

Elektrobiologisk Selskab

- www.elektrobiologi.dk -

Forskningsorientering #3 - Elektrobiologisk Selskab 2017

Genotoksiske virkninger ved højfrekvente elektromagnetiske felter

Kim Horsevad

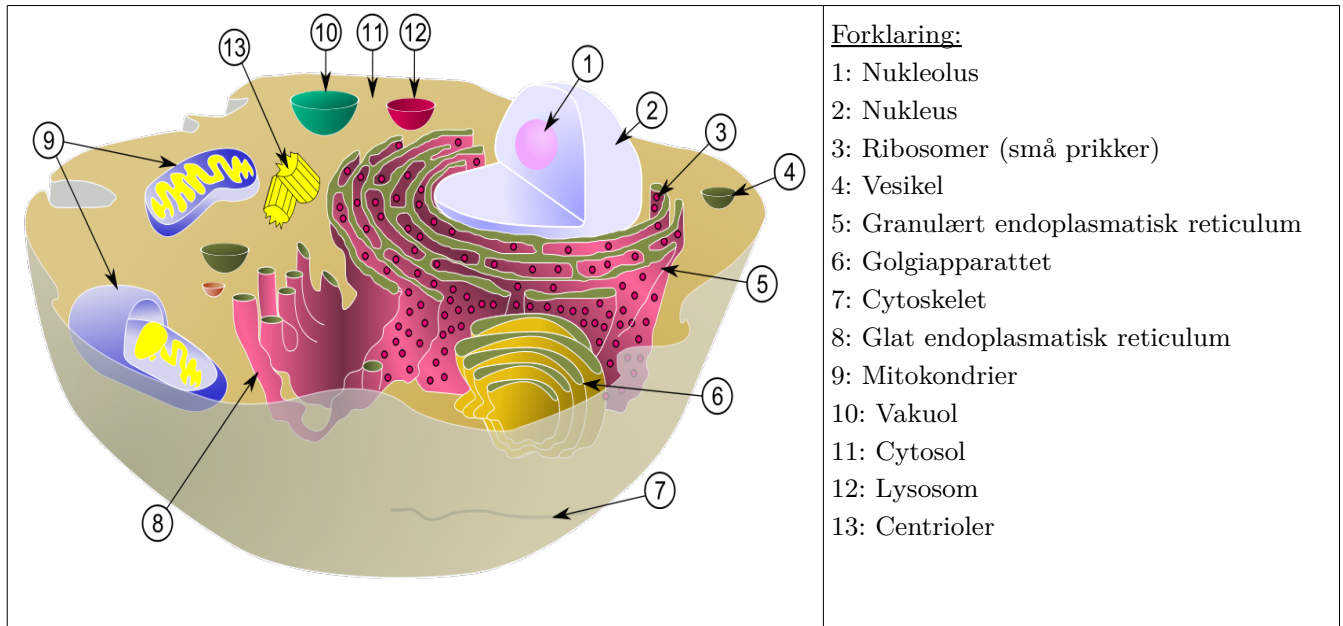
2017

Indhold:

Celler, gener og DNA.....	3
Genotoksiske virkninger ved mikrobølger:.....	5
Modulationsspecifikke genotoksiske virkninger.....	15
Celletype-specifikke virkninger.....	20
Referencer.....	22

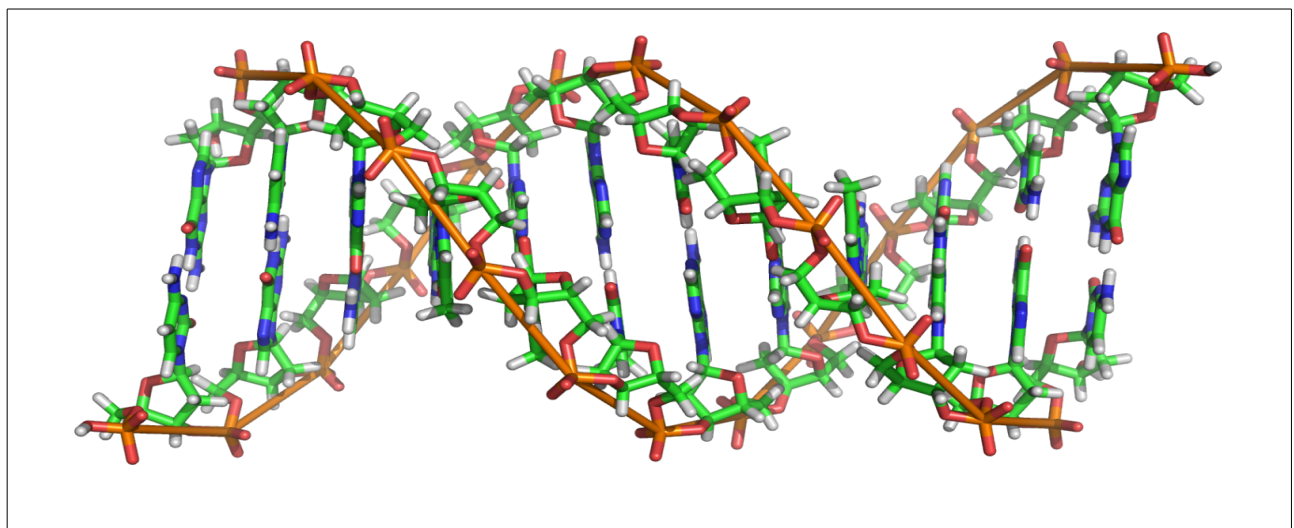
Celler, gener og DNA

Mennesket er opbygget af celler. I alt regner man med, at et normalt voksent menneske indeholder 100 millioner millioner celler (Lodish, Harvey, et al. 2007).



Skematisk oversigt over en eukaryot dyrecelle. Illustration: Wikimedia Commons, GNU

Kroppens celler specialiserer sig, således at nogle celler bliver nerveceller, nogle hudceller, nogle muskelceller, osv; men alle celler indeholder i princippet hele "opskriften" på det pågældende menneske. "Opskriften" ligger lagret i DNA (arvemassen), som beskyttes i cellens kerne. Hver enkelt celle indeholder en fuld kopi af pågældende menneskes DNA.



Skematisk oversigt over et udsnit af en DNA-streng. Illustration: Wikimedia Commons, GNU

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved høffrekvente elektromagnetiske felter. Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

DNA indeholder koder ("opskrifter") for alle de stoffer, cellen skal producere, hvilket samtidigt er årsagen til, at integriteten af DNA er uhyre vigtigt for cellen. Cellen kan - i et vist omfang - reparere skader, der opstår på DNA, men bliver skaderne for massive resulterer det i, at pågældende celle går til grunde - eller endnu værre: bliver til en kræftcelle.

I forhold til påvirkning fra elektromagnetiske felter findes der således en forskningsinteresse i at afklare, hvorvidt mikrobølgerne kan beskadige DNA - altså hvorvidt mikrobølgerne er genotoksiske - idet en sådan beskadigelse vil kunne medføre alvorlige helbredsskadelige virkninger.

Genotoksiske virkninger ved mikrobølger:

Genotoksitet betyder ordret, at noget er giftigt for generne. Giftvirkningen kan eksempelvis være, at DNA-molekylet bliver slået i stykker.

En af måderne, hvorpå forskerne kan måle beskadigelse af DNA, er ved en undersøgelsesmetode kaldet "comet assay", hvor man kan måle, hvor stor vandring der er mellem de negativt ladede DNA-molekyler og den positive anode i et elektrisk felt. Det fremkomne billede ligner en komet med hale - deraf navnet. Mængden af DNA-beskadigelse kan herefter kvantificeres via "halens" længde og udstrækning.

Allerede i 1995 kunne forskere påvise enkeltstrengede DNA-brud i celler fra rottehjerner efter eksponering for pulseret mikrobølgestråling ved 2450MHz ved SAR=0,6-1,2W/kg i to timer (Lai H, Singh NP., 1995). Året efter blev eksperimentet gentaget, hvor der kunne påvises både enkeltstrengede og dobbeltstrengede DNA-brud i celler fra rottehjerner efter eksponering for 2450MHz mikrobølgestråling (både pulserende og bærebølge) ved SAR=1,2 W/kg (Lai, Henry. 1996)

I et efterfølgende eksperiment (Lai H, Singh NP., 1997) replikeres resultaterne; men eksperimentet udvides samtidigt til at undersøge en eventuel beskyttende effekt af forskellige antioxidanter (melatonin og N-tert-butyl-alpha-phenylnitron, PBN). Idet der registreres en beskyttende effekt som følge af disse antioxidanter, konkluderes det samtidigt, at DNA-beskadigelsen skyldes produktion af frie iltradikaler ved eksponering for mikrobølgestråling:

Since cumulated DNA strand breaks in brain cells can lead to neurodegenerative diseases and cancer and an excess of free radicals in cells has been suggested to be the cause of various human diseases, data from this study could have important implications for the health effects of RFR exposure.

