

Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben

Langzeitstudie an Labornagern mit UMTS-Signalen

Forschungsnehmer:

**Jacobs University Bremen
(ehemals International University Bremen)**

Januar 2008

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Forschungsnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

ZUSAMMENFASSUNG

Männliche und weibliche Mäuse (C57BL) wurden lebenslang, 24 Stunden pro Tag elektromagnetischen Feldern der Mobilfunktechnologie (UMTS) ausgesetzt. Ihre Entwicklung und Fertilität wurde durch Erfassung histologischer, physiologischer und reproduktiver Funktionen über mehrere Generationen erfasst. Die Entwicklung der Jungtiere wurde engmaschig überprüft. Die Höhe der Exposition betrug 0 W/kg (Scheinexposition), 0.08 W/kg, 0.4 W/kg und 1.3 W/kg. Die Versuchsdurchführung erfolgte blind. Es ergaben sich insgesamt keine Hinweise auf negative Effekte der Exposition hinsichtlich der für die Reproduktion relevanten Parameter. Allerdings zeigten sich Effekte auf den Futterverbrauch, der unter Exposition zum Teil deutlich unter den Werten der scheinexponierten Tiere lag. Auch zeigten sich, weniger deutlich und nicht durchgehend, geringfügige Effekte auf die Entwicklung des Körpergewichts der schwangeren Weibchen. Die Anzahl und die Gewichtsentwicklung der Nachkommen und alle getesteten Marker für die artgerechte Entwicklung wiesen auf keinen schädlichen Einfluss der Exposition hin. Insgesamt haben die Versuche keine schädlichen Effekte auch langfristiger, über mehrere Generationen hinweg bestehender Exposition zeigen können.

SUMMARY

Male and female mice (C57BL) were chronically exposed (life-long, 24 hrs/day) to mobile phone communication electromagnetic fields (UMTS). Their development and fertility were monitored over several generations by investigating histological, physiological and reproductive functions. The development of the pups were monitored closely. The SAR values tested were 0 (sham), 0.08, 0.4, and 1.3 W/kg. Exposure was blinded. In summary, there were no indications for a harmful effect of exposure on fertility parameters. Some results indicate partially pronounced effects on food consumption and, less pronounced, on weight gain in pregnant females. The number and weight development of the pups as well as the markers for their development were unaffected by exposure. In summary, the results of this study did not indicate harmful effects of long-term exposure over several generations.

1. ZIELSETZUNG

Es sollten männliche und weibliche Mäuse über 4 Generationen (F0, F1 – F3) langfristig (24 Stunden / Tag) elektromagnetischen Feldern des UMTS-Standards ausgesetzt werden (F0 ab Tag der Verpaarung, F3 bis kurz vor Ende der Schwangerschaft). Die spezifischen Absorptionsraten (SAR) sollten 0 (Schein-Exposition), 0.08, 0.4 und 1.3 W/kg betragen. Die Endpunkte waren bei den adulten männlichen Tieren Spermienanzahl und Spermienmorphologie, bei den adulten weiblichen Tieren Wurfgröße, Frühgeburten und Anzahl überlebende Tiere. Weiterhin sollten teratogene Effekte untersucht werden (Uterusgewicht, Anzahl Gelbkörper, Implantationsstellen, Resorptionen sowie Anzahl, Position und Gewicht der Feten und Fehlbildungen). Die Untersuchungsergebnisse sollen zum einen publizierte Ergebnisse überprüfen, zum anderen dienen sie der Risikoabschätzung und als Grundlage für mögliche Veränderungen der zurzeit bestehenden Grenzwerte.

2. METHODIK

2.1 Expositionsanlagen

Die für den UMTS – Frequenzbereich konzipierten radialen Wellenleitungen bestehen jeweils aus zwei runden, parallel angeordneten Metallplatten mit einem Durchmesser von 2 m (Abb. 1).

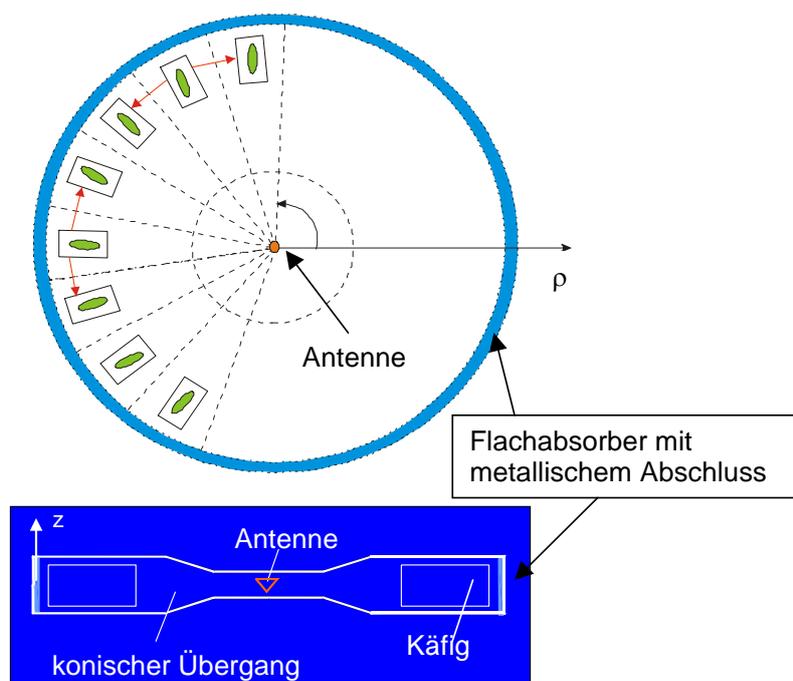


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Expositionsanlage

Das mit einer Frequenz von $f = 1,97$ GHz eingespeiste Hochfrequenz(HF)-Signal wird über eine konische Antenne im Zentrum der Wellenleitung, die mittels numerischer Berechnungen dimensioniert und angepasst wurde, in eine in radiale Richtung fortschreitende Welle umgesetzt. Am Außenrand sind die Wellenleitungen mit Flachabsorbern und einer ringförmigen Metallwand abgeschlossen. Diese Wand wird durch HF-dicht verschließbare Klappen gebildet, die ein einfaches Einbringen der Kunststoffkäfige mit den Tieren ermöglichen. Jede Wellenleitung kann 16 Käfige aufnehmen. Für die gewünschten 128 Käfige wurden insgesamt 8 radiale Wellenleitungen gefertigt, die in 4 Stapeln à 2 Wellenleitungen angeordnet wurden (Abb. 2). Die Experimente laufen verblindet ab, d.h., für das die Versuche durchführende Personal ist nicht erkennbar, in welchen Wellenleitungen die Exposition mit dem Hochfrequenzfeld bzw. die Scheinexposition erfolgt.

Die Licht-, Luft- und Trinkwasserzufuhr für die Tiere ist auch bei laufender Exposition gewährleistet, ohne dass hochfrequente Fremdfelder eindringen können oder das Expositionsfeld aus den Leitungen abgestrahlt werden kann (Abschirmung > 60 dB). Dazu wurden Revisionsöffnungen über den perforierten Kunststoffkäfigen vorgesehen, die mit luft- und lichtdurchlässigen, aber elektrisch abschirmenden Metallgittern versehen wurden, und die aus Glas bestehenden Nippel der Trinkflaschen werden durch metallische Rohrstützen, die als Rundhohlleitungen unterhalb ihrer Grenzfrequenz („Dämpfungskamine“) dimensioniert sind, in die Wellenleitungen geführt (Abb. 3). Die ausreichende Luftzufuhr wird durch eine externe Belüftung sichergestellt. Durch einen Flansch mit einem Durchmesser von 50 mm, dessen Öffnung mit einer Lochplatte aus Metall abgeschirmt ist, wird Luft aus der zentralen Klimaanlage in den inneren Bereich der Anlage nahe der Einspeisung geblasen. Die Luft verteilt sich in der Leitung und kann durch die Metallgitter, welche die Revisionsöffnungen abdecken, entweichen. Dadurch wird eine kontinuierliche und gleichmäßige Luftströmung erzeugt. Bereiche innerhalb der Wellenleitung, die während des Experiments nicht zugänglich sein müssen, wurden von dem eigentlichen Expositionsbereich durch HF-transparente Abschottungen getrennt, um Verschmutzungen zu vermeiden und die Reinigung zu erleichtern.



Abb. 2: Zwei der insgesamt vier doppelstöckigen Anlagen zur Exposition. Jeder Wellenleiter enthält 16 Käfigplätze.

Durch die Bestimmungen des Tierschutzes ist die vorgeschriebene Mindesthöhe der Käfige festgelegt (16 cm einschließlich Deckel), die somit etwas größer ist als die Wellenlänge im freien Raum von $\lambda_0 = 15$ cm bei einer Frequenz um 2 GHz. Die Höhe der Wellenleitung (Plattenabstand) beträgt 17 cm, so dass sich zusätzlich zur gewünschten TEM-Welle (Grundwellentyp) weitere Wellentypen mit Variation des Feldes in vertikaler Richtung ausbreiten können, was zu einer inhomogenen Exposition der Mäuse führen würde. Somit sind Maßnahmen zur Unterdrückung dieser höheren Wellentypen notwendig:

Um eine einwellige Anregung zu gewährleisten, wird die Höhe der Leitung von 6 cm ($h < \lambda_0/2$) nach außen hin auf 17 cm vergrößert. Die Aufweitung wird durch einen konischen Übergang realisiert (vgl. Abb. 1). Die Feldverteilung bei dieser Anregung ist in Abb. 4 dargestellt. Man erkennt – abgesehen von der durch Restreflexionen am Absorber verursachten Stehwelligkeit – eine relativ homogene Feldverteilung im Expositionsbereich, weil das Feld durch die TEM-Welle gegeben ist [Streckert et al. 2000]. Damit liegt eine sehr gleichmäßige und stabile Exposition vor.



Abb. 3: Detailansicht einer Wellenleitung mit geöffneter Klappe. Die Tränkflaschen und die Glasnippel, die ansonsten durch die Plastikdeckel der Käfige ragen, werden vor Entnahme des Käfigs hochgezogen und fixiert. Die Klappen sind mit Absorbermaterial belegt und durch leitfähiges, elastisches Material zusätzlich elektromagnetisch abgedichtet. Die speziell angefertigten keilförmigen Makrolon-Käfige haben eine Grundfläche von ca. 836 cm² und eine Höhe von 155 mm.

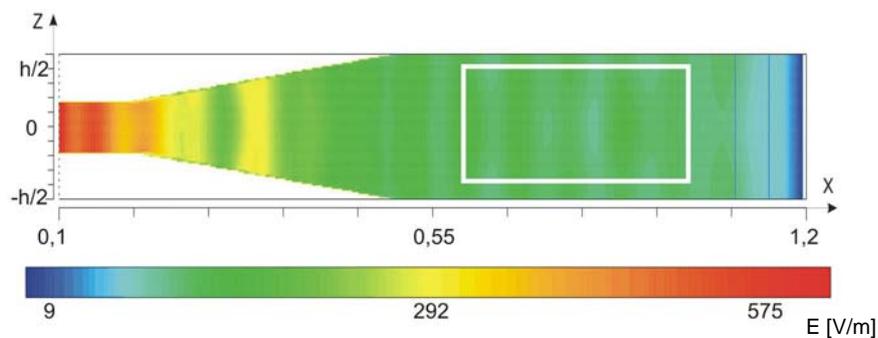


Abb. 4: Betrag der elektrischen Feldstärke im Längsschnitt eines mit 1 W Leistung gespeisten Sektors der inhomogenen radialen Wellenleitung

Die Größe erwachsener Mäuse entspricht etwa einer halben Wellenlänge, so dass sie große Streukörper darstellen. Sobald die Käfige mit den Mäusen eingebracht werden, ist das gestreute Feld zu berücksichtigen, das zur Anregung höherer Wellentypen mit einer Variation des Feldes in azimuthaler Richtung führen und die Feldverteilung in den angrenzenden Käfigen beeinflussen kann. Da das Streufeld der Mäuse von ihrer Position und Körperhaltung abhängt, läge somit kein eindeutig reproduzierbares Expositionsfeld

vor. Um diese gegenseitige Verkopplung der Felder in verschiedenen Käfigen zu vermeiden und eine möglichst homogene Exposition zu gewährleisten, wurden die im Folgenden beschriebenen Zusatzmaßnahmen vorgesehen:

Es wurden metallische Trennwände zwischen benachbarten Sektoren eingefügt, was allerdings eine in azimuthaler Richtung sinusförmige und damit nicht konstante Feldverteilung im Expositionsbereich zur Folge hätte. Für eine konstante Feldverteilung ohne azimuthale Verkopplung des elektrischen Feldes muss die Wandimpedanz $Z_w \rightarrow \infty$ gehen [Hansen 1975]; dies kann durch einen dielektrischen Belag auf den metallischen Trennwänden realisiert werden. Für die praktische Umsetzung wurde weißes POM von ca. 3 cm Stärke mit den metallischen Trennwänden verschraubt. Eine Seite der POM-Platten ist jeweils mit ideal leitender Metallfolie beklebt, um einen sehr guten Kontakt zwischen Metallwand und POM-Platte zu erhalten. Da sich mit diesen 'high impedance'-Wänden nur in einem relativ engen Frequenzbereich die gewünschte Wirkung erzielen lässt, erfolgte die genaue Dimensionierung der dielektrischen Wände durch eine Modenanalyse mit nachfolgender numerischer Detailrechnung für die Feldverteilung und anschließender messtechnischer Überprüfung. In Abb. 5 ist ein Käfigbereich der Wellenleitung mit den 'high impedance'-Wänden, dem Flachabsorber, der HF-Dichtung und der HF-transparenten und luftdurchlässigen Abschottung zu sehen.

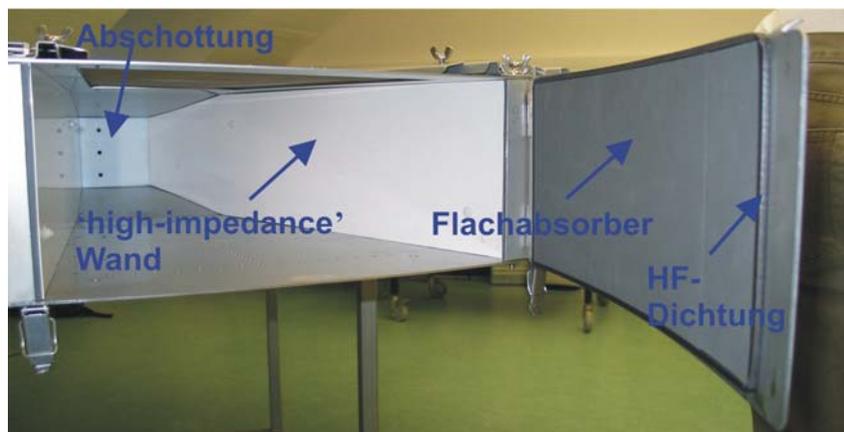


Abb. 5: Käfigbereich der Wellenleitung mit den 'high impedance'-Wänden, dem Flachabsorber, der HF-Dichtung und der HF-transparenten und luftdurchlässigen Abschottung

Die in Abb. 6 dargestellten Ergebnisse numerischer Feldberechnungen mit der Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich [Taflove et al. 2005] auf der Basis eines detaillierten Computermodells der radialen Wellenleitung belegen, dass durch die dielektrischen Wände im Käfigbereich ein quasi-homogenes Feld erzwungen werden kann [Reinhardt 2002, Bitz et al. 2003].

