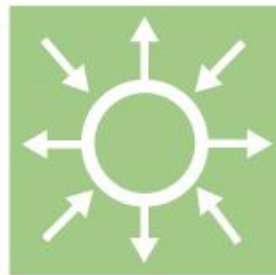




Elektromagnetiska fält ("EMF")

och frågan om biologiska effekter utifrån ett kemiskt-fysikaliskt perspektiv

Elforsk rapport 09:50



Björn Cedervall

Juni 2009

ELFORSK

Elektromagnetiska fält ("EMF")

och frågan om biologiska effekter utifrån ett kemiskt-fysikaliskt perspektiv

Elforsk rapport 09:50

Förord

Föreliggande text har utarbetats av Björn Cedervall, Docent, med dr (Medicinsk Strålningsbiologi), Civ ing (Kärnkemi och Biokemi) och speglar vissa utgångspunkter inom framförallt kemien och fysiken och som har betydelse för förståelsen för biologiska frågeställningar som rör elektriska och magnetiska fält, EMF. Genom att texten är relativt kort kan den givetvis inte göra anspråk på att vara "heltäckande" och detta är inte heller en översikt av aktuell forskning.

Avsikten med texten är inte att ifrågasätta de säkerhets- eller riskbedömningar som gjorts av ledande internationella organisationer m fl som är verksamma inom området. Istället ska texten ses som ett försök att få en diskussion kring vilka fysikaliska-kemiska mekanismer som har eller saknar förutsättningar att leda till biologiska effekter av EMF. Förhoppningsvis ska texten också stimulera till vidare självstudier eller kanske kunna utgöra en av flera grunder för studier av de frågor som rör riskaspekter av EMF.

Elforsk anordnade tillsammans med Riskkollegiet ett seminarium i januari 2009 där en tidig version av texten diskuterades och ett flertal synpunkter togs upp. Synpunkter har därefter också lämnats fortlöpande från olika forskare. För textens slutliga innehåll svarar författaren.

Denna studie har bekostats av Elforsk AB med stöd från följande företag: E.ON Elnät Sverige AB, Fortum Distribution AB, Gävle Energi AB, Göteborg Energi AB, Halmstad Energi och Miljö Nät AB, Jämtkraft AB, Luleå Energi Elnät AB, Lunds Energi AB, Mälarenergi Elnät AB, Nacka Energi AB, Skellefteå Kraft AB, Sundsvall Energi Elnät AB, Svenska Kraftnät, Vattenfall AB, Växjö Energi Elnät AB.

Stockholm juni 2009
Bengt Hanell
Elforsk AB

Sammanfattning

Frågan om huruvida elektriska och/eller magnetiska fält i olika bemärkelser är farliga eller ej har en tvärvetenskaplig karaktär. Att höga elektriska eller magnetiska fält kan ge upphov till farliga strömmar eller värmeeffekter är väl känt. Mer kontroversiellt är frågan om eventuella genotoxiska effekter, dvs effekter som utgår från förändringar i DNA, eller effekter på cellens övriga molekylära maskineri och som i förlängningen skulle kunna innebära någon form av sjukdom. Man kan se det som en kedja av tänkbara händelser ungefär enligt följande: "Exponering->antenn->växelverkan mellan EMF och atomer och/eller molekyler-> molekylär biologi/biokemi->->sjukdom. Varje steg i en sådan kedja måste vara möjligt för att en exponering ska kunna resultera i slutresultatet "sjukdom".

De teman som tagits upp i här är sådana som ofta förbises men kan ha relevans för att man ska kunna belysa den komplexitet som finns inbakad i laboratorieexperiment och teoretiska tolkningar. Skriften kan ses som ett "nedslag" på vissa sådana temata. Till dessa hör beskrivningen av en exponering, vad som menas med dos, vad som är relevant ur molekylsynpunkt vid olika frekvensområden, termiska respektive icke-termiska effekter, ferromagnetiska partiklar som förorening i laboratoriemiljön respektive i naturen.

Ett sätt att närma sig frågeställningarna är att analysera energitäthet hos elektriska och magnetiska fält och sedan sätta dessa i relation till den naturliga miljön i enskilda celler eller hos hela individer. Särskilt intressant är storleksordningen hos de krafter och energier som förekommer naturligt i celler (t ex för att dra isär kromosomerna vid celldelning). Som framgår av motsvarande avsnitt i denna skrift förefaller det osannolikt att EMF skulle kunna bryta exempelvis kemiska bindningar (och därmed förorsaka DNA-strängbrott) om vi med EMF menar sådana sammanhang som vi exponeras för till vardags i hemmet eller i yrkesmiljö.

DNA-skador indelas generellt i ett halvduzin huvudkategorier. Bland dessa skadekategorier anses emellertid DNA dubbelsträngbrott tillhöra de allvarligaste eftersom dessa kan förorsaka mutationer, kromosomskador, resultera i celledöd, eller initiera canceruppkomst. Inga övertygande forskningsdata förefaller vederligen stöda cancermekanismer som bygger på DNA-strängbrott. De "larmresultat" som rapporterats från några håll har inte kunnat upprepas av andra forskare.

För att bryta en kemisk (kovalent) bindning behövs en foton med en energi som ligger storleksordningen 1 miljon gånger högre än den hos "mobilstrålning" (ca 1 GHz). Jämför man med kraftledningar (50 Hz) handlar det snarare om en faktor 100 000 miljarder. Å andra sidan är vid 50 Hz inte fotonbegreppet med dess energi relevant utan man bör snarare se till de elektriska respektive magnetiska fältens förmåga att inducera värme, strömmar eller ge upphov till stötar,

Värmeeffekter i sig kan vara mycket skadliga för människan. Redan vid en temperatur på 40°C börjar skadliga fenomen inträffa hos människan men graden av skada hänger naturligtvis samman med hur länge man utsätts för en

sådan temperatur. Särskilt celler som aktivt delar sig och befinner sig i s k DNA replikationsfas är extremt känsliga för värme.

Det som blivit särskilt kontroversiellt i är huruvida fotoner i exempelvis GHz-området skulle kunna ge icke-termiska effekter. Något sådant har emellertid inte kunnat beläggas och om så gjordes vore det en världssensation.

Ett metodproblem som rör den cell- och molekylärbiologiska EMF-forskningen är förekomsten av ferromagnetiska partiklar såsom magnetit i laboratoriemiljön. Dessa partiklar har en diameter av storleksordningen några nanometer och uppåt - som mest kanske någon mikrometer. Om man har en sådan förorening inne i cellerna och sedan lägger på ett varierande magnetiskt fält över dem kommer partiklarna att kunna överföra energin på okontrollerat sätt med effekter som beror på var i cellerna de befinner sig.

Skriftens sista avsnitt handlar om magnetiska fälteffekter hos djur och människor. Magnetit har varit känd i djurriket sedan tidigt 1960-tal och en mängd fynd gjorts som belyser olika organismers förmåga att reagera på det jordmagnetiska fältet. Känsligheten för magnetiska fält har visat kunna antingen handla om fältets riktning eller fältets storlek. Huruvida människor kan känna av magnetiska fält förefaller vara en av de mest kontroversiella frågorna inom EMF-området. Hos avlidna människor har man funnit magnetitliknande mineral men det har inte visats att levande människor kan känna av magnetiska fält varför här finns kunskapsluckor att fylla i.

Summary

The question of whether electric and/or magnetic fields in various respects are dangerous or not is of interdisciplinary character. That high electric or magnetic fields may give rise to dangerous currents is well known. More controversial is the topic of genotoxic effects, *i.e.* effects which have their origin in changes in DNA or effects on other parts of the molecular machinery of the cell and which if extended could result in some form of disease (e.g. neurological disorders). One may see this as a chain of possible events according to: "Exposure->antenna->interaction between EMF and atoms or molecules->molecular biology/biochemistry->->disease".

The topics that have been discussed in this report have often been neglected but may shed light on the complexity of relevant laboratory experiments and theoretical interpretations. This report includes: descriptions of an exposure, what is meant by dose, what is relevant from a molecular aspect at various frequency ranges, thermal and non-thermal effects respectively, and ferromagnetic particles as a contaminant in the laboratory environment as well as in Nature.

One way of approaching the scientific questions is to analyze the energy density of electric and magnetic fields and then put these into the context of the natural environment in single cells or whole individuals. Of particular interest is the order of magnitude for forces and energies as they occur naturally in cells (*e.g.* for pulling apart chromosomes during cell division). As is clear from the corresponding sections of this report, it seems improbable that EMF can break chemical bonds (and thereby cause DNA strand breaks) if we restrict ourselves to EMF contexts of daily exposures in the home or most workplaces.

DNA damage is generally classified into half a dozen major categories. Among these damage categories the DNA double-strand breaks are considered to be among the most severe as these may give rise to mutations, chromosomal aberrations, result in cell death or initiate cancer. No convincing data which are based on DNA strand breaks seem to support cancer mechanisms. Alarmist results reported from several groups have not been reproducible by independent research groups.

In order to break a chemical (covalent) bond the photon energy must be about six orders of magnitude above that of "mobile phone radiation" (corresponding to about 1 GHz). A comparison with power lines (50 Hz) makes this factor even larger – on the order of 100 000 billion. Thus, the concept of a photon breaking a chemical bond is not relevant at 50 Hz and it is more proper to instead focus on the capacity of the electric or magnetic fields to induce heat or electric currents.

Heat effects may cause very serious damage to humans. Already at a temperature of 40°C harmful phenomena begin to occur in human cells but the degree of damage is of course dependent on the duration of such heat exposures. Most sensitive to heat are cells which are actively dividing (*i.e.* cells that are replicating their DNA).

What has become particularly controversial is whether photons of the GHz-range could give rise to non-thermal effects. Nothing convincing of that kind has been found, however.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Vad menas med EMF?	3
3	Vad menas med en EMF-exponering?	4
3.1	EMF-exponeringar kan indelas i fem kategorier med totalt 18 parametrar?	4
3.1.1	Exponeringens intensitet, "timing" och duration.....	5
3.1.2	Frekvens-domänkaraktistika	5
3.1.3	Spatiala (geometriska) deskriptorer	6
3.1.4	Kombinerade EMF-exponeringar	6
3.1.5	Karakteristika för experimentella exponeringssystem	7
3.2	Vad är skillnaden mellan exponering och dos?	7
4	Skillnaden mellan joniserande och icke-joniserande strålning	9
4.1	Molekylers energi inom det icke-joniserande frekvensområdet.....	11
4.2	Molekylers energi inom det icke-joniserande frekvensområdet.....	13
4.3	Kommentar till fotoners "degradering" när de når Jorden	13
4.4	Olika mått beroende på frekvensområde	14
5	Hur koppla från EMF-exponering till sjukdom?	16
6	Fysikaliska betraktelser av magnetiska respektive elektriska fält	18
6.1	Kraften på elektriska laddningar.....	18
6.2	Energitäthet hos elektriska och magnetiska fält	18
6.2.1	Energitäthet hos elektriska fält	19
6.2.2	Energitäthet hos magnetiska fält	19
6.2.3	Externa EMF ger upphov till fält och strömmar i kroppens vävnader	19
6.3	Energien hos en foton – jämförelse med termiskt bakgrundsbrus.....	21
7	Krafter i molekylärbiologiska sammanhang	22
8	Energiåtgång i molekylärbiologiska sammanhang	23
9	Akuta effekter vs. långsiktiga effekter	24
9.1	Långsiktiga effekter.....	24
10	Frågan om termiska respektive icke-termiska effekter	25
11	Kan DNA-strängbrott uppstå vid exponering för elektromagnetiska fält med frekvens i storleksordningen 3 GHz?	27
12	Problemet med ferromagnetiska material i laboratoriemiljön	29
13	Magnetoreception och magnetiska fälteffekter hos djur och människor	31
	Appendix 1. Fotoner	32

Appendix 2. Exponeringsgränser såsom de föreslås av ICNIRP	33
Appendix 3. Laser	36
Appendix 4. IARC's klassificering	38

1 Inledning

Som en mer generell utgångspunkt kan man inte säga att något är ofarligt – dels kan ofarlighet inte bevisas – dels finns alltid möjligheten att nya relevanta fakta kommer fram och då måste man vara beredd att ändra sin ståndpunkt eller åtminstone modifiera den. Detta är ett av skälen till att en dialog mellan forskare och andra med olika utgångspunkter är värdefull. Problemet är ofta inte kontroverser kring om observationer är korrekta eller ej utan snarare hur dessa kan tolkas.