--- Lai H, Singh NP., 1997, p446

Samtidigt undersøgte DNA-beskadigelse efter eksponering for magnetfelter i ELF-området, hvilke forårsagede DNA-brud i celler fra rottehjerner på samme måde som mikrobølgestrålingen (Lai H, Singh NP. 1997a). DNA-beskadigelsen som følge af eksponering for ELF-magnetfelter kan tilsvarende blokeres ved antioxidanter (Lai H, Singh NP. 1997b), hvilket indikerer, at den grundlæggende påvirkningsmekanisme har fællestræk uafhængigt af frekvensområde

Et nyere resultat indikerer på samme måde, at jernforbindelser kan være involveret i produktionen af frie iltradikaler ved eksponering for RF-EMF, derved at jernbindende forbindelser blokerer DNA-beskadigelsen

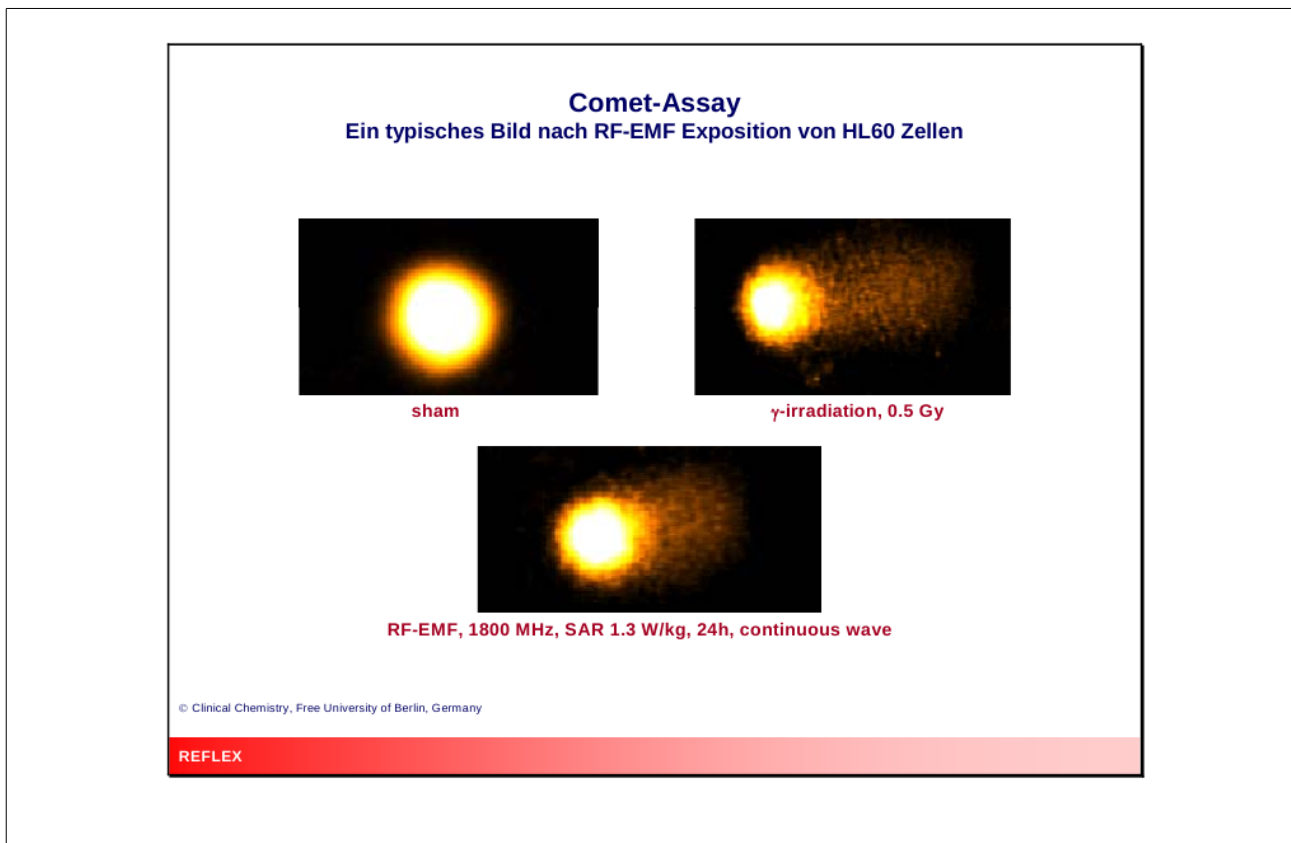
Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved højfrekvente elektromagnetiske felter.
Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

We hypothesize that exposure to a 60-Hz magnetic field initiates an iron-mediated process (e.g., the Fenton reaction) that increases free radical formation in brain cells, leading to DNA strand breaks and cell death. This hypothesis could have an important implication for the possible health effects associated with exposure to extremely low-frequency magnetic fields in the public and occupational environments.

--- Lai H, Singh NP. 2004, p687

Et af de grafisk mest slående eksempler på mikrobølgestrålingens genotoksiske effekt blev publiceret af Frans Adlkofer i forbindelse med REFLEX-rapporten :



Genotoxiske effekter af mikrobølgestråling, Adlkofer, 2004, 2009, p3

Øverst til venstre findes en celle, som ikke er blevet udsat for stråling. Øverst til højre findes en celle, som er blevet udsat for radioaktiv bestråling – svarende ca til 1600 gange røntgenfotografering. Nederst i midten findes en celle, der er blevet udsat for mobilstråling i 24 timer svarende til en SAR-værdi på 1,3 W/kg (almindelig mobiltelefon).

”Tågen” omkring de to bestrålede celler består af fragmenter fra DNA-molekyler, der er slået i stykker af bestrålingen. Det bemærkelsesværdige er således, at den genotoksiske effekt af mobilstrålingen er på niveau med den genotoksiske effekt af den radioaktive

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. *Genotoksiske virkninger ved høffrekvente elektromagnetiske felter. Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.*

bestråling.

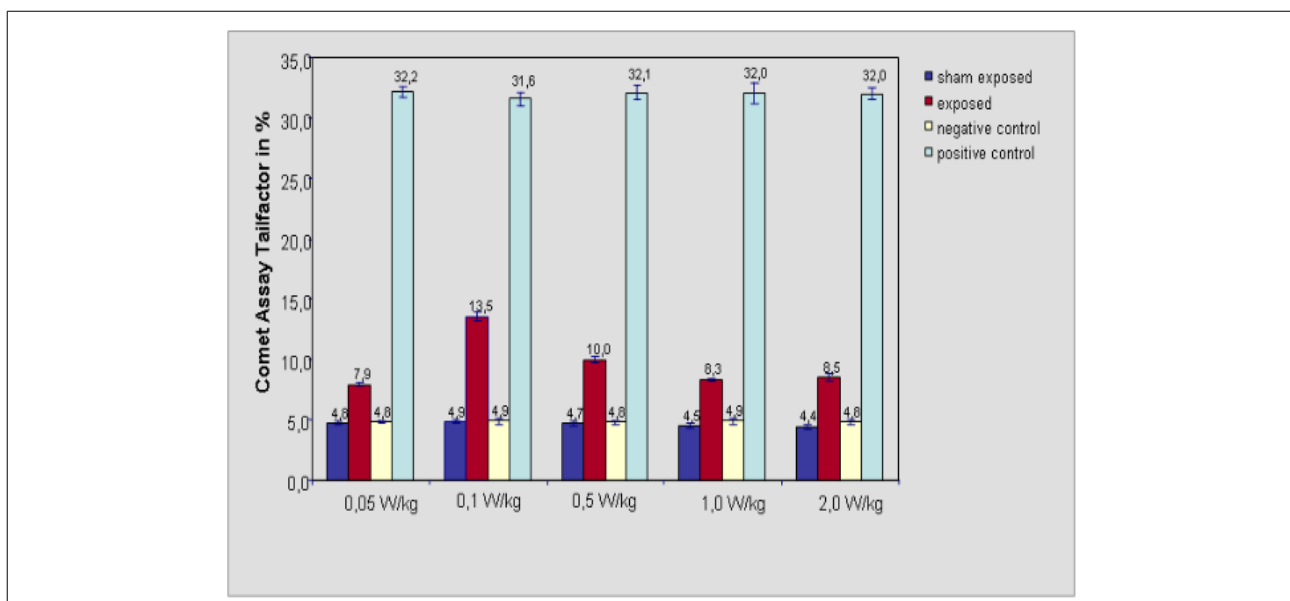
Undersøgelsen er lavet under ledelse af den tyske professor Frans Adlkofer, som efter publiceringen af disse data blev udsat for en lang række forskellige angreb fra modstandere af de pågældende resultater. Blandt andet forsøgte modstandere - anført af Alexander Lerchl - at anklage ham (og en ung laboratorieassistent ved navn Elisabeth Kratochvil) for akademisk uredelighed i forbindelse med rapporten. Nærmere undersøgelser har ikke kunnet påvise nogen tegn på uredelighed; men først for nylig er der blevet sat endelig punktum for sagen, idet Elisabeth Kratochvil sagsøgte Alexander Lerchl for injurier og falsk anklage. Dommen faldt d. 13. marts 2015 og var en utvetydig sejr for Elisabeth Kratochvil.