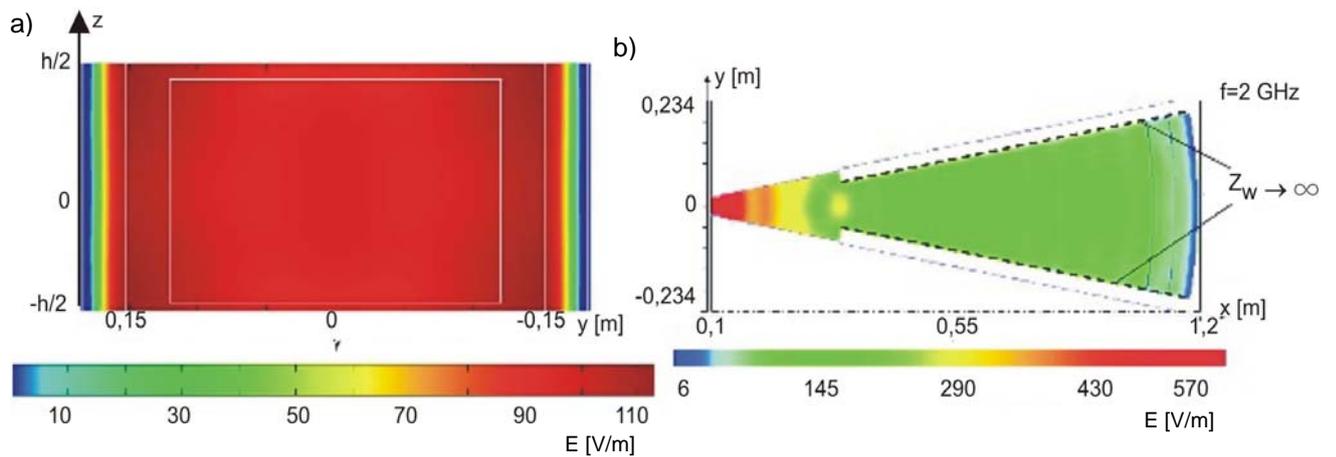


Abb. 6: Betrag der elektrischen Feldstärke in einem mit 1 W Leistung angeregten Sektor der mit 'high impedance'-Wänden bestückten radialen Wellenleitung:
 a) im Querschnitt durch die Käfigmitte; b) im Längsschnitt durch die Käfigmitte

Abb. 7 gibt Mittelwert und Standardabweichung des für 16 Sektoren messtechnisch ermittelten Betrages der z-Komponente der elektrischen Feldstärke in azimuthaler Richtung wieder. Zum Vergleich ist der prinzipielle Feldverlauf in einem Sektor ohne dielektrische Wandbeläge eingezeichnet.

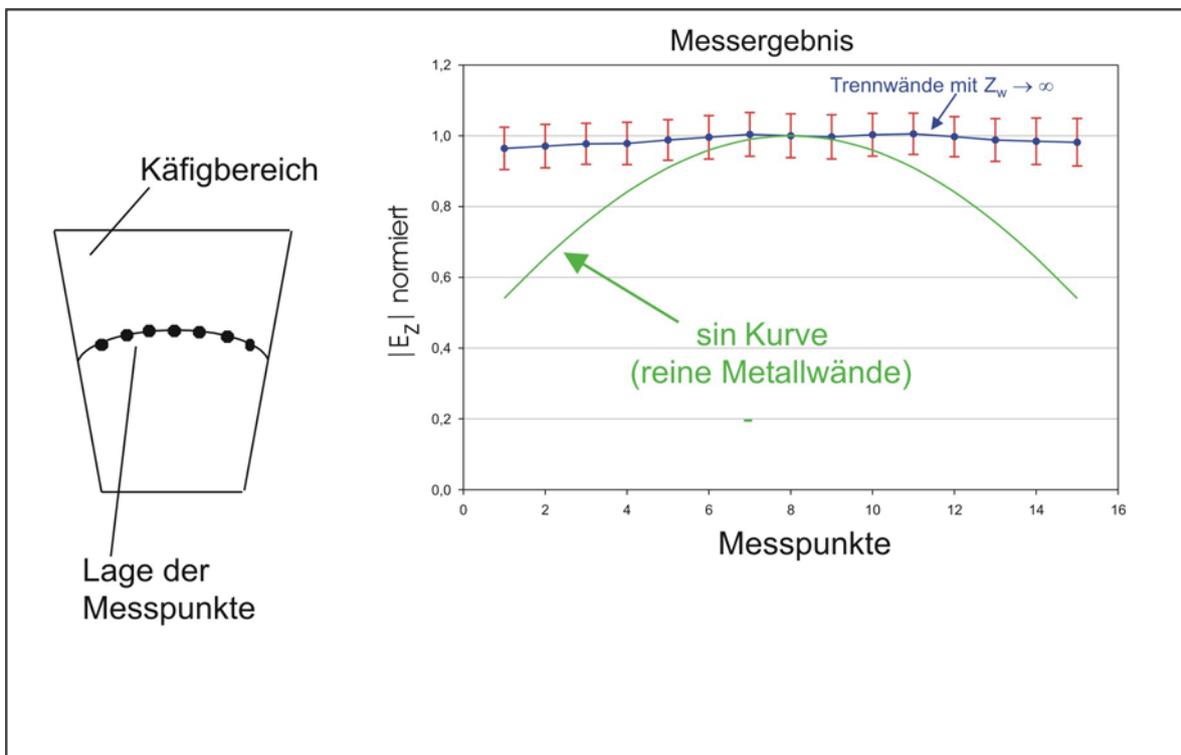


Abb 7: Homogenisierung des elektrischen Feldes im Käfigbereich durch optimierte 'high impedance'-Wände

2.2 SAR-Berechnungen

Die vom BfS vorgegebenen SAR-Werte von 1,3 W/kg, 0,4 W/kg, 0,08 W/kg und 0 W/kg wurden über die entsprechenden elektrischen Feldstärken im Käfigbereich eingestellt. Es wurden ca. 50 numerische Berechnungen mit verschiedenen Konfigurationen von Tiermodellen sowie Berechnungen des Leerfeldes durchgeführt, um einerseits die jeweils notwendige Feldstärke im Käfigbereich zu ermitteln und des Weiteren die SAR-Variation in verschiedenen Tiergruppen zu bestimmen. Für die numerischen Berechnungen wurde ein eigener FDTD-Code mit implementierten Untergittern verwendet.

Versuchsphase 1:

Je zwei trächtige Mäuse und eine männliche Maus befinden sich in einem Käfig. Die mittlere Feldstärke in der höchstexponierten Leitung beträgt 127 V/m. Aufgrund der Einzeldaten ergibt sich für insgesamt 10 verschiedene Modelle bei 127 V/m ein Mittelwert der Ganzkörper-SAR über alle Mäuse von 1,3 W/kg mit einer Standardabweichung von 34 %. Darin sind die Standardabweichungen aus den Feldmessungen und aus den numerischen Berechnungen berücksichtigt. Die für diesen höchsten Nennwert der SAR eingestellte Feldstärke bzw. die zugehörige Speiseleistung wird für alle nachfolgenden Versuchsphasen beibehalten (Referenzeinstellung).

Die spezifische Absorptionsrate ist eine Funktion der Leitfähigkeit κ und der elektrischen Feldstärke, die proportional $1/\sqrt{\epsilon_r}$ (ϵ_r : Permittivität) ist, so dass die elektrischen Materialparameter des biologischen Gewebes entscheidend die absorbierte Leistung P_v bestimmen.

Die Materialparameter sind messtechnisch bestimmte Größen, die der Literatur [Gabriel 1996] entnommen wurden. Da diese nur mit endlicher Genauigkeit messtechnisch zu ermitteln sind, müssen in den dosimetrischen Berechnungen Toleranzen mit berücksichtigt werden. Für jede Expositionsphase, d.h. für jede Konfiguration von Tieren, wurden daher Simulationen mit veränderten Materialparametern durchgeführt.

Die Materialparameter wurden um $\pm 10\%$ in die gleiche Richtung und gegenläufig variiert, da ϵ_r und κ mit unterschiedlicher Proportionalität und Gewichtung in die Verlustleistung eingehen. Als Basismodell für die Parametervariation wurde pro Versuchsphase eine Konfiguration von Mäusen ausgewählt, bei der die einzelnen Ganzkörper-SAR-Werte der Tiere nahe am Mittelwert der SAR-Werte der numerischen Rechnungen für die entsprechende Versuchsphase liegen.

Für die 1. Versuchsphase ergibt sich eine berechnete Unsicherheit des SAR-Mittelwertes zwischen +11 % und -5 %.

Versuchsphase 2:

Je eine trächtige Maus und eine männliche Maus befinden sich in einem Käfig. Die mittlere Feldstärke in der höchstexponierten Leitung beträgt 127 V/m (siehe Versuchsphase 1). Aufgrund der Einzeldaten ergibt sich für insgesamt 8 verschiedene Konfigurationen bei der Referenzeinstellung ein Mittelwert der Ganzkörper-SAR über alle Mäuse von 1,44 W/kg bei einer Standardabweichung von 32 % unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den numerischen Berechnungen und den Feldmessungen. Die berechnete Unsicherheit des SAR-Mittelwertes liegt zwischen +6 % und -7 %.

Versuchsphase 3:

Je zwei erwachsene Mäuse und 6 Jungtiere befinden sich in einem Käfig. Die mittlere Feldstärke in der höchstexponierten Leitung beträgt 127 V/m (siehe Versuchsphase 1). Aufgrund der Einzeldaten ergibt sich für insgesamt 9 verschiedene Konfigurationen bei der Referenzeinstellung ein Mittelwert der Ganzkörper-SAR über alle erwachsenen Mäuse von 1,21 W/kg bei einer Standardabweichung von 52 % und über alle Jungtiere von 1,92 W/kg bei einer Standardabweichung von 56 % unter Berücksichtigung der Daten aus den numerischen Berechnungen und den Feldmessungen. Die berechnete Unsicherheit des SAR-Mittelwertes für die erwachsenen Mäuse liegt zwischen +19 % und -20 % und für die Jungtiere zwischen +19 % und -34 %.

Versuchsphase 4:

Je 4 junge Mäuse mit einem Gewicht von ~17g befinden sich in einem Käfig. Die mittlere Feldstärke in der höchstexponierten Leitung beträgt 127 V/m (siehe Versuchsphase 1). Aufgrund der Einzeldaten ergibt sich für insgesamt 10 verschiedene Konfigurationen bei der Referenzeinstellung ein Mittelwert der Ganzkörper-SAR über alle erwachsenen Mäuse von 2,34 W/kg bei einer Standardabweichung von 36 % unter Berücksichtigung der Daten aus den numerischen Berechnungen und den Feldmessungen. Die berechnete Unsicherheit des SAR-Mittelwertes liegt zwischen +8 % und -12 %.

2.3 Signalquelle und Signalkontrolle

Die Exposition sollte nach den Vorgaben des BfS mit dem in einem Arbeitskreis der FGF durch Vertreter von Netzbetreiberfirmen, Bundesbehörden und Universitäten unter Mitwirkung des Berichters definierten generischen UMTS-Testsignal [Ndoumbè et al. 2004] erfolgen, das die wesentlichen technischen Spezifikationen des FDD-Betriebs einschließlich der schnellen Leistungsregelung ('inner loop power control') berücksichtigt. Einige Charakteristika des Zeitverlaufs dieses Signals, insbesondere das gewählte Schema zur Leistungsvariation, sind in Abb. 8 dargestellt. Zur Erzeugung dieses Signals wurden insgesamt vier Signalgeneratoren eingesetzt, die an der Bergischen Universität Wuppertal (Kooperationspartner) entwickelt worden sind [Glasmachers et al. 2002].

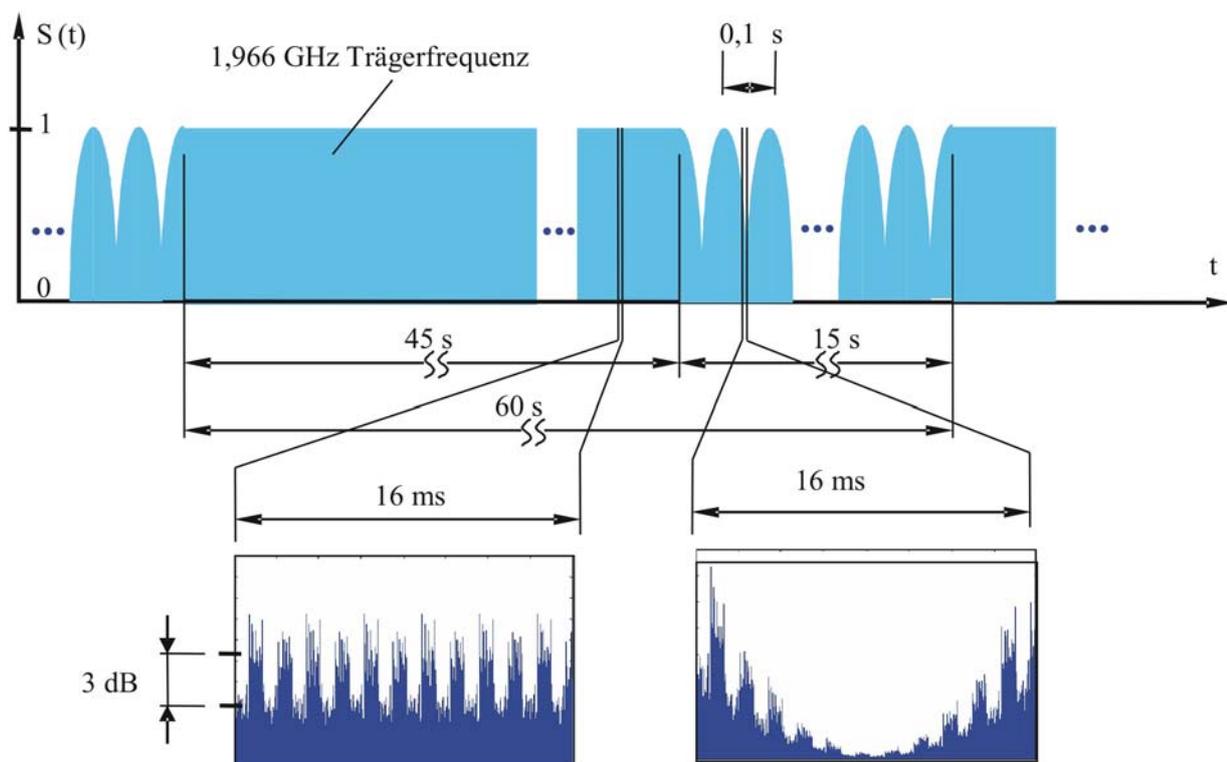


Abb. 8: Zeitverlauf des mit 1 Minute periodischen generischen UMTS-Testsignals (Skizze: G. Schmid, ARCS Seibersdorf)

Zur Anhebung des Signalpegels auf die o.g. zur Exposition der Tiere erforderliche Leistung muss jedem Generator ein Verstärker nachgeschaltet werden. Dieser Leistungsverstärker muss in der Lage sein, das UMTS-Signal möglichst linear zu verarbeiten (Crest-Faktor ≥ 8 dB, Bandbreite: 5 MHz), damit Signalverfälschungen vermieden werden. Es wurden Spezial-Verstärker der Firma BEKO mit einer CW-Nennleistung von 400 W und einer CW-Nennleistung von 125 W eingesetzt, die vom Kooperationspartner gemeinsam mit dem Verstärkerproduzenten konzipiert worden sind. Das verstärkte UMTS-Signal wird den Expositionsvorrichtungen über ein Koaxialkabel (Huber+Suhner Sucofeed $\frac{1}{2}$ ") zugeführt.

Die Geräte befinden sich in ca. 4 m Höhe auf einer Plattform über den Expositionsanlagen. Von der Plattform führen zu allen Wellenleitungen die gleichen Kabel, so dass für das Personal die Verkabelung nicht unterscheidbar ist und die Exposition verblindet abläuft. Eine schematische Aufsicht und eine schematische Seitenansicht der Anlage sind in den Abb. 9 und 10 dargestellt.

Jede Wellenleitung ist mit einer (unkalibrierten) Feldsonde mit nachgeschaltetem Diodendetektor (Agilent 423B) und mit keramischen Temperatursensoren ausgestattet. Über ein Messwerterfassungssystem werden die elektrischen Feldstärken und die Lufttemperaturen in den Leitungen kontinuierlich aufgezeichnet. Die Daten wurden auf einem PC gespeichert und regelmäßig von der Wuppertaler Arbeitsgruppe überprüft. Aus technischen Gründen (Vermeidung von Langzeitdrifts der Verstärker und Systemchecks) wurde die Anlage einmal während jeder Nacht für 30 Minuten heruntergefahren und neu gestartet. Ansonsten waren die Anlagen - auch beim Herausnehmen bzw. Einstellen der Käfige - aktiv, da keine Belastung über die Grenzwerte des Expositionsbereiches 1 (beruflich exponierte Personen) hinaus auftreten konnte.

Die regelmäßige, automatische Datenübermittlung von Bremen nach Wuppertal, die tägliche Sichtung und Bewertung der Daten, sowie entsprechende Rückmeldungen haben sich im Verlauf der Experimente als hervorragend gelöst dargestellt. Einmal kam es durch eine 'update'-Aufforderung des Betriebssystems zu einer Störung der Datenaufnahme, die am nächsten Tag bemerkt und abgestellt wurde. Die Exposition war hiervon nicht betroffen. Ansonsten lief die Anlage bis auf einen kurzfristigen Ausfall eines Verstärkers störungsfrei.

