellingslimieten.

2.6.6 *Conclusies*

In vitro-experimenten zijn belangrijk voor het bepalen van het mechanisme van de interactie tussen EM velden en biologische systemen en om te bepalen welke biologische eindpunten en blootstellingsomstandigheden in proefdieren onderzocht moeten worden. Zij kunnen echter op zichzelf niet dienen als basis voor het vaststellen van gezondheidsrisico’s voor de mens. Onderzoek aan proefdieren is noodzakelijk om de reactie van een geheel organisme op blootstelling aan externe factoren, zoals EM velden, te bepalen. Extrapolatie van de resultaten van dierproeven naar de mens moet echter zorgvuldig gebeuren. Kennis van de mechanismen die in de verschillende soorten werkzaam zijn, is daarbij van belang.

Bij de bepaling van het gezondheidsrisico van blootstelling aan EM velden dient men rekening te houden met het vermogen van het menselijk lichaam om onder normale

omstandigheden om te gaan met warmtebelasting. In een normale omgeving is het lichaam in staat om gedurende langere tijd een hoeveelheid warmte van 3 tot 6 W/kg kwijt te raken. In het dagelijks leven verwerkt een gezond lichaam zonder problemen een warmtebelasting van 1 tot 10 W/kg zoals deze door de ruststofwisseling of door spieractiviteit wordt opgewekt (Duk80, Gor84).

Uit de dierexperimenten blijkt dat de meeste effecten van blootstelling aan continue EM velden alleen waargenomen worden bij vermogensdichtheden die een aanzienlijke temperatuursverhoging veroorzaken. De drempelwaarden voor de SAR van de verschillende effecten variëren aanzienlijk. De lage SAR drempelwaarden zijn in de orde van grootte van 2 - 3 W/kg, anderzijds zijn ook waarden tot 100 W/kg gemeld. SAR drempelwaarden voor effecten op gedrag en warmteregeling zijn lager: 0,3 tot 0,7 W/kg. Extrapolatie van deze waarnemingen naar de mens wordt bemoeilijkt door verschillen in warmteregelingsmechanismen tussen mens en dier.

Bij de mens heeft onderzoek aan vrijwilligers aangetoond dat blootstelling aan een SAR van ongeveer 4 W/kg gedurende 20 tot 30 minuten resulteert in een kleine verhoging van de lichaamstemperatuur. Bij blootstelling aan gepulste EM velden zijn de effecten over het algemeen bij iets lagere vermogensdichtheden waargenomen dan bij continue velden.

2.7 Epidemiologisch onderzoek

Vrijwel alle tot dusverre verrichte epidemiologische onderzoeken naar de effecten van blootstelling aan EM velden zijn patiënt-controle-onderzoeken. In dergelijk onderzoek wordt op grond van bepaalde criteria een groep patiënten geselecteerd en wordt een groep controles samengesteld die met betrekking tot een aantal relevante karakteristieken zoveel mogelijk overeenkomt met de groep patiënten. Vervolgens wordt onderzocht aan welke factoren de patiënten en controlepersonen in het verleden zijn blootgesteld. Indien een bepaalde blootstelling vaker bij patiënten voorkomt dan bij controles kan dat wijzen op een mogelijk oorzakelijk verband.

Bij het bepalen van risico's van blootstelling aan omgevingsfactoren, verdienen epidemiologische gegevens in principe voorkeur. Talloze problemen kunnen echter de geldigheid of waarde (niet te verwarren met de statistische betrouwbaarheid) van de resultaten van epidemiologisch onderzoek verminderen. Het is slechts gedeeltelijk mogelijk hier rekening mee te houden. In het geval van gezondheidseffecten van blootstelling aan EM velden hebben de volgende factoren een negatieve invloed op de betrouwbaarheid van de resultaten (Den92, WHO93):

- Vaak zijn de resultaten niet gebaseerd op metingen van de blootstelling, maar op bepaalde blootstellingskarakteristieken, bijvoorbeeld de aanduiding van een beroep of

- het wonen op een bepaalde afstand van een bron van EM velden. Daarom is het in dergelijke gevallen niet uit te sluiten dat de blootstelling onjuist is geclassificeerd.
- Het is moeilijk om voor individuele personen gedurende een relevante periode de blootstelling vast te stellen.
 - Het is bijzonder lastig om rekening te houden met verstorende factoren, zoals gelijktijdige blootstelling aan ELF EM velden of aan andere fysische of chemische factoren.

Gedetailleerde overzichten van de epidemiologische literatuur zijn samengesteld door Dennis en medewerkers (Den92), de WHO (WHO93) en, het meest recent, door Goldsmith (Gol95). De commissie vat hieronder de belangrijkste onderzoeken uit deze overzichten kort samen en bespreekt nog enkele recente onderzoeken.

2.7.1 *Algemene gezondheidstoestand*

Onderzoekers in de voormalige Sovjetunie legden aan het eind van de jaren zestig een verband tussen a-specifieke gezondheidsklachten en langdurige blootstelling aan microgolven bij beroepsmatig blootgestelde werknemers. Een groot aantal klachten werd gemeld, zoals hoofdpijn, slaapstoornissen, vermoeidheid, verlies van libido, pijn in de borst en gevoelens van algehele malaise. Ook werden veranderingen in concentraties bloedcellen en in bloedelektrolyten gerapporteerd. In het algemeen ontbrak bij deze onderzoeken een adequate opzet. Het is daarom niet mogelijk om op grond van deze onderzoeken enige conclusies te trekken aangaande een mogelijke relatie tussen blootstelling aan EM velden en gezondheidseffecten.

Twee goed opgezette onderzoeken die in de jaren zeventig in Oost-Europa zijn uitgevoerd, zijn het vermelden waard. Siekierzynski onderzocht blootstelling van Poolse mannen aan gepulste EM velden afkomstig van radarinstallaties (Sie74). Hij vond geen verschil in afwijkingen in het functioneren tussen een groep mannen die gedurende één tot tien jaar waren blootgesteld aan vermogensdichtheden van 2 - 60 W/m² en een niet blootgestelde groep (vermogensdichtheden minder dan 2 W/m²). Djordjevic vond geen negatieve effecten op de gezondheidstoestand van radarpersoneel in Joegoslavië in verband met blootstelling aan gepulste radarvelden met vermogensdichtheden tot 50 W/m² gedurende vijf tot tien jaar (Djo79).

Lilienfeld en medewerkers bestudeerden het personeel van de Amerikaanse ambassade in Moskou, dat tussen 1953 en 1976 aan EM velden met frequenties tussen 0,6 en 9,5 GHz en vermogensdichtheden tot 0,15 W/m² was blootgesteld. Het onderzoek betrof 4827 blootgestelde en een controlegroep van 7561 individuen. De blootstelling, die gemiddeld acht maanden lang plaats vond gedurende 9 tot 18 uur per dag, kon niet in

verband worden gebracht met enig verschil in gezondheidstoestand, levensduur of doodsoorzaak tussen de twee groepen (Lil78).

Robinette en medewerkers onderzochten een populatie van 40 000 personeelsleden van de Amerikaanse marine. Een groep van 20 000 mensen was tijdens de oorlog in Korea beroepsmatig blootgesteld aan gepulste EM velden tussen 0,2 en 5 GHz, afkomstig van radarinstallaties. Het blootstellingsniveau, dat werd geschat op grond van de beroepsbeschrijving en het vermogen van de apparatuur, was in sommige gevallen meer dan 100 W/m^2 . Het blootstellingsniveau in de controlegroep was minder dan 10 W/m^2 . De gemiddelde blootstellingsduur was twee jaar. De meer blootgestelde groep werd gesplitst in een subgroep met een geschatte 'matige' blootstelling en een subgroep met een geschatte 'hoge' blootstelling. Er werden geen significante verschillen gevonden met betrekking tot de mortaliteit en morbiditeit tussen de drie groepen (Rob80).

In een recenter, kleinschalig, onderzoek aan 17 blootgestelden en 12 controles voerden Nilsson en medewerkers uitvoerige neurologische, psychometrische en neuropsychiatrische tests uit op radartechnici die blootgesteld waren geweest aan gepulste EM velden met vermogensdichtheden van minder dan 10 W/m^2 . Zij vonden geen aanwijzingen voor effecten op het centrale zenuwstelsel, met uitzondering van een toename van een eiwit met een iso-elektrisch punt van 4,5 in de cerebrospinale vloeistof. Dit verschijnsel kwam vaker voor bij blootgestelden. De betekenis hiervan voor de gezondheidstoestand is echter niet duidelijk (Nil89).

De hoogste beroepsmatige blootstelling aan EM velden vindt waarschijnlijk plaats bij operators van machines waarmee met behulp van warmte materialen worden geseald en plastic wordt gelast. Hierbij worden EM velden in het frequentiegebied van 20 - 100 MHz toegepast. Operators van deze machines die blootgesteld hadden gestaan aan vermogensdichtheden van $100 - 250 \text{ W/m}^2$ en zelfs nog hoger, vertoonden een toename van paraesthesie in de handen (gevoelloosheid, vermindering van het twee-punts onderscheidingsvermogen), neurasthenie (een neuropsychiatrische aandoening, gekarakteriseerd door vermoeidheid, hoofdpijn, rugpijn en misselijkheid) en irritaties aan de ogen. De oogklachten werden soms nog verergerd door dampen afkomstig van het verwarmde plastic (Kol88).

Omdat de ooglenzen in het bijzonder gevoelig is voor warmte, hebben sommige epidemiologische onderzoeken zich speciaal op vertroebelingen van de lens en staar gericht. In de meeste onderzoeken is geen verschil gevonden tussen blootgestelden en niet-blootgestelden, veelal militair personeel. Onderzoek naar lange-termijneffecten bij oudere werknemers ontbreekt echter. In die gevallen waarin staar daadwerkelijk is aangetoond, was de blootstelling aan EM velden naar schatting meer dan 1 kW/m^2 (Den92). In dierexperimenten is bij konijnen staar gevonden na blootstelling aan 2450 MHz tot maximaal $1,5 \text{ kW/m}^2$. Bij primaten is echter zelfs na blootstelling aan 5 kW/m^2 geen effect waargenomen (zie 2.6.3).

2.7.2 Voortplanting

In de jaren zeventig zijn enkele onderzoeken uitgevoerd naar mogelijk negatieve effecten op de voortplanting in relatie tot blootstelling van de vader aan EM velden afkomstig van radar. In één onderzoek is een correlatie gevonden tussen blootstelling aan EM velden en het voorkomen van het syndroom van Down (Sig65), maar dit is in later onderzoek niet bevestigd (Bur77, Coh77).

Het resultaat van de zwangerschap van 305 vrouwelijke lassers in Zweden verschilde niet van dat in de algemene bevolking. De vrouwelijke lassers waren blootgesteld aan vermogensdichtheden van meer dan 250 W/m^2 (Kol88).

Epidemiologisch onderzoek onder vrouwelijke fysiotherapeuten heeft aanwijzingen opgeleverd dat blootstelling aan EM velden effecten op het verloop van de zwangerschap kan hebben. In een publicatie over een patiënt-controle onderzoek in Zweden rapporteerde Källén dat fysiotherapeutes die kinderen met geboortefwijkingen hadden gekregen, aan hogere niveaus van ultrageluid en aan sterkere EM velden van kortegolf-apparatuur waren blootgesteld dan andere fysiotherapeutes (Käl82). Larsen vond bij Deense vrouwelijke fysiotherapeuten een statistisch significante verschuiving in de geslachtsverhouding ten gunste van meisjes (80% meisjes tegen 20% jongens) (Lar91). Deze verschuiving kan geassocieerd zijn met blootstelling aan EM velden tijdens de eerste maanden van de zwangerschap. In een onderzoek in Zwitserland konden deze resultaten echter niet bevestigd worden. In hetzelfde onderzoek kon ook geen verband tussen blootstelling aan EM velden en een vermindering van het gemiddeld geboortegewicht aangetoond worden (Gub94).

Ouellet-Hellstrom en Stewart trokken op grond van een patiënt-controleonderzoek in de VS de conclusie dat miskramen vaker voorkwamen bij fysiotherapeutes die aangaven microgolf (915 MHz en 2450 MHz)-diathermieapparatuur gebruikt te hebben in de zes maanden voorafgaande aan en in het eerste trimester van de zwangerschap, dan bij beroepsgenoten die dat niet hadden gedaan (Oue93). De kans op een effect nam toe met toenemend niveau van blootstelling, zelf na toepassing van correctie voor eerdere miskramen. Hoewel de trend significant was, was dat niet het geval voor de toename van de kans op effect bij het hoogste blootstellingsniveau. Of het toegenomen risico direct gerelateerd is aan het gebruik van microgolf-diathermieapparatuur of aan iets wat nauw met dat gebruik in verband staat, moet nog nader worden uitgezocht. Er werd geen samenhang gevonden tussen de kans op een miskraam en het gebruik van, bij een frequentie van 27 MHz werkende, kortegolf-diathermieappartuur (Oue93). Omdat de blootstellingsgegevens in dit onderzoek gebaseerd zijn op het door de betrokkenen zelf gemelde gebruik van microgolf- en kortegolf-diathermieapparatuur, speelt selectieve herinnering mogelijk een rol. Bovendien zijn de waarnemingen niet goed verenigbaar

met het fysische argument dat in het eerste trimester van de zwangerschap blootstelling van de baarmoeder aan EM velden van kortegolf-apparatuur hoogstwaarschijnlijk groter is dan blootstelling aan velden afkomstig van microgolf-diathermieapparatuur, omdat deze laatste minder ver in het lichaam doordringen (Hoc95).

2.7.3 Kanker

In het al eerder genoemde onderzoek bij 40 000 Amerikaanse marinemensen bleek in de 'matig' en 'hoog' blootgestelde groepen sterfte als gevolg van kanker van het spijsverteringskanaal, de ademhalingswegen en het lymfatische en bloedvormende systeem niet significant vaker voor te komen dan in de controlegroep (Rob80).

In een klein onderzoek onder militair personeel dat langdurig aan EM velden was blootgesteld bleek dat 14 patiënten met polycytemie (toename van de hoeveelheid rode bloedcellen) vaker waren blootgesteld dan 17 controles van overeenkomstige leeftijd (Fri81). Omdat de gegevens over de blootstelling verkregen zijn uit interviews is het mogelijk dat selectieve herinnering de gegevens verstoord heeft.

In een retrospectief cohort-onderzoek onder Pools militair personeel dat blootgesteld was geweest aan EM velden is een toename van de incidentie van kanker gevonden. De blootstelling werd omschreven als 4 - 8 uur per dag bij vermogensdichtheden onder 2 W/m^2 , met enkele minuten $2 - 10 \text{ W/m}^2$, maar soms zelfs $100 - 200 \text{ W/m}^2$. De incidentie van lymfomen en leukemie bleek toegenomen te zijn, maar het is niet uitgesloten dat andere schadelijke en mogelijk carcinogene factoren een versturende invloed op deze resultaten hadden (Szm88). Een causaal verband is niet vastgesteld (Szm96).