Adlkofer beskrev senere, på en forelæsning på Harvard University, de injurierende anklager som et resultat af en udstrakt korruption i forbindelse med forskning i mobilstråling:

“The practices of institutional corruption in the area of wireless communication are of enormous concern, if one considers the still uncertain outcome of the ongoing field study with five billion participants. Based on the unjustified trivializing reports distributed by the mass media by order and on account of the wireless communication industry, the general public cannot understand that its future wellbeing and health may be at stake. The people even distrust those scientists who warn.

--- Adlkofer 2011

Mængden af DNA-beskadigelse blev også undersøgt i Reflex-eksperimenterne:



Sammenhængen mellem eksponering og mængden af DNA-beskadigelse (Brud på DNA-streng) ved UMTS (3G) mobilstråling. De hvide og lyseblå søjler repræsenterer kontroleksperimenterne (som gerne skal ligge

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved højfrekvente elektromagnetiske felter. Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

på samme niveau gennem alle eksperimenterne. Virkningen af mikrobølgestrålingen fra mobiltelefonen aflæses ved forskellen mellem de blå (som repræsenterer ikke-eksponerede) og de røde (som repræsenterer eksponerede) søjler. Adlkofer, 2009, p5

De genotoksiske effekter er altså synlige allerede ved en SAR-værdi på 0,05W/kg. De fleste kommercielt tilgængelige mobiltelefoners SAR-værdier ligger mellem 1,2 og 1,6 W/kg.

Data viser også, at den genotoksiske effekt er højere ved 0,1 W/kg end ved 2,0 W/kg. Dette forhold kan observeres i mange eksperimenter og skyldes formentlig, at de højere eksponeringsniveauer bedre kan igangsætte cellens forsvarsmekanismer, hvorved en del af skadevirkningerne afværges.

De mange eksperimenter i REFLEX-studiet viste tydelige genotoksiske effekter i niveauer, der burde være genstand for lovgivningsmæssig interesse i forhold til betydelig nedsættelse af grænseværdier. Adlkofer beskriver selv konklusionen således:

LF-EMF and RF-EMF far below the safety limits alter the structure and function of genes in different animal and human cells. In more detail we saw an

- *Increase of single and double DNA strand breaks in human fibroblasts, HL60 cells and granulosa cells of rats, but not in human lymphocytes*
- *An increase of micronuclei and chromosomal aberrations in human fibroblasts*
- *Alterations in gene and protein expression of several cell types, especially in human fibroblasts, human endothelial cells and embryonic stem cells from mice*

(...)

Thus, no doubt is justified anymore, that ELF-EMF, GSM and UMTS signals exert a genotoxic effect on human cells under in vitro conditions.

--- (Adlkofer, 2009, p8)

Imidlertid blev REFLEX-eksperimenterne udsat for kritik, derved at mobilindustrien ikke fandt det påvist, at de genotoksiske skader, som påvist i cellekulturer i laboratorieforsøg, (*in vitro*) også forekommer i levende organismer (*in vivo*).

Andre eksperimenter har dog senere godtgjort, at de observerede genotoksiske effekter i fuld grad kan påvises i levende organismer. Et af de mest interessante resultater er fra Indien, hvor et forskerteam i 2013 påviste genotoksiske effekter ved mikrobølgestråling (*in vivo*) ved særdeles lave SAR-værdier (mellem 0,0005835 W/kg og 0,0006672 W/kg).

Results: In the present study, we demonstrated DNA damaging effects of low level microwave radiation in brain. Conclusion: We concluded that low SAR microwave radiation exposure at these frequencies may induce DNA strand breaks in brain tissue.

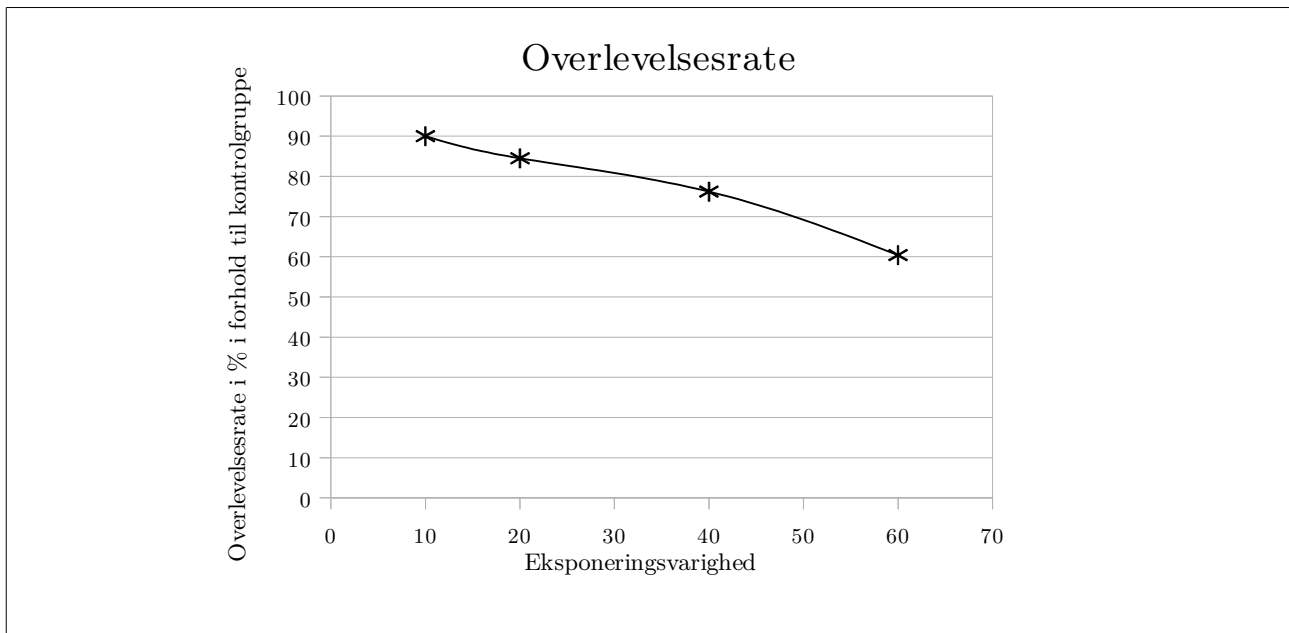
---Deshmukh, et al., 2013

Samtidigt kompliceres udforskningen af genotoksiske virkninger af, at niveauet af genotoksitet kan modificeres af cellens tilpasning til ændrede forhold (adaptive response), samt at denne forsvarsmekanismes effektivitet tilsyneladende er afhængigt af cellens mitotiske status (Zeni et al., 2012).

Den genotoksiske virkning kan med den moderne forsknings teknologi direkte iagttages på kromosomerne, hvor forskere allerede i 1993 (Garaj-Vrhovac, V., & Fucic, A., 1993) demonstrerede tydelige kromosomforandringer hos personer, der arbejdede med pulseret mikrobølgestråling i forbindelse med reparation af radaranlæg. På trods af den voldsomme og meget tydelige beskadigelse påvist af forskerne er det i øvrigt stadig væsentligt at bemærke, at selv så drastisk beskadigelse sker ved indirekte påvirkning - forventelig hovedsageligt via frie radikaler - idet den enkelte fotons energi i mikrobølgestrålingen ikke er tilstrækkelig til at bryde bindinger mellem atomer.

Den pulserende radarstråling er sammenlignelig med de pulserende signaler fra moderne mikrobølgebaserede kommunikationsmidler, og selv om intensiteten ikke blev specifikt målt i ovenstående eksempel, har senere forskning (Garaj-Vrhovac, 1999, 2009, Garaj-Vrhovac V, Gajski G, Pažanin S, Sarolić A, Domijan AM, Flajs D, Peraica M., 2010) påvist lignende genotoksiske virkninger ved intensiteter adskillige størrelsesordener under de nuværende grænseværdier.