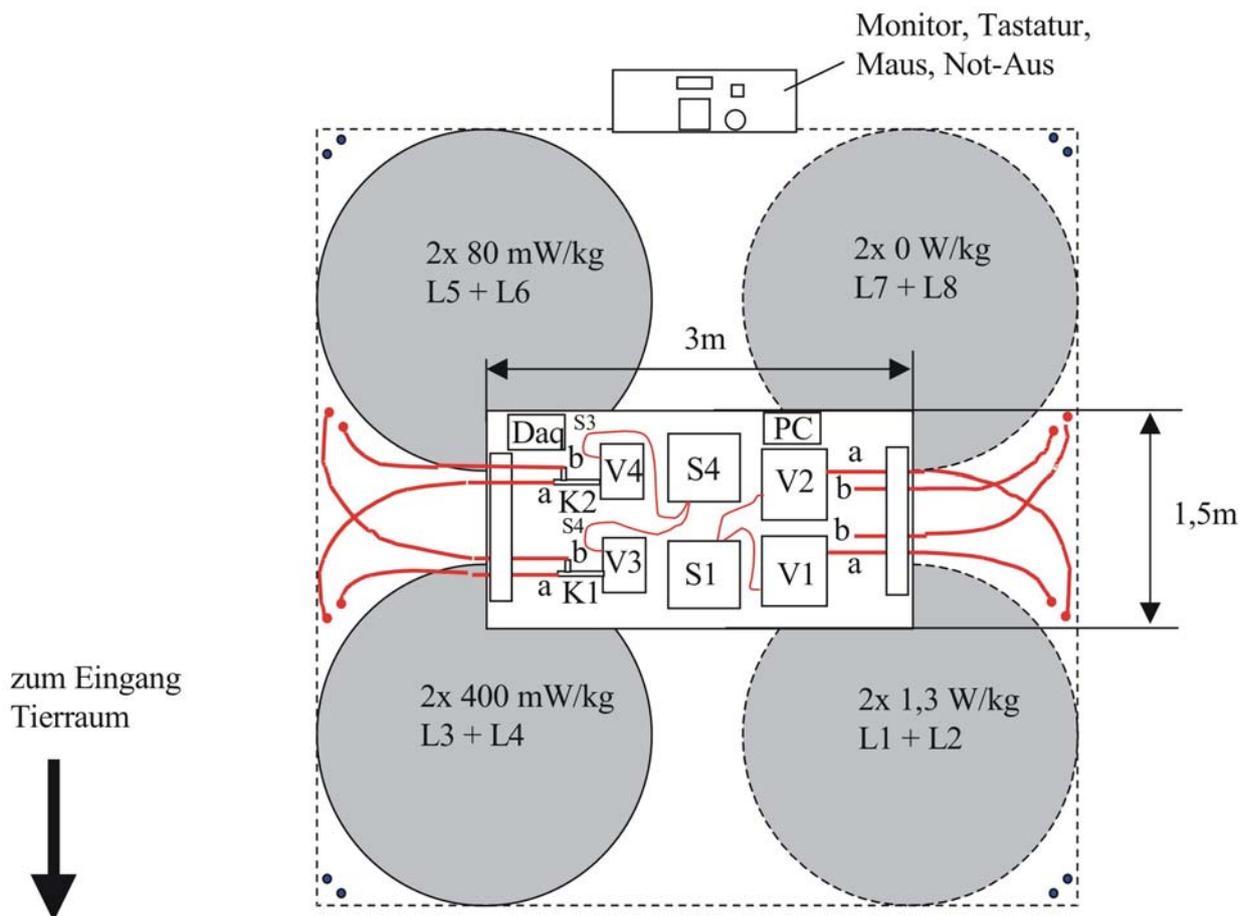


Abb. 9: Aufsicht der Expositionsanlage

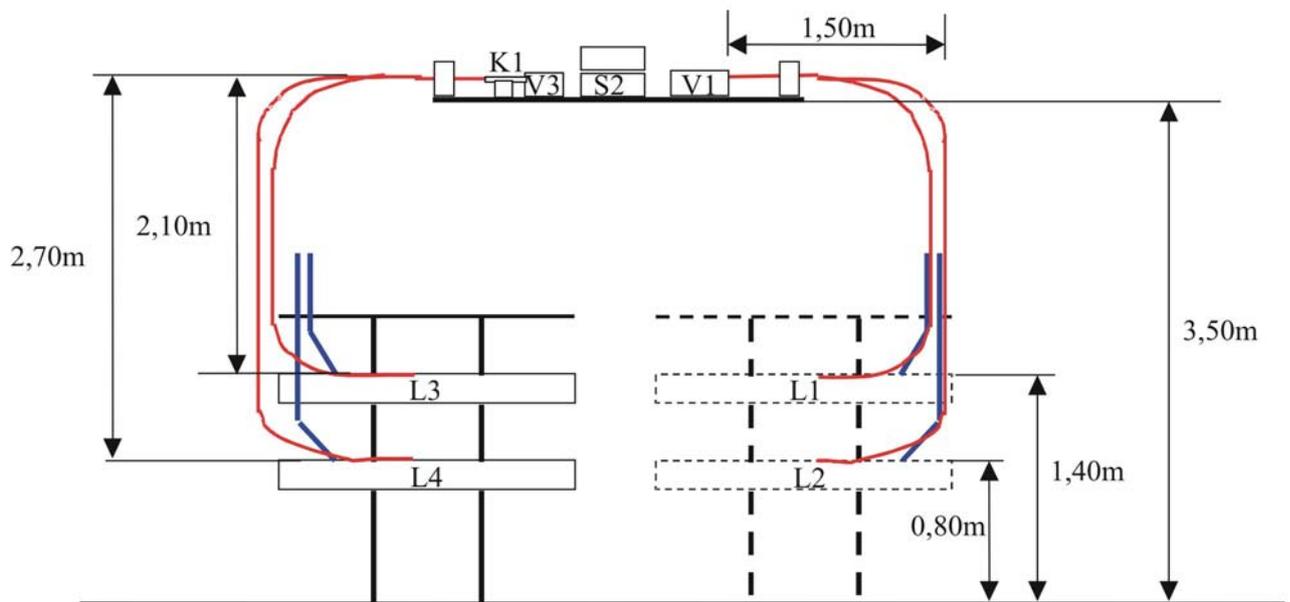


Abb. 10: Seitenansicht der Expositionsanlage

2.3. Versuchstiere

Erwachsene männliche (n = 32 pro Anlage, 1 pro Käfig) und weibliche (n = 64 pro Anlage, 2 pro Käfig) Mäuse (Stamm C57BL6) wurden im Alter von 9-10 Wochen vom Züchter erhalten, 2 Wochen später in den Expositionsanlagen verpaart und regelmäßig gewogen. Zur Unterscheidung wurde das Ohr eines Weibchens tätowiert. Aufgrund der Lieferzeiten wurden die Verpaarungen innerhalb von 4 Wochen durchgeführt, die Variationen des Alters waren aber in jedem Fall nicht größer als 2 Wochen. Das Alter der Tiere zum Zeitpunkt der Verpaarungen betrug in den folgenden Generationen 90 – 110 Tage. Ein schwangeres Weibchen pro Käfig wurde 18 Tage nach Verpaarung schmerzfrei getötet und hinsichtlich der Anzahl Feten, Absorptionsstellen, Uterusgewicht und Fehlbildungen der Feten untersucht. Das verbleibende Weibchen trug die Jungtiere aus, die am 7. Lebenstag durch die Registrierung eines Umdrehreflexes untersucht wurden. Ebenfalls wurde der Zeitpunkt der Augenöffnung als Marker für die Entwicklung der Jungtiere notiert. Aus diesen Jungtieren wurden die Elterntiere der nächsten Generation rekrutiert. Die Elterntiere wurden schmerzfrei getötet, die Hoden der Männchen entnommen und nach Standard-Verfahren (Hämatoxylin-Eosin-PAS-Färbung) histologisch aufbereitet und analysiert (Lerchl et al., 1993).

2.4. Auswertungen

Neben dem Körpergewicht wurden der Verbrauch von Wasser und Futter während eines Fütterungsintervalls (für alle Tiere bei gleichem Alter) registriert. Alle weiteren Ergebnisse (s.u.) wurden sowohl schriftlich protokolliert als auch elektronisch gespeichert und ausgewertet. Die Versuchsdurchführung sowie die Datenaufbereitung erfolgten ohne Kenntnis der Gruppenzugehörigkeit (blinde Versuchsdurchführung). Der Code wurde erst nach Erhalt und Analyse aller Ergebnisse gebrochen. Hierzu wurden die verblindeten Ergebnisse zum Kooperationspartner nach Wuppertal übersandt, danach erfolgte die Mitteilung des Expositionscode. Die Daten wurden anschließend mit Zwei-Weg ANOVA statistisch analysiert und mittels post-hoc Test (Bonferroni) bei Vorhandensein von statistischen Unterschieden geprüft, ob Unterschiede zwischen Scheinexposition und Exposition vorlagen.

3. DURCHFÜHRUNG

Die Kontrolle einer eingetretenen Schwangerschaft konnte nicht wie ursprünglich geplant verifiziert werden, da ein „plug“ als Zeichen einer Begattung in keinem Fall sichtbar war. Als verlässlicher Indikator wurde stattdessen das Körpergewicht der Weibchen heran gezogen. Weiterhin stellte sich heraus, dass die Anzahl der überlebenden Nachkommen des 1. Wurfes in allen Generationen unzureichend war (Überlebensrate nur ca. 30%). Daher wurde jeweils ein weiterer Wurf abgewartet, um die Weitervermehrung zu gewährleisten. Es hat sich als unmöglich heraus gestellt, das Geschlecht der Feten makroskopisch zu bestimmen. Dieser Parameter wird in die Ergebnisse der Untersuchungen daher nicht eingehen, allerdings war das Verhältnis der männlichen zu weiblichen Jungtiere beim Absetzen zwischen den 4 Anlagen nicht unterschiedlich, so dass dieser Parameter ohnehin wenig Aussagekraft gehabt hätte.

4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die bisherigen Ergebnisse zeigen zunächst, dass der Versuch im Großen und Ganzen wie geplant durchführbar war, mit Ausnahme der insgesamt niedrigen Wurfgrößen im jeweils ersten Wurf. Der Trinkwasser- und Futterverbrauch ist in den Abb. 11 und 12 dargestellt. Hierzu wurde jeweils einmal während der Exposition zum gleichen Zeitpunkt (7 Tage nach Verpaarung) der Wasserverbrauch durch Wiegen der Flaschen und der Futterverbrauch durch Wiegen der Futterpellets und Aussieben der nicht gefressenen Pellets bestimmt. Insofern wurde für diesen Parameter kein zeitlicher Verlauf ermittelt, da dies eine zusätzliche Störung der Tiere bedeutet hätte. Auch konnte der Futterverbrauch nicht für Männchen und Weibchen getrennt bestimmt werden.

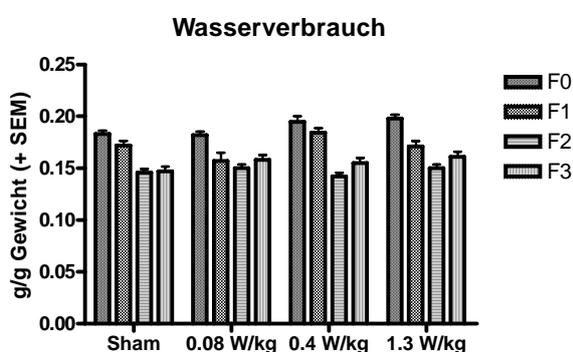


Abb. 11: Wasserverbrauch der Versuchstiere.

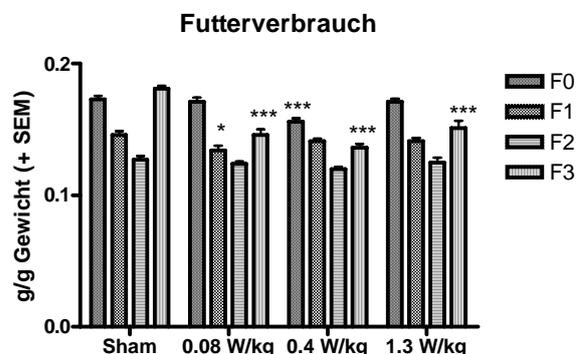


Abb. 12: Futterverbrauch der Versuchstiere.
* p < 0.05; *** p < 0.001 gegenüber scheinexponierten Versuchstieren der entsprechenden Generation.

Während beim Wasserverbrauch keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt wurden, zeigten sich für den Futtermittelverbrauch bei 5 von 12 Vergleichen in den Generationen F0, F1 und F3 statistisch zum Teil deutlich signifikante Unterschiede, und zwar hinsichtlich einer expositionsbedingten ausnahmslos *geringeren* Futteraufnahme, wenngleich dieser Effekt nicht in allen Generationen gleich stark auftrat. In einer anderen Darstellungsart der Ergebnisse (Abb. 13) sieht man den generellen Trend besser: es ist deutlich zu erkennen, dass der geringere Futtermittelverbrauch bereits bei 0.08 W/kg einsetzt, bei 0.4 W/kg ein Minimum erreicht, und bei 1.3 W/kg wieder in Richtung des Wertes bei Scheinexposition steigt. Besonders deutlich ist dieser Effekt in der letzten Generation F3. Dieser Befund ist insofern hochinteressant, als er sich mit den Hypothesen deckt, die von einer Beeinflussung der metabolischen Umsatzrate durch elektromagnetische Felder ausgehen. Diese Hypothesen sind auch Grundlage des durch das BfS geförderten Projektes FM 8840. Interessant ist weiter, dass der Effekt am stärksten in der F3-Generation zeigt, was auf eine langfristige Anpassung hindeuten könnte.

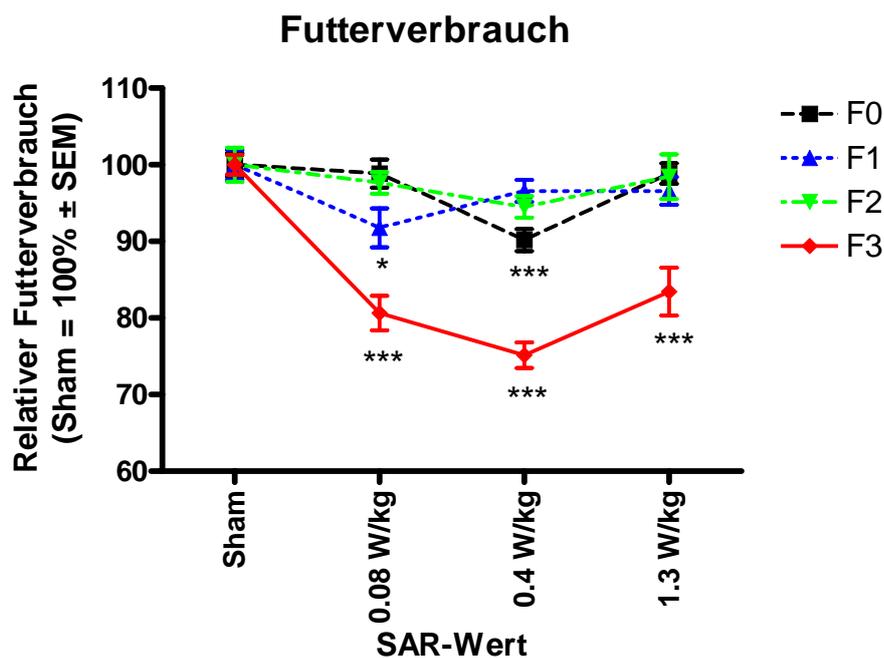


Abb. 13: Futtermittelverbrauch der Versuchstiere in Liniendarstellung. Die Werte für die scheinexponierten Tiere wurden auf 100% normiert. Statistische Symbole wie in Abb. 12.

Die Gewichtszunahme der Weibchen nach der Verpaarung ist in Abb. 14 dargestellt.