Thomas en medewerkers bestudeerden de kans op hersentumoren bij mannen met een beroep in de elektrische of elektronische industrie, waarbij zij speciale aandacht gaven aan mogelijke blootstelling aan radiofrequente EM velden (Tho87). In de betreffende beroepen vond blootstelling aan EM velden plaats, maar ook aan ELF velden, soldeerdampen en oplosmiddelen. Het uitoefenen van een elektrisch of elektronisch beroep bleek gerelateerd te zijn met een toename van de kans op hersentumoren met een factor 2,3 (95% betrouwbaarheidsinterval 1,3 - 4,2), maar dit kon niet worden verklaard uit blootstelling aan microgolven of radiofrequente EM velden.

Er is bijzonder weinig onderzoek gedaan bij niet-beroepsmatig blootgestelde personen. In 1982 vonden Lester en Moore een correlatie tussen een toename van de sterfte aan kanker en mogelijke blootstelling aan radarvelden afkomstig van luchtmachtbases (Les82). Vele versturende factoren kunnen echter een rol hebben gespeeld, zoals leeftijdsopbouw, sociale klasse en verstedelijking. Een later uitgevoerd onderzoek kon de waarneming niet bevestigen (Pol85).

Onlangs is in Hawaii een toename van het optreden van acute leukemie bij kinderen in de nabijheid van een militaire installatie met radiozenders die op 23,4 kHz uitzenden

gemeld. Een patiënt-controleonderzoek bij 12 patiënten en 48 controles wees uit dat wonen binnen een straal van 2,6 mijl vanaf de radiatoren voorafgaande aan diagnose geassocieerd was met een verdubbeling van de kans op leukemie. Dit resultaat was echter niet significant (Mas94).

Milham heeft een onderzoek uitgevoerd onder amateur-radiozendgemachtigden in het westen van de VS en daarbij gestandaardiseerde sterfteverhoudingen (standardized mortality ratio, SMR) ten opzichte van de algemene bevolking van de VS bepaald. De SMR voor alle doodsoorzaken bij elkaar was lager voor de radioamateurs, maar voor enkele types leukemie werden significant verhoogde SMRs berekend, met name voor acute myeloïde leukemie en aanverwante kwaadaardige nieuwvormingen van lymfoïde weefsels, en voor multiple myeloma. Een probleem met dit onderzoek is, ook hier, het gebrek aan gegevens over de blootstelling en de blootstellingsomstandigheden. Tevens is van belang dat 30 tot 40% van de radioamateurs een elektrisch of elektronisch beroep had, waardoor blootstelling aan ELF velden en chemicaliën, zoals metaaldampen, oplosmiddelen en PCBs, een versturende factor kan zijn (Mil85).

2.7.4 *Conclusie*

De commissie concludeert dat de epidemiologische onderzoeken geen aanwijzingen geven dat, bij de niveaus waaraan mensen gewoonlijk worden blootgesteld, algemene gezondheidseffecten ten gevolge van blootstelling aan EM velden te verwachten zijn.

De tegenstrijdige resultaten met betrekking tot de effecten van blootstelling op het resultaat van de zwangerschap bij vrouwelijke fysiotherapeutes vereisen nader onderzoek alvorens hierover conclusies getrokken kunnen worden. Speciale aandacht verdient hierbij het bepalen van de blootstelling, aangezien in de verrichte onderzoeken de exacte blootstelling niet bekend was.

Het epidemiologisch onderzoek biedt geen aanwijzingen dat EM velden een carcinogeen effect hebben. Sommige onderzoeken wekken de indruk dat er een grotere kans op kanker is voor die beroepen waarin gecombineerde blootstelling aan EM velden en chemische stoffen plaats kan vinden. Als gevolg van de opzet van deze onderzoeken kunnen hier echter vele versturende factoren een rol spelen. Nader gericht epidemiologisch onderzoek zal uit moeten wijzen of EM velden een rol spelen.

2.8 **Specifieke risicogroepen**

Een belangrijk facet van het vaststellen van blootstellingslimieten is het bepalen van de populatie die beschermd dient te worden. Een vaak gebruikt onderscheid is dat tussen de algemene bevolking en beroepsmatig blootgestelden, vanwege verschillen in

Tabel 6 Verschillen tussen beroepsmatig blootgestelden en de algemene bevolking.

beroepsbevolking	algemene bevolking
blootstellingsniveaus hoger	blootstellingsniveaus lager
blootstelling mogelijk gedurende 40 uur per week	continue, levenslange blootstelling
'gezonde arbeiders' geen kinderen en ouderen	uiteenlopende gezondheidstoestand alle leeftijden
vaak gecontroleerde omstandigheden	niet-gecontroleerde omstandigheden
• toezicht op blootstelling • speciale medische zorg	• blootstelling onbekend • geen speciale medische zorg
voorzorgsmaatregelen tegen verbranding en schokken	geen voorzorgsmaatregelen
bewust van mogelijke risico's	in het algemeen niet bewust van risico's; onvrijwillig risico

blootstelling en gevoeligheid tussen deze groepen. Enkele van deze verschillen zijn in tabel 6 samengevat.

Onder zowel de beroeps- als de algemene bevolking kunnen zich mensen bevinden die gevoeliger dan gemiddeld zijn voor blootstelling aan EM velden. De twee belangrijkste oorzaken hiervoor zijn een verstoorde warmteregulatie en de aanwezigheid van een medisch implantaat. Een samenvatting staat in tabel 7.

2.8.1 Verstoorde warmteregulatie

Omdat opwarming het belangrijkste effect is van blootstelling aan frequenties boven 10 MHz worden beperkingen voorgesteld aan de warmtebelasting van het gehele lichaam om voor de gezondheid nadelige effecten te voorkomen. Het is bekend dat sommige mensen minder warmte kunnen verdragen dan anderen en dat zij daardoor gevoeliger zijn voor warmtebelasting als gevolg van blootstelling aan EM velden. Een belangrijke factor is de leeftijd: het warmteregulatiesysteem is bij jonge kinderen nog niet geheel ontwikkeld en bij ouderen niet meer volledig werkzaam. Ook overgewicht en hart- en vaatziekten, zoals hypertensie, verminderen de mogelijkheden tot aanpassing aan een toename van de warmtebelasting.

Stijging van de lichaamstemperatuur door koorts, hormonale stoornissen (hyperthyroïdie) of hersenafwijkingen (afwijkingen aan de hypothalamus) verminderen eveneens het vermogen tot aanpassing aan opwarming door blootstelling aan EM velden. Ook diverse medicijnen, zoals sommige diuretica, vaatverwijders, kalmeringsmiddelen en pijnstillers, verminderen de warmtetolerantie.

Het is bekend dat warmtebelasting bij proefdieren, ook bij primaten, tot teratogene effecten leidt. Afwijkingen aan het centrale zenuwstelsel en aan het gelaat bij kinderen worden wel in verband gebracht met ernstige hyperthermie *in utero* tijdens het eerste

Tabel 7 Oorzakelijke factoren voor een hogere gevoeligheid voor mogelijk nadelige effecten van blootstelling aan radiofrequente EM velden (Ber92, Hoc91, NRPB93, WHO93).

verstoorde warmteregulatie	geïmplanteerde medische hulpmiddelen
leeftijd (jonge kinderen en ouderen)	pacemaker
overgewicht	orthopedische hulpmiddelen
koorts	middenoor-implantaten
diabetes	hartkleppen
hart- en vaatziekte	transcutane medicijntoedieningssystemen
hormonale afwijkingen	
hersanafwijkingen	
medicatie	
zwangerschap	

trimester van de zwangerschap (Mil92, Ple81). Het embryo en de foetus lopen een verhoogd risico om opgewarmd te worden door EM velden vanwege een minder efficiënte koelingsmechanisme. Tijdens grote warmtebelasting stijgt de temperatuur van de foetus meer dan die van de moeder (You90).

Het is van belang hier op te merken dat de invloed van een verminderde warmteregulatie bij de mens in combinatie met een toegenomen warmtebelasting van het gehele lichaam door EM velden niet goed bekend is. Slechts enkele onderzoeken beschrijven de reactie op blootstelling aan EM velden van personen die minder goed warmte kunnen verdragen of die een verminderde warmteregulatie hebben (Bud85, She87, She89). Het betreft hier patiënten die diagnostisch onderzoek met magnetische-resonatietechnieken ondergaan, waarbij een SAR, gemiddeld over het gehele lichaam, van ongeveer 0,4 W/kg wordt opgewekt en uiteenlopende temperatuursverhogingen optreden. Het is echter niet duidelijk of deze reactie geheel toegeschreven kan worden aan de blootstelling aan EM velden. De stress van het verblijf in de tamelijk smalle koker van het MRI apparaat kan ook de lichaamstemperatuur beïnvloeden.

Een hoge omgevingstemperatuur en zware lichamelijke inspanning, ten slotte, kunnen ook een negatieve invloed hebben op de warmteregulatie.

2.8.2 *Geïmplanteerde medische hulpmiddelen*

Door blootstelling van metalen implantaten aan EM velden, wordt lokaal het elektrisch veld sterker en daarmee ter plaatse de absorptie van energie verhoogd. Hierdoor kan het omliggende weefsel worden opgewarmd. Dit effect kan vooral optreden bij orthopedische metalen voorwerpen zoals draden, platen, staven en kunstgewrichten. Maar ook andere hulpmiddelen verdienen de aandacht, zoals metalen hartkleppen en transdermale

medicijnafgiftesystemen die metalen onderdelen bevatten, bijvoorbeeld geïmplanteerde insuline-infusiesystemen. Vullingen van tanden en kiezen zijn geen probleem: de koeling in de mond is zeer effectief en tanden en kiezen zijn voldoende warmteresistent (Hoc91). De blootstellingslimieten voor de algemene bevolking worden geacht ook bescherming te bieden tegen nadelige effecten van opwarming van weefsel rond metalen implantaten.

Bij andere geïmplanteerde medische hulpmiddelen zoals pacemakers en cochleaire implantaten is elektromagnetische interferentie (EMI) meer van belang. EM velden kunnen een directe invloed uitoefenen op de pulsgenerator van een pacemaker, of een indirecte via de elektrode, die als antenne kan werken. Afscherming en filtering kunnen EMI grotendeels voorkomen, maar voldoende sterke signalen kunnen toch nog resulteren in dysfunctioneren van de pacemaker. Interferentie met cochleaire implantaten vindt plaats door directe ontvangst van de elektromagnetische golven. Bronnen in de werkomgeving waarvan bekend is dat zij interferentie veroorzaken, zijn onder andere elektrische lasapparaten, zendinstallaties en antennes, diëlektrische en inductieverwarmingsapparatuur en diathermie-apparaten (Hoc91).

Onlangs is ongerustheid ontstaan over het mogelijke risico van het gebruik van draagbare telefoons voor patiënten met een pacemaker. Draagbare telefoons kunnen een belangrijke bron van EM velden zijn, als gevolg van het toenemend gebruik en doordat zij zich vaak dichtbij een geïmplanteerde pacemaker bevinden, bijvoorbeeld in een borstzak van een jas.

In bijlage E geeft de commissie achtergrondinformatie over EMI van pacemakers en over thans geldende normen. Wireless Technology Research (WTR), een onafhankelijke organisatie in de Verenigde Staten die door de telecommunicatie-industrie in het leven geroepen is om onderzoek naar mogelijke gezondheidsrisico's samenhangend met het gebruik van draadloze telecommunicatiemiddelen te ontwikkelen en uit te laten voeren, heeft onlangs een uitvoerige evaluatie van het onderzoek naar de effecten op pacemakers van door draagbare telefoons opgewekte EM velden gepubliceerd. De conclusie uit dat onderzoek is dat verscheidene pacemakertypes gevoelig zijn voor EM velden (Car96), zelfs bij veldsterktes die lager zijn dan de op warmte-effecten gebaseerde blootstellingslimieten die in hoofdstuk 3 van dit rapport behandeld worden.

De commissie is het eens met de aanbevelingen van WTR (zie bijlage E) dat speciale voorzorgsmaatregelen genomen moeten worden om elektromagnetische interferentie van pacemakers door EM velden te voorkomen. Patiënten bij wie een pacemaker is geïmplanteerd, zouden een draagbare telefoon die stand-by staat niet dicht bij de pacemaker moeten dragen, maar op een afstand van minimaal 15 cm. Daarnaast zouden fabrikanten van pacemakers gestimuleerd moeten worden modellen te ontwerpen die afdoende tegen EMI door draadloze telecommunicatie-apparatuur zijn beschermd.

2.8.3 *Elektromagnetische interferentie van andere medische apparatuur*

Elektromagnetische interferentie door EM velden afkomstig van draagbare telecommunicatie-apparatuur kan de werking van vitale medische apparaten, bijvoorbeeld hartbewakingsapparatuur op intensive care units, verstoren (VIF95). Hierdoor kan de gezondheid van patiënten bedreigd worden. De commissie onderschrijft de voorstellen die onlangs door de telecommunicatie-industrie zijn gedaan om het gebruik van draagbare telefoons in de directe nabijheid van gevoelige medische apparaten te beperken (VIF95).

Basisbeperkingen: huidige aanbevelingen

Er zijn maar weinig gegevens beschikbaar over effecten van EM velden op de mens. Het merendeel van de informatie is afkomstig uit dierproeven. In de meeste daarvan zijn echter slechts enkele specifieke frequenties gebruikt. Om het gezondheidsrisico van blootstelling aan EM velden beter te kunnen inschatten, zou een grotere verscheidenheid aan blootstellingsomstandigheden bestudeerd moeten worden.

Extrapolatie van de met proefdieren verkregen gegevens naar de mens wordt bemoeilijkt door verschillen in elektromagnetische karakteristieken tussen mensen en dieren, in temperatuurregelingsmechanismen en in lichaamsafmetingen. Dergelijke verschillen leiden tot verschillen in de afhankelijkheid van de beschouwde effecten van de golflengte en van de intensiteit van de EM velden. Het is daardoor niet goed mogelijk resultaten uit dierexperimenten te gebruiken voor het trekken van kwantitatieve conclusies voor de mens. Veel dierexperimenten zijn echter bijzonder relevant voor het begrip van mogelijke mechanismen via welke EM velden op moleculair en cellulair niveau op dieren en mensen kunnen inwerken.

In hoofdstuk 2 heeft de commissie aangegeven dat voor verschillende frequentiegebieden verschillende dosimetrische grootheden van belang zijn. Bepaalde waarden van deze grootheden moeten niet overschreden worden om de kans op voor de gezondheid nadelige effecten te beperken. De commissie noemt deze gezondheidskundige advieswaarden in dit advies 'basisbeperkingen'. In dit hoofdstuk geeft zij een samenvatting van de basisbeperkingen die door verscheidene nationale en internationale instanties zijn voorgesteld.