Andre resultater er endnu mere dramatiske. En forskergruppe (Garaj-Vrhovac V, Horvat D, Koren Z., 1991) eksponerede celler fra hamstere (*Cricetulus griseus*) for mikrobølgestråling og optalte derefter, hvor mange celler, der døde på grund af eksponeringen. Forsøgsopstillingen var konstrueret isothermisk, således at den forudvalgte temperatur opretholdes, for derved at sikre, at man kun måler de non-termiske effekter:



Overlevelsesrate for celler fra hamstere efter mikrobølgeeksponering i non-termiske intensiteter. Skematisk overblik på grundlag af data fra: Garaj-Vrhovac V, Horvat D, Koren Z., 1991

Eksponeringen i ovenstående eksempel var på 5 W/m^2 ved 7.7 GHz, og overlevelsesraten blev opgjort på grundlag af reproduktionskapaciteten af cellekolonier på et eksponeret substrat. ICNIRPS anbefalede grænseværdi ligger på 10 W/m^2 , hvilket samtidigt vil sige, at der i den observerede cellekultur efter en eksponering på *halvdelen af grænseværdien* kan iagttages 10% celledød allerede efter 10 minutters eksponering. Efter 60 minutters eksponering er næsten 40% af cellerne døde.

Resultaterne er skræmmende,;men man bør være opmærksom på, at skadevirkningerne her er demonstreret under laboratorieforsøg - resultaterne betyder ikke, at et menneske, der udsættes for mikrobølgestråler, mister næsten halvdelen af sine celler efter 60 minutters eksponering; men de meget dramatiske resultater påviser dog med særdeles stor tydelighed en betydelig skadevirkning, som de nuværende grænseværdier ikke tager højde for. DNA-beskadigelse er tæt forbundet med udvikling af kræftceller - selv en lille risiko kan derfor have betydelig og livsomvæltende betydning for et stort antal mennesker.

Mobiltelefoner sender med variabel sendestyrke, men under visse omstændigheder kommer eksponeringen ganske tæt på grænseværdierne:

Hvis der er dårlige sende/modtageforhold for mobiltelefoner, kan strålingseksponeringen komme op et niveau, der ligger lige under de anbefalinger, som ICNIRP giver for befolkningen som helhed. I gennemsnit, og ved normale forhold, er eksponeringen dog betydeligt lavere.

---Arbejdstilsynet, At-vejledning D.6.1.1.

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved høffrekvente elektromagnetiske felter. Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

Som vist ovenfor kan der opstå betydelige DNA-skader allerede ved eksponeringsniveauer langt under grænseværdierne. Både mobiltelefoner og andre trådløse enheder - som DECT og WiFi bruger pulserede mikrobølgestråler, så skadevirkningerne genfindes ved mange eksponeringskilder.

I et eksperiment fra 2012 undersøgte en forskergruppe (Atasoy HI, Gunal MY, Atasoy P, Elgun S, Bugdayci G. 2012) virkningerne af mikrobølgestrålingen fra kommercielt tilgængelige trådløse (WiFi) accespoints på rotter. Rotterne blev eksponeret i 24 timer pr dag over 20 uger. Der kunne efterfølgende observeres signifikant ($p < 0.05$) stigning i markører (8-oxo-dG) for DNA-skader og ændringer, der antydede enzympåvirkning. På baggrund deraf advarer forskerne om skadevirkningerne:

These findings raise questions about the safety of radiofrequency exposure from Wi-Fi Internet access devices for growing organisms of reproductive age, with a potential effect on both fertility and the integrity of germ cells.

--- Atasoy, et al., 2012, p223

Virkningerne er ikke begrænsede til rotter. I 2012 udførtes et eksperiment (Avendaño C, Mata A, Sanchez Sarmiento CA, Doncel GF. 2012), hvor virkningen på menneskelig sperm blev undersøgt, idet spermen blev udsat for mikrobølgestrålingen fra en WiFi-forbundet computer i 4 timer. Der kunne iagttages nedsat bevægelighed og øget DNA-fragmentering for den del af spermen, der blev udsat for mikrobølgestrålingen:

To our knowledge, this is the first study to evaluate the direct impact of laptop use on human spermatozoa. Ex vivo exposure of human spermatozoa to a wireless internet-connected laptop decreased motility and induced DNA fragmentation by a nonthermal effect. We speculate that keeping a laptop connected wirelessly to the internet on the lap near the testes may result in decreased male fertility. Further in vitro and in vivo studies are needed to prove this contention.

--- Avendaño C, et al., 2012, p39

DNA-beskadigelse kan også påvises i celler fra knoglemarven hos eksponerede rotter (Atlı Şekeroğlu Z, Akar A, Sekeroğlu V., 2013). Strålingskilden var 900MHz (mobiltelefoni). Eksponeringsmønstret var 2 timer pr dag i 45 dage ved SAR= 0.38-0.78 W/kg. Der kunne efterfølgende måles betydelige skadevirkninger på både celledeling, cellulære strukturer og kromosomer, men effekten var mere udtalt hos rotteunger end hos fuldvoksne rotter:

The exposure of RF-EMF leads to cytotoxic and genotoxic damage in immature and mature rats. More sensitive studies are required to elucidate the possible carcinogenic risk of EMF exposure in humans, especially children.

--- *Ath Şekeroğlu Z, Akar A, Sekeroğlu V., 2013, p985*

I et andet eksperiment (Paulraj R, Behari J., 2006) blev virkningen af mikrobølgestråling på rottehjerne i udviklingsstadiet undersøgt. Eksponeringsmønsteret var 2,45GHz og 16,5GHz mikrobølgestråling ved SAR=1,0-2,01 W/kg i 35 dage. DNA-beskadigelsen kunne efterfølgende kvantificeres via "comet assay"-teknikken, hvorved der påvist en særdeles signifikant ($p < 0.001$) forøget forekomst af DNA-beskadigelse blandt de eksponerede rotter.

DNA-beskadigelsen kan iagttages hos mennesker umiddelbart efter eksponering. Første gang, det blev undersøgt, var i 2005, hvor en indisk forsker (Gandhi G, 2005) undersøgte sammenhængen mellem eksponering for mikrobølgestråler i non-termiske intensiteter og DNA-beskadigelse. Der registreredes signifikant DNA-beskadigelse hos brugere af mobiltelefoner i forhold til sammenlignelige personer uden mobiltelefonforbrug. Gennemsnitligt var 39,75% af de undersøgte celler hos personerne med daglig benyttelse af mobiltelefoner beskadigede. Resultaterne kunne replikeres og udvides i et senere eksperiment (Gandhi G, Singh P. 2005), hvor der kunne påvises både genetoksiske og cytotoxiske egenskaber ved mikrobølgestrålingen fra mobiltelefoner hos daglige brugere af mobiltelefoni.

There is a potential for a very large worldwide public health impact in the wake of the results of this study and calls for interim public health protective measures.

--- *Gandhi, G., 2005, p103*

I et senere eksperiment fra 2012 (Cam ST, Seyhan N., 2012) undersøgte et forskerhold DNA-beskadigelse i celler fra hårrødderne hos mennesker, der anvendte mobiltelefoni. Der blev indsamlet hårprøver før og inden eksponeringen. Eksponeringsvarigheden var 15 og 30 minutter, og eksponeringskilden var en 900MHz GSM mobiltelefon. Allerede efter 15 minutters eksponering kunne der iagttages signifikant ($p < 0,05$) forhøjet niveau af DNA-beskadigelse. Mængden af DNA-beskadigelse øgedes med eksponeringsvarigheden:

A short-term exposure (15 and 30 minutes) to RFR (900-MHz) from a mobile phone caused a significant increase in DNA single-strand breaks in human hair root cells located around the ear which is used for the phone calls.

--- *Cam ST, Seyhan N. 2012, p420*

DNA-beskadigelse ved eksponering for mikrobølgestråling i de intensiteter, der forekommer ved normal benyttelse af mobiltelefoner, er således påvist i flere forskellige celletyper. Faktisk er DNA-beskadigelse som følge af eksponering for mikrobølgestråling fra kommunikationsteknologi i dag tilstrækkeligt dokumenteret, til at flere forskerhold allerede er igang med at undersøge, hvorvidt de DNA-beskadigende virkninger kan

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved højfrekvente elektromagnetiske felter.
Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

mindskes med kendte stoffer. Et af disse eksperimenter er fra 2009, hvor man undersøgte eventuelle beskyttende virkninger ved honningbiens gift i forhold til DNA-beskadigelse som følge af mikrobølgestråling i nontermiske intensiteter (Gajski G, Garaj-Vrhovac V., 2009). Forskerne kunne registrere DNA-beskadigelse i lymfocytter fra de anvendte rotter allerede ved SAR= 0,6 W/kg, men små mængder af honningbiens gift havde en beskyttende virkning i forhold til de oxidative skader, som medførte DNA-beskadigelsen.

Et andet af sådanne eksperimenter er fra 2011, hvor et forskerhold (Esmekaya MA, Aytakin E, Ozgur E, Güler G, Ergun MA, Omeroglu S, Seyhan N., 2011) undersøgte den DNA-beskadigende virkning af 1,8GHz GSM og samtidigt evaluerede eventuelle gavnlige effekter af ekstrakter fra Ginkgo biloba i forhold til denne DNA-beskadigelse.