Till debatten om elektromagnetiska fält, EMF, hör en mängd vetenskapliga förhållanden som sällan lyfts fram och som har relevans för frågeställningar som rör eventuella risker. De teman som här valts är sådana som ofta förbises men som har relevans för att man ska kunna belysa den komplexitet som finns inbakad i laboratorieexperiment och teoretiska tolkningar.

Det avgörande för att biologiska effekter ska kunna åstadkommas vid exponering för någon form av strålning är att en växelverkan sker mellan strålningen och atomer och/eller molekyler. För de som läser exempelvis strålningsfysik (sjukhusfysiker m fl) är denna växelverkan så central att man har separata och ganska tunga kurser i ämnet. För växelverkan mellan icke-joniserande strålning och atomer och/eller molekyler förekommer nog knappast någon särskild kurs i ämnet. Istället är det senare kunskapsområdet inbakat i andra ämnen – främst inom kemin genom kurser såsom fysikalisk kemi, organisk kemi, analytisk kemi, kvantkemi, spektroskopi, fotokemi mm. Dessa områden är centrala i sammanhang som rör kvantifierande analys av struktur och funktion hos molekyler inklusive de man mäter inom biokemi och molekylär cellbiologi. Ett annat område som delvis överlappar med kemin är astronomin. Här kan det handla om molekylfysik för interstellära medier eller tolkning av spektra i andra sammanhang som exempelvis utforskandet av planeters miljö nära andra stjärnor: Växelverkan mellan icke-joniserande strålning och atomer och/eller molekyler är central för att astronomer ska kunna ägna sig åt spektralanalys av olika slag. Vissa traditionella vetenskapsområden som materiefysik och kärnkemi sträcker sig över både området joniserande och icke-joniserande strålning.

Det är alltså hos personer som har erfarenheter från dessa områden som man återfinner den kunskapsmassa som behövs för att förstå hur en eventuell "antenn" skulle kunna fungera från fysik och kemi till biologi.

Ett annat kemiområde av betydelse för tolkningsfrågor rörande eventuella mekanismer bakom biologiska effekter efter exponering för elektriska och magnetiska fält är det som rör förekomst av ferromagnetiska material¹ i olika organismer liksom som förorening i laboriemiljön. Återigen är kemins utgångspunkter av stor relevans för tillhörande frågeställningar.

¹ Man kan även tänka sig ferrimagnetiska och anti-ferromagnetiska material m fl specialfall men sådana möjligheter måste förbli spekulationer till dess motsvarande underlag studerats.

Om man ser till de som aktivt deltar i mer eller mindre kontroversiella aspekter kring elektriska och magnetiska fält, oavsett om de är forskare eller mer fristående aktörer, finner man att få av dem har kemi som kompetensområde. Som följd av detta förhållande kommer sällan motsvarande vetenskap fram ordentligt i debatt och andra sammanhang. Detta är ett av huvudskälen till att undertecknad tagit initiativ till denna skrift och det är min förhoppning att det som nedan tas upp ska kunna stimulera till ytterligare fördjupning och dialog – inte minst mellan forskare som har olika utgångspunkter och erfarenheter i EMF-frågorna.

Även om denna text har en del fokus på lägre frekvenser (säg lägre än storleksordningen 100 kHz)² är det för sammanhangets skull nödvändigt att även ge en viss översikt av fenomen vid högre frekvenser – dvs vilka fenomen som dominerar i respektive område och därigenom också på ett ungefär sätta upp gränserna för var icke-termiska effekter går. Dessa gränser sätts bl a av termiskt bakgrundsbrus samt den energimängd som behövs för att bryta den svagaste molekylbindningen (vätebindningen). Mot denna bakgrund sträcker sig den här texten upp emot de energinivåer som motsvaras av molekylära rörelser som rotation och vibration.

Komplexiteten hos en "EMF-exponering" framkommer sällan i den mer allmänna debatten och ibland finner man även i originallitteraturen exempel på ofullständigt beskrivna experimentella förhållanden. Av detta skäl tas här inledningsvis viktiga exponeringsparametrar (eller variabler) upp så läsaren ska få en utgångspunkt för kritisk läsning av forskarfynd mm.

² Vad som menas med höga respektive låga frekvenser varierar i litteraturen. Anledningen till att man ofta väljer en viss frekvens som gräns mellan "hög" och "låg" är helt enkelt att det är praktiskt men i verkligheten föreligger inga "språng" i ekvationer eller liknande.

2 Vad menas med EMF?

Beteckningen "EMF³" (elektromagnetiska fält – eller för låga frekvenser⁴ - elektriska och magnetiska fält) används ofta som ett samlingsbegrepp för helt olika begrepp som har att göra med elektricitet eller magnetism, elektrisk fältstyrka (volt per meter, V/m), statiska eller tidsvarierande magnetiska fält⁵ (tesla, T) och elektromagnetiska vågor. I det senare fallet handlar det om elektriska och magnetiska fältet som ett "kombinerat" fenomen (kopplad våg) där man kan tala om *fotoner* (med partikelegenskaper) snarare än vågor. Se närmare Appendix 1 om fotoner. I de fall elektrisk ström eller spänning tolkas in i begreppet EMF är detta en mycket slarvig och egentligen felaktig hantering. Huruvida man väljer att tala om vågor eller fotoner är delvis beroende av vilka egenskaper man vill framhålla.

Generellt kan man säga att hög frekvens (som motsvarar hög energi) motiverar att EMF tolkas som "elektromagnetiskt fält" med en kopplad våg eller fotoner under det att låg frekvens bör betraktas som "elektriska och magnetiska fält" med separata elektriska och magnetiska komponenter.

³ För de som läst kemi kan beteckningen EMF te sig lite förvirrande eftersom det i internationella litteraturen står för elektromotorisk kraft (electromotive force) som emellertid är en helt annan sak.

⁴ Under storleksordningen 100 000 Hz.

⁵ Anm. Formellt skiljer man på magnetisk flödestäthet för det s k B-fältet (som mäts i tesla) och magnetisk fältstyrka för det s k H-fältet (som mäts i A/m). B- respektive H-fältet står alltså för olika begrepp och de har därför också olika enheter. Enhetsomvandlaren mellan B och H betecknas med permittiviteten μ som är en materialberoende konstant. Se även avsnitt 6.2 nedan.

3 Vad menas med en EMF-exponering?

3.1 EMF-exponeringar kan indelas i fem kategorier med totalt 18 parametrar?

Peter Valberg har diskuterat de faktorer som karakteriserar en EMF-exponering och vad som är centralt för tolkningen av biologiska experiment.⁶ Utgångspunkten är den analogi man kan finna när man exempelvis diskuterar för kemisk dos vid exponering av försöksdjur, celler i odling, sammanhanget med bakgrundsnivåer mm. Med denna utgångspunkt utgör EMF en ny utmaning. Den som avser att genomföra ett "EMF-experiment" ställs inför många val vilket ställer krav på försökets planering och rapportering. Utvärderingen i sin tur blir helt beroende av exponeringsförhållandena som innefattar både exponeringsutrustning och övrig försöksuppställning. Dessvärre återfinns i litteraturen ganska många publicerade arbeten där just exponeringsförhållandena inte dokumenterats tillräckligt nog för att det experimentella (eller epidemiologiska) utfall man fått ska gå att tolka.

Valberg avhandlar fem exponeringskategorier med sammanlagt 18 parametrar som beskriver miljön med avseende på elektriskt respektive magnetiskt fält. En del av dessa parametrar är inte alltid relevanta – det väsentliga är att Valberg systematiserat frågan. Detta innefattar således strålningens fysikaliska karaktär, den experimentella anordningen liksom objektet självt. De fem kategorierna är:

- A) Exponeringens intensitet, "timing" och duration (varaktighet)
- B) Frekvens-domänkaraktäristika
- C) Spatiala (geometriska) deskriptorer
- D) Kombinerade EMF-exponeringar samt
- E) Karakteristika hos exponeringssystemet.

De 18 exponeringsparametrarna måste antingen specificeras eller så är de ej är tillämpbara. Endast ett fåtal artiklar i litteraturen specificerar EMF-exponering med motsvarande systematik trots att en sådan avsaknad gör att en rapporterad tillhörande biologisk effekt då blir meningslös (informationen kan inte tolkas och försöket kan inte upprepas). Av parametrarna nedan brukar de fem första oftast anges men ofta blir exponeringen ofullständigt beskriven om inte många av de andra parametrarna också beskrivs.

⁶ P.A. Valberg, Designing EMF Experiments: What is Required to Characterize "Exposure"? *Bioelectromagnetics*, Vol. 16, 1995:396-401. Den text som ligger under avsnitt 3.1 är ett kraftigt sammandrag av Valbergs artikel vilket bl a inneburit att vissa meningar ändrats, andra utgör en mer eller mindre direkt översättning. Detta har förklarats och stämts av med ursprungsförfattaren som gett sitt samtycke vilket naturligtvis varit av stort värde.

3.1.1 Exponeringens intensitet, "timing" och duration

1. *Magnetfältets storlek.* Ofta anges ett magnetfältets storlek som ett enda värde men detta är egentligen otillräckligt eftersom man även måste ange om fältets storlek avser topp, "topp till topp" eller kvadratroten ur amplitudens kvadratiska medelvärde. Vid "verkliga" sammanhang bör observeras att växelströmssystem undergår transienter, avvikelser från sinusvågens form samt spänningsfluktuationer som alla yttrar sig i form av magnetfältstyrka.

2. *"Timing"* syftar på när exponeringen sätts in exempelvis i förhållande till ett djurs ålder eller tid på dagen, antal timmar efter att celler i odling delat sig osv. Exponeringstiden kan vara allt från sekunder till veckor. Ytterligare en parameter är den tid som förflyter från det att exponeringen upphört till dess att man påbörjar analysen av det biologiska resultatet.

3. *Upprepade exponeringsperioder.* Ofta handlar ett experiment bara om en enda exponering men ibland rör det sig istället om återkommande exponeringar.

4. *Biologisk klocka.* Eventuell biologisk klocka i förhållande till exponeringstiden (känslighet kan hos olika djurarter variera över dygnet).

De 14 exponeringsfrågor som här följer är sådana som inte har en motsvarighet till exponering för kemikalier. Särskilt viktigt är vågform samt hur EMF varierar med tiden.

3.1.2 Frekvens-domänkaraktäristika

5. *Frekvensen för fältets svängningar.* Den oftast förekommande svängningsfrekvensen är för ELF (extremely low frequency) 50 Hz men andra frekvenser kan också vara aktuella. I ett mellanregister ligger radio- och TV-vågor. Frekvensen för mobiltelefoni är av storleksordningen 1 GHz och hör till mikrovågsområdet som har en övre gräns vid 300 GHz. För närmare detaljer kring frekvensområden, se avsnittet nedan om skillnaden mellan joniserande och icke-joniserande strålning.

6. *Övertoner.* En ren sinusvåg kräver frånvaro av övertoner men i praktiken måste man ofta mäta och sedan specificera deltonernas andel. EMF som avviker från den perfekta sinusvågen är vanliga och i verkliga exponeringssammanhang har man i själva verket ofta att göra med mycket komplexa frekvensspektra.

7. *Intermittens.* En fråga är hur stabil intensiteten är hos det magnetiska fältet – kanske ger en varierande intensitet (hos det magnetiska och/eller elektriska fältet) en större biologisk effekt. I detta hänseende kan experimenten varieras i det oändliga – t ex av- och påslag varje timme eller var 30:e sekund osv.

8. *Transienter* pga anordningar för av- och påslag av elektriska system.

9. *Tidskoherens*. Vissa forskare (se t ex arbeten av T.A. Litovitz i början av 1990-talet) menar att fasstabilitet hos ett 60 Hz/50 Hz magnetiskt fält kan vara avgörande för eventuella biologiska effekter.

3.1.3 Spatiala (geometriska) deskriptorer

10. *Cirkulär- och linjärpolarisation*. Det magnetiska eller elektriska fältet är en vektor och kan ses som en förändring i storlek och riktning. En oscillation som enbart innefattar vektorns storlek kallas för linjärpolarisation under det att man för en storleksfixerad vektor som endast varierar med avseende på riktning talar om en cirkulärpolarisation. Elektriska och magnetiska fält vid trefasledningar är normalt elliptiskt polariserade (dvs en blandning av linjär och cirkulär polarisation råder).

11. *Relativ orientering och magnitud hos magnetfält från växelström (AC) respektive likström (DC)*. Detta är av vikt när man testas k "jonparametriska" eller cyklotronresonansmodeller som är specialfall där den intresserade hänvisas till litteraturen (se t ex arbeten av J.P. Blanchard, C.F. Blackman samt A.R. Liboff m fl).

