

# ElektrosmogReport

Fachinformationsdienst zur Bedeutung elektromagnetischer Felder für Umwelt und Gesundheit

16. Jahrgang / Nr. 4

www.elektrosmogreport.de

April 2010

## Zellforschung Mobilfunk

### Review: Oxidativer Stress durch Mobilfunkstrahlung

In dieser Übersichtsarbeit (Review) bearbeiteten die Autoren Veröffentlichungen, die sich mit den Wirkungsmechanismen von elektromagnetischen Feldern des Mobilfunkbereichs befasst haben. Sie beziehen sich besonders auf den Stoffwechsel der freien Radikale. Die Autoren schließen aus den Ergebnissen, dass vor allem bestimmte Strukturen und Enzyme in den Zellmembranen Angriffspunkte sind, wodurch der Stoffwechsel der Reaktiven Oxidativen Substanzen (ROS) verändert wird und dadurch viele Prozesse in der Zelle beeinflusst werden, z. B. Krebsentstehung und Apoptose. Weiter werden epidemiologische Untersuchungen zur Spermienqualität beurteilt.

Die Zellmembran scheint der entscheidende Angriffspunkt für hochfrequente elektromagnetische Felder zu sein, das haben viele Experimente übereinstimmend ergeben. Genauer gesagt geht es um die Signaltransduktion in der Plasmamembran, die durch elektromagnetische Felder in nicht-thermischer Wirkung beeinflusst wird. Die Einwirkung auf die Plasmamembran könnte zur Einleitung der Apoptose führen, wenn nicht die Reparaturmechanismen eingeschaltet werden. Die in der Membran sitzende NADH-Oxidase wird durch die Strahlung aktiviert und es wird extrazellulär Peroxid gebildet. Diese Wirkung der Strahlung auf die NADH-Oxidase führt zu oxidativem Stress, was Krebsentstehung zur Folge haben kann (s. u.). Eine weitere Wirkung der Strahlung auf die Membran ist die Beeinflussung des Calcium-Haushalts. Man findet innerhalb der Zellen höhere Calcium-Konzentrationen nach Bestrahlung mit Mobilfunkfrequenzen. Dies alles spricht dafür, dass die Membran der Angriffspunkt ist und andere Störungen in der Zelle eine sekundäre Wirkung der Membranveränderungen sind.

**Mobilfunkstrahlung und oxidativer Stress:** Freie Radikale entstehen beim Stoffwechsel des Sauerstoffs in den Zellen. Diese werden als ROS bezeichnet. Die aggressiven Stoffe werden ständig von Antioxidanzien im Gewebe neutralisiert (Radikalfänger). Wenn allerdings die Neutralisationskapazität überschritten wird, entsteht oxidativer Stress. Seit 1992 kennt man diese Wirkung von Hochfrequenz und hat sie in vielen nachfolgenden Experimenten bestätigt. Entweder erhöhen die Felder die Radikalbildung oder sie vermindern die antioxidative Enzymaktivität. Sicher ist, dass Antioxidanzien wie Melatonin, die Vitamine C und E und andere Stoffe oxidativen Stress oder Apoptose verhindern können.

Chronische Einwirkung von Hochfrequenz vermindert die Aktivität verschiedener Enzyme (Katalase, Superoxiddismutase, Glutathion-Peroxidase) und vermindert damit die antioxi-

dativ Kapazität. Mobilfunkstrahlung kann Veränderungen in der intrazellulären Calcium-Konzentration und den Aktivitäten von PKC (s. u.) und ODC hervorrufen. Experimente zu anderen Enzymen hatten widersprüchliche Ergebnisse; es gibt aber Experimente, die belegen, dass ROS die Aktivitäten von ODC und PKC beeinflussen. So wird die durch die Strahlung hervorgerufene Zunahme der ROS-Konzentration die Zelldifferenzierung auslösen durch deren Einwirkung auf die Enzyme MAPK-Kinase, PKC and ODC sowie auf die Hitzeschockproteine. Auch Studien zur Spermienqualität deuten auf ROS-Produktion in den Spermazellen hin (s. u.).

**DNA-Strang-Brüche und Apoptose:** Die Schädigung der DNA durch Hochfrequenzfelder wurde in den letzten 10 Jahren mehrfach belegt. Experimente mit verschiedenen tierischen (Mäuse, Ratten) und menschlichen Zellkulturen bei verschiedenen Mobilfunkfrequenzen ergaben auch hier wieder die Bildung von freien Radikalen, die zu der DNA-Schädigung führen, wenn auch einige Experimente diese Wirkung nicht zeigten. Die DNA-schädigende Wirkung scheint von den Versuchsbedingungen und der Zellart abhängig zu sein. Gleiches gilt für das Einleiten der Apoptose. Wenn in der DNA nur ein Einzelstrangbruch auftritt, kann dieser leicht repariert werden, bei Doppelstrangbrüchen wird die Apoptose eingeleitet, wenn der Strang nicht repariert werden kann.