Der blev anvendt hvide blodlegemer til eksperimentet, og disse blev eksponeret i 6, 8, 24 og 48 timer. Efter eksponeringen kunne der iagttages omfattende beskadigelse af organelstrukturer, DNA og mitokondrier i de bestrålede celler. For de længst eksponerede celler kunne endvidere iagttages membranbeskadigelser og nedbrydning af celledlimen. Det viste sig samtidigt, at et specifikt udtræk (EGb 761) fra Ginkgo biloba havde en vis forebyggende effekt på skadevirkningerne:

The results of our study showed that RF radiation affects cell morphology, increases SCE and inhibits cell proliferation. However, EGb 761 has a protective role against RF induced mutagenity. We concluded that RF radiation induces chromosomal damage in hPBLs but this damage may be reduced by EGb 761 pre-treatment.

--- Esmekaya, et al., 2011, p59

Muligvis kan overlejring af et stokastisk elektromagnetisk felt til mikrobølgestrålingen mindske skadevirkningerne (Wu W, Yao K, Wang KJ, Lu DQ, He JL, Xu LH, Sun WJ., 2008; Yao K, Wu W, Wang K, Ni S, Ye P, Yu Y, Ye J, Sun L., 2008)

Et forskerhold fra Kina (Liu C, Gao P, Xu SC, Wang Y, Chen CH, He MD, Yu ZP, Zhang L, Zhou Z. 2013) kunne ligeledes påvise, at melatonin har en beskyttende effekt i forhold til DNA-beskadigelse observeret i sædceller fra mus efter eksponering for mikrobølgestråling fra en mobiltelefon:

The levels of DNA damage were significantly increased following exposure to MPR [Mobile Phone Radiation] in the listen, dialed and dialing modes. Moreover, there were significantly higher increases in the dialed and dialing modes than in the listen mode. Interestingly, these results were consistent with the radiation intensities of these modes. However, the DNA damage effects of MPR in the dialing mode were efficiently attenuated by melatonin pretreatment.

--- Liu, et al., 2013, p993

Forskerne foreslår videre, at deres resultat kan have farmakologiske perspektiver, i den betydning at man vil kunne udvikle medicin, der kan modvirke DNA-beskadigelsen som følge af eksponering for mikrobølgestråling fra trådløst kommunikationsudstyr. Fra et etisk perspektiv forekommer det dog særdeles problematisk, at samfundet udsætter borgerne for en så høj grad af DNA-beskadigende mikrobølgestråling, at man fra forskningsmæssig side finder det relevant at beskæftige sig med udvikling af farmakologiske løsninger til at modvirke skadeeffekterne.

Skadevirkningerne på DNA kan også påvises hos andre dyrearter. I et eksperiment fra 2012 eksponeredes celler fra kalvebrissel for mobillignende mikrobølgestråling (940MHz ved SAR=40mW/kg). Det påvises (Hekmat A, Saboury AA, Moosavi-Movahedi AA. 2013), at mikrobølgestrålingen beskadiger DNA-strukturen bemærkelsesværdigt, samt at der forekommer irreversible ændringer i DNA-molekylernes størrelse og overfladeladning. Resultaterne understreger, at der forekommer væsentlige og vidtrækkende DNA-beskadigelse ved eksponering for mikrobølgestråling langt under nuværende grænseværdier.

Collectively, our results reveal that 940MHz can alter the structure of DNA. The displacement of electrons in DNA by EMFs may lead to conformational changes of DNA and DNA disaggregation. Results from this study could have an important implication on the health effects of RF-EMFs exposure.

--- Hekmat A, et al., 2013, p35

Nogle få minutters daglig eksponering for 900MHz GSM eller 1800MHz DCS i de 6 første dage af bananfluers voksne liv er ligeledes tilstrækkeligt til at måle DNA-fragmentering (Panagopoulos DJ, Chavdoula ED, Nezis IP, Margaritis LH. 2007). Der kunne endvidere måles forøget celledød, mindsket æglægning og skadevirkninger i alle stadier af ægdannelsen. Eksperimentet replikerede i øvrigt tidligere forskning med lignende resultater (Panagopoulos, D.J., Messini, N., Karabarounis, A., Philippetis, A.L., Margaritis, L.H., 2000; Panagopoulos, D.J., Karabarounis, A., Margaritis, L.H., 2004)

Det er bemærkelsesværdigt, at en stor del af de påviste skadevirkninger forekommer i forbindelse med reproduktion eller udvikling af organismen. Dette forhold genfindes i mange andre eksperimenter, eksempelvis et rotteforsøg fra 2012 (Sekeroğlu V, Akar A, Sekeroğlu ZA. 2012), hvor både fuldt udvoksede og endnu ikke udvoksede rotter eksponeredes for 1800MHz mobillignende mikrobølgestråling ved SAR=0,37-0,49W/kg i to timer om dagen i 45 dage. Der kunne påvises cellebeskadigelse (kromosomfejl, celledelingsfejl og formidsket celledeling) både ved udvoksede og endnu ikke udvoksede rotter, men effekten var størst hos de endnu ikke udvoksede:

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved højfrekvente elektromagnetiske felter. Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

The cytogenotoxic damage was more remarkable in immature rats and, the recovery period did not improve this damage in immature rats. Because much higher and irreversible cytogenotoxic damage was observed in immature rats than in mature rats, further studies are needed to understand effects of EMF on DNA damage and DNA repair, and to determine safe limits for environment and human, especially for children.

--- Sekeroğlu V, Akar A, Sekeroğlu ZA. 2012, p 140

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved høffrekvente elektromagnetiske felter.
Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

Modulationsspecifikke genotoksiske virkninger

Visse modulationsformer i RF-EMF giver anledning til større biologiske skadevirkninger end andre modulationsformer. Tilsvarende er det samtidigt påvist, at visse celletyper er mere modtagelige for påvirkningen end andre. Fra et samfundsmæssigt perspektiv er det af uhyre stor betydning, at man etablerer en stærk forskningsmæssig indsats, der kan klarlægge de forskellige sammenhænge og reaktionsformer, idet en sådan viden ikke blot vil resultere i mere hensigtsmæssige grænseværdier for mikrobølgeeksponering generelt, men forventeligt også vil afføde yderligere forståelse for RF-EMF mulige potentiale i terapeutisk henseende. I mange andre sammenhænge har fuld udforskning af et givet bioreaktivt stof efterfølgende givet anledning til, at pågældende substans kan anvendes i positiv henseende i terapeutisk øjemed - man må således forvente, at tilvejebringelse af en mere fuldstændig forståelse af interaktionen mellem RF-EMF og biologiske systemer på det cellulære og kvanteelektrodynamiske niveau vil have et uafdækket potentiale i både strålingshygiejnisk/profylaktisk henseende og i terapeutisk øjemed.

Den pulserende egenskab ved mikrobølgestrålingen fra moderne trådløs kommunikationsteknologi er forventeligt baggrunden for hovedparten af de bioreaktive egenskaber.

Oscillation is also a universal phenomenon, and biological systems of the heart, brain and gut are dependent on the cooperative actions of cells that function according to principles of non-linear, coupled biological oscillations for their synchrony. They are dependent on exquisitely timed cues from the environment at vanishingly small levels.

Altered 'informational content' of environmental cues can swamp natural electromagnetic cues and result in dysregulation of normal biological rhythms that direct growth, development, metabolism and repair mechanisms.

Pulsed electromagnetic fields (PEMF) and radiofrequency radiation (RFR) can have the devastating biological effects of disrupting homeostasis and desynchronizing normal biological rhythms that maintain health.

Non-linear, weak field biological oscillations govern body electrophysiology, organize cell and tissue functions and maintain organ systems. Artificial bioelectrical interference can give false information (disruptive signaling) sufficient to affect critical pacemaker cells (of the heart, gut and brain) and desynchronize functions of these important cells that orchestrate function and maintain health

--- Sage C., 2015 (epub - doi: 10.1515/reveh-2015-0007)

Mikrobølgestråling med pulserende (50Hz) amplitude-moduleret bølgeform forårsager DNA-fragmentering i rotters hjerneceller allerede efter 20 minutters eksponering ved feltintensitet på 10 V/m (Campisi et al., 2010). Bemærk i denne henseende, at

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved højfrekvente elektromagnetiske felter. Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

grænseværdien i DK er 61 V/m.

The irradiation conditions allowed the exclusion of any possible thermal effect. Our data demonstrate, for the first time, that even acute exposure to low intensity EMF induces ROS production and DNA fragmentation in astrocytes in primary cultures, which also represent the principal target of modulated EMF.