12. *Spatiell homogenitet*. En exponeringssituationen måste alltid specificeras med avseende på fältets homogenitet (helst genom mätningar) eftersom närliggande ledande material (t ex av järn) kan förstöra homogeniteten i det fält man räknat sig fram till.

3.1.4 Kombinerade EMF-exponeringar

13. *Överlagrade elektriska fält*. Vid vissa experiment kombineras elektriska och magnetiska fält för att simulera en kraftledningsmiljö. Det är då viktigt att specificera de relativa orienteringarna hos fälten. Till skillnad från magnetiska fält avtar elektriska fält mycket snabbt vid kroppsytan eller då de går genom luft och når ledande vattenlösningar.

14. *Statiska (Jordens) magnetiska fält*. Storleken på geomagnetiska eller andra statiska magnetiska fält måste specificeras liksom dess orientering i förhållande till exponeringsregionen. Storlek och orientering hos geomagnetiska fält varierar beroende på plats på Jorden och modifieras beroende på ev. närhet till stålkonstruktioner – t ex i byggnader.

15. *Tillfällig oplanerad EMF-exponering*. De magnetiska bakgrundsfält som föreligger i laboratoriemiljö ligger ofta på storleksordningen 0,1 μT vilket också är den nivå som i allmänhet brukar betraktas som acceptabel men tillfälliga "strömfält" över denna nivå bör undvikas. Dessvärre producerar cellinkubatorer och annan utrustning "strömfält" som åtminstone tillfälligt kan ligga avsevärt över 0,1 μT . Man måste därför veta vilka åtgärder som bör vidtagas eller har vidtagits för att undvika sådana exponeringar vilket inkluderar situationer där celler eller försöksdjur exempelvis transporteras mellan olika utrymmen.

3.1.5 Karakteristika för experimentella exponeringssystem

16. *Geometri för ett cellkultursystem.* De kärl som celler odlas eller förvaras i kan genom sin form, storlek och placering påverka nivån på de elektriska fält som induceras av ett varierande magnetfält.

17. *Storlek, antal och rörelser hos exponerade djur samt närmiljöns egenskaper.* Vid en exponering för elektriska fält blir de uppkomna fälten i kroppen beroende av djurets storlek, närhet till andra djur, de gränser som burens sätter samt djurens orientering i förhållande till det externa elektriska fältet. Om djuren rör sig förorsakar de statiska fält som uppträder som tidsvarierande fält i kroppen. Strömmar kan då flöda in genom djuren från dricksvattenssystem, prober och annat.

18. *Tillkommande exponering av icke-EMF-karaktär.* Utrustning för magnetfältsexponering förorsakar ofta hörbara surranden, vibrationer, detekterbar värmeutveckling (ytterst svårt att undvika⁷) och förnimbar värmeutveckling. Kraftiga elektriska fält kan få hår att resa sig, producera susljud, förorsaka elektrostatisk utfällning och ge upphov till ozon-bildning. För att hantera detta problem behövs en shamexponering (kontrollexponering) där man har dubbelvirade spolar för de magnetiska fälten.

Utöver dessa 18 variabler kan också situationen rörande magnetit och andra ferromagnetiska material vara högrelevant att specificera (se avsnitt 12).

3.2 Vad är skillnaden mellan exponering och dos?

För joniserande strålning är begreppet dos klart definierat – den som absorberade dosen anges i gray, Gy, där $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ (joule per kilogram – det handlar alltså om energiabsorption räknat per kilo). För joniserande stråldos till människa, där man genom viktning tagit hänsyn till biologisk verkan av olika strålslag (alfa, beta, gamma, neutroner mm) används sievert, Sv (J/kg).

Med en exponering vid en viss doshastighet (även kallad "dosrat"), dvs Gy/s erhålls dosen genom att multiplicera doshastigheten med exponeringstiden. Exempelvis ger en doshastighet på $0,0001 \text{ Gy/s}$ på 10 sekunder en dos på $0,001 \text{ Gy} = 1 \text{ mGy}$.⁸

Mot denna bakgrund för joniserande strålning ligger det alltså nära till hands att försöka åstadkomma en motsvarande beräkning för elektromagnetiska fält, dvs en beräkning som ska mynna ut i "absorberad energi per kilo". Det man då ser är att varken exponering (över viss tid) vid en elektrisk fältstyrka (volt per meter, V/m) eller vid ett visst magnetiskt fält (s k B-fält)⁹ ($\text{Vs/m}^2 =$

⁷ C-K. Chou, Thirty-five Years in Bioelectromagnetics Research, *Bioelectromagnetics*, Vol.28, 2007:3-15.

⁸ Om doshastigheten varierar med tiden beskrivs dosen annars av tidsintegralen över dosvariationen vilket är det generella sättet på vilket man beräknar en dos.

⁹ Här bör observeras att B-fältet ofta kallas "magnetisk flödestäthet" samt att det besläktade begreppet H-fält mäts i A/m.

N/Am) kan ge upphov till "energi per kilo"¹⁰ genom någon slags direkt multiplikation. Syftet med att poängtera detta är att det inte är meningsfullt att använda begreppet "dos" för exponering för ett elektriskt respektive ett magnetiskt fält – det blir helt enkelt dimensionsfel om man är ute efter "J/kg".

Alltså gör man därför på följande sätt när det handlar om beskrivning av exponering för elektromagnetiska fält i det icke-joniserande området:

För extremt lågfrekventa elektriska och magnetiska fält (såsom det från kraftledningar eller de flesta hushållsapparater, dvs frekvensen 50 Hz) anges den magnetiska fältkomponenten för sig (för många praktiska sammanhang ett värde uttryckt i storleksordningen mikrottesla) och den elektriska fältkomponenten för sig (t ex "1000 V/m").

En kraftledning är en mycket dålig antenn och den energi som avges i form av strålning är mycket låg. Därför är det missvisande att tala om strålning i sammanhang som rör 50 Hz – i varje fall leder det tanken fel.¹¹ Exempelvis avger en 100 meter lång kraftledning som bär på 500 MW mindre än 10 μW vilket ger ungefär $2 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$ på ett avstånd av 1 m från kraftledningen. Bortsett från elektromagnetisk strålning kan man beräkna att värmeeffekten pga induktion i kroppen vid fält på 1 kV/m och 0,1 mT blir cirka $5 \cdot 10^{-8} \text{ W}$.¹²

Om frekvensen är högre (storleksordningen MHz-GHz) är det ofta anledning att snarare tala om mikrovågor eller radiovågor, och där värmeeffekter kan vara av intresse, är ofta istället effekt (watt, W) respektive effekttäthet (uttryckt som W/m^2 eller "specific absorption rate", SAR, W/kg) en mer passande beskrivning. Eftersom effekt är energi per tidsenhet ($\text{W} = \text{J/s}$) blir det här lätt att göra jämförelser med absorberad energi i sammanhanget joniserande strålning.

¹⁰ Joule per kilo kan även skrivas som VAs/kg ($1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Nm/kg} = 1 \text{ VAs/kg}$).

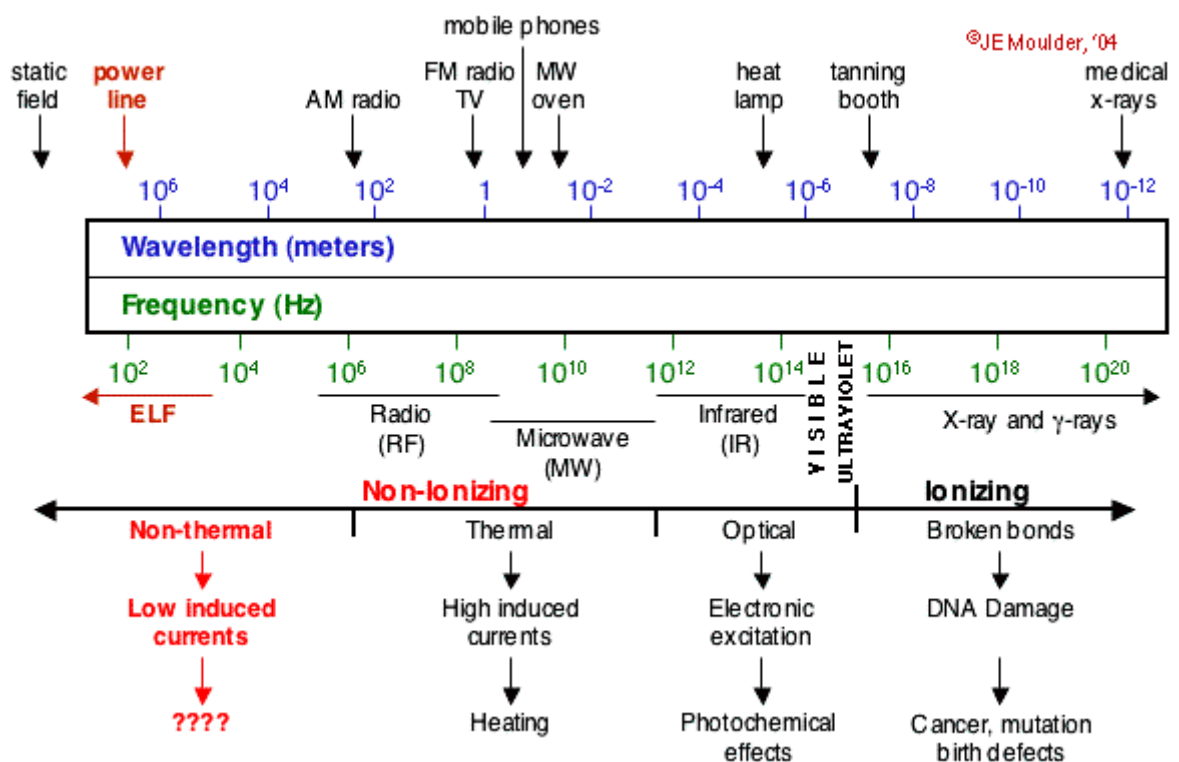
¹¹ Juridiskt räknas emellertid elektriska och magnetiska fält till "strålning" (2§ i Strålskyddslagen).

¹² Olsen & Wong, *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 7, 1992:2046-2055.

4 Skillnaden mellan joniserande och icke-joniserande strålning

En viktig gränsdragning som rör en foton energiinnehåll handlar om huruvida den kan jonisera atomer eller molekyler. För en väteatom ligger jonisationsgränsen vid 13,6 eV. Det betyder att all den energi som en foton avger, och som ligger över 13,6 eV, vid växelverkan med en elektron i en väteatom blir rörelseenergi (hos elektronen). Joniserande strålning inkluderar även partikelstrålning (alfa- och betapartiklar, neutroner mm) men denna text avgränsas till resonemang som rör EMF.

Elektromagnetiska vågor spänner över ett mycket stort energiområde. Exempelvis ligger de flesta hushållsapparaters och kraftledningars frekvens i Sverige på 50 Hz (hertz, 1 Hz motsvarar en svängning per sekund) under det att röntgen och gammastrålning ligger i frekvensområdet 10^{17} - 10^{22} Hz. Energin från detta stora frekvensområde kan beskrivas lite närmare enligt Figur 1:



Figur 1. Översikt av frekvensområdet noll till 1022 Hz (efter J. Moulder, 1998¹³).

¹³ Figuren har återgivits med tillåtelse av John Moulder – författare till Power-frequency fields and cancer. *Critical Reviews in Biomedical Engineering* Vol. 26, 1998:1-116.

Den lägsta möjliga frekvensen är 0 Hz – dvs statiska fält. Jordens naturliga magnetiska fält varierar ungefär inom intervallet från 25 till drygt 60 mikrotesla. De högsta magnetfälten återfinns vid polerna. Om vi istället ser till teknisk verksamhet återfinns vi en del av de högsta statiska magnetiska fälten inom medicinen (s k Magnetic Resonance Imaging, MRI) och nivån kan då handla om uppåt 2 tesla eller t o m mer. Den kliniska nyttan med att gå från 1,5 T till 3,0 T för att exempelvis studera brosk i leder skiljer sig åt högst väsentligt.¹⁴ Frågan är emellertid hur kraftiga magnetfält man kan arbeta med på ett sätt som kan betraktas som acceptabelt ur risksynpunkt. Frågan ligger inbakad i ett s k EU-direktiv som är under översyn och där särskilt statiska fält i sammanhanget MRI-teknik är i fokus. ICNIRP utkom i april 2009 med guidelines för statiska magnetiska fält (se fotnot samt appendix 2).¹⁵

50 Hz: Kraftledningar, de flesta hushållsapparater mm.

Vissa industritillämpningar som t ex induktionsugnar ligger i kHz-området. Elsystem i flygplan nyttjar 400 Hz som frekvens.