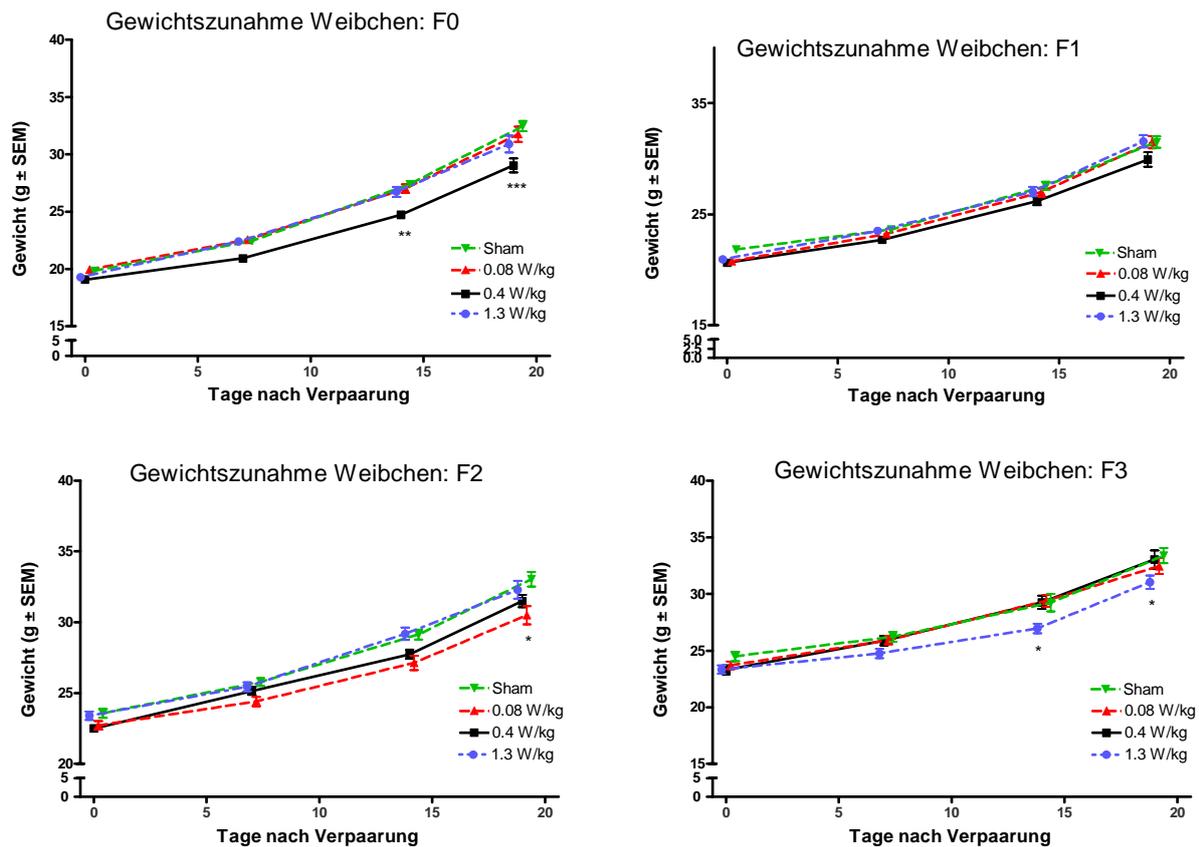


Abb. 14: Gewichtszunahmen der Weibchen im Verlauf der Schwangerschaft. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ gegenüber den scheinexponierten Weibchen der entsprechenden Generation.

Es ist zu erkennen, dass es einige signifikante Unterschiede jeweils im letzten Drittel der Schwangerschaft gibt (Tag 14 und Tag 19), wobei allerdings keine klare Dosis-Wirkungsbeziehung oder Durchgängigkeit zu erkennen sind: in der F0-Generation zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen SAR 0.4 W/kg und Sham, in der F1-Generation keine Unterschiede, in der F2-Generation zwischen SAR 0.08 W/kg und Sham, und in der F3-Generation zwischen SAR 1.3 W/kg und Sham. Insgesamt ist aber zu konstatieren, dass es eine geringfügige Tendenz zu niedrigerer Gewichtszunahme bei exponierten schwangeren Weibchen gibt, die allerdings für sich weder pathologisch ist noch als Indiz für eine Beeinträchtigung der Schwangerschaft gesehen werden kann (s.u.). Vielmehr spricht auch dieser Befund dafür, dass metabolische Prozesse (niedrigere Futteraufnahmen) durch elektromagnetische Felder beeinflusst werden könnten.

Bei den Männchen zeigen sich solche Effekte nicht, mit Ausnahme eines signifikanten Unterschiedes zwischen SAR 0.4 W/kg und Sham in der F1-Generation am Ende des Versuchs (Abb. 15).

Körpergewichte (Männchen)

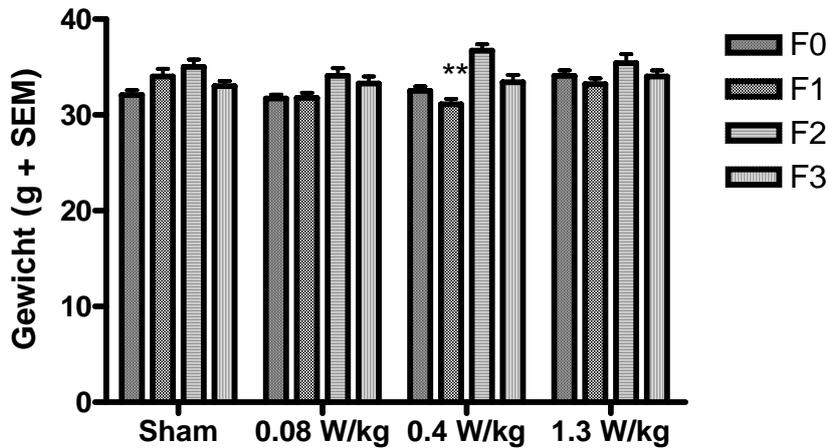


Abb. 15.: Gewicht der Männchen am Ende des Versuchs. ** $p < 0.01$, gegenüber den scheinexponierten Männchen der F1-Generation.

Während des Versuchs zeigten sich hingegen keine statistisch bedeutsamen Unterschiede (Abb. 16), so dass dieser einzelne Unterschied in der F1-Generation als unbedeutend und zufällig gewertet werden kann.

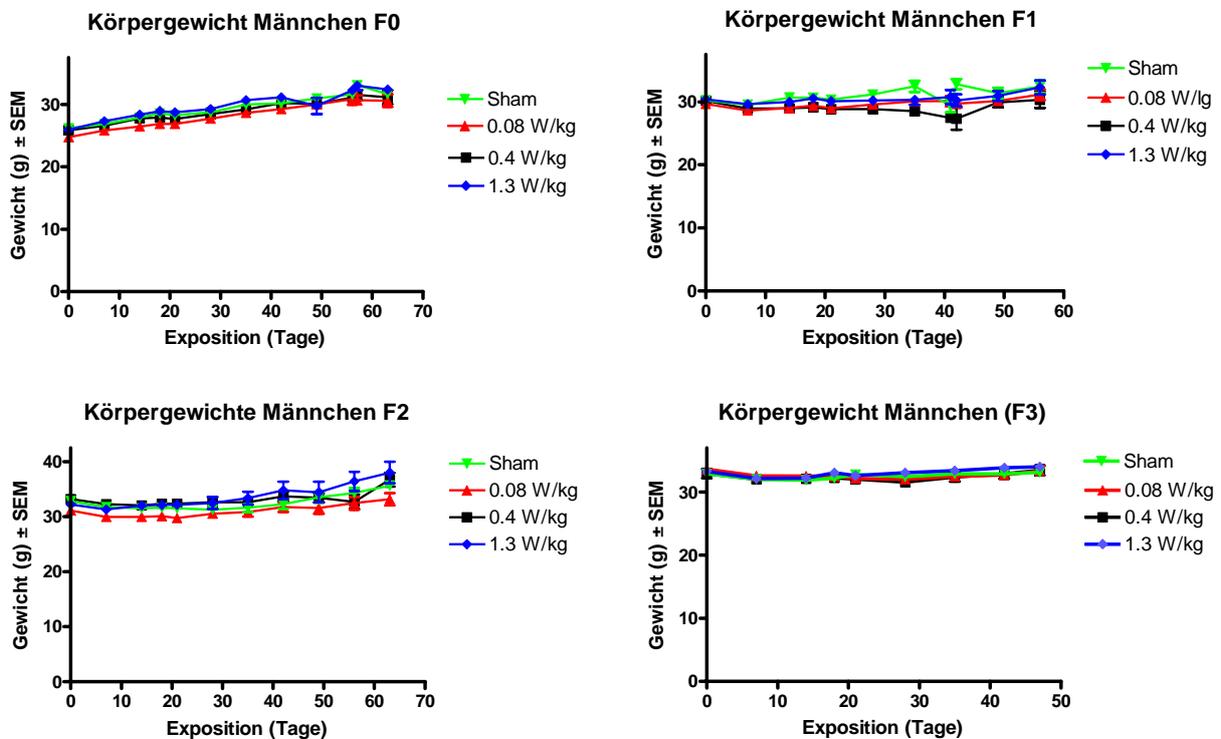


Abb. 16.: Gewichtsverläufe der Männchen.

Insgesamt lassen die bislang beschriebenen Ergebnisse erkennen, dass es Effekte gibt, die auf eine Beeinflussung des Metabolismus bei den Weibchen hindeuten. Sie bedeuten

allerdings nicht, dass die Gesundheit der Tiere beeinflusst wird, sondern weisen – in Übereinstimmung mit der formulierten Hypothese (Projekt FM 8828) – darauf hin, dass die Absorption der Energie von elektromagnetischen Feldern für den Wärmehaushalt der Tiere genutzt werden kann, wodurch geringere Futtermittelaufnahme und/oder veränderte Gewichtszunahmen resultieren.

Die folgenden Ergebnisse beschreiben die Effekte auf die für die Fertilität wichtigen Parameter. Zunächst werden die Männchen betrachtet (Abb. 17-21).

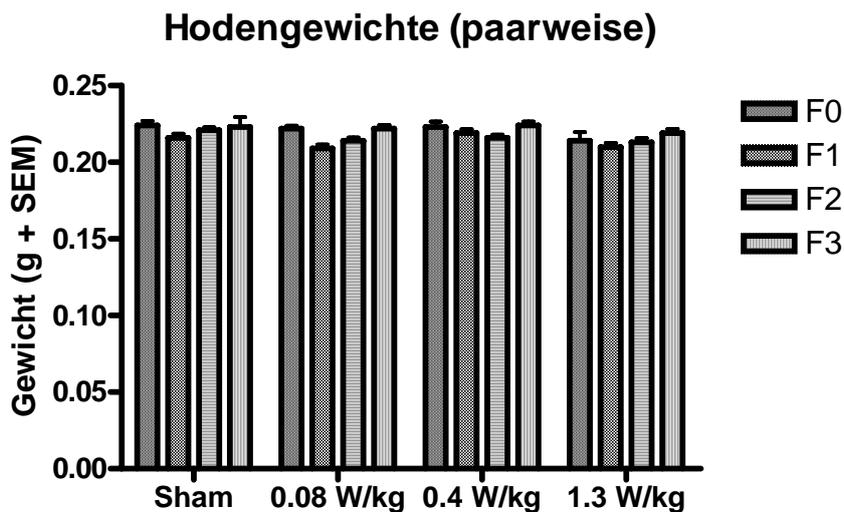


Abb. 17: Hodengewichte. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

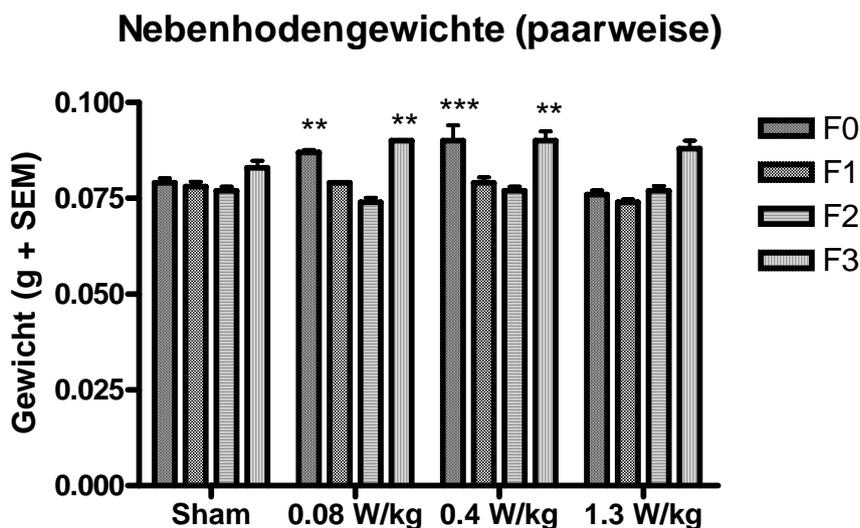


Abb. 18: Nebenhodengewichte. ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ gegenüber den scheinexponierten Tieren der jeweiligen Generation.

Es zeigten sich bei den Hodengewichten keinerlei signifikante Effekte, während die Nebenhodengewichte in der F0- und in der F3-Generation bei SAR 0,08 W/kg und 0,4 W/kg geringfügig, aber signifikant höher waren, verglichen mit den scheinexponierten Männchen. Für diesen Effekt ist aber weder eine Durchgängigkeit zu erkennen, da in der F1- und der F2-Generation keine entsprechenden Effekte beobachtet wurden, noch ist eine klare Dosisabhängigkeit zu erkennen. Daher ist eine Interpretation schwierig. Jedenfalls ist diese Beobachtung nicht als Indikator für einen negativen Effekt zu werten.

Die Gewichte der akzessorischen Drüsen (Prostata, Samenblasen, Koagulationsdrüsen; Abb. 11) sind durch die Exposition nicht beeinflusst worden. Ursprünglich war geplant, die Gewichte jede dieser Drüsen einzeln zu bestimmen. Dies hat sich aber als undurchführbar herausgestellt, da bei der Präparation Flüssigkeit austrat, die die Messergebnisse verfälscht hätte. Stattdessen wurden die Gewichte insgesamt bestimmt.

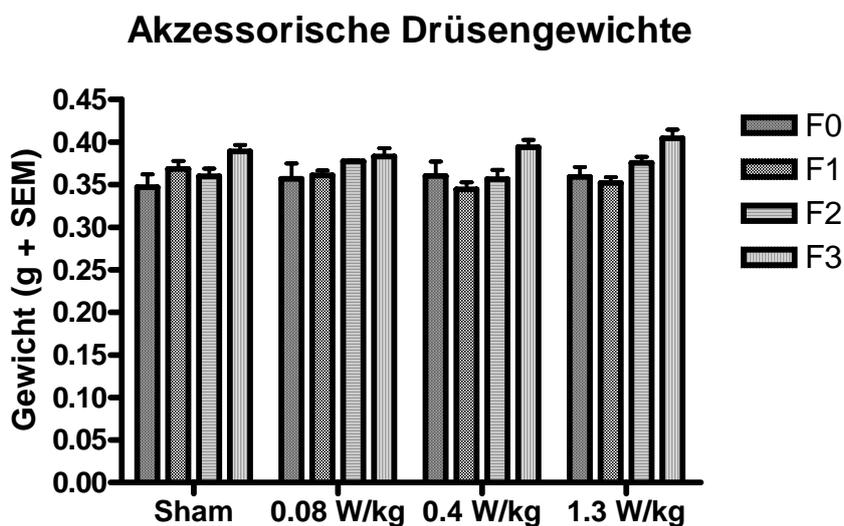


Abb. 19: Gewichte der akzessorischen Drüsen. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

Die Analyse der Anzahl Spermien und fehlgeformter Spermien erbrachte keinen Hinweis auf einen Effekt durch die Exposition (Abb. 20 und 21). Als fehlgeformt wurden Spermien definiert, bei denen sich die Form der Akrosomen (Spermienköpfchen) mikroskopisch deutlich von der Normalform unterschied.

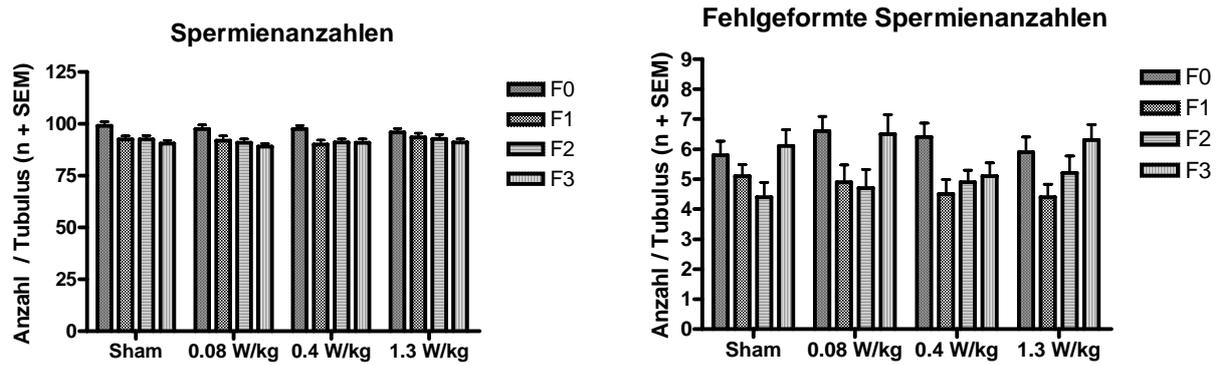


Abb. 20 und 21: Anzahl Spermien und fehlgeformter Spermien in den Tubuli der Hoden. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

Die folgenden Ergebnisse beschreiben die Effekte auf diejenigen Weibchen, die kurz vor Ende der Schwangerschaft schmerzfrei getötet wurden, um die Fertilitätsparameter vor der Geburt zu untersuchen. Das Uterusgewicht wurde durch die Exposition nicht beeinflusst, es sind aber markante Unterschiede zwischen den Generationen zu beobachten. Für diesen Effekt ist ein Artefakt verantwortlich: am Ende des Gesamtversuchs wurden alle Weibchen der F3-Generation getötet, während für die vorangehenden Generationen nur jeweils dasjenige Weibchen pro Käfig getötet wurde, was schwerer war als das andere. Diese Vorgehensweise sollte sicherstellen, dass für die Feststellung der Fertilitätsparameter vor Ende der Schwangerschaft die Weibchen herangezogen wurden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit schwanger waren und vermutlich eher schwanger wurden als die jeweils leichteren Weibchen. Daher wurden bei der Tötung der F3-Weibchen auch die Parameter derjenigen Weibchen mit untersucht, die später schwanger wurden und bei denen die Schwangerschaft noch nicht so weit vorangeschritten war, was sich im geringeren Uterusgewicht und geringerem Gewicht der Föten bemerkbar machte.