---Campisi et al., 2010, p 52

Tilsvarende resultater findes hos et andet forskerhold (Franzellitti et al., 2010), der undersøgte virkningen af mikrobølgestråling på celler fra moderkagen. Cellerne blev eksponeret for tre typer af 1,8GHz mikrobølgestråling i 4, 16 og 24 timer, nemlig GSM (pulseret med 217Hz), intermitterent GSM(5 minutter tændt, 10 minutter slukket) og umoduleret bærebølge. Der kunne efterfølgende iagttages DNA-beskadigelse hos de celler, der blev eksponeret for GSM-mikrobølgestrålingen, mens den rene bærebølge (af samme intensitet) ikke forårsagede skader:

The amplitude-modulated signals GSM-217 Hz and GSM-Talk induced a significant increase in comet parameters in trophoblast cells after 16 and 24h of exposure, while the un-modulated CW was ineffective.

--- Franzellitti et al., 2010, p35

Den bioreaktive virkning af pulseret mikrobølgestråling kan også måles i immunforsvarsceller i regnorme, hvor pulseringen forstærker mikrobølgestrålingens potentiale for DNA-beskadigelse:

All exposure treatments induced significant genotoxic effect in earthworms coelomocytes detected by the Comet assay, demonstrating DNA damaging capacity of 900MHz electromagnetic radiation. Field modulation additionally increased the genotoxic effect.

--- Tkalec et al., 2013, p7

En relateret virkning kan måles i nerveceller fra rotter (Zhang et al., 2008) i et eksperiment, hvor cellerne kontinuerligt og intermitterent blev eksponeret for 1,8GHz i 6 og 24 timer ved SAR = 2 W/kg. Bioreaktiviteten af mikrobølgebestrålingen kunne aflæses i genekspressionen, hvor der ud af 1200 undersøgte gener blev iagttaget opregulering af 24 gener og nedregulering af 10 andre gener:

The changes of many genes transcription were involved in the effect of 1.8 GHz RF EMF on rat neurons; Downregulation of Egr-1 and up-regulation of Mbp, Plp indicated the negative effects of RF EMF on neurons; The effect of RF intermittent exposure on gene expression was more obvious than that of continuous exposure; The effect of 24 h RF exposure (both intermittent and continuous) on gene expression was more obvious than that of 6 h (both intermittent and continuous).

--- Zhang et al., 2008, p449

Ændringer af genekspressionen er dog i andre eksperimenter registreret ved langt lavere eksponeringsværdiger, eksempelvis er der påvist (Nittby H, Widegren B, Krogh M, Grafström G, Berlin H, Rehn G, Eberhardt JL, Malmgren L, Persson BRR, Salford L. 2008) ændringer i genekspression i hjerneceller fra rotter efter eksponering for 1800MHz GSM i 6 timer ved SAR=13mW/kg

Et andet interessant resultat er fra 2009, hvor et forskerhold (López-Martín E, Bregains J, Relova-Quinteiro JL, Cadarso-Suárez C, Jorge-Barreiro FJ, Ares Pena FJ., 2009) påviste, at GSM-lignende mikrobølgestråling og umoduleret mikrobølgestråling (i samme intensitet) bevirker forskellige ændringer i genekspressionen i hjerneceller hos rotter:

These results suggest a specific effect of the pulse modulation of GSM radiation on brain activity of a picrotoxin-induced seizure-proneness rat model and indicate that this mobile-phone-type radiation might induce regional changes in previous preexcitability conditions of neuronal activation.

--- López-Martín et al., 2009, p1484

Samtidigt er der forskel i pulseringsstrukturen på de forskellige typer af mobilteknologier, hvorfor visse typer af mobilsignaler kan påvirke anderledes end andre. Eksempelvis udførte et forskerhold (Belyaev IY, Markovà E, Hillert L, Malmgren LO, Persson BR., 2009) i 2009 et eksperiment for at klarlægge genotoksiske effekter fra GSM og UTMS (3G-mobiltelefoni). Eksperimentet blev foretaget på grundlag af lymfocytter fra raske personer og fra personer med hypersensitivitet overfor elektromagnetiske felter. Resultaterne viste, at både GSM og UTMS forårsager varige skader på cellens evne til at reparere dobbeltsidige brud på DNA-strengen hos både raske personer og hypersensitive personer, mens mikrobølgestrålingens effekt på en specifik reparationsmekanisme var forskellig mellem raske og hypersensitive personer.

Here, we report for the first time that UMTS MWs affect chromatin and inhibit formation of DNA double-strand breaks co-localizing 53BP1/gamma-H2AX DNA repair foci in human lymphocytes from hypersensitive and healthy persons and confirm that effects of GSM MWs depend on carrier frequency.

Remarkably, the effects of MWs on 53BP1/gamma-H2AX foci persisted up to 72 h following exposure of cells, even longer than the stress response following heat shock.

The data are in line with the hypothesis that the type of signal, UMTS MWs, may have higher biological efficiency and possibly larger health risk effects compared to GSM radiation emissions.

--- Belyaev, et al., 2009, p129

De forskellige signalstrukturer i en GSM-transmission har også forskellig virkning i forhold til genotoksiske og genekspressionsmæssige virkninger. Et nyere eksperiment (Valbonesi P, Franzellitti S, Bersani F, Contin A, Fabbri E., 2014) påviste, at GSM-signal moduleret med 217Hz (normal samtale) ændrer genekspressionen for HSP70, mens

andre segmenter af GSM-signalet (lytte) og umodulerede mikrobølger i samme frekvens ikke forårsager samme virkninger:

The positive effect on HSP70 mRNA expression, observed only in cells exposed to the GSM-217Hz signal, is a repeatable response previously reported in human trophoblast cells and now confirmed in PC12 cells. Further investigations towards a possible role of 1.8 GHz signal modulation are therefore advisable.

--- Valbonesi, et al, 2014, p382

Andre eksperimenter har fokuseret på, hvorvidt mængden af DNA-beskadigelse afhænger af, om eksponeringen er kontinuerlig eller intermitterent. Et resultat fra 2010 påviser DNA-beskadigelse ved 6 minutters daglig kontinuerlig eksponering - og ved forskellige intermittens-mønstre med samme daglige varighed.

Intermittent exposures with 10-min intervals between exposure sessions proved to be almost equally effective as continuous exposure of the same total duration, whereas longer intervals between the exposures seemed to allow the organism the time required to recover and partly overcome the above-mentioned effects of the GSM exposure.

--- Chavdoula ED, Panagopoulos DJ, Margaritis LH. 2010, p51

Resultatet af et eksperiment fra 2011 antyder endvidere, at modulation/bølgeform har langt større indflydelse på mængden af skadevirkninger end frekvens og eksponeringstid (Giorgi G, Marcantonio P, Bersani F, Gavocci E, Del Re B. 2011). Eksperimentet var baseret på eksponering af bakterier for lavfrekvente magnetfelter, og her kunne iagttages, at frekvens (20, 50, 75 Hz) og eksponeringstid (15min, 90min) ikke havde afgørende effekt på DNA transposition - den afgørende effekt var derimod, om bølgeformen var sinusoidal eller pulseret. Resultatet støttes af et lidt ældre eksperiment (d'Ambrosio G, Massa R, Scarfi MR, Zeni O. 2002), hvor der kunne påvises signifikant DNA-beskadigelse ved fase-moduleret (GMSK, Gaussian minimum shift keying), men ikke ved TDMA (time domain multiple access) modulering.

Forskningen indenfor området kompliceres dog yderligere, idet eksponeringsforhold ved egentlig benyttelse af mikrobølgebaserede kommunikationsmidler og simulerede eksponeringer ved laboratorieforsøg er væsensforskellige:

Real mobile phone emissions are constantly and unpredictably varying and thus are very different from simulated emissions which employ fixed parameters and no variability. This variability is an important parameter that makes real emissions more bioactive. Living organisms seem to have decreased defense against environmental stressors of high variability. While experimental studies employing simulated EMF-emissions present a strong inconsistency among their results with less than 50% of them reporting effects, studies employing real mobile phone exposures demonstrate an almost 100% consistency in showing adverse effects. This consistency is in agreement with studies showing association with brain tumors, symptoms of unwellness, and declines in animal populations.

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved højfrekvente elektromagnetiske felter.
Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

--- *Panagopoulos, Johansson, Carlo, 2015, (Epub før udgivelse, Article ID 607053)*

Der er samtidigt eksperimenter (Kim J, Yoon Y, Yun S, Park GS, Lee HJ, Song K., 2012), der indikerer, at mængden af DNA-skader er styret af de mønstre, der forekommer i DNA-molekylet, når det udsættes for Lorentz-kræfter og Foucault-strømme som følge af det eksterne elektromagnetiske felt (60 Hz magnetfelt ved 7 mT i 10-60 min).