88 – 108 MHz motsvarar det vanliga FM-bandet för radio.

Fjärravlästa elmätare arbetar med flera olika tekniker, bland annat med elnätskommunikation med signaler med storleksordningen 90 kHz som från fastigheten ifråga skickas till en koncentrator som i sin tur omvandlar signalen till ett GSM-meddelande (med en frekvens på storleksordningen 850 MHz). Informationen som skickas med GSM-teknik motsvarar ett mobiltelefonsamtal på maximalt någon minut. En annan teknik som man emellertid håller på att gå ifrån är radioteknik på 433 MHz (max 10 mW, oftast 2 till 5 mW som total effekt¹⁶ se även kommentaren till SAR-värden nedan).

2,45 GHz (ca 10^{-5} eV): Så kallad "blåtandsteknik" för trådlös kommunikation t ex mellan dator och mus eller skrivare.

s k DECT-telefoner arbetar med en frekvens på ca 1,9 GHz.

Mobiltelefonfrekvenser, NMT (ca 450 MHz till 470 MHz samt 890 till 944 MHz), GSM, GPRS¹⁷ = "2,5G"), 3G mm) ligger i intervallet 450 MHz till 1,8 GHz.

10^9 Hz (1 GHz) till 300 GHz: Detta frekvensområde kallas ibland mikrovågor.

10^6 Hz (1 MHz) till 300 GHz: Detta frekvensområde kallas ibland radiovågor och inkluderar bland annat de frekvenser som nyttjas för TV-sändningar – till största delen handlar TV-sändningar om frekvenser på 400 till 800 MHz.

¹⁴ R. Kijowski *et al.*, Comparison of 1.5- and 3.0-T MR Imaging for Evaluating the Articular Cartilage of the Knee Joint, *Radiology*, Vol. 250, 2009:839-848.

¹⁵ Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields, *Health Physics*, Vol. 96, 2009:504-514.

¹⁶ Området som spänner från mikrovågor och ned mot radiovågor motsvarar i olika grad de frekvenser som fångas upp av olika material och effektivt omvandlas till värme. Därför anger man i de sammanhang där energiabsorptionen är central ofta olika mått på effekttäthet snarare än frekvensen (i första hand W, W/m^2 samt W/kg).

¹⁷ GPRS = General Packet Radio Service

Området $3 \cdot 10^{11}$ Hz = 300 GHz till $1 \cdot 10^{16}$ Hz (41 eV) kallar man *optisk strålning* och innefattar ultraviolett ljus (UV, omkring 10^{15} Hz), synligt ljus (omkring 10^{14} Hz) samt infrarött ljus (IR, omkring 10^{11} - 10^{14} Hz).

100 000 000 000 000 000 Hz ($1 \cdot 10^{17}$ Hz) till 10 000 000 000 000 000 000 000 Hz ($1 \cdot 10^{22}$ Hz): *Röntgen- och gammastrålning*. Denna strålning kan jonisera atomer och molekyler. Sådana jonisationsprocesser är ospecifika i den bemärkelsen att exempelvis stora molekyler kan trasas sönder på ett ordnat och icke förutsägbart sätt.

4.1 Molekylers energi inom det icke-joniserande frekvensområdet

Molekylära spektra är ett huvudområde av intresse för de som arbetar inom kemien och länge har man nyttjat hela frekvensområdet från mikrovågor och upp till det som motsvaras av ultraviolett ljus. För att studera molekyler används ofta olika spektroskopiska metoder som syftar till att studera *emission*, *absorption* eller *spridning* av elektromagnetisk strålning eller partiklar. Det är alltså dessa fenomen som är grundläggande för vad som kan/inte kan hända när elektromagnetisk strålning växelverkar med molekyler som aminosyror, proteiner, lipider, RNA, DNA osv. Komplexiteten hos molekylära spektra är, jämfört med atomspektra (som mer tydligt handlar om linjespektra), generellt mycket hög och kan vid låg upplösning te sig som kontinuerliga band men dessa avgränsas ofta skarpt på ena sidan och försvagas gradvis mot den andra. Vid högre upplösning kan emellertid oftast monokromatiska linjer urskiljas i banden och som går att gruppera enligt relativt enkla fysikaliska lagar.¹⁸

Det som här följer är en översikt av molekylära fenomen som motsvaras av det icke-joniserande frekvensområdet. En väsentlig poäng med att ta upp dessa fenomen och var de hör hemma energimässigt är att de rimligen kan bortsorteras från den diskussion som rör värme och frekvenser av storleksordningen 1 MHz eller lägre. Energin hos en molekyl kan uttryckas som summan av bidrag från elektronövergångar, rotationer, vibrationer samt translation.

Med *rotation* menas att två atomer snurrar i relation till varandra runt den axel som förbinder dem (t ex en väteatom i en vattenmolekyl i förhållande till syreatomen). Rotation kan inte ske runt en dubbelbindning såsom exempelvis den i eten ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$) – däremot kan i fall som detta istället en oscillerande vridpåkänning ske runt dubbelbindningar. Rotation kan även ske runt de båda axlar som ligger vinkelrätt mot "förbindelseaxeln". *Vibration* innebär att två atomer svänger utmed den axel som förbinder dem så att avståndet mellan atomerna varierar. För att förstå vibrationsfrekvensens beroende av massan kan man som tankemodell betrakta kol-kol-bindningen i etan ($\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3$) – en molekyl som kan ses som två metylgrupper som i sin tur sammanhålls genom

¹⁸ Den matematiska utmaningen här ligger på nivån universitetsfysik. Det väsentliga är att man kan räkna på många spektrallinjer och förstå varför de motsvaras av de energiövergångar som det handlar om.

en kol-kol-bindning. Om man nu tänker sig att de båda kolatomerna istället för väteatomer hade något större molekylärt "påhäng" skulle motsvarande frekvens sjunka jämfört med det för etanmolekylen. Om kol-kolbindningen absorberar energi genom att den träffas av en foton kommer istället vibrationernas amplitud att öka. *Translation* innebär att hela molekylen rör sig i rymden. Mikrovågskokning av vatten exempelvis innebär att man åstadkommer rotations-, vibrations- och translationsfenomen hos molekylerna och det är dessa rörelser som skapar uppvärmningseffekten. Elektronövergångar är endast aktuella vid energinivåer som motsvaras av frekvensen 10^{14} Hz eller mer.

I striktare bemärkelse är emellertid inte uppdelningen i de just nämnda distinkta kategorierna helt korrekt eftersom både elektronövergångar, vibrationer och rotationer delvis inbördes kan påverka varandra och därför inte helt går att åtskilja. För den som vill fördjupa sig i dessa frågor hänvisas till fysikalisk kemi och de avsnitt som handlar om kemisk bindning, spektralanalys och besläktade områden.

Det bör betonas att andra fysikaliska fenomen än de som tas upp här och som handlar om värme inte är kända i mikrovågsområdet och lägre energier. *Om sådana icke-termiska fysikaliska effekter skulle hittas vore det en världssensation och skulle sannolikt resultera i en höggradig uppmärksamhet eftersom det då skulle handla om fenomen med egenskaper som var nya för vetenskapen.* Det är därför rapporter om "icke-termiska effekter" måste mötas med skepsis och framför allt krav på upprepning av oberoende forskargrupper.¹⁹

Emellertid kan man inte i striktaste bemärkelse utesluta möjligheten att en riktigt stor molekyl skulle kunna ha någon specifik resonansenergi för vibration eller rotation vid lägre frekvens – säg under 1 GHz men det förefaller osannolikt av två skäl: Det första är att alla molekyler badar i termiskt brus som ligger flera tiopotenser högre vid exempelvis 37°C. Det andra – om vi utgår från någon elektronisk apparat eller anordning (t ex en mobiltelefon) – är att det vore bra märkligt om dess frekvens exakt skulle matcha exempelvis en vibrationsfrekvens hos en biologisk makromolekyl. Om en sådan absorption ändå skulle kunna ske torde minst en förutsättning till vara nödvändig – nämligen en ackumuleringsmekanism – där flera fotoner samverkade för att skapa en högre sammantagen energinivå som i sin tur skulle vara nödvändig för att man skulle nå över den *termiska* brusnivån.²⁰

¹⁹ Robert K. Adair nämner i en artikel i tidskriften *Bioelectromagnetics* (Vol. 24, 2003:39-48) att över 200 rapporter publicerats och som pekar på icke-termiska effekter. Adairs bedömning som i sin tur stöds av andra forskare är emellertid: "...these results do not form a coherent pattern and no single result has been accepted as valid by a consensus of scientists working in the field".

²⁰ Jämför detta med projektet att hoppa över det drygt 2000 m höga Kebnekaise. Stefan Holm hoppar som bekant över 2 m i höjdhopp. Om vi hade 1000 personer med Stefan Holms kapacitet skulle det ändå inte utan särskilda anordningar gå att få till ett sammantaget hopp för dessa personer som skulle göra att de nådde över toppen på Kebnekaise.

4.2 Molekylers energi inom det icke-joniserande frekvensområdet

Radiofrekventa våglängdsområdet ($3 \cdot 10^3$ Hz- $3 \cdot 10^{11}$ Hz)

För det radiofrekventa området²¹ är energiförändringar i molekyler alltför svaga för att kunna observeras utom under mycket kraftiga magnetfält (kärnmagnetisk resonansteknik samt elektronspinresonansteknik, hör till de tillämplade områden där frekvenser ned till under 1 Hz kan nyttjas för att dra slutsatser om elektroners respektive atomkärnors spinn i molekyler).

Mikrovågor (10^9 - 10^{11} Hz)

Mikrovågsområdet kan ge information om *rotation* hos tunga molekyler, avstånd mellan atomer samt dipolmoment hos molekyler. Mikrovågornas gräns mot lägre frekvenser är inte klart definierad utan det man hittar är istället lite flytande ned mot ca 300 MHz.

Långvågigt infrarött ljus (10^{11} - 10^{13} Hz)

För den delen av IR som kallas "far infrared" kan information erhållas som rör rotation hos lätta molekyler, *vibration* hos tunga molekyler samt avstånd mellan atomer.

Infrarött ljus (10^{13} - 10^{14} Hz)

Det infraröda området innefattar de molekylära energinivåer som kan ge upphov till vibration i *lätta* molekyler samt *kombinerade vibrations-rotationsfenomen*. Den information som erhålles i detta energiområde inkluderar avstånd mellan atomer, kraftkonstanter som relaterar till kemiska bindningar samt information om molekylära laddningsfördelningar.

Ultraviolett och synligt ljus (10^{14} - 10^{15} Hz)

Inom frekvensområdet för UV och synligt ljus handlar molekylenergin om elektronövergångar. Den information man kan få ut inom detta område handlar om bindningsenergi, avstånd mellan atomer samt molekylära laddningsfördelningar.

4.3 Kommentarer till fotoners "degradering" när de når Jorden

De fotoner inom det ultravioletta och synliga ljusområdet som når jorden absorberas till stor del och driver en mängd fysikaliska och biologiska processer. Ett resultat av dessa processer är att den ursprungliga fotonenergin yttrar sig i form av värmestrålning – dvs fotoner av lägre energi. Förenklat och i relativt bemärkelse således: Högenergetiska fotoner blir lågenergetiska fotoner. Ob-

²¹ Liksom för mikrovågsområdet är tolkningen av vad som är radiovågor lite flytande. Det område som här angivits ($3 \cdot 10^3$ Hz- $3 \cdot 10^{11}$ Hz) är här tolkat i bred bemärkelse.

servera att detta är en enkelriktad process – dess omvändning gäller inte i någon spontan bemärkelse. Vi kan alltså inte förvänta oss att fotoner med ännu lägre energi (t ex motsvarande de som är aktuella inom trådlös kommunikation) spontant skulle samla ihop sig till färre fotoner men med ett energiinnehåll per foton som skulle bryta exempelvis kemiska bindningar.