3.1 Stroomdichtheid

Zoals uiteengezet in 2.5.1, worden in het frequentiegebied tussen 300 Hz en 10 MHz de belangrijkste effecten in biologische weefsels veroorzaakt door kleine elektrische stromen die in het lichaam worden opgewekt door de EM velden, of door contactstromen. Om effecten die een negatieve invloed op de gezondheid kunnen hebben, zoals beïnvloeding van het functioneren van zenuwen en zenuwcellen, te voorkomen, moeten de elektrische stromen in het lichaam bepaalde waarden niet te boven gaan. Het is algemeen aanvaard dat in het lage frequentiegebied, van 300 Hz tot 1 kHz, stroomdichtheden van 10 mA/m² of minder niet resulteren in voor de gezondheid nadelige effecten. Boven 1 kHz neemt deze grenswaarde evenredig met de frequentie toe (zie 2.5.1) volgens de formule $f/100$, waarbij f de frequentie in Hz is (CEN95a, NRPB93).

3.2 SAR

De opwekking van warmte wordt beschouwd als het meest relevante effect van blootstelling aan EM velden in het frequentiegebied tussen 100 kHz en 10 GHz (zie 2.5.2). In sommige voorgestelde normen wordt deze grootte ook wel als basisbeperking voor lagere frequentiegebieden gebruikt. Aangenomen wordt dat in de mens blootstelling gedurende 20 - 30 minuten aan een SAR van 2 - 4 W/kg, gemiddeld over het gehele lichaam, resulteert in een opwarming van het lichaam met 0,1 - 0,5 °C (NRPB93, WHO93). Het is algemeen aanvaard dat bij een langdurig verhoging van de kerntemperatuur van het lichaam de temperatuurstijging niet groter moet zijn dan 1 °C, wil er geen gezondheidsschade optreden (IEEE92, NRPB93). De commissie onderschrijft dit standpunt.

Uit de resultaten van dierexperimenten kan opgemaakt worden dat onder verder normale omstandigheden gezondheidseffecten niet optreden wanneer de SAR niet hoger is dan ongeveer 4 W/kg.

Op grond van deze argumenten zijn alle organisaties die richtlijnen voorstellen, van mening dat bij blootstelling aan EM velden de SAR gemiddeld over het gehele lichaam een waarde van 4 W/kg niet te boven dient te gaan.

Veiligheidsfactoren

Bij het bepalen van maximale blootstellingswaarden op grond van de beschikbare wetenschappelijk gegevens, dient rekening gehouden te worden met de onzekerheden en variaties in blootstellingsomstandigheden, met de slechts beperkte kennis over de reactie van mensen op blootstelling aan EM velden en met de variatie in gevoeligheid tussen mensen. Bij de extrapolatie van met proefdieren verkregen gegevens naar de mens

moeten daarnaast, zoals eerder vermeld, verschillen tussen de soorten in aanmerking worden genomen. Hiertoe worden vaak zogenoemde veiligheidsfactoren toegepast op de blootstellingsniveaus waarbij het voorkomen van effecten verondersteld wordt verwaarloosbaar te zijn.

De waarde van de veiligheidsfactor hangt af van de inschatting van de onzekerheden in de beschikbare gegevens. Bij de keuze van een veiligheidsfactor voor de SAR wordt rekening gehouden met externe en interne factoren die van invloed zijn op de regulering van de lichaamstemperatuur. Indien de voorstellen gebaseerd zijn op proefdiergegevens wordt ook de variatie tussen de soorten in aanmerking genomen.

IRPA/INIRC* heeft bijvoorbeeld bij het bepalen van veiligheidsfactoren rekening gehouden met de volgende variabelen (IRPA88):

- verschillen in de absorptie van energie van EM velden tussen mensen van verschillende grootte, met speciale aandacht voor kinderen
- gebrek aan kennis over de relatie tussen piekwaarden voor de SAR van gepulste velden en biologische effecten
- verschillen in omgevingsfactoren; een hoge omgevingstemperatuur, hoge luchtvochtigheid en weinig luchtstroming verminderen de maximaal verdraagbare warmtebelasting; blootstellingslimieten dienen ook onder deze omstandigheden bescherming te bieden
- reflectie, bundeling en verstrooiing van de opvallende EM velden, waardoor een verhoogde absorptie van energie kan optreden.

Daarnaast kunnen ook andere factoren in overweging genomen worden bij het bepalen van een veiligheidsfactor voor blootstelling aan EM velden, bijvoorbeeld de veronderstelde verminderde warmteregulatie bij zwakke ouderen, bij mensen met bepaalde ziektes, bij zwangere vrouwen enzovoorts. Tevens kunnen verschillen in activiteitenpatronen (bijvoorbeeld tijdens lichamelijke inspanning) tussen blootgestelde personen van belang zijn. Over de invloed van andere factoren bestaat zoveel onzekerheid dat het moeilijk is om ermee rekening te houden. Dit zijn bijvoorbeeld verandering van de reactie bij het gebruik van medicijnen, mogelijke gecombineerde effecten van EM velden en chemicaliën of andere fysische agentia en mogelijke effecten van gemoduleerde velden op het centraal zenuwstelsel.

Het IEEE** stelt dat bij de keuze van de SAR-limiet van 4 W/kg 'worst-case'-omstandigheden aangenomen zijn die alles bijelkaar een grotere mate van veiligheid geven dan begrepen is in de expliciete veiligheidsfactor 10 (IEEE92). Bovendien stelt IEEE dat

* Het International Non-Ionizing Radiation Committee van de International Radiation Protection Association. Sinds 1992 is deze commissie als een onafhankelijke organisatie werkzaam onder de naam International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP).

** Het Institute of Electrical and Electronic Engineers in de Verenigde Staten.

het effect van blootstelling aan 0,4 W/kg vrijwel niet te onderscheiden is van dat van normale variaties in de omgevingstemperatuur, blootstelling aan zonlicht, training enzovoorts.

3.3 Aanbevelingen van verschillende organisaties

In deze subparagraaf geeft de commissie een kort overzicht van de basisbeperkingen die in de verschillende aanbevelingen worden voorgesteld en van de overwegingen die aan die basisbeperkingen alsmede, indien van toepassing, aan de toegepaste veiligheidsfactoren ten grondslag liggen. In verschillende gevallen worden aanbevelingen gegeven voor beroeps- en algemene bevolking, voor volwassenen en kinderen of voor 'gecontroleerde' en 'niet-gecontroleerde' omgevingen. (Een gecontroleerde omgeving is hierbij gedefinieerd als een gebied waar blootstelling plaats kan vinden van mensen die zich daar bewust van zijn, hetzij ingevolge hun werkzaamheden, hetzij omdat door middel van waarschuwingsborden is aangegeven dat blootstelling mogelijk is.) De gedachten achter dergelijke vormen van onderscheid vat de commissie kort samen in paragraaf 4.1.

Gezondheidsraad

In het Gezondheidsraadadvies uit 1975 is geen onderverdeling gemaakt in het daarin beschouwde frequentiegebied van 300 MHz tot 300 GHz (GR75). Het begrip SAR was destijds nog niet ontwikkeld; blootstellingslimieten werden gegeven in de vorm van vermogensdichtheden en waren gebaseerd op thermische effecten. De Raad beval voor 'microgolfwerkers' een maximale vermogensdichtheid aan van 100 W/m², gemiddeld over 1 seconde en voor ten hoogste 5 uur per dag. Voor alle andere personen werd een maximale waarde van 10 W/m² voor continue blootstelling aanbevolen. Een onderbouwing van de impliciete veiligheidsfactor 10 werd niet gegeven.

ANSI

Op grond van een uitgebreid literatuuronderzoek concludeerde het American National Standards Institute (ANSI) in 1982 dat acute blootstelling, korter dan een uur, aan een SAR van minder dan 4 W/kg gemiddeld over het gehele lichaam niet gepaard gaat met voor de gezondheid nadelige effecten (ANSI82). Deze conclusie was gebaseerd op gedragsveranderingen in proefdieren bij acute blootstelling. Op grond van een aantal overwegingen met betrekking tot veiligheid en biologische onzekerheid werd een reductie van de SAR, gemiddeld over het gehele lichaam, met een factor tien voorgesteld. Dit resulteerde in de aanbeveling van een maximale SAR waarde van 0,4 W/kg bij continue blootstelling. In een herziening uit 1992 van deze richtlijnen is een extra veiligheidfactor

5 geïntroduceerd voor blootstelling in een niet-gecontroleerde omgeving voor bepaalde frequentiegebieden, waaronder het resonantiegebied (IEEE92). Het gevolg hiervan is een maximale SAR van 0,08 W/kg. Deze aanbevelingen hebben betrekking op het frequentiegebied van 100 kHz tot 6 GHz.

De basisbeperking in het frequentiegebied van 6 tot 300 GHz is een vermogensdichtheid van 10 mW/cm² (= 100 W/m²), zowel voor een gecontroleerde als niet-gecontroleerde omgeving. Een bijkomende eis in het frequentiegebied tussen 100 kHz en 300 GHz is een maximale stroomsterkte van het lichaam naar de aarde van 100 mA in een gecontroleerde en van 45 mA in een niet-gecontroleerde omgeving.

Voor het frequentiegebied van 3 tot 100 kHz is ook rekening gehouden met effecten van geïnduceerde en contactstromen. Hiervoor is een ingewikkelde en uitgebreide verantwoording gegeven (IEEE92).

IRPA/INIRC en WHO

Ook IRPA/INIRC heeft een SAR van 4 W/kg, gemiddeld over het gehele lichaam, gekozen als het uitgangspunt voor het vaststellen van blootstellingslimieten in het frequentiegebied van 10 MHz tot 300 GHz (IRPA88). Een bijkomende voorwaarde is een maximale stroomsterkte van 200 mA van het lichaam naar de grond. Voor beroepsmatige blootstelling wordt een veiligheidsfactor 10 toegepast op de SAR-waarde van 4 W/kg, resulterend in een SAR-limiet van 0,4 W/kg, gemiddelde over het gehele lichaam. Als onderbouwing van de keuze van de veiligheidsfactor worden een aantal argumenten gegeven (zie 3.2). Een extra veiligheidsfactor 5 wordt toegepast bij blootstelling van de algemene bevolking, resulterend in een maximum SAR van 0,08 W/kg (IRPA88).

Voor frequenties lager dan 10 MHz zijn de aanbevelingen van IRPA/INIRC gebaseerd op een maximale stroomsterkte van het lichaam naar de grond van 200 mA. Voor de daarvan afgeleide waarden van het elektrisch en magnetisch veld wordt een verschil van een factor 5 geïntroduceerd voor de maxima voor de beroeps- en algemene bevolking.

De aanbevelingen van IRPA/INIRC zijn onverkort overgenomen door de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO93).

ICNIRP* heeft onlangs een verklaring uitgegeven over effecten op de gezondheid samenhangend met het gebruik van draagbare telefoons (ICN96). In deze publicatie stelt ICNIRP voor bestraling van delen van het lichaam maximale SAR waarden voor van 10 W/kg voor de beroepsbevolking en 2 W/kg voor de algemene bevolking.

* De International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, sinds 1992 de onafhankelijke voorzetting van het International Non-Ionizing Radiation Committee van de IRPA.

NRPB

De National Radiological Protection Board (NRPB) van het Verenigd Koninkrijk stelt dat, op grond van gezondheidskundige overwegingen, een kortdurende verhoging van de lichaamstemperatuur met 1 °C toelaatbaar is en dat de temperatuur niet hoger zou moeten zijn dan 38 °C gedurende langere periodes (NRPB93). Gesteld wordt dat blootstelling aan een SAR van 1 W/kg gedurende ongeveer een uur, of aan een SAR van 4 W/kg gedurende kortere tijd, in een luchtig gekleed persoon een temperatuurverhoging van minder dan 1 °C veroorzaakt. De NRPB stelt als basisbeperking voor het frequentiegebied van 100 kHz tot 10 GHz een SAR van 0,4 W/kg voor, maar geeft geen onderbouwing van de grootte van de veiligheidsfactor. De NRPB maakt geen onderscheid tussen beroeps- en algemene bevolking. Bij de waarden voor de elektrische en magnetische veldsterktes die zijn afgeleid van de SAR wordt in het resonantie-gebied een versoepeling met een factor 1,2 tot 1,4 toegestaan indien blootstelling van kinderen niet mogelijk is.

De basisbeperking in het frequentiegebied van 10 tot 300 GHz is een vermogensdichtheid van 100 W/m².

In het gebied van de lage frequenties is de stroomdichtheid de beperkende factor. Deze dient tussen 300 Hz en 1 kHz niet hoger te zijn dan 10 mA/m² en tussen 1 kHz en 100 kHz niet hoger dan $f/100$ mA/m² (f in Hz).

CENELEC

De Europese Commissie voor Elektrotechnische Standaardisatie (CENELEC) heeft onlangs twee voornormen openbaar gemaakt voor blootstelling aan respectievelijk laag- en hoogfrequente elektromagnetische velden (CEN95a, CEN95b).

In het frequentiegebied van 1 MHz tot enkele GHz beschouwd CENELEC een SAR van 4 W/kg als de drempelwaarde voor nadelige effecten op de gezondheid. Voor de beroepsbevolking wordt een veiligheidsfactor 10 toegepast, waardoor de maximum toelaatbare SAR 0,4 W/kg is. Voor de algemene bevolking wordt nog een extra veiligheidsfactor 5 toegepast, hetgeen resulteert in een SAR van 0,08 W/kg. Een additionele eis voor het frequentiegebied van 10 - 100 MHz is een maximale stroomsterkte in de extremiteiten van 100 mA (beroepsbevolking) of 45 mA (algemene bevolking).

In het hoogste frequentiegebied, tot 300 GHz, is specifieke absorptie de belangrijkste basisbeperking. Voor de beroepsbevolking is de limiet gesteld op 10 mJ/kg en voor de algemene bevolking op 2 mJ/kg.

In het gebied van de lage frequenties, tot aan enkele MHz, is de geïnduceerde stroomdichtheid de basisbeperking. Tot aan 1 kHz is de maximale waarde 10 mA/m² en bij hogere frequenties neemt deze evenredig met de frequentie toe volgens $f/100$ mA/m²

(frequentie f in Hz). Deze waarden gelden voor de beroepsbevolking en impliceren een veiligheidsfactor 10; voor de algemene bevolking stelt CENELEC nog een extra veiligheidsfactor 2,5 voor.

De keuze voor de grootte van de veiligheidsfactoren wordt niet onderbouwd.

3.4 Huidige situatie in Nederland

In Nederland zijn geen normen van kracht voor de maximale blootstelling aan elektromagnetische velden. In de brochure 'Richtlijn voor radiofrequente straling bij zendingen' verwijst de Hoofdinspectie van de Volksgezondheid voor de Milieuhygiëne naar de richtlijnen van IRPA/INIRC uit 1988 (VROM90).