I eksperimentet observeredes ingen produktion af frie radikaler, hvilket understreger, at de registrerede dobbeltsidige DNA-brud i dette eksperiment skyldes direkte interaktioner med magnetfeltet styret af Lorentz-kræfter og Foucault-strømme.

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved høffrekvente elektromagnetiske felter. Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

Celletype-specifikke virkninger

Forskellige typer af celler reagerer forskelligt på eksponering for radiofrekvent elektromagnetisk stråling - eksempelvis kan der for visse celletyper (EA.hy926) registreres signifikante ændringer i proteinekspressionen ved eksponering for 900MHz GSM, men ikke ved eksponering for 1800MHz GSM (Nylund, R., Kuster, N., Leszczynski, D., 2010). Samtidigt påviste et andet eksperiment, at cellens metabolske niveau er afgørende for bioreaktiviteten for en given eksponering (Gerner C, Haudek V, Schandl U, Bayer E, Gundacker N, Hutter HP, Mosgoeller W. 2010).

Der udførtes i 2006 et banebrydende eksperiment (Nylund R, Leszczynski D., 2006) angående celletype-specifikke reaktioner, hvor to forskellige cellekulturer blev eksponeret for GSM-mikrobølgestråling (SAR=2,8W/kg) og efterfølgende undersøgt i forhold til genekspression og proteinekspression.

Mikrobølgestrålerne ændrede genekspressionen og proteinekspressionen; men det væsentlige i eksperimentet var, at disse ændringer var forskellige afhængig af celletypen - og formentlig også afhængige af cellens proteinsammensætning

På cellulært niveau kan der i øvrigt optræde en form for tilpasning til forekomsten af en given gift eller uhensigtsmæssig påvirkning. Denne tilpasning benævnes AR - (adaptive response) og er iagttaget i forbindelse med mikrobølgestråling og DNA-beskadigelse (Jiang B, Nie J, Zhou Z, Zhang J, Tong J, Cao Y. 2012). Ved fortsat eksponering iværksættes forskellige forsvarsmekanismer, således at en efterfølgende eksponering for samme dosis ikke vil afstedkomme samme virkning som indledningsvis registreret.

Et senere eksperiment (Zhao R, Zhang S, Xu Z, Ju L, Lu D, Yao G. 2007) viste tilsvarende, at nerveceller er mere modtagelige for påvirkning fra mikrobølger end astrocytter (en slags "hjælpeceller" i centralnervesystemet)

Et andet resultat fra 2008 påviste, at eksponering for mikrobølger fra 3G (UMTS) mobiltelefoni ved 1950MHz ved SAR \leq 2W/kg forårsager større skade på celler fra bindevæv end på hvide blodlegemer (Schwarz C, Kratochvil E, Pilger A, Kuster N, Adlkofer F, Rüdiger HW., 2008)

Et nyere resultat viser tilsvarende genotoksiske virkninger af 1800MHz GSM ved SAR=3 W/kg for celler fra menneskeligt bindevæv og celler fra hamsterlunger, men ikke ved flere andre typer celler (Xu S, Chen G, Chen C, Sun C, Zhang D, Murbach M, Kuster N, Zeng Q, Xu Z. 2013)

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved høffrekvente elektromagnetiske felter. Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

Forskellige celle-typer reagerer således forskelligt på samme eksponering. Ud over at dette forhold selvfølgelig understreger dybden af den kompleksitet, der findes i forhold til interaktionsmuligheder mellem elektromagnetisk stråling og biologiske systemer, giver resultatet formentlig samtidig indblik i, hvorfor der eksperimentelt kan være stor uenighed mellem forskellige laboratorier og forskere om specifikke virkninger af RF-EMF på biologiske systemer.

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved høffrekvente elektromagnetiske felter. Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

Referencer

- Adlkofer, Franz. 2004. Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards From Low Frequency Electromagnetic Field Exposure Using Sensitive in vitro Methods. (REFLEX) European Union: Quality of Life and Management of Living Resources
- Adlkofer, Franz. 2009. Presentation at the International EMF Conference, Starvanger, Norway, Nov 17 2009.
- Adlkofer, Franz. 2011. Forelæsning på Harvard. URL: http://www.law.harvard.edu/news/2011/11/18_safracenter-cellphone-radiation-corruption.html
- Arbejdstilsynet. 2002. At-vejledning D.6.1.1. URL: <https://arbejdstilsynet.dk/da/regler/at-vejledninger-mv/arbejdets-udforelse/d-6-1-1-ikke-ioniserende-straling.aspx>
- Atasoy HI, Gunal MY, Atasoy P, Elgun S, Bugdayci G. 2012. Immunohistopathologic demonstration of deleterious effects on growing rat testes of radiofrequency waves emitted from conventional Wi-Fi devices. *J Pediatr Urol.* 2013 Apr;9(2):223-9
- Atlı Şekeroğlu Z, Akar A, Sekeroğlu V. Evaluation of the cytogenotoxic damage in immature and mature rats exposed to 900 MHz radio frequency electromagnetic fields. *Int J Radiat Biol.* 89(11):985-992, 2013.
- Avendaño C, Mata A, Sanchez Sarmiento CA, Doncel GF. 2012. Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *FertilSteril* 97:39-45, 2012.
- Belyaev IY, Markovà E, Hillert L, Malmgren LO, Persson BR. 2009. Microwaves from UMTS/GSM mobile phones induce long-lasting inhibition of 53BP1/gamma-H2AX DNA repair foci in human lymphocytes. *Bioelectromagnetics* 30:129-41, 2009.
- Campisi A, Gulino M, Acquaviva R, Bellia P, Raciti G, Grasso R, Musumeci F, Vanella A, Triglia A. 2010. Reactive oxygen species levels and DNA fragmentation on astrocytes in primary culture after acute exposure to low intensity microwave electromagnetic field. *Neurosci Lett* 473:52-55.
- Chavdoula ED, Panagopoulos DJ, Margaritis LH. 2010. Comparison of biological effects between continuous and intermittent exposure to GSM-900-MHz mobile phone radiation: detection of apoptotic cell-death features. *Mutat Res* 700:51-61, 2010.
- Deshmukh PS, Megha K, Banerjee BD, Ahmed RS, Chandna S, Abegaonkar MP, Tripathi AK. 2013. Detection of low level microwave radiation induced deoxyribonucleic acid damage vis-à-vis genotoxicity in brain of fischer rats. *Toxicol Int* 2013;20:19-24
- Esmekaya MA, Aytakin E, Ozgur E, Güler G, Ergun MA, Omeroğlu S, Seyhan N. 2011. Mutagenic and morphologic impacts of 1.8GHz radiofrequency radiation on human peripheral blood lymphocytes (hPBLs) and possible protective role of pre-treatment with Ginkgo biloba (EGb 761). *Sci Total Environ.* 410-411:59-64, 2011.
- Franzellitti S, Valbonesi P, Ciancaglini N, Biondi C, Contin A, Bersani F, Fabbri E. 2010. Transient DNA

- damage induced by high-frequency electromagnetic fields (GSM 1.8 GHz) in the human trophoblast HTR-8/SVneo cell line evaluated with the alkaline comet assay. *Mutat Res* 683(1-2):35-42,
- Gajski G, Garaj-Vrhovac V. 2009. Radioprotective effects of honeybee venom (*Apis mellifera*) against 915-MHz microwave radiation-induced DNA damage in wistar rat lymphocytes: in vitro study. *Int J Toxicol* 28:88-98, 2009.
- Gandhi G, Anita, 2005. Genetic damage in mobile phone users: some preliminary findings. *Ind J Hum Genet* 11:99-104, 2005.
- Gandhi G, Singh P. 2005. Cytogenetic damage in mobile phone users: preliminary data. *Int J Hum Genet* 5:259-265, 2005.
- Garaj-Vrhovac V, Gajski G, Pažanin S, Sarolić A, Domijan AM, Flažs D, Peraica M. 2011. Assessment of cytogenetic damage and oxidative stress in personnel occupationally exposed to the pulsed microwave radiation of marine radar equipment. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Jan 2011;214(1):59-65
- Garaj-Vrhovac V, Horvat D, Koren Z. 1991. The relationship between colony-forming ability, chromosome aberrations and incidence of micronuclei in V79 Chinese hamster cells exposed to microwave radiation. *Mutation Research*, July 1991, 263(3):143-9.
- Garaj-Vrhovac V. 1999. Micronucleus assay and lymphocyte mitotic activity in risk assessment of occupational exposure to microwave radiation. *Chemosphere*, Dec 1999;39(13):2301-12.
- Garaj-Vrhovac, V., and Fucic, A., 1993: "The rate of elimination of chromosomal aberrations after accidental exposure to microwave radiation". *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 30:319-325.
- Garaj-Vrhovac, Vera .2009. Assessment of DNA sensitivity in peripheral blood leukocytes after occupational exposure to microwave radiation: the alkaline comet assay and chromatid breakage assay. *Cell Biology and Toxicology*, February 2009, Volume 25, Issue 1, pp 33-43
- Gerner C, Haudek V, Schandl U, Bayer E, Gundacker N, Hutter HP, Mosgoeller W. 2010. Increased protein synthesis by cells exposed to a 1,800-MHz radio-frequency mobile phone electromagnetic field, detected by proteome profiling. *Int Arch Occup Environ Health*. 2010 Aug;83(6):691-702.
- Giorgi G, Marcantonio P, Bersani F, Gavoçi E, Del Re B. 2011. Effect of extremely low frequency magnetic field exposure on DNA transposition in relation to frequency, wave shape and exposure time. *Int J Radiat Biol*. 87(6):601-608, 2011.
- Hekmat A, Saboury AA, Moosavi-Movahedi AA. 2013. The toxic effects of mobile phone radiofrequency (940MHz) on the structure of calf thymus DNA. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2013 Feb;88:35-41.
- Jiang B, Nie J, Zhou Z, Zhang J, Tong J, Cao Y. 2012. Adaptive response in mice exposed to 900 MHz radiofrequency fields: primary DNA damage. *PLoS One*. 7(2):e32040, 2012.
- Kim J, Yoon Y, Yun S, Park GS, Lee HJ, Song K. 2012. Time-varying magnetic fields of 60 Hz at 7 mT induce DNA double-strand breaks and activate DNA damage checkpoints without apoptosis. *Bioelectromagnetics*.