**Wirkung auf Spermien:** Mehrere Studien stellten verminderte Spermienqualität (Beweglichkeit, Lebensfähigkeit) fest. Die Beeinträchtigung könnte auf DNA-Schäden und oxidativen Stress zurückgehen. Damit im Zusammenhang steht die

Wirkung auf die **Proteinkinase C** und den **Calcium-Haushalt:** (PKC, ein Enzym, das eine Phosphatgruppe auf ein Protein überträgt. Es hat damit eine wichtige Regulationsfunktion, also das Aktivieren oder Abschalten von Enzymen. Die PKC hat eine Schlüsselrolle in der Signaltransduktion.) Die PKC ist Calcium-abhängig und sie spielt eine wichtige Rolle bei der Beweglichkeit der Spermien. Auch eine Beeinträchtigung der Calcium-Ionenkanäle durch hochfrequente Strahlung wurde festgestellt, sodass die intrazelluläre Calcium-

## Weitere Themen

### Wie elektrische Felder auf Zellen wirken, S. 2

Francis X. Hart stellt ein neues Modell vor, nach dem geringe künstliche elektrische Felder biologisch wirksam sind.

### Magnetfelder steigern Pflanzenwachstum, S. 2

Statische Magnetfelder von 4 und 7 mT beschleunigen sowohl die Samenkeimung als auch das Wachstum.

### Keine Wirkung, keine Mikrokerne?, S. 3

Das fanden zwei Arbeiten, an denen Industrievertreter beteiligt waren bzw. von der Industrie mitfinanziert wurden.

Konzentration nicht im Gleichgewicht ist. Der Anstieg der Calcium-Konzentration in der Zelle kann zu gesteigerter Zellteilung und -differenzierung führen und verschiedene Enzymaktivitäten verändern.

**Krebsentstehung (Karzinogenese):** Mobilfunkstrahlung kann die DNA-, RNA- Proteinsynthese- und Zellteilungsrate verändern. Aber die epidemiologischen Studien sind nicht eindeutig. Dennoch kann ein möglicher Ablauf der Krebsentwicklung gezeichnet werden. Verschiedene Enzyme und Rezeptoren in der Plasmamembran werden, wie oben beschrieben, als Angriffspunkte für Mobilfunkstrahlung verändert, was ein unkontrolliertes Zellwachstum auslösen kann.

Zusammenfassend ist festzuhalten: Die Zellmembran ist der primäre Angriffspunkt der Strahlung, dadurch entstehen ROS-Moleküle, die NADH-Oxidase-Aktivität in der Zellmembran steigt an. Dauereinwirkung von Mobilfunkstrahlung kann durch oxidativen Stress zu DNA-Schäden führen. Das führt zu vermehrtem Zelltod von Spermienzellen und neurodegenerativen Prozessen im Gehirn sowie zur Beschleunigung des Krebszellwachstums in beiden Organen. Die Beschleunigung des Krebswachstums entsteht durch Einwirkung der Strahlung auf die Enzyme PKC, ODC und Stresskinase und auf die Calcium-Konzentration in den Zellen. Oxidativer Stress und Veränderungen in der PKC-Aktivität könnten für die in vielen Studien beobachtete Unfruchtbarkeit verantwortlich sein. Deshalb sollten die SAR-Grenzwerte für Mobiltelefone herabgesetzt werden, empfehlen die Autoren.

#### Quelle:

Desai NR, Kesari KK, Agarwal A (2009): Pathophysiology of cell phone radiation: oxidative stress and carcinogenesis with focus on male reproductive system. *Reproductive Biology and Endocrinology* 7, 114

### Zellforschung Niederfrequenz

## Einfluss elektrischer Felder auf das Zellskelett

**In dieser theoretischen Arbeit werden die mechanischen Kräfte berechnet, die von elektrischen Feldern auf das Zellskelett ausgeübt werden. Die berechneten Kräfte dieses elektromechanischen Übertragungsprozesses stellen einen einleuchtenden Mechanismus dar, warum von außen einwirkende elektrische Felder biologische Wirkungen haben.**