Conclusies en voorgestelde gezondheidskundige advieswaarden

4.1 Thermische en niet-thermische effecten

De aangetoonde effecten van blootstelling van mensen en dieren aan EM velden kunnen onderscheiden worden in de inductie van stroompjes in het lichaam – het belangrijkste effect bij lage frequenties – en de opwekking van warmte als gevolg van de absorptie van elektromagnetische energie – het belangrijkste effect in het hogere frequentiegebied. De resultaten van sommige experimentele onderzoeken wekken de indruk dat biologische effecten ook het gevolg kunnen zijn van andere niet-thermische mechanismen dan geïnduceerde elektrische stromen. Deze onderzoeken zijn echter in het algemeen behept met verschillende onvolkomenheden, onder meer in de opzet en de analyse van de experimentele gegevens. Bovendien is het tot nu toe niet mogelijk gebleken de resultaten in onafhankelijk onderzoek te reproduceren. Tevens zijn de bevindingen, voor zover ze gevonden zijn in *in vitro* onderzoeken, moeilijk te extrapoleren naar voor een geheel organisme negatieve effecten en er zijn ook geen biologische mechanismen die de gevonden effecten kunnen verklaren. Daarom kan de commissie de vermeende biologische effecten als gevolg van niet-thermische mechanismen niet gebruiken bij het vaststellen van blootstellingsadvieswaarden voor het frequentiegebied boven 10 MHz.

4.2 Onderscheid tussen bevolkingsgroepen of gebieden

Alle organisaties die richtlijnen hebben vastgesteld, zijn van mening dat niet op alle mensen in elke situatie dezelfde blootstellingslimieten van toepassing kunnen zijn. Er zijn

hiervoor twee benaderingen. De eerste is het maken van een onderscheid tussen beroeps- en algemene bevolking. In de tweede benadering maakt men een onderscheid tussen beperkt en onbeperkt toegankelijke gebieden. Sommige organisaties maken voor bepaalde grootheden ook wel onderscheid tussen volwassenen en kinderen, als verschillen tussen deze twee groepen van belang zijn.

De commissie meent dat er goede gronden zijn voor een twee-sporenbeleid en geeft de voorkeur aan een onderscheid tussen beroeps- en algemene bevolking. De gedachte hierachter is, dat de beroepsbevolking over het algemeen bestaat uit een homogene groep gezonde personen, terwijl de algemene bevolking ook oude, jonge, zieke en zwakke mensen omvat bij wie het temperatuurreguleringsmechanisme van het lichaam minder goed kan functioneren. Andere argumenten zijn: onzekerheid over effecten op lange termijn als gevolg van het ontbreken van gegevens daarover, het ontbreken van directe medische en algemene controle van leden van de algemene bevolking met betrekking tot blootstelling aan EM velden en het feit dat de beroepsbevolking alleen gedurende werktijd wordt blootgesteld, terwijl de algemene bevolking permanent kan blootstaan.

De commissie verstaat onder beroepsbevolking: de volwassenen die in het kader van hun beroepsuitoefening blootgesteld kunnen worden aan EM velden *en* die voorlichting hebben gekregen over de risico's die met die blootstelling samenhangen en over welke voorzorgsmaatregelen genomen kunnen worden. Dit betekent dat niet alle werknemers van een bedrijf waar blootstelling aan EM velden plaats kan vinden volgens deze definitie tot de beroepsbevolking gerekend worden. Het essentiële punt is of de werknemer de bedoelde voorlichting ontvangen heeft.

4.3 Afleiding van richtlijnen: basisbeperkingen

In het voorgaande hoofdstuk beschreef de commissie dat ANSI, NRPB, IRPA/INIRC en CENELEC allen voorstellen om een energieopname overeenkomend met een SAR van 4 W/kg, gemiddeld over het gehele lichaam, te beschouwen als maximaal toelaatbaar uit gezondheidskundig oogpunt. De commissie is het hiermee eens, maar vindt dat de keuze voor deze norm, als uitgangspunt voor het geven van richtlijnen, door geen van de genoemde organisaties goed is onderbouwd. Volgens haar is de meest relevante onderbouwing gebaseerd op experimentele gegevens verkregen met vrijwilligers, waaruit is gebleken dat blootstelling aan een SAR van 4 W/kg gedurende meer dan 20 minuten leidt tot een verhoging van de lichaamstemperatuur met ongeveer 1 °C. Hoewel het menselijk lichaam zo'n temperatuursverhoging kan verdragen, is het niet zeker of een langdurige verhoging van de lichaamstemperatuur de kans op nadelige effecten vergroot. Om dit te voorkomen vindt de commissie dat een veiligheidsfactor toegepast moet worden op de SAR-waarde van 4 W/kg. Zij stelt een factor 10 voor, in

overeenstemming met de benadering van ANSI, NRPB, IRPA/INIRC en CENELEC. Dit resulteert in een basisbeperking voor de SAR van 0,4 W/kg. Conform de redenering uit de vorige paragraaf maakt de commissie een onderscheid tussen de beroeps- en de algemene bevolking en voert zij een extra veiligheidsfactor 5 in voor de algemene bevolking. Voor deze populatie leidt dit tot een maximum SAR van 0,08 W/kg. De middelingstijd voor het bepalen van de SAR, gemiddeld over het gehele lichaam, is in alle gevallen zes minuten (zie 2.5.2).

In het lage frequentiegebied is de SAR minder belangrijk, maar zijn biologische effecten het gevolg van geïnduceerde elektrische stromen. In dat geval moet de stroomdichtheid beperkt worden. De commissie volgt de aanbevelingen van de NRPB. Zij maakt echter geen onderscheid tussen volwassenen en kinderen, maar tussen beroeps- en algemene bevolking. De door de NRPB voorgestelde waarden acht zij van toepassing op de beroepsbevolking en zij verlaagt deze waarden voor het algemene publiek met een factor 5.

Er is geen scherp gedefinieerde overgang tussen frequenties waarbij de geïnduceerde stroom en die waarbij de SAR de relevante dosimetrische grootte is. De commissie stelt daarom voor om in het frequentiegebied van 100 kHz tot 10 MHz de basisbeperkingen van beide grootheden van toepassing te laten zijn.

In het frequentiegebied boven 10 GHz vindt absorptie van de energie van EM velden voornamelijk plaats aan de oppervlakte van het lichaam. De SAR is dan minder relevant. De commissie stelt voor om de vermogensdichtheid van het externe EM veld, die proportioneel is met de oppervlakteabsorptie, als basisgrootte te gebruiken in dit frequentiegebied. Zij stelt een waarde van 100 W/m² voor de beroepsbevolking voor. Dit is in overeenstemming met de aanbevelingen van ANSI (IEEE92) en NRPB (NRPB93). Opgemerkt dient te worden dat in het advies 'Optische straling' van de Gezondheidsraad (GR93) een waarde van 1000 W/m² is aanbevolen voor het infraroodgebied (frequenties van 300 GHz en hoger). Deze waarde is gebaseerd op experimentele gegevens en grafieken uit een ANSI-rapport uit 1973 (ANSI73). In het Gezondheidsraadadvies uit 1993 zijn deze in een eerder advies (GR78) voorgestelde waarden overgenomen. ANSI heeft intussen een veiligheidsfactor 10 geïntroduceerd, waardoor de aanbeveling thans 100 W/m² is. De commissie volgt deze benadering, die overeenstemt met de benadering die zij heeft gevolgd bij de SAR, waar zij ook een veiligheidsfactor 10 heeft toegepast op de waarde die zij beschouwt als de uiteindelijke gezondheidkundige advieswaarde. Volgens dezelfde redenering past zij een extra veiligheidsfactor 5 toe voor de algemene bevolking, waardoor de grenswaarde voor de vermogensdichtheid voor deze populatie uitkomt op 20 W/m².

Echter, omdat de energieafgifte steeds oppervlakkiger wordt in het bovenste GHz-gebied en de regulering van de temperatuur geleidelijk verschuift van interne naar externe mechanismen, is het onderscheid tussen beroeps- en algemene bevolking hier minder

relevant. Bij 300 GHz ziet de commissie geen noodzaak voor een onderscheid tussen beroeps- en algemene bevolking. Zij stelt daarom een overgangsgebied voor tussen 10 GHz en 300 GHz.

De commissie heeft aangegeven dat voor het bepalen van SAR-waarden een middelingstijd van zes minuten aangehouden dient te worden. Bij quasi-optische effecten van blootstelling, zoals in het hoogste frequentiegebied beschouwd in dit advies, waarbij de absorptie van energie met toenemende frequentie steeds oppervlakkiger plaats vindt, moet de middelingstijd verlaagd worden. Overeenkomstig de aanbeveling van de NRPB stelt de commissie voor frequenties tot 10 GHz een middelingstijd van zes minuten voor en tussen 10 GHz en 300 GHz een lineaire afname naar een middelingstijd van 10 sec. In dit frequentiegebied kan de relatie tussen frequentie en middelingstijd al volgt worden beschreven:

$$t_{\text{mid}} = 68 / f^{1,05} \text{ (} f \text{ in GHz)}.$$

Deze middelingstijden zijn van toepassing op de vermogensdichtheid, de relevante dosimetrische grootheid in het frequentiegebied tussen 10 GHz en 300 GHz.

De basisbeperkingen die de commissie voorstelt zijn samengevat in tabel 8.

4.4 Afgeleide eenheden: maximale blootstellingswaarden

De in de basisbeperkingen gebruikte grootheden zijn in levende organismen niet eenvoudig te meten. Het is praktischer om te werken met grenswaarden voor grootheden waarvoor dit wel mogelijk is. Daarom worden grenswaarden bij voorkeur gegeven voor de sterkte van het elektrisch en magnetisch veld en voor de stroomdichtheid op de plaats van het object. Alle normgevende instanties hebben zogenoemde afgeleide blootstellingslimieten voor deze grootheden voorgesteld. Meestal zijn tamelijk eenvoudige modellen gebruikt om deze limieten uit die voor de SAR te berekenen. De commissie vindt het gebruik van dergelijke modellen wel acceptabel, maar beveelt aan dat in de toekomst thans beschikbare meer verfijnde modellen toegepast worden.

De waarden voor de afgeleide blootstellingslimieten die door de verschillende organisaties zijn voorgesteld, zijn alle gebaseerd op nagenoeg dezelfde basisbeperkingen (zie hoofdstuk 3). Toch zijn er kleine verschillen, als gevolg van verschillen tussen de gebruikte modellen. De commissie is bij de keuze voor blootstellingslimieten voor het elektrisch en magnetisch veld uitgegaan van drie voorwaarden. Ten eerste moeten de limieten de experimentele gegevens omsluiten (NRPB93, Gar95), ten tweede moeten zij niet onnodig beperkend zijn en ten derde moeten ze tegen indirecte effecten bescherming bieden. Indirecte effecten zijn in dit verband gedefinieerd als waarneming of pijn ten gevolge van contactstroom bij het aanraken van grote metalen voorwerpen die door een

Tabel 8 Basisbeperkingen.

frequentiegebied	stroomdichtheid (mA/m ²)		SAR (W/kg) ^a		vermogensdichtheid (W/m ²) ^b	
	beroeps-bevolking	algemene bevolking	beroeps-bevolking	algemene bevolking	beroeps-bevolking	algemene bevolking
	10	2				
1 kHz - 100 kHz	$f/100$ ^c	$f/500$ ^c				
100 kHz - 10 MHz	$f/100$ ^c	$f/500$ ^c	0,4	0,08		
10 MHz - 10 GHz			0,4	0,08		
10 GHz - 300 GHz					100	$6,727 \times f^{0,473}$ ^d

^a middelingstijd = 6 min

^b middelingstijd = $68 / f^{1,05}$ min (frequentie f in GHz)

^c frequentie f in Hz

^d frequentie f in GHz

elektrisch veld opgeladen kunnen worden. De commissie baseert zich de door Deno (Den74) en Guy (Guy85a) beschreven indirecte effecten bij het vaststellen van blootstellingslimieten.

4.4.1 Advieswaarden voor het elektrisch veld

Het uitgangspunt voor de limieten in het lage frequentiegebied zijn de waarden bij 50 Hz die door IRPA/INIRC zijn voorgesteld (IRPA90) en overgenomen door de Gezondheidsraadcommissie 'ELF elektromagnetische velden' (GR92): 5 kV/m voor blootstelling van de algemene bevolking en 10 kV/m voor beroepsmatige blootstelling. De commissie heeft deze waarden geëxtrapoleerd naar hogere frequenties conform de frequentie-afhankelijkheid van de sterkte van de geïnduceerde stroom (tabel 8), de basisbeperking in dit frequentiegebied. De resulterende maximale waarden van het elektrisch veld voor de beroepsbevolking, die een factor 2 boven die voor de algemene bevolking liggen, worden geacht van toepassing te zijn op situaties waarin indirecte effecten voor kunnen komen. Als dit niet het geval is kunnen voor de beroepsbevolking waarden worden gehanteerd die een factor 5 boven die voor de algemene bevolking liggen.

In het middelste frequentiegebied, ongeveer tussen 2 kHz en 1 MHz, extrapoleert de commissie de door IRPA/INIRC (IRPA88) gegeven curves voor frequenties hoger dan 0,1 MHz naar lagere frequenties, tot op het punt waar zij de curves voor de laagste frequenties snijden.

In het resonantiegebied – hier: het gebied tussen 10 MHz en 400 MHz – volgt de commissie de aanbevelingen van IRPA/INIRC (IRPA88). De waarden voor de

algemene bevolking zijn een factor $\sqrt{5}$ lager dan die voor de beroepsbevolking, aangezien de basisbeperkingen voor SAR en vermogensdichtheid voor de algemene bevolking een factor 5 lager zijn en de veldsterkte van het elektrisch veld kwadratisch gerelateerd is aan zowel SAR als vermogensdichtheid.

In het GHz-gebied is de basisbeperking een maximale vermogensdichtheid van 100 W/m^2 voor de beroepsbevolking. Dit betekent dat de curves van het afgeleide elektrisch veld tussen 400 MHz en 2 GHz sterker stijgen dan de door IRPA/INIRC voorgestelde curves, omdat die gebaseerd zijn op een maximale vermogensdichtheid van 50 W/m^2 . Het verschil tussen de limieten voor de algemene en beroepsbevolking neemt tussen 10 GHz en 300 GHz geleidelijk af totdat er bij 300 GHz geen onderscheid meer is.

In figuur 6 en tabel 9 zijn de door de commissie voorgestelde limietwaarden voor het elektrisch veld samengevat.