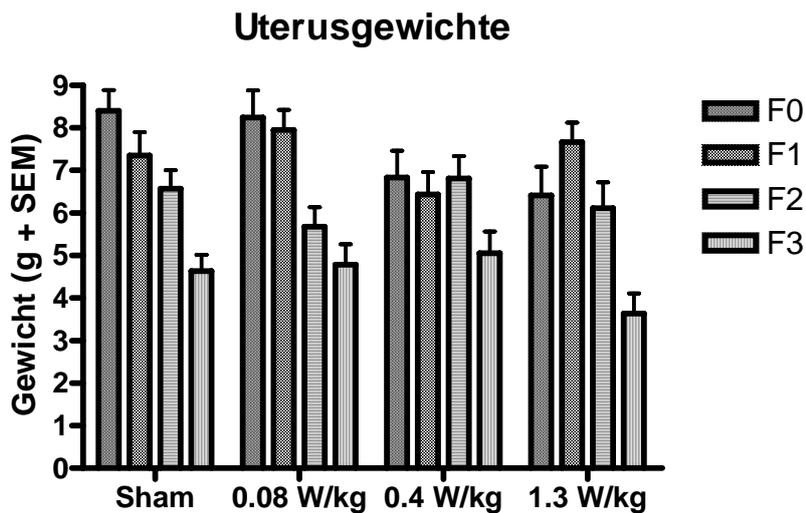


Abb. 22: Gewichte der Uteri. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

Die Anzahl Gelbkörper waren ebenfalls nicht durch die Exposition beeinflusst (Abb. 23).

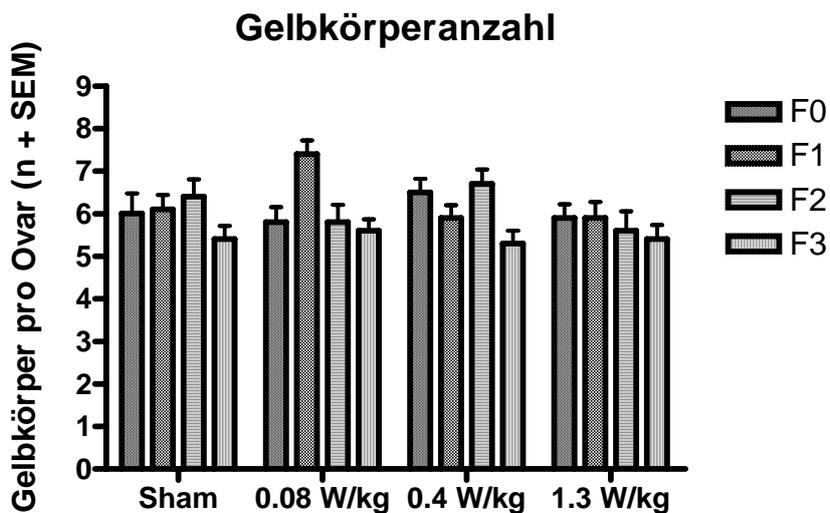


Abb. 23: Anzahl Gelbkörper in den Ovarien. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

Die festgestellte Anzahl von Resorptionen war gleichfalls, bis auf einen schwach signifikanten Unterschied bei SAR 0,4 W/kg in der F0-Generation, durch die Exposition nicht beeinflusst (Abb. 24).

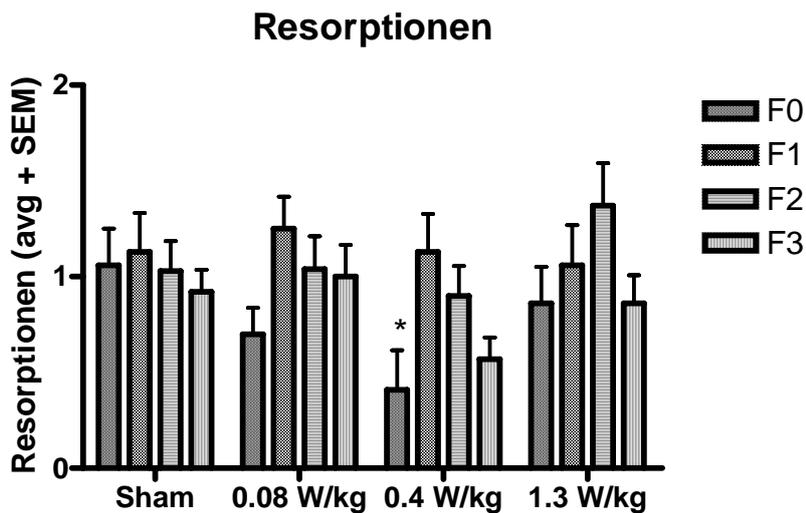


Abb. 24: Anzahl Resorptionen. * $p < 0.05$ gegenüber Scheinexposition (F0).

Einer der wichtigsten Parameter hinsichtlich der möglichen Auswirkungen auf die Fertilität, die Anzahl der normal entwickelten Föten vor Ende der Schwangerschaft, war durch die Exposition unbeeinflusst (Abb. 25). Als Parameter, der nicht durch nach der Schwangerschaft auftretende Effekte (z.B. unterschiedliche Infantizidraten) beeinflusst ist, hätte er mögliche Auswirkungen auf die Fertilität am ehesten anzeigen müssen.

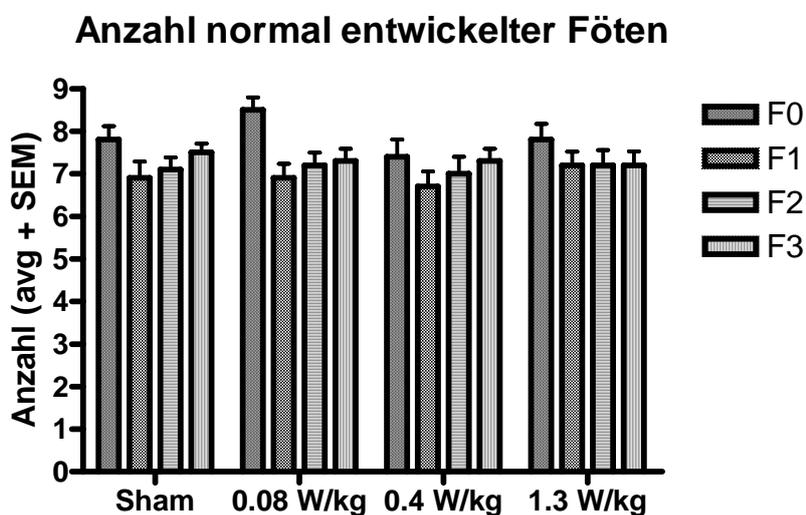


Abb. 25: Anzahl normal entwickelter Föten in den Uteri schwangerer Weibchen. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

Auch die Gewichte der Föten waren durch die Exposition nicht beeinflusst worden (Abb. 26). Der einzige statistisch signifikante Unterschied fand sich in den Föten der Weibchen der F3-Generation bei 0.4 W/kg, die etwas schwerer waren als die Föten der scheinexponierten Tiere dieser Generation. Insgesamt ist aber auch für diesen Parameter

nicht von einem gesundheitlich relevanten Effekt der Exposition auszugehen. Der Trend zu geringeren Gewichten bei den Föten in der F3-Generation im Vergleich mit den Generationen F0-F2 ist auf das oben beschriebene Artefakt zurückzuführen.

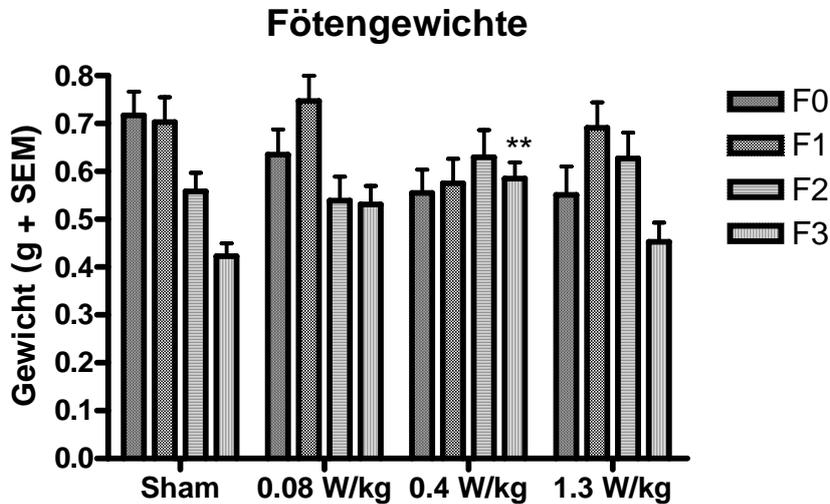


Abb. 26: Gewichte der Föten. ** p < 0.01 gegenüber Scheinexposition (F3).

Bei der Betrachtung der Position der Föten in den Uteri fiel zunächst auf, dass es eine hochsignifikante Ungleichverteilung zwischen der Anzahl Föten im rechten und linken Teil des Uterus gibt, da im Mittel ca. 50% mehr Föten im rechten Teil gefunden wurden. Die Exposition hatte allerdings keinen Einfluss auf diesen Parameter (Abb. 27).

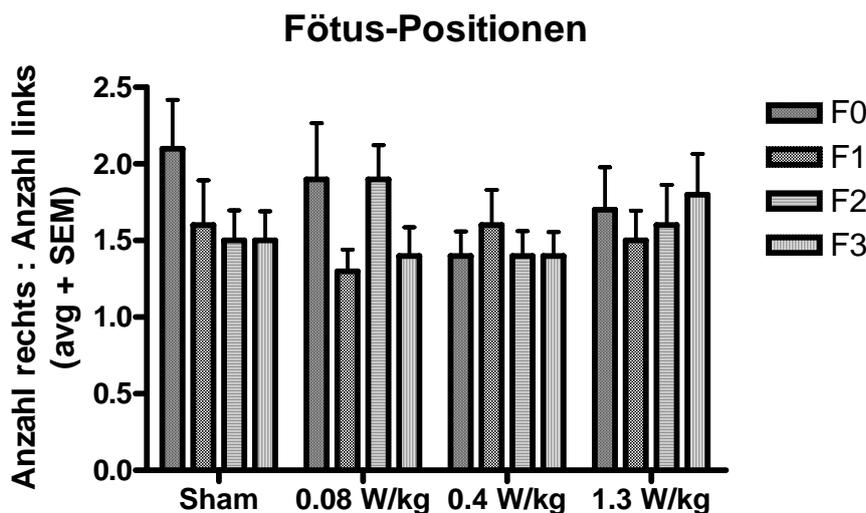


Abb. 27: Position der Föten (Anzahl rechts / Anzahl links). Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

Schließlich wurde die Anzahl der Föten mit äußerlich sichtbaren Missbildungen (hauptsächlich missgebildete oder fehlende Iris, selten fehlende Gliedmaßen) ermittelt (Abb. 28). Wegen der geringen Rate der Missbildungen wurden die Daten zusammengefasst (Gesamtanzahl pro Generation und SAR-Wert). Zwar konnten hier bei den Föten der F0-Generation signifikant häufigere Missbildungen festgestellt werden, dieser Befund tritt aber nur bei der ersten Generation und auch nicht bei 0.4 W/kg auf, so dass von keinem über die Generationen durchgehenden und auch nicht von einem dosisabhängigen Effekt ausgegangen werden kann. Zudem sind die Signifikanzen auf die ungewöhnlich niedrigen Missbildungsraten in der Kontrollgruppe zurückzuführen, die ansonsten gerade in diesem Mäusestamm vergleichsweise hoch sind (Smith et al., 1994).

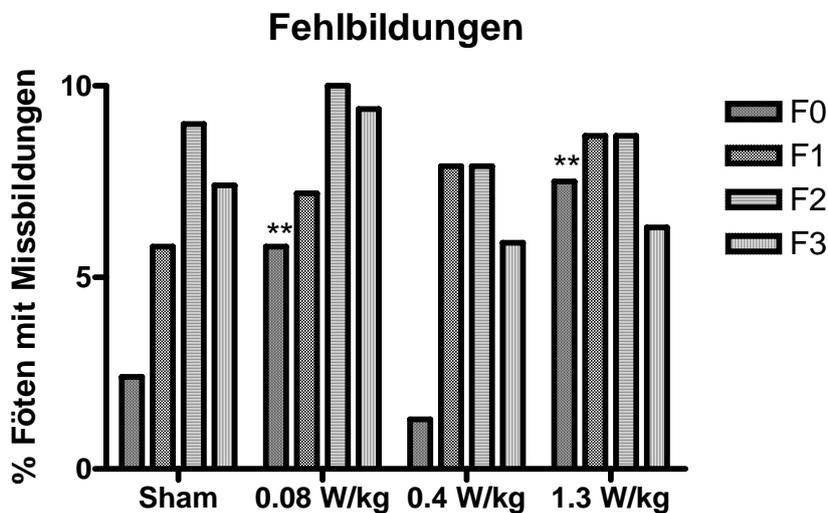


Abb. 28: Anteil missgebildeter Föten. In der F0-Generation konnten signifikante Unterschiede bei 0.08 und 1.3 W/kg gegenüber sham festgestellt werden, die allerdings durch die ungewöhnlich geringen Werte der nicht exponierten Tiere verursacht wurden. ** $p < 0.01$ (χ^2 -Test).

Insgesamt lassen die Ergebnisse der Untersuchungen der schwangeren Weibchen und der Föten keine Beeinträchtigungen der Fertilität erkennen, und es konnten auch keine durchgehenden und dosisabhängigen Effekte auf die Missbildungsraten festgestellt werden. Hinsichtlich der Fragestellung, ob elektromagnetische Felder der Mobilfunktechnologie negative Auswirkungen auf die Fertilität haben, kommt diesen Ergebnissen entscheidende Bedeutung zu, da es auch über mehrere Generationen unter dem Einfluss von Feldern nicht zu einer Schädigung kommt, selbst bei einem SAR-Wert von 1,3 W/kg, dem die Tiere ab dem Zeitpunkt der Konzeption konstant ausgesetzt waren.

Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf die Weibchen, die die Schwangerschaft beendeten. Da der vierte Wurf (Nachkommen der F3-Generation) nicht erfasst wurde,

sondern die entsprechenden Weibchen vorher getötet wurden, sind in den Abbildungen nur die Ergebnisse von 3 Generationen aufgeführt. Da die Überlebensraten der Jungtiere beim ersten Wurf jeweils nur bei etwa 30% lagen, wurde ein zweiter Wurf abgewartet, bei dem die Überlebensraten mit ca. 70% deutlich besser waren und die Rekrutierung der Tiere für die nächste Generation ermöglichte. Für beide Überlebensraten spielte die Exposition keine Rolle. Die folgenden Daten beziehen sich nur auf die zweiten Würfe.

Die Wurfgröße (Abb. 29) unterschied sich nicht als Folge der Exposition. Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist, dass sich die Anzahl geborener Jungtiere kaum von der Anzahl Föten unterschied (Abb. 25), was einerseits den Versuchsansatz bestätigte und andererseits zeigt, dass es offenbar zu keinen nennenswerten Verlusten unmittelbar nach der Geburt kam.