Über die physikalischen Mechanismen, mit denen elektrische Felder in den Zellen übertragen werden, ist kaum etwas bekannt. Diese Arbeit stellt zum ersten Mal ein quantitatives Modell vor, das eine Verbindung zwischen elektrischem Feld und Zellskelettkräften herstellt. In einer früheren Arbeit hatte der Autor gezeigt, dass elektrische Felder physiologischer Stärke signifikante mechanische Drehungen auf Zellebene erzeugen (s. *ElektrosmogReport* 12/2008). In der neuen Arbeit werden die gleichermaßen auf das Zellskelett einwirkenden Kräfte berechnet und das Ergebnis ist, dass diese in der gleichen Größenordnung liegen, d. h. sie haben die gleichen mechanischen Kräfte, die physiologische Wirkungen ausüben können. Dazu kommen Kräfte durch die Viskosität, die von den umgebenden Strukturen ausgeübt werden. Die Kraft eines elektrischen Feldes von 10 V/m, das auf eine Hyaluronkette des CD 44-Rezeptor im Knorpel übertragen wird, beträgt etwa 1 pN (picoNewton) bei 10 Hz und 7 pN bei 1 Hz. Beträgt das elektrische Feld 100 V/m, ist die auf das Zellskelett übertragene Kraft 0,5 pN bei 10 Hz und 1,3 pN bei 1 Hz. Mechanische Kräfte solcher Stärke sind in der Lage, physiologische Wir-

kungen hervorzurufen. Natürliche Kräfte in und zwischen Zellen betragen etwa 0,5 pN–10 pN. Beispielsweise können 4,5 pN Chromatinmoleküle entfalten oder 0,5 pN Wechselwirkungen zwischen Nukleosomen unterbrechen. Deshalb können künstliche Felder, die von außen einwirken, biologische Relevanz besitzen.

Ein möglicher Mechanismus, wie elektrische Felder wirken, ist eine Änderung des Transmembran-Potenzials, das die spannungsabhängigen Ionen-Kanäle öffnet. Ein anderer Mechanismus könnte über Diffusion/Osmose laufen, was aber bei Wechselfeldern kaum der Fall sein kann. Ein Vorschlag, den Hart 2008 gemacht hatte, ist die Drehung eines negativ geladenen Glycoproteins, das mit der Zelloberfläche verbunden ist. Hier werden die Drehungskräfte, die auf das Zellskelett ausgeübt werden, als Modell vorgestellt. Da die Kräfte in der gleichen (physiologischen) Größenordnung liegen, ist auch dieser Mechanismus möglich. Hart betrachtet in seinem Modell die Beziehungen der Moleküle untereinander: Größe (Radius), Drehung, Ladungen und deren Lage. Die Verbindungen von Molekülen im extrazellulären Raum mit den Molekülen in der Membran und dem Zellskelett im Zellinnern üben Kräfte aufeinander aus. Das Aggrecan (ein Protein, ein Hauptbestandteil des Knorpels) z. B. liegt quer zur Zelloberfläche, die Glykocalix (die Zellhülle) aber parallel, sodass hier Scherkräfte entstehen. Die sich dadurch ergebenden Unterschiede in der Richtung der Kräfte bedeuten möglicherweise verschiedene biologische Wirkungen, weil die Zelle verschiedene Signale erhält. Auch die Frequenz spielt eine wichtige Rolle. Kräfte der elektrischen Felder, die von außen auf die Glykocalix einwirken, werden in das Zellinnere weitergeleitet und bewirken Veränderungen in der Membran und im Zellskelett. Das Modell passt auf alle Zelltypen, unabhängig von der Größe, und es funktioniert bei Gleich- und Wechselfeldern.

#### Quelle:

Hart FX (2010): Cytoskeletal Forces Produced by Extremely Low-Frequency Electric Fields Acting on Extracellular Glycoproteins. *Bioelectromagnetics* 31, 77–84

### Statische Magnetfelder

## Pflanzenwachstum durch Magnetfelder beschleunigt

**Bohnen und Weizen haben eine höhere Keimungs- und Wachstumsrate sowie stärkere Zunahme der Biomasse, wenn die Samen während der Keimung 7 Tage lang mit statischen Magnetfeldern von 4 und 7 mT behandelt werden. Und das auch, wenn die Pflanzen osmotischem Stress ausgesetzt sind.**

Seit langem ist bekannt, dass Magnetfelder das Wachstum von Pflanzen beschleunigen. Diese Wirkung wurde bereits an vielen verschiedenen Nutzpflanzen festgestellt. Man kann diese Eigenschaft der Magnetfelder im kommerziellen Pflanzenanbau dazu nutzen, den Ertrag zu steigern und ihn schneller und früher zu bekommen. In diesen Experimenten kamen Bohnen- und Weizensamen zum Einsatz. Untersucht wurden die Keimung und das Wachstum der Sämlinge in verschiedenen Nährmedien, die durch Salz- oder Zuckerlösung einen osmotischen Druck von 0, 2, 6 und 10 Atmosphären (atm) hatten. 50 Weizen- und 12 Bohnensamen wurden für jeden Ansatz verwendet. Die statischen Magnetfelder von 4 und 7 mT wirkten 7 Tage ein. Innerhalb dieser 7 Tage wurden die Keimungsraten bestimmt und in Prozent zu den unbehandelten Kontrollen angegeben. Dann wurden Länge und Gewicht von Spross und Wurzel gemessen und die Trockenmasse bestimmt.