4.4.2 *Advieswaarden voor het magnetisch veld*

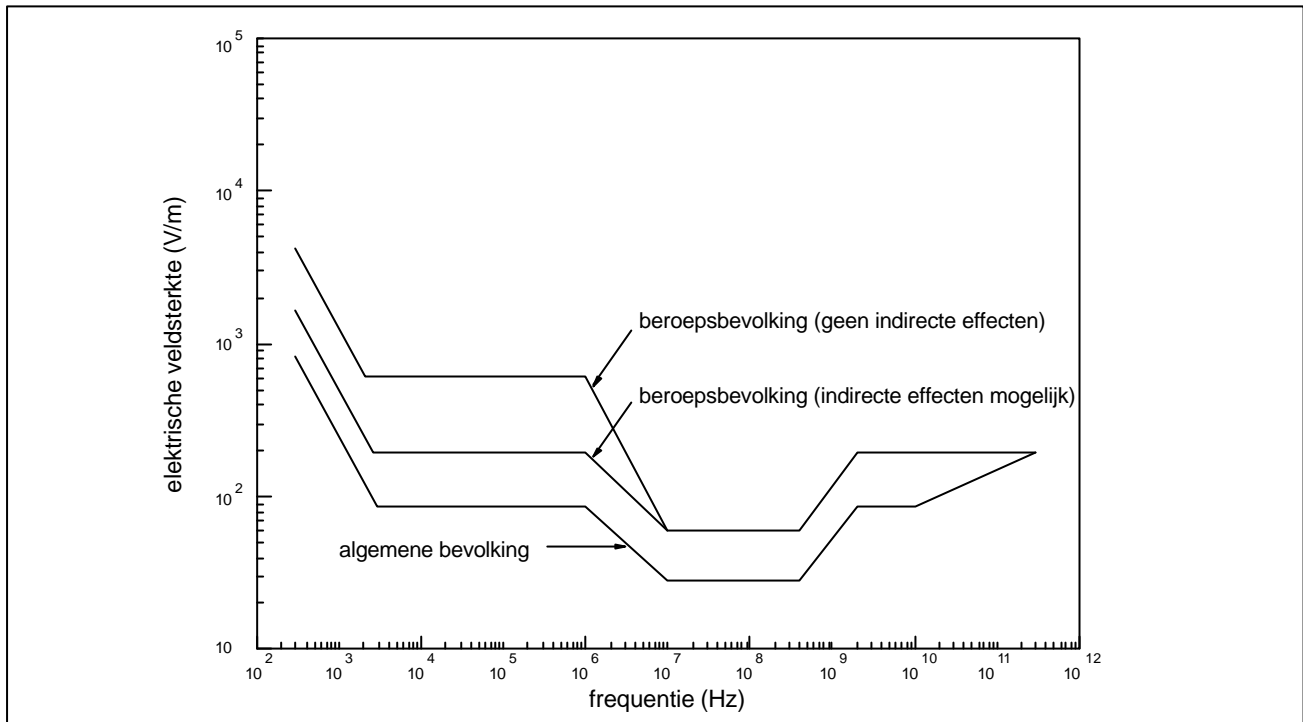
In het lage frequentiegebied gaat de commissie weer uit van de waarden bij 50 Hz die een commissie van de Gezondheidsraad in 1992 voorstelde (GR92) en die overgenomen zijn van IRPA/INIRC (IRPA90). Deze waarden, 0,5 mT voor de beroepsbevolking en 0,1 mT voor de algemene bevolking, extrapoleert zij naar hogere frequenties, waarbij zij rekening houdt met de basisbeperkingen met betrekking tot de geïnduceerde stroomdichtheid zoals vermeld in tabel 8. Het hierbij gebruikte model is een ellipsoïde met assen van 0,4 en 0,2 m zoals beschreven door Reilly (Rei92), en een geleidbaarheid \mathbf{s} van 0,2 S/m, een gemiddelde waarde voor spierweefsel.

Voor het middelste frequentiegebied neemt de commissie de waarden over die IRPA/INIRC voor de beroepsbevolking heeft voorgesteld voor frequenties tussen 100 kHz en 400 MHz (IRPA88). Deze extrapoleert zij naar lagere frequenties tot aan het snijpunt met de curves voor de lagere frequenties. De overeenkomstige waarden voor de algemene bevolking in dit middelste frequentiegebied zijn een factor $\sqrt{5}$ lager.

In het bovenste frequentiegebied wordt een soortgelijke procedure als bij de elektrische velden gevolgd. Het uitgangspunt is een vermogensdichtheid van 100 W/m^2 voor de beroepsbevolking; de magnetische velden worden hieruit berekend. Het verschil tussen beroeps- en algemene bevolking neemt ook voor de magnetische velden geleidelijk af tussen 10 GHz en 300 GHz.

Figuur 7 en tabel 10 geven een samenvatting van de door de commissie voorgestelde maximumwaarden voor het magnetisch veld en de magnetische fluxdichtheid.

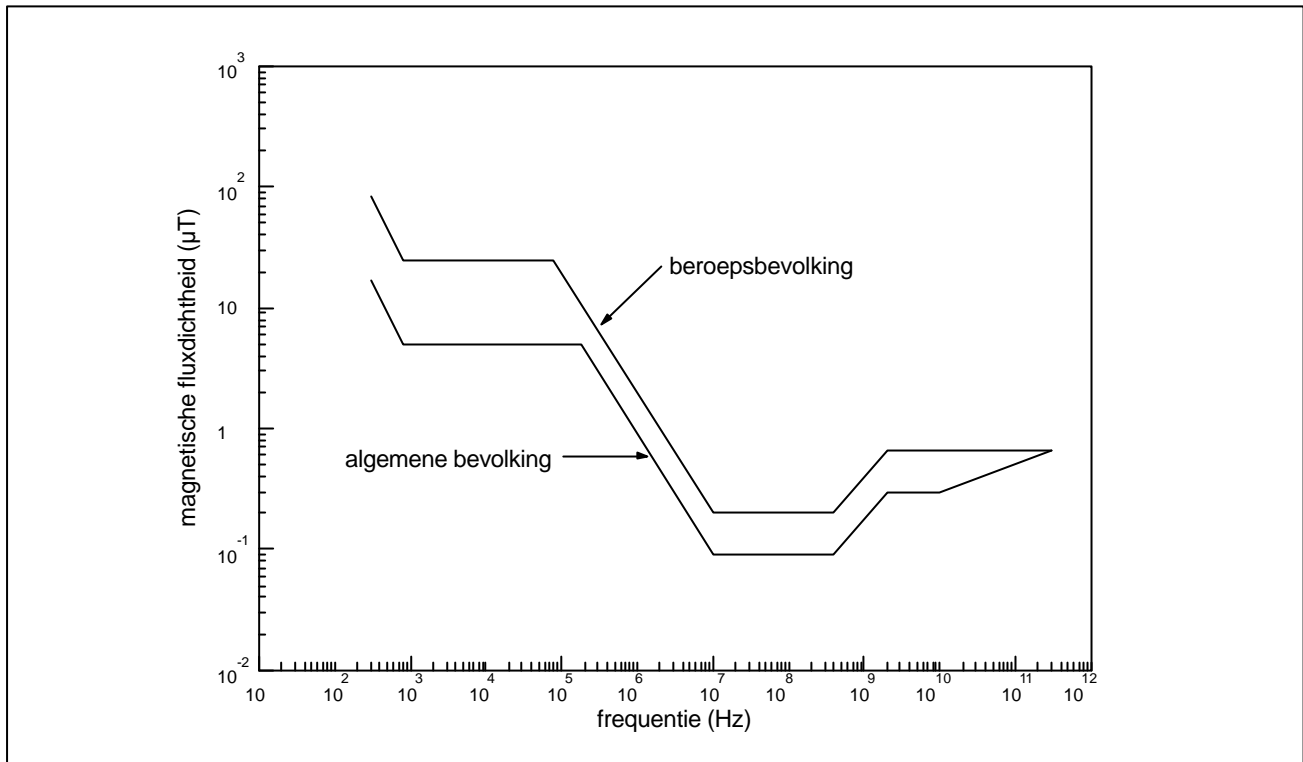
De commissie benadrukt dat de voorgestelde blootstellingslimieten niet opgevat kunnen en moeten worden als een strikte scheiding tussen 'gevaarlijke' en 'ongevaarlijke' niveaus. Zij moeten veeleer, overeenkomstig de benadering van NRPB, gezien worden



Figuur 6 Voorgestelde maximale sterktes voor het elektrisch veld.

Tabel 9 Voorgestelde maximale sterktes voor het elektrisch veld.

frequentie	elektrische veldsterkte (V/m)		
	beroepsbevolking		algemene bevolking
	geen indirecte effecten	indirecte effecten mogelijk	
300 Hz - 2,04 kHz	$1250 / f$	$500 / f$	$250 / f$ (f in kHz)
2,04 kHz - 2,58 kHz	614	$500 / f$	$250 / f$ (f in kHz)
2,58 kHz - 2,88 kHz	614	194	$250 / f$ (f in kHz)
2,88 kHz - 1 MHz	614	194	87
1 MHz - 10 MHz	$614 / f$	$194 / f^{0,5}$	$87 / f^{0,5}$ (f in MHz)
10 MHz - 400 MHz	61	61	28
400 MHz - 2 GHz	$118 \times f^{0,72}$	$118 \times f^{0,72}$	$53 \times f^{0,72}$ (f in GHz)
2 GHz - 10 GHz	194	194	87
10 GHz - 300 GHz	194	194	$78 \times f^{0,16}$ (f in GHz)



Figuur 7 Voorgestelde maximale magnetische fluxdichtheid.

Tabel 10 Voorgestelde maximale magnetische fluxdichtheid en magnetische veldsterkte.

frequentie	magnetische fluxdichtheid (μT)		magnetische veldsterkte (A/m)		
	beroeps-bevolking	algemene bevolking	beroeps-bevolking	algemene bevolking	
300 Hz - 1,0 kHz	$25 / f$	$5 / f$	$20 / f$	$4 / f$	(f in kHz)
1,0 kHz - 80 kHz	25	5	20	4	
80 kHz - 180 kHz	$2,0 / f$	5	$1,6 / f$	4	(f in MHz)
180 kHz - 10 MHz	$2,0 / f$	$0,92 / f$	$1,6 / f$	$0,73 / f$	(f in MHz)
10 MHz - 400 MHz	0,2	0,09	0,16	0,07	
400 MHz - 2 GHz	$0,39 \times f^{0,73}$	$0,17 \times f^{0,73}$	$0,31 \times f^{0,72}$	$0,14 \times f^{0,74}$	(f in GHz)
2 GHz - 10 GHz	0,65	0,29	0,52	0,23	
10 GHz - 300 GHz	0,65	$0,26 \times f^{0,16}$	0,52	$0,21 \times f^{0,16}$	(f in GHz)

als niveaus waarvan het overschrijden aandacht en maatregelen vereist.

4.5 Blootstelling van delen van het lichaam

De diverse richtlijnen geven blootstellingslimieten voor de SAR gemiddeld over het gehele lichaam. NRPB, ANSI en CENELEC geven daarnaast ook waarden voor de SAR in het geval van blootstelling van delen van het lichaam. In het algemeen zijn de SAR-limieten voor armen en benen hoger dan die voor andere lichaamsdelen.

De commissie volgt in grote lijnen de aanbevelingen van de NRPB, maar maakt een onderscheid tussen beroeps- en algemene bevolking, net als bij blootstelling van het gehele lichaam. De onderbouwing van de aanbevelingen van de NRPB, die de commissie overneemt, is het voorkómen van een lokale temperatuur hoger dan ongeveer 38 °C in het hoofd of in de foetus, 39 °C in de hals en de romp en 40 °C in armen en benen. Aan deze voorwaarden wordt voldaan wanneer de SAR-waarden zoals gegeven in tabel 11 niet worden overschreden. De middelingstijd is in alle gevallen 6 minuten.

Deze aanbevelingen stemmen overeen met het voorstel van ICNIRP met betrekking tot blootstelling van het hoofd aan EM velden die door draagbare telefoons worden uitgezonden (ICN96). ICNIRP stelt eveneens 10 W/kg voor de beroepsbevolking en 2 W/kg voor de algemene bevolking voor.

4.6 Kortdurende blootstelling

De commissie beschouwt elke blootstelling van minder dan zes minuten, de tijd die als warmte-evenwichtstijd is gekozen (zie 2.5.2), als een kortdurende blootstelling. Bij zulke kortdurende blootstellingen zijn de temperatuurregelingsmechanismen in het lichaam nog niet (volledig) in werking en is er een lineaire relatie tussen de afgifte van energie en de opwarming. SAR-waarden hoger dan de grenswaarden van 0,4 W/kg voor de beroepsbevolking en 0,08 W/kg voor de algemene bevolking zijn acceptabel, zolang de SAR gemiddeld over elke periode van zes minuten onder deze limieten blijft.

Tabel 11 Maximale SAR-waarden in W/kg voor blootstelling van delen van het lichaam.

frequentie	hoofd, hals, romp, foetus ^a gemiddeld over 10 g weefsel		ledematen gemiddeld over 100 g weefsel	
	beroeps- bevolking	algemene bevolking	beroeps- bevolking	algemene bevolking
100 kHz - 10 GHz	10	2	20	4

^a voor de foetus is alleen de waarde voor de algemene bevolking van toepassing

4.7 Blootstelling aan verscheidene frequenties tegelijk

In het dagelijks leven vindt meestal blootstelling aan meer dan één frequentie plaats. Om voor een dergelijke gecombineerde blootstelling de grenswaarden te berekenen, volgt de commissie de benadering van IRPA/INIRC, waarbij de vermogensdichtheden of de kwadraten van de elektrische of magnetische veldsterktes, uitgedrukt als fracties van de overeenkomstige grenswaarden, worden opgeteld:

$$\sum_i \left(\frac{E_i}{L_{E,i}} \right) \leq 1 \text{ en } \sum_i \left(\frac{H_i}{L_{H,i}} \right) \leq 1; \text{ voor alle frequenties } \leq 10 \text{ MHz}$$

en

$$\sum_i \left(\frac{E_i}{L_{E,i}} \right)^2 \leq 1 \text{ en } \sum_i \left(\frac{H_i}{L_{H,i}} \right)^2 \leq 1; \text{ voor alle frequenties } > 10 \text{ MHz,}$$

waarbij E_i het elektrisch veld is van de i -de bron, H_i het magnetisch veld van de i -de bron, terwijl $L_{E,i}$ en $L_{H,i}$ de overeenkomstige grenswaarden zijn voor het elektrisch en magnetisch veld.

De formules voor frequenties kleiner of gelijk aan 10 MHz vloeien voort uit overwegingen met betrekking tot geïnduceerde stroomdichtheid, terwijl die voor frequenties groter dan 10 MHz gebaseerd zijn op de SAR. Als sommige frequenties lager en andere hoger zijn dan 10 MHz, dient men het meest beperkende criterium te hanteren. Dit impliceert: toepassing van de formules voor frequenties lager dan 10 MHz voor alle bronnen.

4.8 Gepulste EM velden

De biologische effectiviteit van gepulste EM velden hangt af van de gemiddelde energie per puls. ANSI, IRPA/INIRC en CENELEC geven grenswaarden voor blootstelling. De gehanteerde formules verschillen echter aanzienlijk. ANSI baseert haar limieten op het voorkómen van effecten op het gehoor. De commissie beschouwt het horen van EM velden niet als een voor de gezondheid schadelijk effect en volgt deze benadering daarom niet. Zij beschouwt alleen effecten die niet met het gehoor te maken hebben.