4.4 Olika mått beroende på frekvensområde

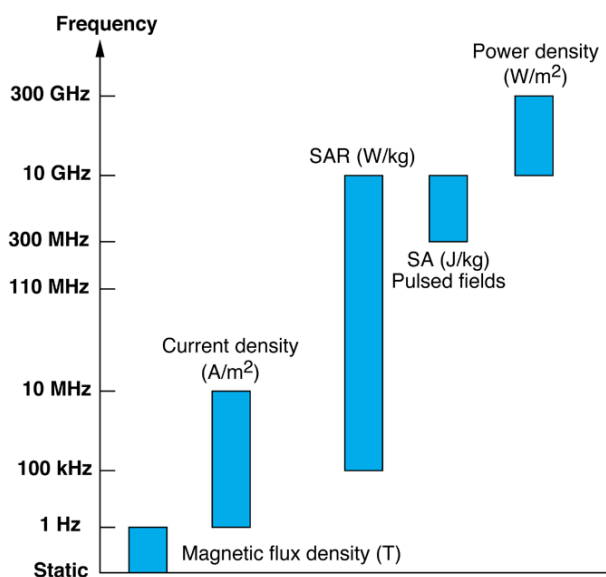
Ett annat sätt att beskriva elektromagnetiska fält än att ange frekvensen är att se till effekten uttryckt som watt per kilo (W/kg). Detta mått anger alltså hur mycket energi som absorberas per tidsenhet och massenhet och kallas därför i engelskspråkig litteratur för *SAR-värde* (specific absorption rate). I praktiken har SAR-värdet under senare år mest använts i sammanhanget "mobiltelefoni" vilket handlat om storleksordningen 1 GHz. Vid högre frekvenser än ca 6 GHz blir uppvärmning av ytliga vävnader viktigare än helkroppss SAR (Shapiro, 2002). För låga frekvenser som 50 Hz är SAR-värdet, som syftar på energiabsorption, tämligen ointressant²². För en sexminuters period får inom EU SAR-värdet för huvudet från en mobiltelefon inte överstiga 2 W/kg.²³ Inte heller är det inom EU tillåtet att sälja mobiltelefoner som överstiger detta värde.

Som framgår av översikten ovan kan en allmän hänvisning till "strålning" lätt bli ganska oklar och snarast förvirrande. Detta gör att man ofta behöver uttrycka mer exakt vad man menar med "strålning" så att begreppet blir definierat på ett sätt som är relevant för det aktuella sammanhanget.

Figur 2 nedan illustrerar grafiskt på ett ungefär när olika mått är relevanta att använda med tanke på biologiska effekter. Observera särskilt att magnetisk flödestäthet (tesla) endast rekommenderas för fält mellan 0 och 1 Hz. Detta hänger samman med ICNIRPs strikta krav på etablerade biologiska effekter. För låga frekvenser handlar riskerna alltså om strömtäthet – se även Appendix 2. För högre frekvenser (över ca 100 kHz) är det istället mått på absorberad energi respektive effekttäthet som är centralt.

²² Detta hänger samman med den stora våglängden som är 6000 km – med andra ord är vågens gradient ytterst liten över storleksordningar av intresse exempelvis för frågan om hälsorisker - människans kroppsdimension är omkring 1 m, mått på cellulär nivå ännu lägre.

²³ Strikt räknas SAR-värdena ofta som medelvärde över 10 gram vävnad – dvs var som helst i människokroppen.



Figur 2. För magnetiska fält finner man olika biologiskt relevanta fysikaliska enheter beroende på frekvensområdet (efter ICNIRP).

Den här utgångspunkten följer också väl de rekommendationer som ICNIRP²⁴ föreslagit för yrkesarbetare och allmänheten s k basic limits och reference levels (se avsnitt 9 samt Appendix 2).

Statens Strålskyddsinstitut²⁵, SSI, har utgivit "allmänna råd om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält" (SSM FS 2008:18) om hittas på www.ssm.se. Vidare har SSI utgivit "Föreskrifter om torkning med mikrovågor" (SSM FS 2008:41).

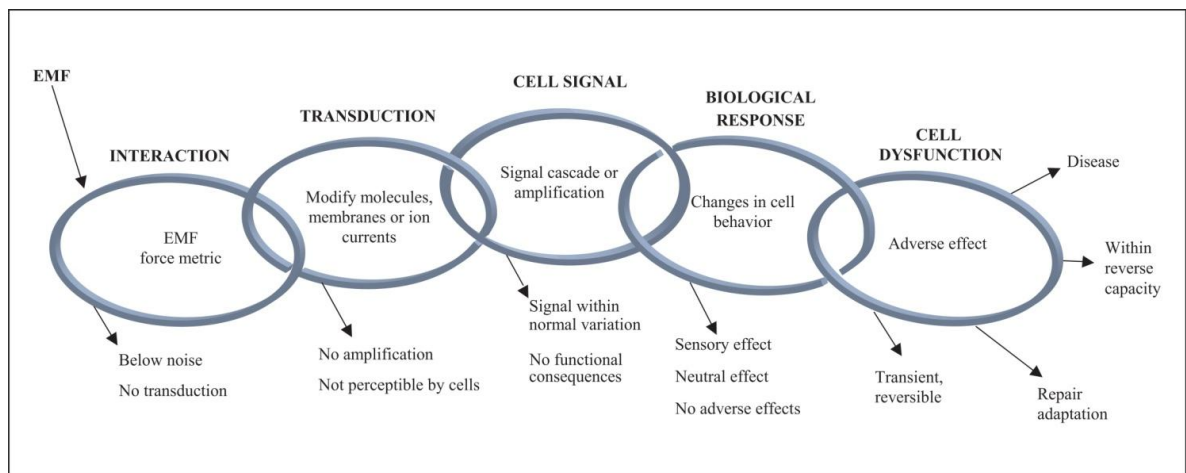
En speciell typ av elektromagnetisk strålning utgörs av *laser*. De flesta frågeställningar som rör laser rör emellertid helt andra betraktelser av EMF än de som huvudsakligen åsyftas i denna text. Därför har laser endast kommenterats helt kort i Appendix 3.

²⁴ ICNIRP = International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

²⁵ Statens Strålskyddsinstitut slogs den 1 juli 2008 samman med den tidigare Statens Kärnkraftinspektion och bytte då namn till Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM.

5 Hur koppla från EMF-exponering till sjukdom?

För att någon form av sjukdom ska kunna bli resultatet av en EMF-exponering krävs att en kedja av händelser uppfylls. Länkarna i denna kedja kan principiellt ses på följande sätt:²⁶



Figur 3. EMF-exponering ->Transduktion (modifiering av molekyler/membranfunktioner, eller strömmar av joner) ->Cellsignal (signalkaskad eller förstärkning) ->Biologisk respons (förändring av cellbeteende) ->Cellulär defektfunktion (figuren är från P.A. Valberg *et al.*, som medgivit dess återanvändning i detta sammanhang).

Det räcker med att en av dessa länkövergångar inte kan ske för att "EMF" inte ska kunna resultera i sjukdom. Därför bör var och en av dessa länkar granskas kritiskt. Det främsta syftet med detta och följande avsnitt är därför att mer tydligt visa hur man stegvis, med betoning på de första stegen i kedjan, kan analysera frågeställningen "EMF->sjukdom?".

Den första länken handlar alltså om exponeringen där man exempelvis kan analysera huruvida denna ligger under brusnivå. Om så är fallet är transduktion (energiöverföring) inte möjlig (se särskilt avsnittet nedan om energiinnehållet hos en foton). En energiöverföring skulle exempelvis kunna ske om krafter på något sätt utvecklas så att mekaniska rörelser sker på molekylär nivå. Man skulle kunna tänka sig ett membran som transient öppnas så att joner, pga av dessas gradient över membranet, strömmar genom membranet. Emellertid kräver detta en föregående händelse av något slag eftersom ett

²⁶ P.A. Valberg, R. Kavet and C.N. Rafferty, Can Low-Level 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields Cause Biological Effects? *Radiation Research*, Vol. 148, 1997:2-21. Styrkan hos detta arbete ligger till stor del i den systematiska framställningen.

membran i sig veterligen inte kan fånga upp energin hos en foton på säg 1 GHz ("mobiltelefonfrekvens") eller än mindre 50 Hz.

Den enda kända möjligheten är om ferromagnetiska partiklar (FP, t ex magnetit = Fe_3O_4) förekommer i cellerna. Sådana partiklar är kända som laboratorieförorening (se särskilt avsnitt nedan) och det är lätt att föreställa sig att dessa vid ett växelfält skulle kunna "flippa" fram och tillbaka pga krafter som utvecklas i partiklarna. Teoretiskt kan detta studeras genom att man analyserar olika stora FP och hur tröghetsmomentet i dessa fungerar med hänsyn till frekvens samt viskositet och andra egenskaper hos det omkringliggande mediet.

Om nu en signal trots allt blir följd av en energiöverföring kan man analysera nästa steg i kedjan ovan. Om denna signal adderad till cellens övriga signaler hamnar inom cellens normala variation för signaler kan denna nya signal inte leda till några funktionella konsekvenser.²⁷

De sista stegen i kedjan ovan handlar om mer biologiska processer vilka ofta är av reversibel karaktär. Andra mekanismer såsom reparation och adaptation kan också helt omintetgöra ett fenomen (eller en molekylärt baserad händelse) som ytterst härrör uppifrån i kedjan.

²⁷ Anm. En analogi med joniserande strålning haltar dels pga att man för denna har att göra med distinkta molekyلفörstörande processer (t ex genom fria radikalreaktioner), dels genom att man epidemiologiskt inte hittat något samband (t ex för canceruppkomst) som är jämförbart med de man funnit för exempelvis gammastrålning.

6 Fysikaliska betraktelser av magnetiska respektive elektriska fält

Liksom i ett par föregående avsnitt följer avsnitt 6-8 mycket från Valberg *et al.* (*Radiation Research*, Vol. 148, 1997:2-21) men också Moulder *et al.* (*Radiation Research*, Vol. 151, 1999:513-521). Dessa båda referenser är av systematisk översiktskaraktär där författarna har fokus på mekanismer och vad som över huvud taget är möjligt med avseende på nu kända fysikaliska lagar.

6.1 Kraften på elektriska laddningar

Genom elektriska, E (V/m), och magnetiska, B (tesla, T^{28}), fält uppstår en kraft på elektriska laddningar. Den totala kraften, F (newton, N), på en laddning q består av två komponenter enligt

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

Termen $q\vec{E}$ ger den så kallade coulombkraften (ett elektriskt fälts verkan på en laddning i det elektriska fältets riktning). Laddningen q mäts i ampere sekunder (As) och är för en elektron $1,6 \cdot 10^{-19}$ As.

Den andra termen, $q(\vec{v} \times \vec{B})$, ger den så kallade Lorentzkraften. Lorentzkraften beror som framgår av laddningens storlek och hastighet (v) samt det magnetiska fältets styrka. Innebörden av kryssprodukten $v \times B$ är att kraften verkar vinkelrätt mot både v och B .

Eftersom ingen komponent av den magnetiska fältkraften verkar i den laddade partikelns riktning kan dennas hastighet varken ökas eller minskas (dvs den laddade partikelns energi kan inte ändras). Däremot kan ett magnetfält ändra en laddad partikels bana. Hastigheten hos en laddad partikel kan däremot ändras av E-fältet.

6.2 Energitäthet hos elektriska och magnetiska fält

En utgångspunkt för att kunna sätta perspektiv på vad som kan/inte kan tänkas hända i ett elektriskt eller magnetiskt fält är att beskriva fältens energitäthet. Detta går tillbaka på grundläggande definitioner som återges nedan för att de samtidigt också ska kunna sättas in i några allmänt bekanta sammanhang som också ger perspektiv på riskrelaterade frågor.

²⁸ Enheten för magnetiskt fält kan kallas ”kraft per enhet strömelement” som i sin tur är newton per ampere meter (N/Am) som i sin tur är samma sak som tesla, T. Ofta ser man i (särskilt den amerikanska) litteraturen även det äldre måttet gauss, G där $1 \text{ T} = 10\,000 \text{ G}$ (eller $1 \mu\text{T} = 10 \text{ mG}$).

En dimensionsbetraktelse för elektriska och magnetiska fält (se 6.2.1 samt 6.2.2 nedan) implicerar hur EMF kan påverka materia – oavsett vilken mekanism man diskuterar måste den vara en funktion av kraft eller energi: Alla EMF-effekter på biologiska system måste vara alltså vara resultatet av krafter som utvecklats av de elektriska och magnetiska fälten i systemen.

De två första avsnitten nedan handlar om energitäthet hos elektriska respektive magnetiska fält såsom de beskrivits av Valberg *et al.* (1997).²⁹ Energitätheten uttrycks här per kubikmeter men *en viktig reservation rör naturligtvis i vilken mån en sådan makroskala tillåts översättas till den måttstock som gäller för molekyler som proteiner och DNA* (säg storleksordningen 1 till 100 nm).