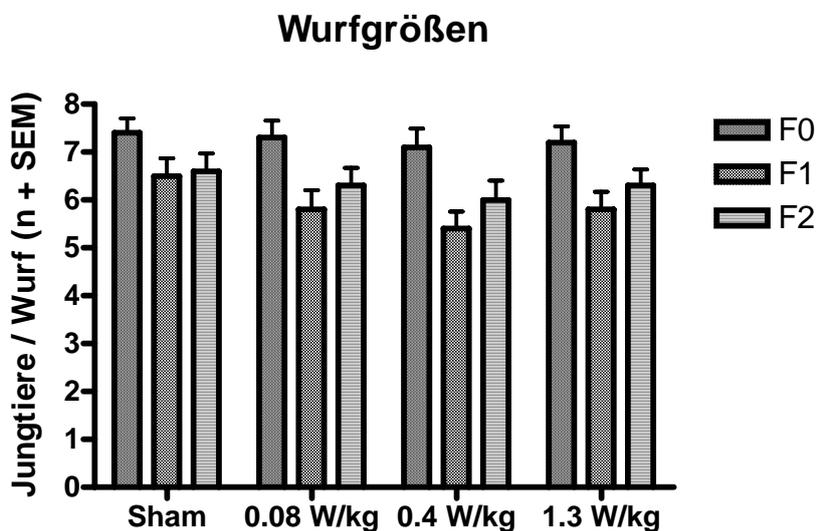


Abb. 29: Wurfgrößen. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

Das Geburtsgewicht war ebenfalls nicht von der Exposition abhängig (Abb. 30). Das Gewicht der Jungtiere war jedoch erwartungsgemäß wesentlich höher als das der Föten (Abb. 26), da es in den letzten Tagen der Schwangerschaft bekanntermaßen stark steigt.

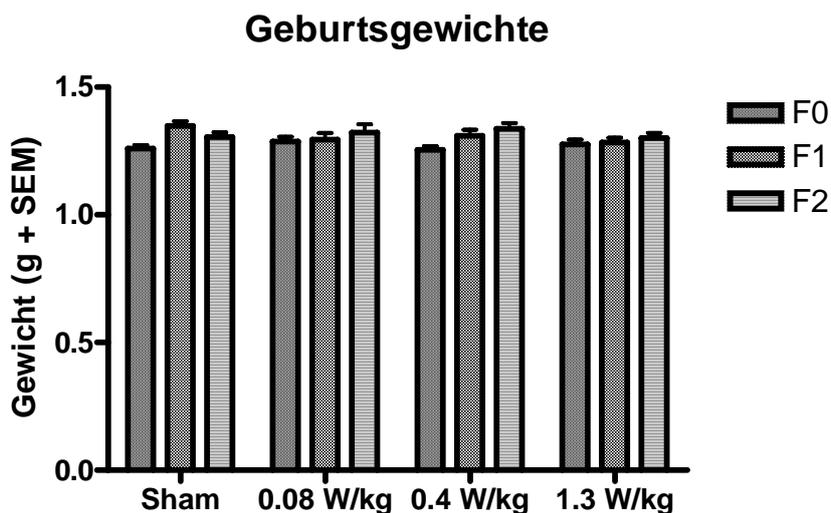


Abb. 30: Geburtsgewichte, spätestens einen Tag nach der Geburt ermittelt. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

Die weitere Entwicklung der Gewichte der Jungtiere ist in den Abbildungen 31 – 33 dargestellt. Es konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, so dass in dieser Phase der Entwicklung keine (wie bei den adulten schwangeren Weibchen beobachteten) Wirkungen der Exposition festzustellen waren.

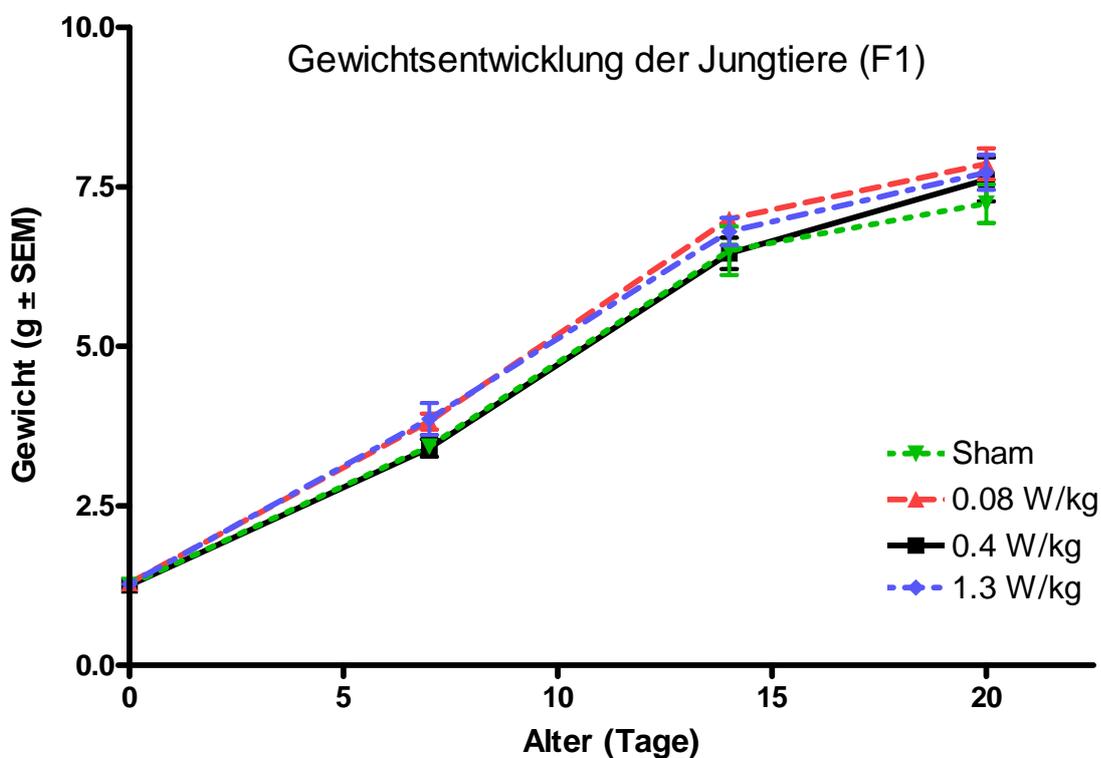


Abb. 31: Entwicklung der Gewichte der Jungtiere der F0-Generation. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

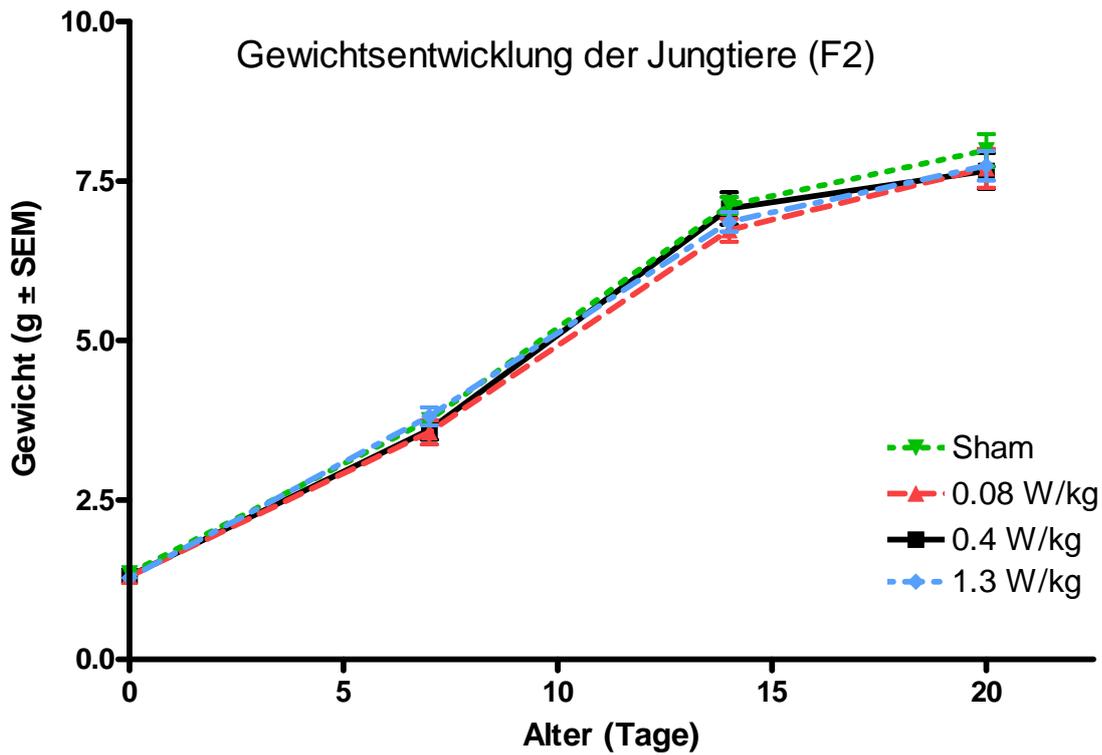


Abb. 32: Entwicklung der Gewichte der Jungtiere der F1-Generation. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

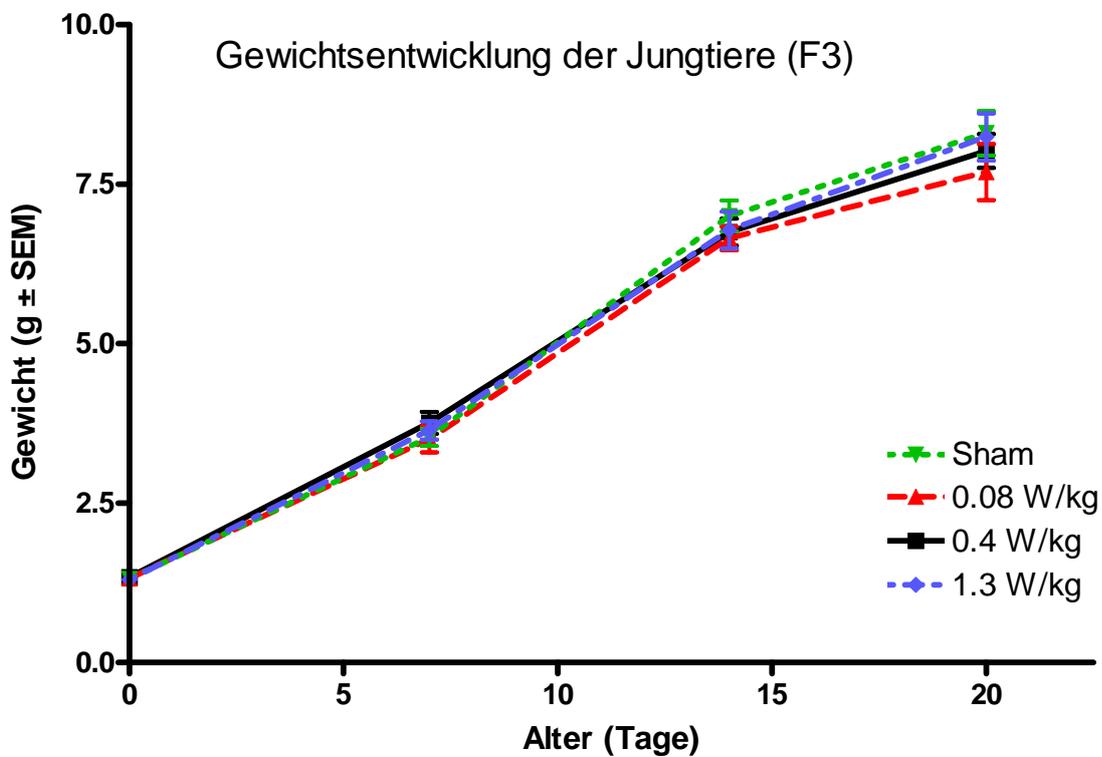


Abb. 33: Entwicklung der Gewichte der Jungtiere der F2-Generation. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

Abschließend sind die Ergebnisse der Parameter aufgeführt, die die Entwicklung der Föten anhand der Parameter Zeitpunkt der Augenöffnung und Umdrehreflex charakterisieren. Während der erstgenannte Parameter durch tägliche visuelle Inspektion ermittelt wurde, wurde der Umdrehreflex an einem bestimmten Tag nach der Geburt durchgeführt, um die Versuchsbedingungen altersmäßig zu standardisieren.

Der Zeitpunkt der Augenöffnung (Abb. 34) ist erwartungsgemäß sehr wenig variabel. Etwa 2 Wochen nach der Geburt haben alle Tiere die Augen geöffnet. Eine Beeinflussung durch die Exposition konnte nicht festgestellt werden. Der Umdrehreflex ist als Verhaltenstest hingegen wesentlich variabler, und auch hier konnte kein signifikanter Effekt der Exposition nachgewiesen werden (Abb. 35).

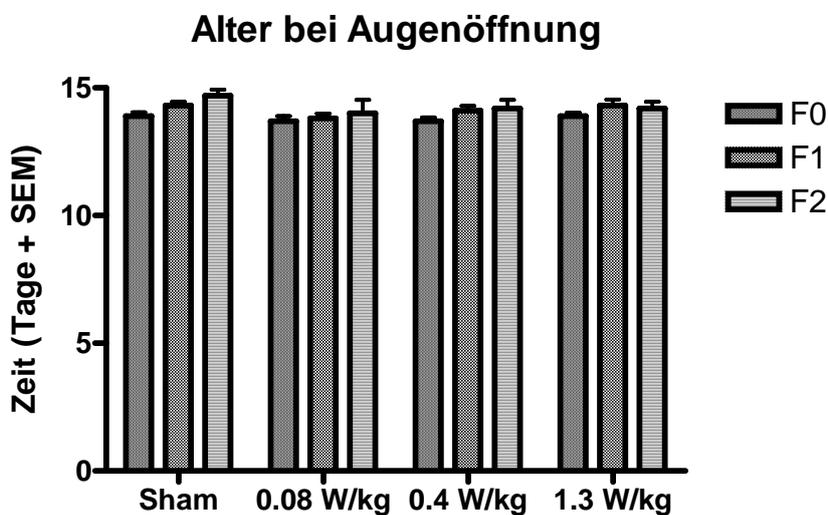


Abb. 34: Analyse des Zeitpunkts der Augenöffnung. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

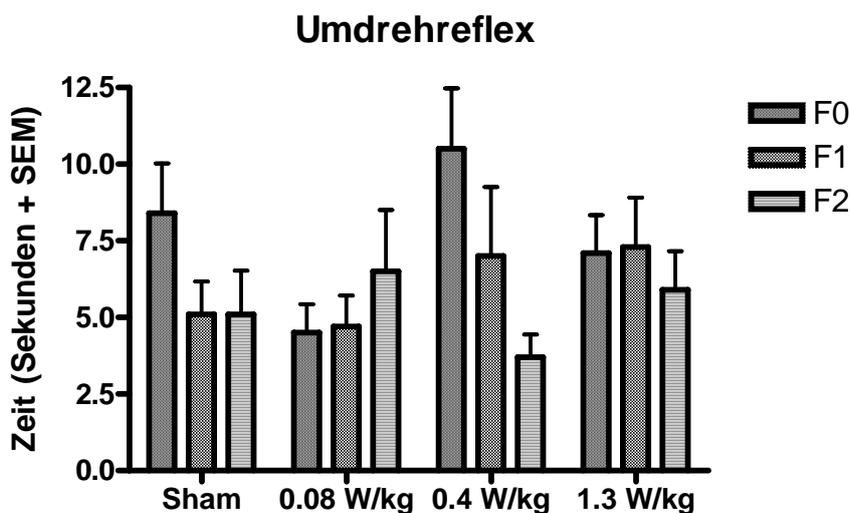


Abb. 35: Analyse des Umkehrreflexes. Die Tiere wurden im Alter von 7 Tagen auf den Rücken gedreht und die Zeit ermittelt, bis sie mit allen Extremitäten den Boden berührten. Es konnten keine expositionsbedingten statistischen Unterschiede festgestellt werden.