De commissie heeft in 2.6.6 vermeld dat bij blootstelling aan gepulste EM velden biologische effecten bij wat lagere vermogensdichtheden optreden dan bij continue bestraling. Zij meent echter dat deze verschillen geheel vallen binnen de biologische variatie en daarom door de toepaste veiligheidsfactoren gecompenseerd worden. Zij beveelt

daarom aan om voor blootstelling aan gepulste EM velden dezelfde richtlijnen te hantieren als voor continue velden.

4.9 Contactstroom

De commissie beveelt aan om grenswaarden aan contactstroom te stellen, teneinde bescherming te bieden tegen elektrische schokken, verbranding en ongemak. Zij maakt weer een onderscheid tussen beroeps- en algemene bevolking. Omdat er echter voldoende experimentele gegevens zijn, meent zij dat een veiligheidsfactor van 2 voor de algemene bevolking voldoende is. De aanbevelingen zijn gebaseerd op experimentele gegevens die vermeld zijn in WHO93. De grenswaarden voor de beroepsbevolking zijn gekozen teneinde bij volwassenen sensatie van pijn bij vingercontact te voorkomen. Toepassing van een veiligheidsfactor 2 voor de algemene bevolking resulteert in een grenswaarde die zelfs bij kinderen het waarnemen van contactstroom bij aanraking voorkomt.

De aanbevelingen van de commissie staan in tabel 12.

Tabel 12 Voorgestelde maximum waarden voor contactstroom.

frequentie	contactstroom (mA)	
	beroepsbevolking	algemene bevolking
300 Hz - 2,5 kHz	1,0	0,5
2,5 kHz - 100 kHz	$0,4 \times f$	$0,2 \times f$ (f in kHz)
100 kHz - 10 MHz	40	20

4.10 Specifieke toepassingen

4.10.1 Draagbare telefoons

Dosimetrie

De sterkte van de EM velden die uitgezonden worden door draagbare telecommunicatieapparatuur, zoals draagbare telefoons en walkie-talkies, dient, teneinde nadelige invloed op de gezondheid te voorkomen, zodanig beperkt te zijn dat de energieabsorptie in het lichaam voldoet aan de aanbevelingen van de commissie. Bij normaal gebruik van dergelijke apparatuur wordt voornamelijk het hoofd blootgesteld, derhalve zijn de SAR-limieten voor blootstelling van delen van het lichaam van toepassing (zie paragraaf 4.5).

Omdat het hoofd zich in het nabijheidsveld van de antenne bevindt, kunnen geen grenswaarden voor het elektrisch of magnetisch veld worden afgeleid. De in paragraaf 4.4 voorgestelde waarden zijn niet bruikbaar, omdat deze zijn berekend voor verre-velddcondities en blootstelling van het gehele lichaam.

Verskillende numerieke en experimentele methodes zijn voorgesteld om de SAR in het hoofd te bepalen (And95, Dim94, Gan95, Mei95, Zwa92a). Uit het verricht onderzoek is gebleken dat de positie van de telefoon een belangrijke invloed heeft op de SAR-verdeling in het hoofd. De aanwezigheid van de hand en de positie van de antenne zijn eveneens belangrijke factoren. De SAR-verdeling kan aanzienlijk verschillen per type telefoon. Hoewel de numerieke methodes steeds verfijnder worden, vindt de commissie toch dat ze nog niet nauwkeurig genoeg zijn om gebruikt te worden voor berekening van de SAR-waarden in het hoofd. Een belangrijk probleem is de modellering van de door de telefoon uitgezonden EM velden. De commissie beveelt de verdere ontwikkeling van numerieke simulaties aan, maar meent dat vooralsnog de SAR-waarden berekend moeten worden aan de hand van metingen van de veldsterktes die telefoons in een kunsthoofd teweegbrengen.

GSM-telefoons

Er zijn metingen verricht aan verschillende types draagbare telefoons. Meier en medewerkers, bijvoorbeeld, hebben negen verschillende GSM-telefoons onderzocht die uitzenden met een frequentie van 900 MHz (Mei95). Ze hebben de sterkte van het elektrisch veld gemeten in een realistisch model van een menselijk hoofd en met behulp van deze gegevens de SAR-verdeling berekend. De metingen zijn uitgevoerd terwijl de telefoon zich in een normale positie bevond, d.w.z., met de antenne enigszins naar achteren wijzend. Focusering en reflectie zijn bij deze opstelling niet waargenomen. De absorptie van energie nam altijd af met toenemende afstand tot de bron. De berekende SAR-waarden zijn genormaliseerd op een continu uitgangsvermogen van 1 W. Het maximale uitgangsvermogen van GSM-telefoons is echter 2 W en de eigenlijke radiotransmissie vindt maar gedurende een achtste deel van de tijd plaats, wegens de toepassing van het principe van tijdsdeling, waarbij de informatie van zeven verschillende gebruikers tegelijkertijd wordt verzonden in gepulste 'pakketjes' van 577 μ s elk. Het effectieve maximale zendvermogen is daardoor slecht 0,25 W. Om de werkelijk door de telefoons opgewekte SARs te verkrijgen moeten de door Meier gerapporteerde waarden dus door 4 worden gedeeld (Kus96). Zo resulteren maximale SAR-waarden van 0,03 tot 0,7 W/kg, gemiddeld over 10 g weefsel. Voor de meest ongunstige omstandigheden, waarbij het voedingspunt van de antenne het hoofd boven het oor bijna raakt, zijn SAR-waarden van 0,1 - 1,3 W/kg berekend. Deze liggen alle ruim beneden de grenswaarde van 2 W/kg

die de commissie voor de algemene bevolking voorstelt voor gedeeltelijke blootstelling van het lichaam.

De commissie merkt op dat er maar zeer weinig gegevens zijn. Meer metingen zijn noodzakelijk.

Andere draagbare telefoons

Het digitale GSM-systeem is slechts een van de systemen die in Nederland operationeel zijn, maar wel het snelst groeiende. In juni 1996 had meer dan de helft van de gebruikers van een mobiele telefoon, 435 000, een GSM-abonnement (Oud96). De overige gebruikers van draagbare telefoons, ongeveer 300 000, maakt gebruik van een van de analoge systemen. Deze werken met verschillende frequenties: 150 MHz (ATF1), 450 MHz (ATF2) en 900 MHz (ATF3). Het ATF3-netwerk heeft de meeste abonnees. De bij dit systeem gebruikte draagbare telefoons hebben een maximaal uitgangsvermogen van 1 W. In tegenstelling tot GSM maken de analoge systemen geen gebruik van gepulste straling, maar zenden zij continue EM velden uit.

Anderson en Joyner hebben in een kunsthoofd elektrische velden gemeten die uitgezonden werden door drie verschillende analoge telefoons en berekenden de SAR-niveaus in de hersenen en in de ogen (And95). De telefoons zonden uit met een vermogen van 0,6 W. De op 1 W uitgangsvermogen genormaliseerde maximale SAR-waarden zijn 0,01 tot 0,35 W/kg in het oog en 0,2 tot 1,38 W/kg in de hersenen. Dit betekent dat de blootstelling ruim beneden de maximale SAR-waarde van 10 W/kg voor de beroepsbevolking ligt en ook beneden de aanbevolen waarde van 2 W/kg voor de algemene bevolking. De toename van de temperatuur in zowel het oog als de hersenen, samenhangend met de aangegeven SAR-waarden, werd berekend op minder dan 0,05 °C (And95).

Ook hier gaat het echter weer om een zeer beperkte hoeveelheid gegevens. De commissie beveelt aan om meer metingen, ook aan apparatuur van andere analoge en digitale systemen, uit te voeren.

Een rapport dat onlangs opgesteld is voor het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid bevat de conclusie dat de veldsterkte die wordt opgewekt door draagbare telecommunicatieapparatuur de grenswaarden kan overschrijden en dat het gebruik van deze apparatuur daarom risico's voor de gezondheid met zich mee kan brengen (Kle95). Deze conclusie is echter gebaseerd op berekeningen aan EM velden die worden opgewekt door apparaten met een maximaal uitgangsvermogen van 17 W. Aangezien de meest gebruikte draagbare telefoons een maximaal zendvermogen hebben van slechts 1 of 2 W, zijn genoemde conclusies niet van toepassing op deze apparaten. Bovendien zijn bij de berekeningen grenswaarden voor verre-veldomstandigheden toegepast op blootstelling in het nabijheidsveld. De commissie heeft al eerder

aangegeven dat dit een onjuiste handelwijze is en dat in een dergelijk geval direct aan SAR-waarden moet worden gerefereerd.

Draadloze telefoons

Draadloze telefoons zijn in veel huishoudens in gebruik. Zij bestaan uit een handset die draadloos verbonden is met een basisstation dat op het telefoonnet is aangesloten. Deze apparaten werken met een maximaal uitgangsvermogen van slechts 10 mW. Daarom hebben zij ook een bereik van niet meer dan ongeveer 150 m. Bij zo'n laag uitgangsvermogen kunnen de blootstellingslimieten niet worden overschreden. Hetzelfde geldt voor de zogenoemde Greenhopper-telefoons. Ook deze hebben een uitgangsvermogen van 10 mW.

Autotelefoons

Autotelefoons worden in Nederland op grote schaal gebruikt. Bij deze apparaten is de antenne op de buitenzijde van de auto geplaatst. Het maximale uitgangsvermogen is hoger dan dat van draagbare telefoons: 6 W voor apparaten die via het ATF3-net werken en 8 W voor het GSM-net. De blootstelling van inzittenden van het voertuig is in het algemeen laag. Zij hangt sterk af van de afstand tot de antenne en van afscherming door de metalen carrosserie van de auto. Balzano en medewerkers hebben in auto's de intensiteit van het elektrisch veld gemeten. Zij vonden dat in de VHF-band (30 - 300 MHz) de sterkte van het elektrisch veld in de auto lager is dan 20 V/m (Bal86). Aangenomen dat verre-velddcondities van toepassing zijn, leert vergelijking met tabel 9 dat de limietwaarden niet worden overschreden. Guy en Chou maten elektrische velden en bepaalden de SAR-patronen in levensgrote menselijke fantomen die in of naast een auto blootgesteld werden aan 835 MHz velden uitgezonden door een antenne op het dak of op de kofferbak (Gu86). Lokale maximale SAR-waarden waren 0,02 tot 0,23 W/kg per watt uitgangsvermogen buiten het voertuig en 0,02 W/kg in de auto. Omgerekend naar het 6 W-uitgangsvermogen van een ATF3-autotelefoon komt dit neer op maxima van 0,12 tot 1,38 W/kg buiten en 0,12 W/kg in de auto. Deze waarden liggen ruim onder de grenswaarde van 2 W/kg die de commissie aanbeveelt voor blootstelling van delen van het lichaam bij de algemene bevolking.

Epidemiologie

In een recent onderzoek is het sterfjepatroon van gebruikers van draagbare telefoons onderzocht (Rot96). In een groep van meer dan 250 000 personen die minstens drie jaar een abonnement hadden, week de sterfte van gebruikers van draagbare telefoons niet

af van die van gebruikers van niet-draagbare mobiele telefoons. De onderzoekers geven toe dat dit slechts een zeer globale bevinding is, maar concluderen ook dat deze resultaten er op wijzen dat het gebruik van draagbare telefoons op korte termijn geen groot effect heeft op de sterfte.

Conclusies

De commissie meent dat de beschikbare gegevens er niet op wijzen dat het gebruik van draagbare telefoons negatieve gevolgen voor de gezondheid heeft. Deze conclusie komt overeen met uitspraken die ICNIRP in een recente verklaring over draagbare telefoons heeft gedaan (ICN96). Er zijn echter maar zeer weinig meetgegevens gepubliceerd. Daarom beveelt de commissie aan om metingen uit te voeren aan een voldoende groot aantal telefoons van verschillende types, voor alle in gebruik zijnde systemen.

De commissie beveelt ook aan om de rekenmodellen te vervolmaken, zodat zij een goede beschrijving geven van de complexe wisselwerking tussen de door de draagbare telefoons uitgezonden EM velden en het menselijk hoofd. In afwachting daarvan moeten, volgens de commissie, deze rekenmethodes niet worden gebruikt om te bepalen of draagbare telefoons voldoen aan de aanbevolen richtlijnen (de SAR waarden voor delen van het lichaam).

De commissie wil hier benadrukken dat de aanbevolen limieten slechts bedoeld zijn om directe nadelige effecten op de gezondheid te voorkomen. In bepaalde gevallen kunnen de door draagbare telefoons uitgezonden EM velden, zelf als zij zo laag zijn dat zij de aanbevolen SAR-waarden niet overschrijden, een indirect gevaar voor de gezondheid vormen. Dit kan het geval zijn wanneer verstoring van de werking van gevoelige medische apparatuur, zoals pacemakers, mogelijk is (zie 2.8.2 en 2.8.3).

4.10.2 *Radiofrequente industriële en paramedische apparatuur*

In een recente publicatie wordt gesteld dat zowel in Nederland als in andere landen de veldsterktes op de plaats van de operator van industriële en fysiotherapie-apparatuur die met radiofrequenties werkt de blootstellingslimieten soms aanzienlijk overschrijden (Kle95).

De commissie beveelt aan dat bij alle apparatuur die thans in gebruik is de blootstellingsniveaus op de positie van de operator gemeten worden en dat adequate maatregelen worden genomen om te voorkomen dat operators en andere personen die zich in de buurt van deze apparatuur bevinden aan te hoge veldsterktes worden blootgesteld.

Rijswijk, 28 januari 1997,
namens de commissie

dr E van Rongen,
secretaris

dr EW Roubos,
voorzitter

Literatuur

De volledige literatuurlijst is opgenomen in de Engelse vertaling (zie pag. 173).