6.2.1 Energitäthet hos elektriska fält

Den elektriska fältenergin per volymenhet kan skrivas $\epsilon E^2/2$ där ϵ är dielektricitetskonstanten. I luft är $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ J}/[(\text{V}/\text{m})^2 \cdot \text{m}^3]$. Exempelvis har således ett elektriskt fält på 1000 V/m en energi per volymenhet på omkring $10^{-5} \text{ J}/\text{m}^3$. Beräkningen tyder således på att energitätheten är ganska irrelevant för lågfrekventa fält.

6.2.2 Energitäthet hos magnetiska fält

Hos ett fält, B , ges den lagrade energin av magnetiska fältenergin per volymenhet $= B^2/2\mu$ där μ är den magnetiska permittiviteten. I icke-järnföremål är $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N}/\text{A}^2 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ N}/\text{A}^2$. Enheten för μ kan även skrivas som $\text{m}^3 \cdot \text{T}^2/\text{J}$. Exempelvis ger detta för ett magnetiskt fält på 100 mikrottesla (μT) energi per volymenhet till $4 \cdot 10^{-3} \text{ J}/\text{m}^3$.

Som jämförelse kan nämnas att den termiska energin i levande vävnader är omkring $2,2 \cdot 10^8 \text{ J}/\text{m}^3$, dvs cirka en faktor 10^{10} högre.

6.2.3 Externa EMF ger upphov till fält och strömmar i kroppens vävnader³⁰

I en ledande kropp är laddningar fria att röra sig och dessa laddningar positionerar sig som svar på ett externt elektriskt fält så att det inre elektriska fältet är nära noll. Vid frekvensen noll Hz rör sig laddningarna till kroppens yta så att utjämnningen blir exakt och det inre elektriska fältet blir då noll. För va-

²⁹ Valberg *et al.*, *Radiation Research*, Vol. 148, 1997:5-6.

³⁰ De fem första styckena i detta avsnitt följer ganska noga Valberg *et al.* (1997) även om det kortats ned något. Detta har bl a inneburit att vissa meningar ändrats men många utgör en mer eller mindre direkt översättning. Detta har stämts av med ursprungsförfattaren som vänligen gett sitt samtycke.

riera elektriska fält (växelström) måste däremot laddningarna röra sig fram och tillbaka för att upprätthålla utjämnningen och ett litet internt elektriskt fält driver då detta flöde. Hos levande vävnader är det elektriska motståndet (eller impedansen) mycket lägre än den elektriska impedansen hos luft varför det interna fältet blir ganska litet. Kvoten mellan det interna (E_i) och det externa (E_e) elektriska fältet blir då ungefär lika med kvoten av dessa impedanser:

$$E_i/E_e \approx \text{resistivitet hos vävnad/luftens impedans} \approx (1/\sigma)/(1/\omega\epsilon) \quad (2)$$

där ϵ är dielektricitetskonstanten hos luft, σ är konduktiviteten för vävnad (0,05 till 0,6 S/m), och ω är EMF-frekvensen (vid 50 Hz).

Man kan alltså med ekvation 2 som utgångspunkt analysera fält och strömmar som uppkommer som konsekvens av yttre elektriska fält. En sådan analys visar att ett 60 Hz elektriskt fält på 1000 V/m ger ett vävnadsfält på $4 \cdot 10^{-5}$ V/m vilket i sin tur är ekvivalent med det fält som produceras av ett 1,5 V ficklampsbatteri som kopplas över 35 km vävnad.³¹

Magnetiska fält på 50 Hz går i stort sett igenom människokroppen utan någon attenuering vilket betyder att motsvarande energiupptag i stort sett är obefintligt. Valberg *et al.* (1997) har med utgångspunkt från Faradays lag räknat ut att ett varierande magnetfält (med frekvensen 60 Hz) och ett toppvärde på 100 μ T skulle ge upphov till ett elektriskt fält på 0,0048 V/m runt omkretsen hos en (stor) människa med diametern 50 cm. Den inducerade medelströmmen i vävnadens periferi skulle då bli $< 1 \text{ mA/m}^2$. Strömtätheten utanför cellers membraner bedöms då lokalt kunna nå 10 mA/m^2 under det att strömmarna i mer centrala delar av kroppen bedöms bli avsevärt lägre. Som jämförelse ligger strömmarna runt exciterbara nervceller på en bakgrundsnivå på omkring 1000 mA/m^2 .³²

Om ett elektriskt fält oscillerar med låg frekvens, som t ex intill en kraftledning, kommer det att fortsätta att producera strömmar och motsvarande elektriska fält i en ledare men fälten kommer bara att bli en liten andel av det pålagda fältet. Eftersom människokroppen är en bra men komplicerad elektrisk ledare erfar den också inre elektriska fält nära kraftledningar, men dessa är alltså mycket små - mindre än en milliondel av det externt pålagda fältet.³³

Exponering för ett vertikalt elektriskt fält från en kraftledning på 10 kV/m skulle resultera i en strömtäthet i bröstkorgen på ca 190 nA/cm^2 (1,9 mA/m^2)³⁴. Detta är av samma storleksordning som medelvärdena på naturliga strömtätheter pga elektrisk aktivitet i hjärnan och hjärtat.

Hur stort fältens penetrationsdjup in i människokroppen är och hur mycket energi som absorberas beror i hög grad på frekvensen och en del av de övriga

³¹ Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, 2nd ed., CRC Press, 1996:6.

³² H. Wachtel, Bioelectric Background Fields and Their Implications for ELF Dosimetry, *Bioelectromagnetics*, Suppl.1, 1992:139-145.

³³ Repacholi, 1988.

³⁴ T.S. Tenforde and W.T. Kaune, Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans, *Health Physics*, Vol. 53, 1987:595-606.

relevanta parametrarna som beskrivits i avsnitt 2.1 ovan. Vid frekvenser under 100 kHz är energiabsorptionen från intilliggande elektriska och magnetiska fält låg och uppvärmning är av helt underordnad betydelse. Emellertid kan strömmar induceras i människokroppen i frekvensområdet 300 Hz – 1 MHz och dessa kan ge upphov till nerv- och muskelstimulering inklusive ofrivilliga rörelser. Vid 100 kHz börjar värmeeffekter bli betydande med ökande absorption och med vissa resonansfrekvenser mellan 20 MHz och 300 MHz. Betydande lokal ickehomogen absorption uppträder vid 300 MHz och flera GHz. Över 10 GHz sker absorptionen (värmning) väsentligen i huden.³⁵ Vid låga frekvenser (i detta sammanhang under 100 MHz) blir människokroppen alltmär ledande och kontaktströmmar kan ge upphov till stötar och brännskador.

6.3 Energin hos en foton – jämförelse med termiskt bakgrundsbrus

Termiskt brus vid 310 K (37°C) ges av kT där k är Boltzmannkonstanten. Uträknat motsvarar detta en energinivå på $4,3 \cdot 10^{-21}$ J.³⁶ För en foton på 3000 MHz blir energin $< 2 \cdot 10^{-24}$ J. Denna enkla betraktelse gör att man ser att det av fysikaliska skäl förefaller omöjligt att enstaka fotoner i "frekvensområdet för mobiltelefoner" skulle kunna ge upphov till biologiska effekter.³⁷ En central fråga är om kemiska bindningar skulle kunna brytas – för detta krävs energinivåer av storleksordningen en elektronvolt ($1,6 \cdot 10^{-19}$ J). Sammanfattningsvis tyder inte fysikens lagar på att det är möjligt att få icke-termiska effekter av fotoner med frekvenser i området för mobiltelefoner.

³⁵ J. Shapiro, Radiation Protection, A Guide for scientists, regulators, and physicians, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 2002:519.

³⁶ Här bör observeras att en enskild foton inte har en viss temperatur. Istället är det så att en viss temperatur motsvarar en viss fördelning av fotoner med olika energier. Denna fördelning beskrivs av Plancks strålningslag, Wiens förskjutningslag och besläktad fysik.

³⁷ J.E. Moulder, L.S. Erdreich, R.S. Malyapa, J. Merritt, W.E. Pickard and Vijayalaxami, Cell phones and Cancer: What Is the Evidence for a Connection? *Radiation Research*, Vol. 151, 1999:513-531.

7 Krafter i molekylärbiologiska sammanhang

För att sätta perspektiv på de krafter som kan uppstå pga extern EMF-exponering vid låg frekvens (50/60 Hz) kan man jämföra med de krafter som naturen själv arbetar med³⁸. Tabellen nedan illustrerar där samtliga krafter uttryckts i pN (picoNewton) = $1 \cdot 10^{-12}$ N. De biologiska fenomenen nedan gäller alla celler utom specialfallet med en "hårcell" (egentligen ett cilium) i innerörat samt flagellen (svansen) hos bakterier med "simförmåga". För närmare detaljer se Valberg *et al.*, 1997.

EMF-kraft:

Elektriskt fält (1,000 V/m)-kraft på en laddad molekyl (10 laddningar)	$6 \cdot 10^{-11}$
60 Hz, 0,1 mT inducerad kraft på en molekyl i cellmembran	$2 \cdot 10^{-5}$
Kraft på en molekyl i rörelse (10+), beroende på magnetiskt fält (0,1 mT)	$1 \cdot 10^{-7}$

Biologiska sammanhang:

Aktivering av en enstaka hårcell i innerörat	1
Enstaka kinesinmolekyl som arbetar mot ett mikrotubulum	3
Enstaka muskel-myosinmolekyl som drar i ett aktinfilament	4
Nödvändig kraft för att öppna en mekanisk-receptiv, jonkanal i cellmembran	14
DNA-transkription (kraft hos RNA-polymeras)	14
Nödvändig kraft för att sträcka ut en DNA-molekyl	20
Proteinreceptor till molekylär ligand kraft (molekylär igenkänning)	90
DNA sträng-sträng bindningskraft, per vart och ett av komplementärt baspar	70
Kraft utvecklad i flagellär motor (10 nm radie) hos bakterie	100

Slutsatsen av ovanstående tabell är att de krafter som utvecklas i ett elektriskt fält är många storleksordningar lägre än de med vilka basala cellbiologiska funktioner opererar. Alltså förefaller det helt omöjligt att något skulle kunna hända på cellbiologisk nivå då celler exponeras för elektriska fält av den storleksordning som exempelvis gäller under en kraftledning.

³⁸ P.A. Valberg *et al.*, *Radiation Research*, Vol. 148, 1997:11.

8 Energiåtgång i molekylärbiologiska sammanhang

Utöver kraftbetraktelser kan man analysera energinivåer i olika biologiska sammanhang där referensen är en jon med 10 laddningar (underförstått syftar detta troligen på ett protein). Tabellen nedan illustrerar alltså detta perspektiv för kemiska bindningsenergies relativt till ljus, termiska och "EMF-energies".³⁹

<u>Bindningstyp</u>	<u>eV/bindning (eller molekyl)</u>
NN, (trippel kovalent bindning)	9,5
O=O, (dubbel kovalent bindning)	5,1
C-C, (enkel kovalent bindning)	3,6
Fotoner – grönt ljus	2,5
ATP-hydrolys ⁴⁰	0,3
Ligand-till-receptorbindning	0,6
Vätebindning	0,1
Isomerisering av enzym	0,03
EMF-accelererade joner	10^{-8} (10 laddningar, $4 \cdot 10^{-5}$ V/m över 20 mikrometer = 1 cellediameter)

³⁹ P.A. Valberg *et al.*, *Radiation Research*, Vol. 148, 1997:9.

⁴⁰ ATP-hydrolys motsvarar det energipaket (ett eller flera) med vilket de flesta grundläggande biokemiska processer drivs (hydrolys som kemiskt begrepp innebär spjälkning av ATP i AMP och ett difosfat). Exempelvis motsvarar en glukosmolekyl hos däggdjur cirka 36 ATP-molekyler. Energiinnehållet är mycket direkt – exempelvis drar människans hjärna ca 5 gram glukos per timme vilket via ATP-hydrolys motsvarar cirka 25 W.

9 Akuta effekter vs. långsiktiga effekter

För akuta effekter såsom brännskador och effekter på exiterbara vävnader (väsentligen nerver och muskler) vid 100 μT eller mer (och i praktiken oftast låga frekvenser som 50/60 Hz) har internationella organ såsom ICNIRP (Appendix 2) och IEEE föreslagit referensnivåer vilka inte bör överskridas⁴¹. Effekterna relateras till det interna elektriska fältet (V/m) eller strömtäthet (A/m^2). Referensnivåerna bygger alltså på klarlagda verkningar och syftar till att ge ordentlig säkerhetsmarginal mot negativa hälsoeffekter pga för hög lokal eller sammantagen alstring av värme eller för hög strömtäthet.