33(5):383-393, 2012.

Lai H, Singh NP. 1997. Melatonin and a spin-trap compound block radiofrequency electromagnetic radiation-induced DNA strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics*. 1997;18(6):446-54.

Lai H, Singh NP. 1997a. Acute exposure to a 60 Hz magnetic field increases DNA strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics*. 1997;18(2):156-65.

Lai H, Singh NP. 1997b. Melatonin and N-tert-butyl-alpha-phenylnitron block 60-Hz magnetic field-induced DNA single and double strand breaks in rat brain cells. *J Pineal Res*. 1997 Apr;22(3):152-62.

Lai H, Singh NP. 2004. Magnetic-field-induced DNA strand breaks in brain cells of the rat. *Environ Health Perspect*. 2004 May;112(6):687-94.

Lai H, Singh NP., 1995. Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics*. 1995;16(3):207-10.

Lai, Henry. 1996. Single-and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int J Radiat Biol*. 1996 Apr;69(4):513-21.

Liu C, Gao P, Xu SC, Wang Y, Chen CH, He MD, Yu ZP, Zhang L, Zhou Z. 2013. Mobile phone radiation induces mode-dependent DNA damage in a mouse spermatocyte-derived cell line: a protective role of melatonin. *Int J Radiat Biol*. 2013 Nov;89(11):993-1001

Lodish, Harvey, et al. 2007. *Molecular Cell Biology*. W.H.Freeman and Company.

López-Martín E, Bregains J, Relova-Quinteiro JL, Cadarso-Suárez C, Jorge-Barreiro FJ, Ares Pena FJ. 2009. The action of pulse-modulated GSM radiation increases regional changes in brain activity and c-Fos expression in cortical and subcortical areas in a rat model of picrotoxin-induced seizure proneness. *J Neurosci Res*. 87(6):1484-1499, 2009.

Nittby H, Widegren B, Krogh M, Grafström G, Berlin H, Rehn G, Eberhardt JL, Malmgren L, Persson BRR, Salford L. 2008. Exposure to radiation from global system for mobile communications at 1,800 MHz significantly changes gene expression in rat hippocampus and cortex. *Environmentalist* 28(4), 458-465, 2008.

Nylund R, Leszczynski D. 2006. Mobile phone radiation causes changes in gene and protein expression in human endothelial cell lines and the response seems to be genome- and proteome-dependent. *Proteomics* 6:4769-4780, 2006.

Nylund, R., Kuster, N., Leszczynski, D., 2010. Analysis of proteome response to the mobile phone radiation in two types of human primary endothelial cells. *Proteome Science*, 2010, 8:52

Panagopoulos DJ, Chavdoula ED, Nezis IP, Margaritis LH. 2007. Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobile telephony radiation. *Mutat Res* 626:69-78, 2007.

Panagopoulos, D.J., Karabarbounis, A., Margaritis, L.H., 2004. Effect of GSM 900-MHz mobile phone radiation on the reproductive capacity of *D. melanogaster*, *Electromagn. Biol Med* 23 (2004) 29-43.

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. *Genotoksiske virkninger ved høffrekvente elektromagnetiske felter*.
Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.

Panagopoulos, D.J., Messini, N., Karabarbounis, A., Philippetis, A.L., Margaritis, L.H., 2000. Radio frequency electromagnetic radiation within "safety levels" alters the physiological function of insects, in: P. Kostarakis, P. Stavroulakis (Eds.), Proceedings of the Millennium International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Heraklion, Crete, Greece, October 17-20, 2000, pp. 169-175, ISBN: 960-86733-0-5;

Paulraj R, Behari J. 2006. Single strand DNA breaks in rat brain cells exposed to microwave radiation. *Mutat Res* 596:76-80, 2006.

Sage C., 2015. The implications of non-linear biological oscillations on human electrophysiology for electrohypersensitivity (EHS) and multiple chemical sensitivity (MCS). *Rev Environ Health*. 2015 Sep 12. doi: 10.1515/reveh-2015-0007. [Epub ahead of print]

Sekeroğlu V, Akar A, Sekeroğlu ZA. 2012. Cytotoxic and genotoxic effects of high-frequency electromagnetic fields (GSM 1800 MHz) on immature and mature rats. *Ecotoxicol Environ Saf*. 80:140-144, 2012.

Tkalec M, Stambuk A, Srut M, Malarić K, Klobučar GI. Oxidative and genotoxic effects of 900MHz electromagnetic fields in the earthworm *Eisenia fetida*. *Ecotoxicol Environ Saf*. 90:7-12, 2013.

Valbonesi P, Franzellitti S, Bersani F, Contin A, Fabbri E. 2014. Effects of the exposure to intermittent 1.8 GHz radio frequency electromagnetic fields on HSP70 expression and MAPK signaling pathways in PC12 cells. *Int J Radiat Biol*. 2014 May;90(5):382-91

Wu W, Yao K, Wang KJ, Lu DQ, He JL, Xu LH, Sun WJ. 2008. [Blocking 1800 MHz mobile phone radiation-induced reactive oxygen species production and DNA damage in lens epithelial cells by noise magnetic fields.] *Zhejiang Da XueXueBao Yi Xue Ban* 37:34-38, 2008.

Xu S, Chen G, Chen C, Sun C, Zhang D, Murbach M, Kuster N, Zeng Q, Xu Z. 2013. Cell Type-Dependent Induction of DNA Damage by 1800 MHz Radiofrequency Electromagnetic Fields Does Not Result in Significant Cellular Dysfunctions. *PLoS One*. 8(1):e54906, 2013.

Yao K, Wu W, Wang K, Ni S, Ye P, Yu Y, Ye J, Sun L. 2008. Electromagnetic noise inhibits radiofrequency radiation-induced DNA damage and reactive oxygen species increase in human lens epithelial cells. *Mol Vis* 14:964-969, 2008.

Zeni, O.; Sannino, A.; Romeo, S.; Massa, R.; Sarti, M.; Reddy, A.B.; Prihoda, T.J.; Vijayalaxmi; Scarfi, M.R. 2012. Induction of an adaptive response in human blood lymphocytes exposed to radiofrequency fields: Influence of the universal mobile telecommunication system (UMTS) signal and the specific absorption rate. *Mutat. Res*. 2012, 747, 29–35.

Zhang SZ, Yao GD, Lu DQ, Chiang H, Xu ZP. 2008. [Effect of 1.8 GHz radiofrequency electromagnetic fields on gene expression of rat neurons]. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi*. 26(8):449-452, 2008.

Zhao R, Zhang S, Xu Z, Ju L, Lu D, Yao G. 2007. Studying gene expression profile of rat neuron exposed to 1800MHz radiofrequency electromagnetic fields with cDNA microassay. *Toxicology* 235:167-175, 2007.

d'Ambrosio G, Massa R, Scarfi MR, Zeni O. 2002. Cytogenetic damage in human lymphocytes following GMSK

phase modulated microwave exposure. *Bioelectromagnetics*. 2002 Jan;23(1):7-13.

Citer denne udgivelse som:

Horsevad, Kim. 2017. Genotoksiske virkninger ved høffrekvente elektromagnetiske felter. Forskningsorientering #1, Elektrobiologisk Selskab.