5. Literatur

(nur die im Abschlussbericht aufgeführten Zitate; eine ausführliche Literaturstudie ist als Anhang beigefügt)

- Bitz, A., Streckert, J., Reinhardt, T., Hansen, V., Buschmann, J.: Exposure setup for UMTS two-generation study with up to thousand rats. 25th BEMS Annual Meeting, Maui, Hawaii, p. 44, June 2003.
- Gabriel, C.: Compilation of the dielectric properties of body tissues at rf microwave frequencies / Brooks Air Force. Version: 1996.
<http://niremf.ifac.cnr.it/docs/DIELECTRIC/Report.html> (AL/OETR-1996-0037).
- Glasmachers, A., Streckert, J., Gencol, S., Rozic, D., Ndoumbè Mbonjo Mbonjo, H., Bitz, A., Hansen, V.: UMTS signal source for RF bioelectromagnetic studies. 24th BEMS Annual Meeting, Québec, Canada, pp. 63-64, June 2002.
- Hansen, V.: Das elektromagnetische Feld in trichterförmigen Wellenleitungen verschiedener Form und Wandimpedanz und das Strahlungsverhalten entsprechender Hornstrahler. Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 1975.
- Lerchl A, Sotiriadou S, Behre HM, Pierce J, Weinbauer GF, Kliesch S, Nieschlag E. Restoration of spermatogenesis by follicle-stimulating hormone despite low intratesticular testosterone in photoinhibited hypogonadotropic Djungarian hamsters (*Phodopus sungorus*). *Biol Reprod* 49: 1108-1116, 1993.
- Ndoumbè Mbonjo Mbonjo, H., Streckert, J., Bitz, A., Hansen, V., Glasmachers, A., Gencol, S., Rozic, D.: A generic UMTS test signal for RF bio-electromagnetic studies. *Bioelectromagnetics*, Vol. 21, No. 6, pp. 415-425, 2004.
- Reinhardt, T., Bitz, A., Streckert, J., Hansen, V., Buschmann, J.: Two generation rf experiment with non-restrained rats of various body mass: dosimetric analysis using high resolution models. 26th BEMS Annual Meeting, Washington, DC, p. 30, June 2004.
- Smith RS, Roderick TH, Sundberg JP. Microphthalmia and associated abnormalities in inbred black mice. *Lab Anim Sci*. 44: 551-560, 1994.
- Streckert, J., Bitz, A., Hansen, V., Buschmann, J.: High SAR exposure of 24 rats at 900 MHz: problems of temperature limits and uniform field distribution, Millenium Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Heraklion, Greece, pp. 185-195, October 2000.
- Taflove, A., Hagness, S.: *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Third Edition, Artech House Publishers, London, 2005.

Anhang: Literaturstudie

Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf Fortpflanzung und Entwicklung von Labornagern

Stand: Februar 2006

A. M. Sommer & A. Lerchl

School of Engineering and Science, International University Bremen, D-28759 Bremen

Hintergrund

Um den Anspruch der heutigen Gesellschaft auf eine uneingeschränkte, flächendeckende und schnelle Datenübertragung in Zukunft besser verwirklichen zu können, wird zurzeit ein Netz eines neuen, leistungsfähigeren Mobilfunksystems aufgebaut, des UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Die Sendecharakteristik des UMTS unterscheidet sich deutlich vom bisherigen GSM-Standard (Global System for Mobile communications, Ndoumbè Mbonjo Mbonjo et al. 2004).

Die UMTS-Spezifikation sieht zwei unterschiedliche Modulationsverfahren vor, die sich auch in den genutzten Frequenzbereichen unterscheiden. Das Modulationsverfahren für FDD (frequency division duplex) verwendet die Frequenzbereiche 1,92 bis 1,98 GHz und 2,11 bis 2,17 GHz, um gleichzeitig Informationen von der Basisstation („down link“) und vom Benutzer („up link“) zu übertragen. TDD (time division duplex) verwendet die Frequenz-bereiche 1,9 bis 1,92 GHz und 2,01 bis 2,025. Hierbei werden die Informationen der Basisstation und vom Endgerät auf den

gleichen Frequenzen, aber zu unterschiedlichen Zeiten übertragen, so dass eine gepulste Signalstruktur entsteht. Anders als beim GSM werden Daten unterschiedlicher Teilnehmer, die simultan Informationen zur Basisstation senden, nicht durch eine weitere Zeitspreizung separiert. Stattdessen werden verschiedene Teilnehmersignale durch unterschiedliche Feinstrukturen der Sendesignale unterschieden. Das hierfür verwendete Verfahren ist das CDMA (Code Division Multiple Access, Codemultiplex). Eine Zusammenfassung der technischen Details und Unterschiede zum GSM findet sich bei Steiner (2000).

Wegen der zunehmenden Verbreitung der UMTS-Technologie wird die Bevölkerung zusätzlich zu anderen hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (z. B. anderer Mobilfunksysteme, kabelloser Internetzugänge (WLAN), oder durch TV und Radio) in Zukunft auch Feldern des UMTS chronisch ausgesetzt sein. Untersuchungen zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen von elektromagnetischen Feldern des UMTS liegen jedoch kaum vor. Daher werden diese zurzeit in verschiedenen Studien untersucht. Unter anderem beschäftigt sich eine vom Bundesamt für Strahlenschutz geförderte Langzeitstudie mit dem Einfluss von UMTS-Signalen auf die Reproduktion und Entwicklung von Labornagern. Die vorliegende Literaturstudie fasst bereits veröffentlichte Untersuchungsergebnisse zum Thema Reproduktion und Entwicklung zusammen (siehe auch die Reviews von Heynick and Polson 1996, IEGMP 2000, Thalau 2002, Heynick und Merritt 2003). Es ist jedoch zu bedenken, dass aufgrund der unterschiedlichen Sendecharakteristik bisherige Studien über elektromagnetische Felder nur bedingt auf das UMTS zu übertragen sind.

Fertilität

Verschiedene ältere Studien beschäftigten sich mit dem Einfluss von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf die männliche Fertilität von Kleinsäugetieren (siehe Review UNEP/IRPA/WHO 1993). Es zeigte sich beispielsweise, dass kontinuierliche Befeldung mit 2,45 GHz zu einer verminderten Anzahl von primären Spermatozyten und Spermatisiden in betäubten Mäusen führte (Saunders und Kowalczyk 1981). In wachen Mäusen konnten dagegen keine

Veränderungen auf die männliche Fertilität beobachtet werden (Saunders et al. 1988). Das Feld beeinflusste weder die Spermienzahl noch -morphologie (Cairnie und Harding 1981). Es ist bekannt, dass in verschiedensten Säugetieren die Temperatur im Hoden die Entwicklung von Spermien beeinflusst. Die vorliegenden Studien deuten darauf hin, dass in betäubten Mäusen die Temperaturregulation der Hoden, die normalerweise ca. 2 °C unterhalb der normalen Körpertemperatur gehalten werden, gestört ist. Daher konnte es bei hoher Bestrahlungsintensität (SAR: ≥ 30 W/kg) zu einer schädlich hohen Temperatur im Hoden von betäubten Mäusen kommen (Saunders und Kowalczyk 1981). Dieser Effekt wurde bei wachen Tieren dagegen nicht beobachtet.

Der Zusammenhang zwischen Betäubung, Befeldung und Hodentemperatur wurde durch Studien mit Laborratten bestätigt. Bestrahlung mit gepulsten 1,3 GHz-elektromagnetischen Feldern führte in betäubten Ratten zu einer Verminderung der Anzahl primärer Spermatozyten und Spermatisiden, wobei der Schwellenwert für die schädigende Temperatur mit 39-41 °C angegeben wurde (Lebovitz et al. 1987). Studien der selben Arbeitsgruppe an nicht-anästhetisierten Tieren konnten dagegen keinen Zusammenhang zwischen elektro-magnetischen Feldern (1,3 GHz, gepulst oder kontinuierlich) und männlicher Fertilität herstellen (Lebovitz und Johnson 1983, Johnson et al. 1984, Lebovitz und Johnson 1987).

Dasdag et al. (1999) setzten Ratten elektromagnetischen Feldern aus, die direkt von einem Mobiltelefon ausgingen (2 Stunden am Tag, 1 Monat lang, SAR: 0,141 W/kg), entweder im Standby oder im Sprechmodus, und verglichen diese mit schein-exponierten Tieren. Gewebsveränderungen im Hoden wurden nur bei Tieren im Sprechmodus gefunden, bei denen auch die Rektaltemperatur erhöht war. Die Erhöhung der Rektaltemperatur überraschte die Autoren, da sich Bestrahlungen mit SAR-Werten von unter 1 W/kg bisher als nicht-thermisch zeigten. Sie vermuteten daher, dass die Bestrahlung mit einem unspezifischen Stress einher ging, der sich in der Temperaturerhöhung zeigte und Gewebsveränderungen nach sich zog. Nicht angegeben wurde in der Veröffentlichung, ob der Schallpegel in allen Gruppen gleich war. Daher ist nicht auszuschließen, dass in der Gruppe, die dem Telefon im Sprechmodus ausgesetzt war, akustische

Reize die beobachteten Veränderungen hervor gerufen haben. In einer späteren Studie der Arbeitsgruppe, in der Kontrollratten mit dem gleichen Tonband beschallt wurden, wie Tiere, die Telefonen im Sprachmodus ausgesetzt waren, wurden keine statistisch signifikanten Veränderungen der Spermienzahl oder Hodenmorphologie und –histologie beobachtet (Dasdag et al. 2003). Des weiteren wiesen die Autoren daraufhin, dass Ratten wegen wichtiger morphologischer Unterschiede ein schlechtes Model für menschliche Hoden sein. Eine Extrapolation der Daten auf einen möglichen Einfluss bei Männern kann daher nur mit allergrößter Vorsicht erfolgen.

Ozguner et al. (2005) setzten 10 männliche Sprague-Dawley Ratten (270-320 g Körpergewicht) für 30 Minuten täglich, 5 Tage die Woche, 4 Wochen lang 900 MHz-elektromagnetischen Feldern aus und untersuchten anschließend die Hoden morphologisch und histologisch. Zusätzlich wurde Serum auf den Gehalt an Testosteron, luteinisierenden Hormons (LH) und follikelstimulierenden Hormons (FSH) hin untersucht. Es traten geringe morphologische Veränderungen in befeldeten verglichen mit schein-befeldeten Ratten auf. Diese ließen aber nicht auf einen negativen Einfluss des Feldes auf die Spermatogenese schließen. Die Autoren vermuteten, dass die verminderte Testosteron-Konzentration in den befeldeten Tieren die morphologischen Veränderungen verursacht haben könnte.

Eine neuere Studie von Aitken et al. (2005) wurden 17 Mäuse 7 Tage lang, 12 Stunden am Tag, 900 MHz-elektromagnetischen Feldern (SAR-Wert: 0,09 W/kg) ausgesetzt. Die Autoren beobachteten zwar einen signifikanten genotoxischen Effekt auf Spermatozoen, jedoch keinen Effekt auf die Anzahl, Morphologie oder Vitalität von Spermien.

Teratogenität

Viele an der Fortpflanzung beteiligte Prozesse sind sensitiv gegenüber schädlichen Einflüssen. Sowohl die Meiose (die sogenannte Reduktionsteilung von Zellen zur Spermien- und Eiproduktion), als auch die Befruchtung und Einnistung des Embryos kann durch toxische

Substanzen gestört werden. Die hohe Zellteilungsrate und Zelldifferenzierung während der Entwicklung des Embryos und Fötus machen diese empfindlich gegenüber schädlichen Einflüssen. Es ist daher auch nicht verwunderlich, dass manche Drogen oder Umweltgifte Embryos und Föten in Dosen schädigen können, die für Erwachsene unschädlich sind. Vor diesem Hintergrund wurden verschiedene Studien zum Einfluss von hoch-frequenten elektromagnetischen Feldern auf die Entwicklung von Tieren durchgeführt. Es sollte damit untersucht werden, ob solche Felder einen teratogenen Effekt auf Embryos oder Föten haben können. Die Teratologie beschäftigt sich genau genommen nur mit Missbildung-en. In der vorliegenden Zusammenstellung haben wir jedoch der Vollständigkeit halber auch solche Untersuchungen mit eingeschlossen, die sich mit Schäden beschäftigen, die so gravierend sind, dass es nicht einmal zu einer Einnistung oder zu einer späteren Resorption des Embryos oder Fötusses kommt.

Mäuse

Schon 1975 wurden schwangere Mäuse 2,45 GHz-elektromagnetischen Feldern (sinusoidal moduliert) ausgesetzt, um zu untersuchen, ob diese Felder einen negativen Einfluss auf die Nachkommen haben könnten (Chernovetz et al. 1975). Auch wenn ein Anstieg der rektalen Temperatur bei den Müttern aufgrund der täglich 10-minütigen Bestrahlung beobachtet wurde, war die Mortalitäts- oder Morbiditätsrate bei den Nachkommen unverändert. Auch zeigten die bestrahlten gegenüber den schein-bestrahlten Nachkommen kein unterschiedliches Verhalten im Labyrinth.

Bestrahlung mit 2,45 GHz von CD-1 Mäusen während der 2. Hälfte der Trächtigkeit führte zu Missbildungen bei den Nachkommen ab einer Bestrahlungsintensität von 30 mW/cm^2 (Nawrot et al. 1981). Die Körpertemperatur stieg bei solch einer Intensität; allerdings hatte ein Temperaturanstieg alleine nicht die gleiche negative Wirkung. Die Autoren beschrieben auch das Auftreten von Entwicklungsstörungen bei Bestrahlung während der 1. Schwangerschaftshälfte.

Dabei wurden aber Tiere verglichen, die nicht gleich behandelt wurden („irradiated handled“ versus „sham irradiated nonhandled“), wobei die Autoren selber in ihrer Arbeit feststellten, dass das Handling einen signifikanten Einfluss auf die Fortpflanzung der Tiere hatte. Keine signifikanten Unterschiede zeigten sich dagegen in der Entwicklung von schein-exponierten und exponierten Tieren, die ansonsten gleich behandelt wurden. Ein signifikanter Unterschied in der Entwicklung von Mäusen, die während der 1. Schwangerschaftshälfte intrauterin bestrahlt bzw. schein-bestrahlt wurden, zeigte sich dagegen in einer Folgestudie (Nawrot et al. 1985). Allerdings war der Prozentsatz erfolgreicher Schwangerschaften der schein-bestrahlten Tiere sehr hoch, auch höher als bei den Kontrollen und in der ersten Studie, wohingegen die bestrahlten Tiere vergleichbare Werte in beiden Studien zeigten. Dies lässt die Frage aufkommen, ob tatsächlich ein Effekt des Feldes beobachtet wurde, oder ob in der Folgestudie ein zufällig hoher Vergleichswert einen Effekt vortäuschte. Die in der 1. Studie beobachtete erhöhte Missbildungsrate bei Bestrahlung in der 2. Schwangerschaftshälfte konnte nicht reproduziert werden. Insgesamt betrachtet bieten diese beiden Studien daher keinen Beleg für einen negativen Einfluss des Feldes auf die Fortpflanzung von CD-1 Mäusen. Beide Studien zeigten jedoch einen deutlichen Einfluss des Handlings auf den Fortpflanzungserfolg.

Berman et al. (1982) setzten CD-1 Mäuse 100 Minuten pro Tag intrauterin 2,45 GHz-elektromagnetischen Feldern aus und beobachteten in bestrahlten Tieren ein vermindertes fetales Gewicht und später einsetzende Verknöcherung des Skelettes. Der Gewichtsunterschied war auch 7 Tage nach der Geburt noch nicht ausgeglichen. Die Schwangerschafts- und Resorptionsrate sowie die Nachkommenzahl war dagegen unbeeinflusst vom Feld. In einer Folgestudie mit 0 oder 28 mW/cm²-Bestrahlung wogen nur die einen Tag alten bestrahlten Tiere weniger als die unbestrahlten. Am 5. Tag war kein Unterschied mehr zu beobachten, doch wiesen die bestrahlten Tiere auch noch nach 17 Tagen ein vermindertes Gehirngewicht auf (Berman et al. 1984). Die Autoren deuteten darauf hin, dass der Ganzkörper SAR-Wert von 16,5 W/kg in dieser Studie die Mäuse hitzestress haben könnte, wodurch es zu dem verminderten Gehirngewicht hat kommen können.

Inouye et al. (1982) untersuchten den Einfluss von elektromagnetischen Feldern auf die Entwicklung von Embryonen. Dazu exponierten sie CD-1 Mäuse mit 2,45 GHz-Feldern (0, 9 oder 19 mW/cm², für jeweils 3 Stunden) 2 und 3 Tage nach der Befruchtung. Eine weitere Gruppe von Mäusen wurde in einem Raum mit 38 °C am 2. Tag nach der Befruchtung für 3 Stunden Hitzestress ausgesetzt. Die Körpertemperatur der Mäuse stieg bei einer Befeldung mit 19 mW/cm² um 1 °C und um mindestens 2 °C in den Tieren im 38 °C-Raum. Am 4. Tag wurden die Embryonen gezählt und auf Missbildungen hin untersucht. Zwischen den befeldeten und den scheinbefeldeten Tieren traten keine signifikanten Unterschiede in der Entwicklung oder der Missbildungsrate auf. Die Wärmebehandlung führte dagegen zu einer deutlich verminderten Entwicklung der Embryonen.