9.1 Långsiktiga effekter

För långsiktiga effekter (epidemiologiska studier) har uppmärksamheten mest riktats på magnetiska fält under 1 μT vid 50/60 Hz. Ett märkligt förhållande är att det är vid denna relativt låga nivå som det starkaste sambandet hittats med hälsoeffekter och då sammanhanget med kraftledning. Väsentligen gäller detta samband endast barnleukemi och sambandet stöds i det stora hela varken av laboratorieförsök eller av teoretiska överväganden.

ICNIRPs slutsats är för ELF (extremely low fields⁴²) att i avsaknad av stöd från laboratoriestudier, är de epidemiologiska studierna otillräckliga för att tillåta guidelines för exponering. För radiofrekventa fält uttrycker ICNIRP sin ståndpunkt enligt följande: "Svagheter i de epidemiologiska studierna har inte övertygande visat att typiska exponeringsnivåer kan leda till skadliga reproduktionseffekter eller en ökad cancerrisk hos exponerade individer." Världshälsoorganisationen, WHO, pekar också på sambandet mellan barnleukemi och kronisk ELF-exponering men noterar samtidigt att stödet för ett orsaksamband är svagt och en eventuell betydelse för folkhälsan är oklar⁴³. IARC:s klassificering av EMF i cancersammanhanget framgår i all korthet av Appendix 4.

⁴¹ En tidigare rapport från Elforsk (januari 2007, 54 sidor) handlar om gnisturladdningar och kontaktströmmar.

⁴² Här tolkas ELF som frekvensområdet >0 Hz - 100 kHz som följer den definition Världshälsoorganisationen använder men man hittar även andra tolkningar i den vetenskapliga litteraturen.

⁴³ Föredrag av Maria Neira (WHO) vid mötet för International Radiation Protection Association (IRPA) i Buenos Aires, oktober 2008.

10 Frågan om termiska respektive icke-termiska effekter

Termisk verkan kan ge mycket allvarliga skador på människor. Vad är då hög temperatur i sammanhanget? Arbetar man med trädgårdsarbete drivs kroppstemperaturen utan vidare upp någon grad och vi klarar normalt också en förkylning och andra sjukdomar som kan öka på kroppstemperaturen mot 40°C eller mer. Emellertid är 42°C den maximala temperatur människan tål – blir kroppen genomvärd med 42°C dör man. I själva verket börjar skadliga effekter att infinna sig mer ordentligt vid en temperatur på säg 39,5°C. Säkert kan man med medicinsk vård klara 39°C i många månader men det är definitivt en stor belastning för kroppen. Å andra sidan är vi som bekant anpassade för ett liv vid 37°C vilket speglar vår basala ämnesomsättning som i sin tur motsvarar ca 1 W/kg. En person som spelar tennis på lätt nivå kanske driver upp den basala ämnesomsättningen till 2 W/kg under det att en elitidrottare kanske kan nå 16 W/kg.

Ser man till cellulära fenomen och särskilt sammanhang som rör DNA kan man förenklat säga att 10 minuter vid 45°C är en extremt hög dos för det DNA som befinner sig i s k replikationsfas. Övrigt DNA påverkas knappast alls vid 45°C.⁴⁴ Med andra ord är celler som delar sig känsliga för höga temperaturer.

Hur är det då med fallet mobiltelefon och örat? Ytterörat har normalt en temperatur på 34°C. Om man sedan lägger en mobiltelefon (utan batteri) till örat en halvtimme nås jämvikt och ytterörats temperatur når då typiskt ca 37°C, dvs jämvikt med kroppen. Om man nu har att göra med en mobiltelefon med batteri och elektronik kan man känna av värmen från elektroniken ganska direkt – säkert kan det handla om några graders temperaturförhöjning efter säg en halvtimme. Denna värme är inte värme av mikrovågskaraktär utan beror på direktledning. Frågan är då hur mycket av mikrovågseffekt man skulle kunna få i innerörat. Experiment med s k fantommodeller tyder på att man kanske skulle kunna få en temperaturhöjning på storleksordningen 0,1°C i innerörat pga en mikrovågseffekt. Värmen kan knappast stiga särskilt mycket eftersom vår blodcirkulation kontinuerligt bortför överskottsvärme. Det förefaller därför ytterst osannolikt att temperaturen skulle kunna överträffa den som gäller vid en lättare förkylning eller exempelvis lätt kroppsarbete.⁴⁵

⁴⁴ R.S.L. Wong, J. Dynlacht, B. Cedervall, and W.C. Dewey, Analysis of DNA double-strand breaks by pulsed field gel electrophoresis of heated and/or X-irradiated Chinese hamster ovary cells. *International Journal of Radiation Biology* Vol. 68, 1995:141-152.

⁴⁵ För närmare analys hänvisas till 1. G. Schmid *et al.*, High-resolution numerical model of the middle and inner ear for a detailed analysis of radio frequency absorption, *Phys. Med. Biol.*, Vol. 52, 2007:1771-1781, 2. V.M.M. Flyckt *et al.*, Calculation of SAR and temperature rise in a high-resolution vascularised model of the human eye and orbit when exposed to a dipole antenna at 900, 1500 and 1800 MHz, *Phys. Med. Biol.*, Vol. 52, 2007:2691-2701 samt 3. C.M.J. Van Leeu-

De säkerhetsregler (föreskrifter, normer mm) som gäller för elektromagnetiska anordningar har tagit fasta på att det ska finnas rejält tilltagna säkerhetsgränser mot risken för att drabbas av termiska effekter. För närmare detaljer hänvisas till ICNIRP⁴⁶ samt Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM.

Mot bakgrund av att det förefaller omöjligt att erhålla termiska effekter av betydelse från exempelvis mobiltelefoner har fokus istället inriktats på frågan om det istället skulle kunna uppstå icke-termiska effekter på cell- och molekylärnivå. Något sådant har aldrig påvisats och för att det skulle vara fysikaliskt möjligt måste troligen nya lagar upptäckas inom fysiken. Enda tänkbara undantaget – som då inte skulle handla om en direkt interaktion med vävnaden – skulle vara om exempelvis magnetit (se särskilt avsnitt nedan) förekom lokalt och förstärkte energiflödet från mikrovågsstrålning lokalt så att nivån för termiskt brus överskreds med cirka en faktor 10 (dvs nådde 10 kT, k =Boltzmanns konstant, T =grader K) som ungefärligen motsvarar energin för att bryta en vätebindning.

Uppvärmningsmässigt farliga tillämpningar av mikrovågor förekommer inom plastindustrin (27 MHz) och för torretsningsmaskiner (2,45 GHz).

wen *et al.*, Calculation of change in brain temperature due to exposure to a mobile phone, *Phys. Med. Biol.*, Vol. 44, 1999:2367-2379.

⁴⁶ ICNIRP = International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

11 Kan DNA-strängbrott uppstå vid exponering för elektromagnetiska fält med frekvens i storleksordningen 3 GHz?

DNA-skador kan indelas i ett halvduzin huvudkategorier där DNA dubbelsträngbrott tillhör de allvarligaste eftersom de kan förorsaka mutationer, kromosomskador, resultera i celledöd, eller initiera canceruppkomst.

Inga övertygande forskningsdata som handlat om DNA-strängbrott eller kromosomskador förefaller vederligt stöda cancermekanismer – den största invändningen ligger i att fynden inte har kunnat upprepas av andra forskargrupper. De motstridiga fynd som emellertid erhållits skulle kunna ha sin grund i förekomst av ferromagnetiska partiklar (se avsnitt 12 nedan) som förorening i laboratoriemiljön. Om verkligen lågfrekventa magnetfält i direkt bemärkelse (snarare än indirekt via exempelvis magnetit) kunde förorsaka DNA-strängbrott vore det mycket märkligt att vissa forskare kan exponera celler för sådana fält på uppemot 1 mT (50 Hz) utan att erhålla några DNA- eller kromosomskador alls.⁴⁷

För att ge lite perspektiv på naturliga DNA-skador kan nämnas att en normal cell reparerar eller på annat sätt hanterar ca 100 000 DNA-enkelsträngbrott per dygn pga naturliga orsaker. Vissa författare har förväxlat ett mått på DNA-mängd med ett mått på DNA-strängbrott⁴⁸ (detta påpekades exempelvis för forskarparet Lai och Singh redan juni 1996) har det senare visat sig att en extra mängd enkelsträngbrott kan bero på metoden med vilken man avlivat råttorna. Det har i den svenska debatten flaggats ganska mycket för Lais arbeten vilket är anledningen till att detta behöver kommenteras.⁴⁹

⁴⁷ S. Burdak-Rothkamm *et al.*, DNA and chromosomal damage in response to intermittent extremely low-frequency fields, *Mutation Research*, Vol. 672(2), 2009:82-89.

⁴⁸ Om den procentuella DNA-massan betecknas Q , den absoluta mängden DNA-dubbelsträngbrott med L och dosen med D beskrivs dessas samband av $dQ/dD = (\partial Q/\partial L) \cdot (\partial L/\partial D)$. Undertecknad (BC) hade ett flertal kontakter med Dr. Lai år 1995-96 och det blev då klart att han inte förstod denna teoretiska grund bakom den metod han arbetade med - matematiskt handlar det alltså om ett brott mot kedjeregeln för derivator vilket i sin tur resulterar i dimensionsfel (En närmare förklaring ges i Cedervall & Radivoyevitch, *Methods for analysis of DNA fragment distributions on pulsed field gel electrophoretic gels*, *Electrophoresis*, Vol. 17, 1996:1080-1086). Personlig kontakt med Singh samt genomgång av hans arbeten tyder starkt på att kometmetoden mäter DNA-relaxation snarare än DNA-strängbrott. En svensk översikt av kometmetodens tillämpning vid neutralt pH, som är det som är aktuellt i sammanhanget, tyder på att inga forskare i världen kan tolka vad metoden egentligen mäter (Examensarbete av Caroline Atallah, KTH, 2008).

⁴⁹ Aktivitet från Lai och Singhs sida resulterade i larmlöpsedlar i Sverige (Expressen & Aftonbladet, 11 juni, 1996 – ”mobiltelefon kan ge hjärntumör”).

Om man ser till frågeställningen ur teoretisk synpunkt har en foton med frekvensen 1 GHz alldeles för låg energi för att ens kunna bryta DNA-molekylens svagaste bindning – vätebindningen. Enkelsträngbrott (eng. single-strand breaks, SSB) är triviala och en normal däggdjurscell hanterar kanske över 100 000 SSB per dygn. DNA dubbelsträngbrott (DSB) däremot är mer allvarliga och kan i värsta fall ge upphov till mutation, cancer eller celldöd. Emellertid kan DSB indelas i undergrupper beroende på komplexiteten. Mest komplexa DSB uppstår vid exponering för tätjoniserande strålning som alfastrålning eller neutroner.

En tänkvärd sak i sammanhanget är att elektrofores sedan många år rutinmässigt använts för att separera DNA-trådar av olika längd. Trots att de nyttjade elektriska fälten (storleksordningen 10 till 1000 V/m) drar i de helt oskyddade DNA-molekylerna under ett avsevärt friktionsmotstånd så går de inte av. Vid sk pulsfälts gelelektrofores ändras dessutom det elektriska fältets riktning (t ex varje sekund eller varje timme) vilket i sin tur medför ett avsevärt friktion mellan polysackaridfibrer i gelen och DNA-molekylen. Ändå går alltså inte ens långa DNA-trådar på över 10 miljoner baspar av.

Kort sagt är DNA en ganska tålig molekyl – vid drygt 60°C vindar emellertid DNA-dubbel-spiralen upp sig. De DNA-strängbrott som uppträder vid lägre temperaturer (45°C) beror på att proteinkomplex under replikationsfasen kollapsar. Den fasen av cellens delningscykel är ur DNA-synpunkt särskilt känslig eftersom DNA då under kortare perioder är enkelsträngat istället för dubbelsträngat som är den DNA-form som helt dominerar under cellens liv.