Lijst van eenheden

A	ampere, eenheid van elektrische stroom
mA	milliampere = 10^{-3} A
A/m	ampere per meter: eenheid van magnetische veldsterkte
A/m ²	ampere per vierkante meter: eenheid van stroomdichtheid
°C	graad Celsius: eenheid van temperatuur
kg	kilogram: eenheid van gewicht
g	gram = 10^{-3} kg
H	henry: eenheid van zelfinductie
H/m	henry per meter: eenheid van magnetische permeabiliteit
Hz	hertz: eenheid van frequentie; 1 Hz is gelijk aan 1 cyclus per seconde
kHz	kilohertz = 10^3 Hz
MHz	megahertz = 10^6 Hz
GHz	gigahertz = 10^9 Hz
J	joule: eenheid van energie
mJ	milli-joule = 10^{-3} J
J/s	joule per seconde: eenheid van vermogen
m	meter: eenheid van lengte
mm	millimeter = 10^{-3} m
cm	centimeter = 10^{-2} m
km	kilometer = 10^3 m
m/s	meter per seconde: eenheid van snelheid
S	siemens: eenheid van geleidingsvermogen

S/m	siemens per meter: eenheid van geleidbaarheid
s	seconde: eenheid van tijd
μs	microseconde = 10^{-6} s
T	tesla: eenheid van magnetische fluxdichtheid
V	volt: eenheid van spanning
mV	millivolt = 10^{-3} V
kV	kilovolt = 10^3 V
V/m	volt per meter: eenheid van elektrische veldsterkte
W	watt: eenheid van vermogen
mW	milliwatt = 10^{-3} W
W/m^2	watt per vierkante meter: eenheid van vermogensdichtheid
W/kg	watt per kilogram: eenheid voor de Specific Absorption Rate, SAR

-
- A De commissie
-
- B Elektromagnetische bronnen en milieus
-
- C Modellen en berekeningen
-
- D Blootstelling in specifieke situaties
-
- E Elektromagnetische interferentie van pacemakers

Bijlagen

De commissie

-
- dr EW Roubos, *voorzitter*
hoogleraar zoölogie; Katholieke Universiteit Nijmegen
 - dr ir PM van den Berg
hoogleraar elektromagnetische theorie; Technische Universiteit Delft
 - dr JH Bernhardt
medisch fysicus; Bundesamt für Strahlenschutz, München (Duitsland)
 - WJ van Gaalen
stralingshygiënist, hoofd Toezichtorgaan Stralingshygiëne Defensie; Bilthoven
 - dr CM Horikx
fysisch chemicus; AKZO Nobel, Arnhem
 - drs FBJ Koops
bioloog; KEMA, Arnhem
 - ir JJH Renkens
telecommunicatie-specialist; PTT Telecom, Utrecht
 - dr GC van Rhooen
fysicus; Dr Daniel den Hoed Kliniek, Rotterdam
 - dr ZS Sienkiewicz
fysioloog en psycholoog; National Radiological Protection Board, Chilton (Verenigd Koninkrijk)
 - drs DHJ van de Weerd
medisch milieukundige; GGD, Zwolle
-

- dr ir APM Zwamborn
fysicus; Fysisch Elektronisch Laboratorium TNO, Den Haag
- dr E van Rongen, *secretaris*
radiobioloog; Gezondheidsraad, Rijswijk

Elektromagnetische bronnen en milieus

Als gevolg van de technische ontwikkelingen van de afgelopen decennia zijn er zeer veel verschillende bronnen van EM velden. Hierdoor is het 'electromagnetische milieu' doorgaans bijzonder complex. Voor classificatie van de verschillende blootstellingen is een volledige inventarisatie van bronnen en milieus nodig. In het kader van dit advies is het niet mogelijk zo'n inventarisatie te maken, omdat zowel het aantal bronnen als het aantal milieus zeer groot is.

Het Internationaal Elektrotechnisch Comité (IEC) hanteert een kwalificatie die is gebaseerd op milieus. De commissie geeft hieronder een samenvatting daarvan (IEC91).

Bronnen

De volgende types bronnen volstaan voor het karakteriseren van een willekeurig milieu:

- bronnen met lage frequenties
- bronnen met hoge frequenties
- bronnen van elektrostatische ontladingen.

Deze bronnen kunnen elektromagnetische verstoringen veroorzaken die weer het gevolg kunnen zijn van een aantal verschijnselen:

- geleidingsverschijnselen bij lage frequenties:
 - harmonischen en tussenharmonischen (3 kHz): deze zijn het gevolg van niet-lineaire bronnen, bijvoorbeeld in huishoudelijke apparaten en tractiesystemen

- signaalspanningen in het elektriciteitsnet:
 - 100 Hz - 3 kHz: rimpelcontrolesystemen
 - 3 kHz - 95 kHz: hoogspanningslijnen
 - 95 kHz - 148,5 kHz: signaalsystemen in het huishouden
 - spanningsfluctuaties: deze worden voornamelijk veroorzaakt door zware industriële belasting, zoals bij het gebruik van boogovens, lasapparaten enzovoorts
 - spanningsverlagingen en -onderbrekingen: deze kunnen het gevolg zijn van kortsluiting, defecten in middel- en hoogspanningslijnen en schakelen van zware belastingen
 - ongebalanceerde spanningen: veroorzaakt door asymmetrische belastingen
 - variaties in het elektriciteitsnet: grote verstoringen in het netwerk kunnen frequentieverlagingen veroorzaken
 - geïnduceerde spanningen met lage frequentie die het gevolg kunnen zijn van lagefrequentiestroom in nabijgelegen kabels
 - stralingsverschijnselen bij lage frequenties (50/60 Hz)
 - magnetische velden, voornamelijk afkomstig van het elektriciteitsnet, vooral bovengrondse lijnen, en als zwerfvelden van transformatoren en andere apparatuur
 - elektrische velden; sterke elektrische velden heersen onder hoogspanningslijnen; elektrische velden afkomstig van huishoudelijke apparatuur zijn doorgaans heel zwak
 - geleidingsverschijnselen bij hoge frequenties
 - geïnduceerde continue spanningen en stromen
 - éénrichtingstransiënten
 - wisseltransiënten

Verschillende verschijnselen kunnen de oorzaak zijn van deze verstoringen:

 - 1 pieken die met relatief hoge frequentie oscilleren
 - 2 pieken met hoge energie en verschillende golfvorm
 - 3 zeer snelle pieken, bijvoorbeeld elektrostatische ontladingen
 - stralingsverschijnselen bij hoge frequenties
 - magnetische velden
 - elektrische velden
 - elektromagnetische velden
 - 1 oscillerende stralingsbronnen: deze geven tenminste 90% van het gemiddeld vermogen af in een spectraal interval $[f_{\min}, f_{\max}]$; hieronder vallen allerlei toepassingen, zoals radio- en televisiezenders
 - 2 pulserende bronnen produceren velden die niet langer dan 200 ms bestaan en die gedurende hun bestaan niet vaker dan tien maal van polariteit wisselen; deze bronnen hebben een zeer snelle stijgtijd waardoor zeer gecompliceerde golfvormen ontstaan
-

- 3 niet-coherente stralingsbronnen: de emissie van dergelijke bronnen gedraagt zich als achtergrondruis, omdat de bronnen zonder vorm of structuur lijken
- elektrostatiche ontladingsverschijnselen: deze vinden plaats indien twee personen of voorwerpen elkaar naderen en één van beide geladen is; eerst wordt de ontvanger van de elektrostatiche ontlading blootgesteld aan een elektrisch veld en dit wordt gevolgd door een ontlading met een stroomstoot; dit verschijnsel hangt sterk af van de vochtigheid, temperatuur en aard van de omgeving
 - nucleaire elektromagnetische pulsen.

Milieus

Het is niet waarschijnlijk dat alle bronnen in alle milieus voorkomen. De milieus worden als volgt ingedeeld:

- landelijke woonomgeving
- stedelijke woonomgeving
- zakelijk
- lichte industrie
- zware industrie, elektriciteitscentrales en schakelstations
- verkeerszones
- speciale telecommunicatiecentra
- ziekenhuizen.

Modellen en berekeningen

Vergelijking van rekenmethodes

In de afgelopen jaren is veel werk verricht aan de ontwikkeling van computermodellen die de invloed van een elektromagnetisch veld beschrijven op een voorwerp dat zich in dat veld bevindt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van globale technieken (bijvoorbeeld de ontwikkeling van golf functies en integraalvergelijkingen) of van lokale technieken (eindige differenties en eindige elementen).

In deze bijlage bespreekt de commissie kort twee numerieke technieken die gebruikt kunnen worden bij het oplossen van ingewikkelde elektromagnetische veldproblemen. De eerste techniek is de eindige-differenties (FT-DT) methode (Yee66, Taf89). In deze methode worden de afgeleiden naar tijd en ruimte in de vergelijkingen van Maxwell benaderd door een centrale differentie. Dit resulteert in een iteratief algoritme met expliciete stappen in de tijd. De tweede techniek is de integraalvergelijkingsmethode, waarin de differentiaalvergelijkingen van Maxwell herschreven worden tot integraalvergelijkingen over het gebied van het object. Deze integraalvergelijkingen kunnen op een efficiënte iteratieve wijze worden opgelost (de WCG-FFT methode; Zwa92b).

In het hiernavolgende presenteert de commissie de numerieke benaderingen van beide methodes voor een driedimensionaal verstrooiingsprobleem op een sterk inhomogene diëlektrische bol. Dit probleem is vergelijkbaar met de analyse van het EM veld in het menselijk lichaam. Het belangrijkste voordeel van het gebruik van een bol als proefobject is dat daarvoor ook een analytische oplossing beschikbaar is (Mie-serie).

Verstrooiing door een diëlektrische bol

De situatie die hier is onderzocht, is een radiaal inhomogene diëlektrische bol die door een vlakke golf getroffen wordt. De bol is opgebouwd uit een binnenste laag met straal $r_1 = 2,59$ cm, relatieve permittiviteit $\epsilon_r = 72$ en geleidbaarheid $\sigma = 0,9$ S/m, en een buitenste laag met straal $r_2 = 5,0$ cm, relatieve permittiviteit $\epsilon_r = 7,5$ en geleidbaarheid $\sigma = 0,05$ S/m. Het elektrisch veld is evenwijdig aan de x-as gepolariseerd en beweegt zich langs de negatieve z-as. Het centrum van de bol ligt in de oorsprong. De frequentie van het EM veld is 300 MHz.

Met de FD-TD methode wordt de bol in een FD-TD ruimte bestaande uit $50 \times 50 \times 50$ cellen gemodelleerd, hetgeen overeenkomt met een discretisatie van $1/100$ l. De absorberende grenstoestand ligt op een afstand van 10 cellen van het object. Tijdsintegratie vindt plaats gedurende 400 stappen of 2 cycli van de opvallende golf. Dit komt overeen met twee doorgangen van de golf door het berekeningsgebied. Bij de WCG-FFT methode is een rastergrootte van $29 \times 29 \times 29$ gebruikt om de bol te discretiseren.

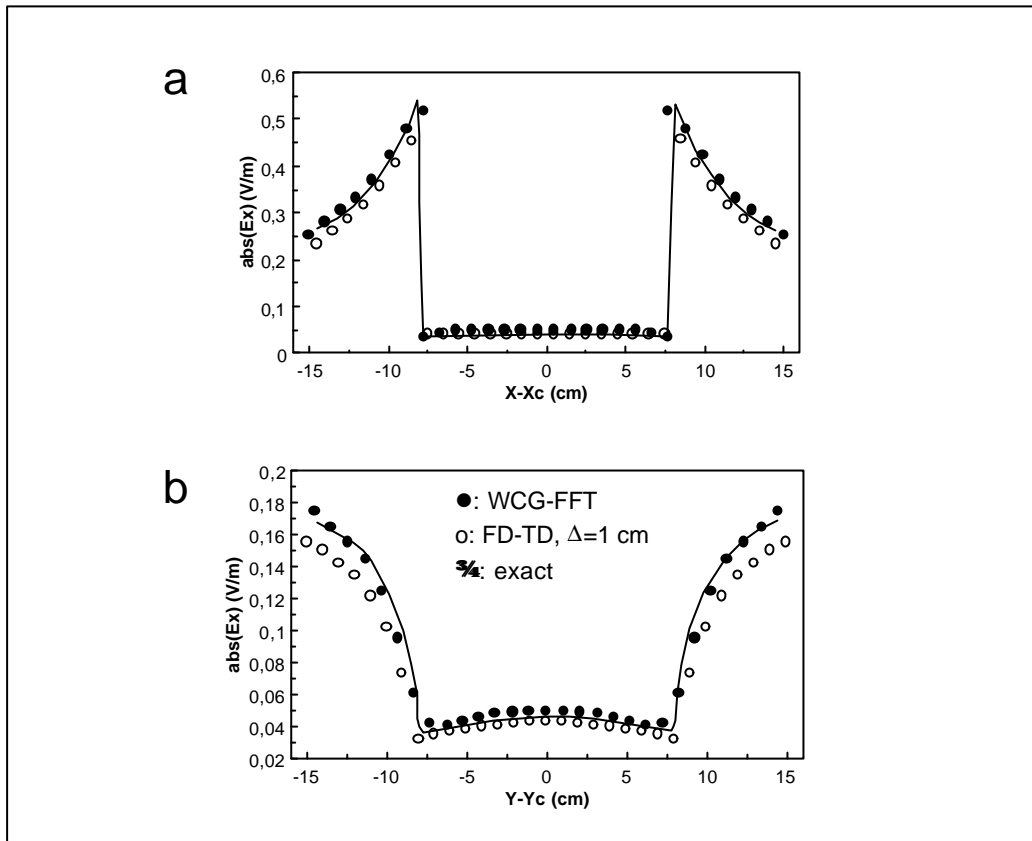
In figuur 8a en 8b zijn de absolute waarden van het elektrisch veld in de bol in respectievelijk de x- en y-richting afgebeeld. In vergelijking met de oplossing met de Mie-serie (de doorgetrokken lijn), zijn de resultaten verkregen met de iteratieve WCG-FFT methode (de gesloten cirkels) nauwkeuriger dan die van de FD-TD methode (de open cirkels). De FD-TD methode is over het geheel genomen echter ook goed.

Berekening van de SAR in het menselijk lichaam

Teneinde enig kwantitatief inzicht te verkrijgen in de absorptie van een elektromagnetisch veld dat inwerkt op het menselijk lichaam, is een numerieke simulatie van het volledige driedimensionale elektromagnetische probleem uitgevoerd (Zwa92b).

Het numerieke model van het menselijk lichaam is gegenereerd met behulp van een CT-scan van een mens (Zwa92a) en staat bekend als het Jaap-fantoom. Met dit model is de verdeling van het elektromagnetisch veld berekend voor vier verschillende frequenties: 1 MHz, 30 MHz, 100 MHz en 300 MHz. De berekeningen zijn uitgevoerd voor uniforme vlakke golven, in de lengterichting van het Jaap-fantoom gepolariseerd en zich bewegend van de voorzijde naar de achterzijde van het fantoom. De afmetingen van het Jaap-fantoom zijn ongeveer $38 \times 54 \times 180$ cm en ten behoeve van de berekeningen is het gediscretiseerd in $21 \times 31 \times 106$ kubusvormige subgebieden. Het fantoom bestaat alleen uit spier- en vetweefsel. Het gewicht van het Jaap-fantoom, berekend met behulp van de massadichtheid van deze weefsels, is 90 kg.

Het is bekend dat de elektromagnetische eigenschappen van menselijk weefsel sterk afhankelijk zijn van de frequentie. Daarom moeten voor elke frequentie andere



Figuur 8 Het elektrisch veld opgewekt door een 300 MHz vlakke golf die op een radiaal inhomogene diëlektrische bol met een totale diameter van 7,59 cm valt.

elektromagnetische parameters voor het medium worden gebruikt. De parameters voor spier en vet zijn afkomstig uit (Joh72) en staan in tabel 13. Genoemde publicatie geeft geen parameters voor 1 MHz; daarom zijn de waarden van 30 MHz voor deze frequentie gebruikt.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een uniforme vlakke golf met een elektrische veldsterkte van 1 V/m. De berekende waarden voor de maximum SAR, de SAR over het gehele lichaam en het totale geabsorbeerde vermogen staan in tabel 14.