12 Problemet med ferromagnetiska material i laboratoriemiljön

Ett särskilt metodproblem som rör den cell- och molekylärbiologiska EMF-forskningen är förekomsten av ferromagnetiska partiklar såsom magnetit i laboratoriemiljön. Forskarna Kobayashi *et al.* (1995) hade funnit att sådana partiklar förekommer på glas- och plastytor (hos t ex provrör och liknande material) samt inte minst i ett av de vanligast förekommande cellodlingssubstraten – det s k RPMI 1640-mediet⁵⁰. Med tanke på kemin i sammanhanget kan man troligen förvänta sig sådan förorening i alla cellodlingsmedier. Dessa partiklar har en diameter av storleksordningen några nanometer och uppåt - som mest kanske någon mikrometer. Magnetit (Fe_3O_4) som det väsentligen handlar om är en utmärkt absorber⁵¹ av mikrovågsstrålning vid frekvenser mellan 0,5 GHz och 10 GHz. Kobayashi och medarbetare visade också att partiklarna begärligt tas upp av mänskliga leukemiceller (s k Jurkatceller som använts av många forskargrupper inom EMF-området). Om man har en sådan förorening inne i cellerna och sedan lägger på ett varierande magnetiskt fält över cellerna så kommer partiklarna att kunna överföra energin på okontrollerat sätt med effekter som beror på var i cellerna de befinner sig.⁵²

Kobayashi och medarbetare påpekade i sitt arbete från 1995 att det i själva verket är mycket svårt att hålla ett laboratorium rent från förorenande ferromagnetiska partiklar. Har man en sådan förorening kan man då analysera lite allt möjligt i cellerna och hitta "samband" som inte har att göra med det man egentligen vill studera – frågan om det finns någon naturlig antennfunktion i en biologisk cell.

Dessvärre finns det anledning att tro att en stor del av de publicerade cell- och molekylärbiologiska inriktade EMF-arbetena är belastade av detta problem. Särskilt märkligt är att fyndet av ferromagnetiska partiklar oftast inte ens omnämns i de artiklar som publicerats efter år 1995 och där problemet kan ha högst relevans och helt dominera över de möjliga fenomen man avser att studera. Kanske är förekomsten av ferromagnetiska material i laboratoriemiljön en huvudorsak till att många "fynd" inte kunnat upprepas av oberoende forskargrupper.

⁵⁰ A.K. Kobayashi, J.L. Kirschvink and M.H. Nesson, Ferromagnetism and EMFs, *Nature*, Vol. 374, 1995:123. Se även R. Adair, Effects of ELF Magnetite Fields on Biological Magnetite, *Bioelectromagnetics*, Vol. 14, 1993:1-4.

⁵¹ Absorptionsprocessen kallas ferromagnetisk resonans – för vidare studier se precession av Bohrmagnetoner.

⁵² Undertecknad tog 1996 kontakt med doktorer/professorer i Stockholm inom ämnena oorganisk kemi, fysikalisk kemi samt analytisk kemi och ställde frågan om de ansåg att man skulle kunna förutsäga något om storleken hos magnetitpartiklar som kan uppkomma i laboratoriemiljö. Svaret blev ett klart nej. Detta är tillräckligt för att man har anledning att ifrågasätta värdet av en stor del av alla de laboratorieexperiment som genomförts och publicerats och där man menar sig ha inducerat olika slags biokemiska och molekylärbiologiska fenomen.

Generellt kan sägas att Gibcos cellodlingsmedium är en förfärande källa till kontamination med ferromagnetiska partiklar.⁵³ Om man i laboratorieförsök inte kan kontrollera mängden och karaktären (storleksfördelningen) för förorenande ferromagnetiska partiklar bör man över huvud taget inte genomföra experimenten eftersom resultaten inte kommer att kunna tolkas. Inte heller kan man förvänta sig att oberoende forskargrupper kan erhålla samma resultat eftersom en mängd svårkontrollerbara fysikaliska faktorer aldrig är jämförbara laboratorier emellan. Som exempel kan här nämnas temperaturskillnader, närhet till magnetiska apparater som centrifuger, vattenbad, hissar mm, ljusstillgång (ett laboratorium kanske har fönster på solsidan – nästa laboratorium har fönster på skuggsidan). Dessa fysikaliska faktorer kan i olika grad driva bildning av exempelvis Fe_3O_4 (magnetit) oavsett om och hur alla medier steriliserats – det handlar alltså då om fysikalisk kemi – inte biologi. Dessa kemiska effekter kan sedan i sin tur helt förstöra en i andra avseenden förträfflig laboratoriemiljö.⁵⁴

⁵³ J. Kirschvink, personlig kommunikation, 1998.

⁵⁴ För djupare studier av ferromagnetiska partiklar och vad de skulle kunna förorsaka hänvisas till analyser av redan nämnda Kirschvink och Kobayashi samt R. Adair inklusive indirekta referenser i dessas arbeten.

13 Magnetoreception och magnetiska fälteffekter hos djur och människor⁵⁵

Magnetit har varit känd i djurriket sedan tidigt 1960-tal och under de senaste decennierna har en mängd fynd gjorts som belyser olika organismers förmåga att reagera på det jordmagnetiska fältet. Dessa fynd inkluderar magnetotaktisk (av gr. *taxis* = rörelse) respons hos bakterier och andra mikroorganismer, magnetiska effekter på orienteringsförmågan hos vissa migrerande djurarter samt magnetiskt påverkade nervsignaler hos vissa fåglar och fiskar. Magnetiska kompass-effekter har återfunnits hos alla fem klasserna av ryggradsdjur (fiskar, amfibier, reptiler, ett flertal fåglar samt däggdjur). I många av dessa fall förefaller magnetit (Fe_3O_4) stå för "antennen" men sammantaget handlar det om ytterligare minst elva mineral som bygger på järn och syre samt i ett fall järn och svavel. Dessa mineral har inbördes olika typer av magnetiska egenskaper och några av mineralerna kan öka interaktionen med ett omgivande statiskt magnetiskt fält en miljon gånger jämfört med övrig kroppsvävnad. Även vissa insekter har visats kunna känna av magnetiska fält - bananflugor och honungsbin är två exempel där särskilt biet visat sig kunna känna av magnetfältsnivåer nedåt. Känsligheten för magnetiska fält har visats kunna antingen handla om fältets riktning eller fältets storlek.

Huruvida människor kan känna av magnetiska fält förefaller vara en av de mest kontroversiella frågorna inom EMF-området. Människokroppen producerar magnetit men det har inte visats att människor skulle kunna känna av magnetiska fält. Hos epileptiker har under experimentella förhållanden epilepsiliknande aktivitet (neurologisk aktivitet i hjärnan) kunnat framkallas då huvudet exponerats för statiska fält på 1-2 mT (Dobson *et al.*, 1993 & 1995). En undre gräns för denna iakttagelse låg omkring 0,9 mT. Ett konstigt förhållande är att inga sådana effekter kunnat hittas vid de kraftiga magnetfält som används vid s k MRI-teknik (magnetic resonance imaging) där fältstyrkorna ligger på uppemot 2 T (tesla). Bakgrunden till de här iakttagelserna har man hittills inte kunnat förstå.

Kvantitativa respektive kvalitativa skillnader mellan ferromagnetiska material i människa och i andra organismer är ett ganska okänt område som borde utforskas i större utsträckning. Detta kan dock vara svårt i fallet människa eftersom ett biologiskt prov som hanteras i laboratoriemiljö utsätts för fysikalisk-kemiska faktorer (t ex exponering för luftens syre) som i sin tur kan skapa tolkningsproblem.

⁵⁵ Detta avsnitt bygger på en uppsats av A. Kobayashi och J Kirschvink (kapitel 21 i *Electromagnetic Fields – Biological Interactions and Mechanisms*, M. Blank Ed., *Advances in Chemistry*, Series 250, Washington D.C., 1995.

Appendix 1. Fotoner

En foton beskrivs väsentligen av sin frekvens. Sambandet kan skrivas som

$$E = h \cdot \nu \quad (\text{A1})$$

där h är Plancks konstant ($6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$) och ν frekvensen. Genom att h är en konstant är energiinnehållet i en foton egentligen samma sak som frekvensen – h är endast en (enhets)omvandlare som gör att man kan betrakta energiinnehållet med två olika enheter beroende på vad som är mest begripligt och meningsfullt i sammanhanget ifråga.

Ljusets hastighet i vacuum, c (som är en konstant $= 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), ger sambandet mellan våglängd, λ (grekiska bokstaven lambda) och frekvensen ν enligt följande:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (\text{A2})$$

Ur sambanden (A1) och (A2) ovan gäller för energin uttryckt i elektronvolt (eV):

$$E \text{ (eV)} = 1240 / \lambda \text{ (nm)}.$$

där $1 \text{ eV} = 1,6021917 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Energin är alltså omvänt proportionell mot våglängden och direkt proportionell mot frekvensen.

Appendix 2. Exponeringsgränser såsom de föreslås av ICNIRP

ICNIRP använder begreppen "basic restrictions" som bygger på faktiska biologiska effekter och referensnivåer som relaterar till externt uppmätta data. ICNIRP skiljer vidare på "basic limits" och referensnivåer och där en extra säkerhetsnivå lagts på jämfört med "basic limits" samt rekommenderar också olika nivåer för yrkesarbetare respektive allmänheten. Dessa rekommendationer för 50 Hz är såsom följer⁵⁶:

Basic limits	
Yrkesarbetare	10 mA/m ²
Allmänheten	2 mA/m ²
Referensnivåer för ett elektriskt fält	
Yrkesarbetare	10 kV/m
Allmänheten	5 kV/m
Referensnivåer för magnetisk flödestäthet	
Yrkesarbetare	500 µT
Allmänheten	100 µT

För radiofrekventa fält använder istället ICNIRP effekt per kilo som mått och motsvarande basic limits är för yrkesarbetare 0,4 W/kg och för allmänheten 0,08 W/kg. För mer detaljerad information hänvisas till ICNIRP (<http://www.icnirp.de/>).

För *statiska* magnetiska fält rekommenderar ICNIRP⁵⁷ följande gränsvärden:

Exponeringskaraktäristik	Magnetisk flödestäthet
Yrkesmässig ⁵⁸	
Exponering av huvud och bål	2 T
Exponering av armar och ben ⁵⁹	8 T
Allmänheten	
Exponering av hela eller delar av kroppen ⁶⁰	400 mT

⁵⁶ Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, Vol. 74(4), 1998: 474-522.

⁵⁷ Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields, *Health Physics*, Vol. 96(4), 2009:504-514.

⁵⁸ För specifika tillämpningar anses att exponering upp till 8 T kan motiveras, förutsatt att omgivningen kontrolleras och att man har kontroll över rörelseinducerade effekter.

⁵⁹ Information om effekter bortom 8 T anses otillräcklig.

⁶⁰ Potentiella risker finns för personer med tekniska anordningar (t ex pacemakers) eller implanterade inopererade i kroppen. *I vissa fall kan detta föranleda avsevärt lägre restriktionsnivåer som kan handla om nedåt 0,1 mT eller lägre.*

Appendix 3. Laser

För sammanhangets skull kan några ord sägas om laser som står för Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Ofta talar man om "laserljus" men som framgår står bokstaven "R" i laser för "radiation" (strålning). I praktiken handlar laser väsentligen om infrarött ljus, synligt ljus och i vissa specialfall om ultraviolett ljus.

Laser karakteriseras av att "ljuset" är:

- Monokromatiskt (en färg)
- Koherent
- Parallellt (till skillnad från exempelvis "ficklampsljus" som sprids i sidled trots att man kanske kan tycka att det är riktat)

Vidare är laser lätt att fokusera och kan användas för att ge mycket korta pulser. Det är viktigt att förstå att en laser med låg effekt kan ge stor skada (exempelvis på ögats näthinna). Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om lasrar, SSM FS 2008:14, hittas på www.ssm.se.

Appendix 4. IARCs klassificering

IARC klassificerar olika agens efter huruvida de bedöms vara cancerframkallande eller inte.

För elektriska och magnetiska fält har IARC i kortversion kommit fram till följande:

Statiska magnetiska fält: Klass⁶¹ 3, Otillräckligt underlag för att man ska kunna göra en bedömning om eventuell cancerrisk för människa.

Varierande lågfrekventa magnetiska fält: Klass 2B: Möjligen cancerframkallande hos människa.

Varierande elektriska fält: Klass 3, Otillräckligt underlag för att man ska kunna göra en bedömning om eventuell cancerrisk för människa.

Radiofrekventa fält: Den IARC-information som veterligen finns tillgänglig går tillbaka till år 1998 och pekar på Klass 3 men förmodligen avvaktar IARC både den s k Interphonestudien och ställningstaganden från ICNIRP.

Kommentar: Klass 1 utgörs av ämnen där IARC dragit slutsatsen att de är cancerframkallande. Klass 4 motsvaras av de ämnen man bedömt som "troligen inte cancerframkallande".

För närmare information rörande kriterier bakom IARCs klassificering av EMF i det lågfrekventa området hänvisas till

<http://www.iarc.fr/> .

[Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency \(ELF\) Electric and Magnetic Fields. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 80 \(2002\)](#)

⁶¹ Anm. IARC använder ordet "Group" men man hör nog oftare ordet "klass" i svenskt språkbruk.