Uit deze tabel blijkt duidelijk dat de berekende maximale SAR-waarden de overeenkomstige gemiddelde SAR-waarden met een orde van grootte of meer overschrijden.

De elektrische veldsterktes samenhangend met de verschillende gehele-lichaams SAR-waarden staan in tabel 15.

De overeenkomstige vermogensdichtheden van het opvallend elektromagnetisch veld worden verkregen uit

Tabel 13 De elektromagnetische parameters en de massadichtheid gebruikt voor de berekening van de SAR voor verschillende frequenties.

weefsel	1 MHz	30 MHz	100 MHz	300 MHz	massadichtheid
spier	$\epsilon_r^* = 113$	$\epsilon_r = 113$	$\epsilon_r = 72$	$\epsilon_r = 54$	1,070 g/cm ³
	$\sigma = 0,63$ S/m	$\sigma = 0,63$ S/m	$\sigma = 0,6$ S/m	$\sigma = 1,0$ S/m	
vet	$\epsilon_r = 20$	$\epsilon_r = 20$	$\epsilon_r = 7,5$	$\epsilon_r = 5,7$	0,937 g/cm ³
	$\sigma = 0,043$ S/m	$\sigma = 0,043$ S/m	$\sigma = 0,076$ S/m	$\sigma = 0,11$ S/m	

* De permittiviteit ϵ geeft de invloed van een medium op de elektrische fluxdichtheid, ϵ_r is de relatieve permittiviteit ten opzicht van die in vacuüm.

Tabel 14 SAR-waarden en totaal geabsorbeerd vermogen (rms) berekend met het Jaap-fantoom voor verschillende frequenties. Het opvallend veld is een uniforme vlakke golf met een elektrische veldsterkte van 1 V/m (= 0,707 V/m rms).

frequentie (MHz)	maximum SAR (W/kg)	SAR gemiddeld over het gehele lichaam (W/kg)	totaal geabsorbeerd vermogen (W)
1	$8,0 \times 10^{-7}$	$8,6 \times 10^{-9}$	$7,4 \times 10^{-7}$
30	$4,7 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-6}$	$4,7 \times 10^{-4}$
100	$6,5 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-3}$
300	$2,0 \times 10^{-4}$	$6,4 \times 10^{-6}$	$5,8 \times 10^{-4}$

Tabel 15 Maximale elektrische veldsterktes van de opvallende uniforme vlakke golf samenhangend met de verschillende SAR waarden gemiddeld over het gehele lichaam.

frequentie (MHz)	maximum elektrisch veld (V/m, rms)		
	SAR = 0,08 W/kg	0,4 W/kg	4 W/kg
1	2.156	4.822	15.248
30	88	196	620
100	50	112	354
300	79	177	560

$$P = \frac{E_{\text{rms}}^2}{\sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}} \approx \frac{E_{\text{rms}}^2}{120\pi} \quad (\text{in W/m}^2)$$

waarin μ_0 de magnetische permeabiliteit in lucht is en ϵ_0 de permittiviteit in vacuüm. De berekende vermogensdichtheden staan in tabel 16.

Tabel 16 Maximale vermogensdichtheden van de opvallende uniforme vlakke golf samenhangend met verschillende SAR waarden gemiddeld over het gehele lichaam.

frequentie (MHz)	vermogensdichtheid (W/m ² , rms)		
	SAR = 0,08 W/kg	0,4 W/kg	4 W/kg
1	12.330	61.689	616.890
30	21	102	1.018
100	7	32	331
300	17	83	829

Deze waarden voor het elektrisch veld en de vermogensdichtheid gelden voor continue blootstelling van het menselijk lichaam aan uniforme vlakke golven en zijn alleen van toepassing op dit specifieke fantoom. Ook dient bedacht te worden dat de SAR-waarden en het totale geabsorbeerde vermogen hoogstwaarschijnlijk aanzienlijk veranderen als de elektromagnetische bron zich dichtbij het lichaam bevindt, omdat in het nabijheidsveld de golffronten niet als uniforme vlakke golven kunnen worden beschouwd.

Blootstelling in specifieke situaties

In deze bijlage geeft de commissie voorbeelden van blootstelling van de algemene bevolking en van de beroepsbevolking in een klein aantal specifieke situaties. Meer informatie over blootstelling van de beroepsbevolking is te vinden in (Kle95).

Tabel 17 De SAR gemiddeld over het gehele lichaam, samenhangend met blootstelling aan EM velden in specifieke situaties^a (All91).

plaats van blootstelling	SAR (W/kg)
300 m van de basis van een 1000 kW UHF-TV-zender	< 0,001
0,5-1 km van een 100 kW HF-zender	< 0,001
50 cm van een 27 MHz, 4 W-antenne op een auto	0,05
550 m in de bundel van een 1,3 GHz-luchtverkeerscontrole-radar	0,04
5 m van een 10 GHz 100 mW-verkeerscontrole-radar	< 0,001
30 cm van een microgolf-oven met maximaal toegestane lekkage	0,04
12 m van een 10 GHz, 300 W-volgradar (in de bundel)	6,10
100 m van een 10 GHz, 300 W-volgradar	0,04
30 cm van een radiofrequent diëlektrisch verwarmingsapparaat	0,40

^a De SAR-waarden in deze tabel zijn gebaseerd op metingen op specifieke locaties. Ze zijn niet noodzakelijkerwijs kenmerkend voor een bepaald type bron. De SAR-waarden zijn berekend voor de meest ongunstige omstandigheden en houden geen rekening met periodiciteit, zoals veroorzaakt door rotatie van de antenne.

Tabel 18 Blootstelling van de algemene bevolking aan diverse specifieke bronnen van EM velden (Ber92).

bron	frequentie	afstand (m)	totaal uitgezonden vermogen (W)	blootstellingsniveau
microgolf oven	2,45 GHz	0,3	-	< 5 W/m ²
		0,5	-	< 2 W/m ²
		1	-	< 1 W/m ²
verkeerscontrole radar	9 - 35 GHz	3	0,5 - 100	< 0,25 W/m ²
		10		< 0,01 W/m ²
veiligheidssystemen	0,9 - 10 GHz		-	< 0,002 W/m ²
FM-zender	87,5 - 108 MHz	1,5 × 10 ³	< 100 × 10 ³	< 0,05 W/m ²
VHF-TV-zender	47 - 68 MHz 174 - 230 MHz	1,5 × 10 ³	100 × 10 ³ -	< 0,02 W/m ²
			300 × 10 ³	
UHF-TV-zender	470 - 890 MHz	1,5 × 10 ³	< 5 × 10 ⁶	< 0,005 W/m ²
kortegolf-zender	3,95 - 26 MHz	220	750 × 10 ³	2 W/m ²
		50		40 W/m ² ^a
AM-zender	130 - 285 kHz	300	1,8 × 10 ⁶	90 V/m ^a
langegolf-zender	415 - 1606 kHz	50	1,8 × 10 ⁶	450 V/m ^a
radarinstallaties	1 - 10 GHz	100 - 1000	200 - 20000	0,1-10 W/m ²
		> 1000		< 0,5 W/m ²

^a hoger dan de in dit advies aanbevolen blootstellingslimiet voor de algemene bevolking (zie tabel 9).

Tabel 19 Blootstelling van fysiotherapeuten aan EM velden van verwarmingsapparatuur (Ber92).

bron	frequentie (MHz)	afstand (m)	blootstellingsniveau (V/m)
kortegolf-diathermie	27,12	0,2	< 1000 ^a
		0,5	< 450 ^a
		1	< 140 ^a
microgolf-behandeling	433	0,5	100 ^a
		1	60
		2450	0,3 - 3

^a hoger dan de in dit advies aanbevolen blootstellingslimiet voor de beroepsbevolking (zie tabel 9)

Elektromagnetische interferentie van pacemakers

Sinds 1992 hebben wereldwijd ongeveer 1,5 miljoen mensen een pacemaker geïmplantéerd gekregen. Jaarlijks neemt dit aantal met ongeveer 100 000 toe. Pacemakers zijn gevoelig voor EM velden, vooral oudere modellen. Als gevolg daarvan kan blootstelling aan EM velden bij dragers van een pacemaker ongewilde effecten veroorzaken. Het is echter moeilijk om de gezondheidsrisico's van elektromagnetische interferentie van pacemakers te bepalen en dat valt ook buiten het bestek van dit advies.

Elektromagnetische interferentie van pacemakers

Onder normale omstandigheden wordt de hartslag geregeld door de natuurlijke pacemaker, de sinoatriale knoop bovenin de rechter hartkamer. Indien, om welke reden dan ook, dit natuurlijke systeem niet goed functioneert, kan een kunstmatige pacemaker worden geïmplantéerd, een apparaat dat ontworpen is om het natuurlijke regelsysteem te ondersteunen. De pulsen die pacemakers opwekken, lijken sterk op de natuurlijke pulsen. Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen apparaten die volgens een vast patroon pulsen genereren (niet-synchrone of autonome pacemakers) en apparaten die het natuurlijke systeem ondersteunen wanneer dit niet in staat is om een volgende hartslag op te wekken. Dit laatste type wordt wel sensing, non-comparative of demand pacemaker genoemd. Dit type staat bekend om de aanzienlijke verhoging van het welzijn van de patiënt. Een ander voordeel is het lage stroomverbruik, waardoor de batterijen minder vaak verwisseld hoeven te worden. De meeste pacemakers zijn van het laatste type.

De regelende werking van een pacemaker hangt af van de waarneming van de door het hart geproduceerde elektrische signalen. Ook andere extern opgewekte elektrische signalen kunnen echter de waarnemingscircuits van de pacemaker beïnvloeden. Het effect van deze beïnvloeding is groter naarmate de externe signalen meer lijken op die van de natuurlijke pacemaker van het hart. EM velden kunnen op twee verschillende manieren met een pacemaker interfereren:

- directe invloed op de circuits in de pacemaker
- indirecte invloed door inductie van stroompjes in de katheterdraad.

Uit metingen blijkt dat voor frequenties lager dan 200 MHz de indirecte invloed het belangrijkste is. De katheterdraad werkt als antenne en veroorzaakt stroompjes in de pacemaker die de werking kunnen beïnvloeden. Het gebruik van geschikte filters kan de negatieve effecten van indirecte koppeling verminderen. Directe invloed wordt doorgaans veroorzaakt door microgolffbronnen en kan vermeden worden door effectieve afscherming van de pacemaker. In het algemeen wordt de meeste elektromagnetische interferentie veroorzaakt door indirecte invloeden.

In vitro-metingen aan een aantal rond 1989 geïmplanteerde pacemakers liet zien dat interferentie optrad bij blootstelling aan elektrische velden tussen 0,23 en 10 V/m (Del89). De effectieve veldsterkte hing sterk af van het type pacemaker.

Met *in vivo*-meting kon bij een aantal pacemakers van dezelfde types als gebruikt bij de *in vitro*-metingen geen interferentie aangetoond worden (Tof88). Dit kan een gevolg zijn van de lagere efficiëntie van de antennewerking van de katheters in de *in vivo*-metingen in vergelijking met die van de gesimuleerde antennes gebruikt bij de *in vitro*-metingen. Hoewel pacemakers wel degelijk gevoelig zijn voor EM velden, zouden de *in vitro* gevonden effecten het werkelijke risico voor pacemakerdragers kunnen overschatten.

In een uitvoerig rapport heeft de Amerikaanse organisatie Wireless Technology Research (WTR) alle beschikbare gegevens over beïnvloeding van het functioneren van pacemakers door van draagbare telefoons afkomstige EM velden geëvalueerd (Car96). WTR concludeert dat interferentie mogelijk is, maar dat dit sterk van het type pacemaker afhangt. Bij verscheidene, maar niet alle, hedendaagse types met voldoende elektromagnetische filtering van externe signalen treedt geen storing op. Omdat een draagbare telefoon een relatief zwakke bron is, is de afstand tot de pacemaker ook van groot belang. Storing werd alleen waargenomen indien de telefoon zich dicht bij de pacemaker bevond. WTR doet daarom de aanbeveling om de telefoon onder alle omstandigheden op een afstand van minstens 15 cm van de pacemaker te houden.

In de Duitse voornorm DIN VDE 0848 (DIN91) zijn blootstellingsnormen geformuleerd voor dragers van pacemakers. Hierbij is uitgegaan van de onderbrekende spanning aan

Tabel 20 Blootstellingslimieten voor patiënten met een pacemaker.

frequentie (MHz)	blootstellingslimiet (V/m)	
	voornorm DIN VDE 0848, deel 2	Europese norm EN 50061/A1
0,5	26,4	587
1	19,7	587
2	14,3	587
10	8,8	470
20	5,0	235
30	1,2	156

de ingangsaansluiting van de pacemaker, gemeten bij blootstelling aan amplitude-gemoduleerde velden en in het verre veld. De blootstellingslimieten staan in tabel 20.

Deze blootstellingslimieten hebben betrekking op pacemakers die voor 1990 zijn gemaakt. Sinds 15 januari 1996 is de Europese norm EN 50061/A1 'Veiligheid van geïmplanteerde pacemakers' van kracht (CEN95c). Alle pacemakers die na deze datum zijn geïmplanteerd, moeten aan deze norm voldoen. Volgens dezelfde procedure als welke gevolgd is voor de DIN-voornorm zijn blootstellingslimieten berekend om aan de Europese norm te voldoen. Deze grenswaarden zijn ook in tabel 20 vermeld.

De veldsterktes in de tabel komen onder normale omstandigheden in het dagelijks leven niet voor. Alleen dichtbij antennes (binnen een afstand van enkele meters) kunnen dergelijke veldsterktes heersen. De blootstellingslimieten voor de algemene bevolking, die zijn gebaseerd op thermische effecten, zijn ongeveer 87 V/m bij 0,5 MHz en 28 V/m bij 30 MHz (zie 4.4.1).

Conclusie

Pacemakers kunnen gevoelig zijn voor elektrische velden die lager zijn dan de blootstellingslimieten gebaseerd op thermische effecten. Hierdoor is het noodzakelijk voor dragers van pacemakers speciale voorzorgsmaatregelen te nemen. De commissie beveelt aan een minimale afstand van 15 cm tussen een in werking zijnde draagbare telefoon en een pacemaker in acht te nemen. Hoewel moderne pacemakers moeten voldoen aan EN 50061/A1 (CEN95c) wijst de commissie erop dat de levensduur van pacemakers ongeveer vijf tot acht jaar is. Daarom zijn de blootstellingslimieten vermeld in tabel 20 tot ongeveer het jaar 2004 realistisch.