Schwangere Swiss Mäuse wurden in einer Studie von Chazan et al. (1983) 2,45 GHz-elektromagnetischen Feldern 2 Stunden pro Tag, 7 Tage die Woche ausgesetzt. Die Bestrahlungsintensität lag bei 10 („nicht-thermisch“), bzw. 40 („thermisch“) mW/cm². Bestrahlung mit 40 mW/cm² führte zu einer signifikant verminderten embryonalen und fetalen Entwicklung sowie zu einer vermehrten Resorption und Mortalität der Föten. Auch zeigten Nachkommen der während der gesamten Schwangerschaft mit 40 mW/cm²-exponierten Weibchen eine verminderte unspezifische Resistenz gegen Viren und Bakterien. Solche Effekte traten bei Tieren, die 10 mW/cm² ausgesetzt waren, nicht auf. Die Autoren vermuteten daher, dass die negativen Effekte thermisch seien und nicht primär durch das elektromagnetische Feld hervorgerufen worden waren.

Die Exposition von Mäusen mit relativ hohen elektromagnetischen Feldern verstärkte den teratogenen Effekt von bestimmten Chemikalien, selbst wenn das Feld an sich keine teratogene Wirkung aufwies (Marcickiewicz et al. 1986). Es ist jedoch anzunehmen, dass ein Anstieg der fetalen Temperatur und nicht das Feld an sich den synergistischen Effekt auslöste (Nelson et al. 1991, IEGMP 2000); auch ließ sich nicht bei allen teratogenen Chemikalien eine Interaktion mit elektromagnetischen Feldern finden (Nelson et al. 1999, Nelson et al. 2001).

In einer Art Feldstudie verbrachten Magras und Xenos (1997) 12 Mäusepaare in die

Umgebung eines Antennenparks bei Thessaloniki, um 4 aufeinander folgende Verpaarungen zu untersuchen. Im Vergleich zu im Labor belassenen Tieren war der Fortpflanzungserfolg signifikant erniedrigt. Eine 5. Verpaarung im Labor zeigte die Irreversibilität des Fruchtbarkeitsverlustes. Dieser an sich bemerkenswerte Befund kann aber nur als vorläufiges Ergebnis gesehen werden, da die Tierzahl (2 Gruppen á 6 Tiere) viel zu gering und die Expositionsbedingungen unklar waren. Ohne die Kontrolle durch ebenfalls im Freiland verpaarte Tiere, die jedoch mittels Faraday-Käfige von elektromagnetischen Feldern abgeschirmt wurden, können andere Einflüsse als das elektromagnetische Feld daher als Ursache für den Fruchtbarkeitsverlust nicht ausgeschlossen werden.

Ono et al. (2004) untersuchten in schwangeren lacZ-transgenen Mäusen, ob die Bestrahlung mit 2,45 GHz mutagen auf die Nachkommen wirken könnte. Dazu setzten sie die Tiere elektromagnetischen Feldern von durchschnittlich 0,71 W/kg für 16 Stunden am Tag aus. Die Befeldung erfolgte in einem Rhythmus von 10 Sekunden an und 50 Sekunden Pause, um einen thermischen Effekt auf die Nachkommen zu minimieren. Die Peakbestrahlung lag bei 4,3 W/kg. Die Mutationsrate des lacZ Gens lag in verschiedenen Geweben der bestrahlten Nachkommen im gleichen Bereich wie der unbestrahlten Tieren. Auch unterschied sich die Qualität der Mutationen nicht.

Ratten

Der potentiell teratogene Einfluss von 2,45 GHz-elektromagnetischen Feldern wurde bei Sprague-Dawley Ratten untersucht, die vom 6. bis 15. Tag der Schwangerschaft für 100 Minuten täglich einem SAR-Wert von ca. 4,2 W/kg ausgesetzt waren (Berman et al. 1981). Obwohl es zu einer Temperaturerhöhung auf 40,3 °C in den Tieren kam, hatten die Felder keinen Einfluss auf die Nachkommenzahl oder deren Gewicht. Auch kam es zu keiner Häufung von Missbildungen. Erst die Erhöhung des SAR-Wertes auf 6 W/kg hatte geringere fetale Gewichte und eine Verzögerung

der Knochenentwicklung zur Folge (Berman und Carter 1984).

Die Bestrahlung von schwangeren Sprague-Dawley Ratten mit 100 MHz-elektromagnetischen Feldern, entsprechend einem SAR-Wert von 0,4 W/kg, hatte keinerlei teratogenen Effekt (Lary et al. 1983a). Die Autoren schlossen daraus, dass elektromagnetische Felder unterhalb der für den Menschen zulässigen Bestrahlungsintensität keine teratogene Gefahr darstellen. Bei einer Exposition mit 27 MHz (ca. 11 W/kg), die mit einem Anstieg der Körpertemperatur der Mütter einher ging (auf 41 - 42 °C), war dagegen ein teratogener wie auch embryotoxischer Effekt zu beobachten, der sowohl mit der Dauer der Befeldung als auch mit der Temperatur anstieg (Lary et al. 1983b).

Bei einem SAR-Wert von 0,4 W/kg übte auch die Bestrahlung von Sprague-Dawley Ratten mit kontinuierlichen oder gepulsten 2,45 GHz weder Einfluss auf das fetale Gewicht, die fetale Länge, die Resorptionsrate oder die Rate von Missbildungen, noch auf die Gehirnentwicklung aus (Merritt et al. 1984, Schmidt et al. 1984).

Der Einfluss von pre- und postnataler Befeldung mit 2,45 GHz (10 mW/cm², 3 Stunden pro Tag) auf die Gehirnentwicklung wurde auch von Inouye et al. (1983) in männlichen Sprague-Dawley Ratten untersucht. Die Daten dieser Studie lieferten ebenfalls keinen Hinweis für einen negativen Einfluss des Feldes auf die Gehirnentwicklung.

Jensh (1997) fasste verschiedene eigene Studien zur Exposition von Ratten mit elektromagnetischen Feldern (915, 2450 und 6000 MHz) zusammen. Beispielsweise wurden schwangere Ratten für jeweils 6 Stunden täglich mit 2,45 GHz-elektromagnetischen Feldern (20 mW/cm², SAR 3,6-5,2 W/kg) bestrahlt und die Resorptionsrate sowie das Gewicht und Missbildungen bei den Föten nach 22 Tagen untersucht (Jensh et al. 1983b). Es zeigten sich keine Unterschiede zwischen exponierten und schein-exponierten Tieren, woraus die Autoren schlossen, dass diese Strahlungsbelastung nicht embryotoxisch sei. In einer weiteren Studie wurden schwangere Ratten vergleichbaren Feldern ausgesetzt, sie durften ihre Nachkommen jedoch zur

Welt bringen, die dann innerhalb und zwischen den Gruppen weiter gekreuzt wurden (Jensh et al. 1983a). Die Neugeborenen wurden verschiedenen Reflextests unterzogen und auf Missbildungen, den Zeitpunkt des Augenöffnens und die Gewichtszunahme hin untersucht. Außer dass die bestrahlten Nachkommen aktiver waren als die schein-bestrahlten Tiere, zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Gruppen. Wie in dieser Studie beobachtete Jensh auch bei anderen Untersuchungen jeweils verschiedene physiologische, morphologische oder verhaltensbezogene Unterschiede zwischen befeldeten und schein-befeldeten Tieren (z. B. Jensh 1984a, Jensh 1984b). Das Gesamtbild zeigte jedoch, dass – falls es nicht zu einer Temperaturveränderung durch das Feld kam – kein konsistenter, negativer Einfluss des Feldes auf die Fortpflanzung bzw. die Nachkommen vorlag (Jensh 1997).

Zu einem ähnlichen Schluss kam O'Connor (1999) in einer Zusammenfassung ebenfalls v. a. eigener Untersuchungen zum Einfluss intrauteriner Bestrahlung mit elektromagnetischen Feldern. Sie schrieb, dass bei allen Studien, bei denen ein Effekt auf die Fortpflanzung aufgetreten war, mit Expositionen gearbeitet wurde, die weit über den für den Menschen erlaubten Werten lagen. Und selbst bei hohem Expositionsniveau wurden keine konsistenten, morphologischen Veränderungen oder Organmissbildungen beobachtet. Die am häufigsten beschriebene Veränderung sei eine Abnahme des fetalen Gewichtes. Ob dieser Befund eine klinische Bedeutung habe, sei noch unklar. Die Autorin ging daher davon aus, dass für den Menschen - bei Einhaltung der geltenden Richtlinien – von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern keine Gefahr für die Fortpflanzung drohe.

Nakamura et al. (2000) exponierten schwangere Ratten kontinuierlich mit 2 mW/cm^2 (2,45 GHz) für 90 min, um den Einfluss elektromagnetischer Felder auf den Uterus und plazentalen Blutfluss sowie auf verschiedene, für die Schwangerschaft wichtige Hormone zu messen. Es zeigten sich Veränderungen im uteroplazentalen Blutfluss, nicht jedoch in der Temperatur im Enddarm. Die Veränderungen in der Durchblutung konnten möglicherweise mit Konzentrationsänderungen von Prostaglandin $F_{2\alpha}$ im Blut im Zusammenhang stehen. Die

Bestrahlung von schwangeren Ratten mit $0,6 \text{ mW/cm}^2$ (SAR: ca. $0,4 \text{ W/kg}$) durch 915 MHz -elektromagnetische Felder zeigte dagegen keine Wirkung auf den uteroplazentalen Blutfluss oder den Hormonspiegel im Blut (Nakamura et al. 2003). Erst die Bestrahlung mit 3 mW/cm^2 , die zu einer Erhöhung der Temperatur im Enddarm auf $40 \text{ }^\circ\text{C}$ führte, ging mit Veränderungen im Blutfluss und in der Östradiolkonzentration im Blut einher; Veränderungen, die über den Effekt einer gleichwertigen Temperaturerhöhung ohne Exposition hinausgingen.

Dasdag et al. (2000) untersuchten den Einfluss von Feldern, die GSM-Telefone emittierten, auf das Geburtsgewicht und verschiedene Blutparameter bei Ratten. Es zeigte sich, dass die exponierten Nachkommen der 1. Generation ein geringeres Geburtsgewicht aufwiesen, das jedoch innerhalb der ersten 3 Lebensmonate gegenüber den schein-bestrahlten Tieren aufgeholt wurde. In der 3. Generation war kein Einfluss auf das Gewicht zu beobachten. Die Autoren vermuteten, dass die Gewichtsreduktion auf unspezifischen Stress zurück zu führen sei. Schäden, die zur Resorption von Föten oder Missbildungen führten, wurden nicht beobachtet. Unterschiede in der Anzahl der Nachkommen traten ebenfalls nicht auf, und auch unterschieden sich die Blutwerte von Tieren der 1. bis 3. Generation nicht zwischen exponierten und schein-exponierten Tieren.

Die einmonatige Exposition von 8 männlichen Sprague-Dawley Ratten für jeweils 20 min täglich durch von-GSM-Telefonen-emittierten Feldern (Ganzkörper SAR: $0,52 \text{ W/kg}$) zeigte keinen Effekt auf die Morphologie oder Histologie der Hoden der Tiere, noch auf die Spermienzahl (Dasdag et al. 2003). Ebenfalls traten keine signifikanten Veränderungen gegenüber schein-bestrahlten Tieren in der Lipid-Zusammensetzung, der Malondialdehyd-Konzentration oder der p53-Immunreaktivität auf.

Der Einfluss von intrauteriner Bestrahlung mit 900 MHz -elektromagnetischen Feldern auf kognitive Leistungen bei erwachsenen Nachkommen wurde von Bornhausen und Scheingraber (2000) untersucht. Die Bestrahlungsintensität wurde mit $0,1 \text{ mW/cm}^2$ angegeben. Der entsprechende Ganzkörper SAR-Wert wurde für die frei im Käfig beweglichen Tiere anhand eines

Modells gemessen und reichte von 17,5 bis 75 mW/kg. Es wurde kein Einfluss des Feldes auf die kognitiven Leistungen (in Skinner Boxen) beobachtet.

Cobb et al. (2000) setzten intrauterin Sprague-Dawley Ratten gepulsten Breitbandelektromagnetischen Feldern aus (Kentech Instruments PBG-3 series pulser, maximale Intensität des elektrischen Feldes: 55 kV/m, Pulsanstiegszeit: 300 ps, Pulsdauer: 1,8 ns, Pulsrate: 1000 Pulse/Sekunde, Expositionsdauer: 2 min, Hauptfrequenzbereich: 0,1-1 GHz, berechnete spezifische Energieabsorption/Puls: 0,45 mJ/kg, Ganzkörper SAR-Wert für die Mütter: 45 mW/kg). Mit wenigen Ausnahmen zeigten sich keine Veränderungen im Verhalten oder in physiologischen und morphologischen Parametern der Tiere. Die beobachteten signifikanten Unterschiede (z. B. ließen bestrahlte Nachkommen häufiger Stresslaute ertönen, und die männlichen bestrahlten Nachkommen paarten sich seltener als unbestrahlte, auch wenn keine Unterschiede in der Fertilität oder der Nachkommenzahl dieses Männchen zu beobachten war) schienen jedoch nicht sinnvoll miteinander in Beziehung zu stehen. Die Autoren vermuteten daher, es handele sich um Zufallsbefunde, aufgrund der sehr großen untersuchten Datenmenge.

An der Aristoteles Universität von Thessaloniki, Griechenland, wurden schwangere Ratten 9,4 GHz-GSM-modulierten elektromagnetischen Feldern ($5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) ausgesetzt (Pyrpasopoulou et al. 2004). Diese Frequenz wurde auf der Basis der unterschiedlichen Resonanzfrequenzen zwischen Menschen und Ratten gewählt. Die Exposition oder Schein-Exposition fand entweder in der Prä-Implantationszeit (Tag 1-3 nach der Begattung) oder während der frühen Organogenese (Tag 4-7 nach der Begattung) statt. Die Nachkommen wurden auf die Expression bestimmter, für die Nierenentwicklung wichtiger Gene hin untersucht. Es zeigte sich, dass der Zeitpunkt der Exposition für einen möglichen Effekt des elektromagnetischen Feldes von Bedeutung war. Diese neuere Studie bestätigt damit Beobachtungen von Nelson et al. (2001), die Unterschiede in der Interaktion von elektro-magnetischen Feldern und Chemikalien je nach Zeitpunkt der Exposition bzw. Applikation beobachteten.

Schlussfolgerung

In verschiedenen Studien zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Feldern (v. a. des Mobilfunkes) auf die Reproduktion und Entwicklung von Labornagern wurden statistisch signifikante Unterschiede zwischen befeldeten und schein-befeldeten Tieren gefunden. Beobachtete Unterschiede lagen beispielsweise im fetalen Gewicht, dem Aktivitätsniveau der Nachkommen oder in der Anzahl von primären Spermatozyten und Spermatiden. Überwiegend wurden die beobachteten Effekte von anderen Studien jedoch nicht reproduziert oder konnten auf eine Temperaturerhöhung in den trächtigen Weibchen bzw. in den Hoden der Männchen zurückgeführt werden. Obwohl die vorhandenen Studien keine belastbaren Hinweise darauf liefern, dass elektromagnetische Felder des Mobilfunks (im Rahmen der für die Bevölkerung gesetzlich erlaubten Intensitäten) einen negativen Effekt auf Fortpflanzung und Entwicklung in Labornagern haben, ist darauf hinzuweisen, dass in einem Teil der Studien nur geringe Tierzahlen untersucht wurden und bisher keine Studie zum Einfluss der neuen UMTS-Technik vorliegt. Synergistische Effekte und potentielle Einflüsse auf die 2. oder 3. Generation sind bisher ebenfalls sehr selten untersucht worden, so dass hier weiterer Forschungsbedarf besteht.

Literaturverzeichnis

- Aitken RJ, Bennetts LE, Sawyer D, Wiklendt AM, King BV (2005) Impact of radio frequency electromagnetic radiation on DNA integrity in the male germline. *Int J Androl* 28:171-179
- Berman E, Carter HB (1984) Decreased body weight in fetal rats after irradiation with 2450-MHz (CW) microwaves. *Health Phys* 46:537-542
- Berman E, Carter HB, House D (1981) Observations of rat fetuses after irradiation with 2450-MHz (CW) microwaves. *J Microw Power* 16:9-13
- Berman E, Carter HB, House D (1982) Reduced weight in mice offspring after in utero exposure to 2450-MHz (CW) microwaves. *Bioelectromagnetics* 3:285-291
- Berman E, Carter HB, House D (1984) Growth and development of mice offspring after irradiation in utero with 2,450-

MHz microwaves. *Teratology* 30:393-402

Bornhausen M, Scheingraber H (2000) Prenatal exposure to 900 MHz, cell-phone electromagnetic fields had no effect on operant-behavior performances of adult rats. *Bioelectromagnetics* 21:566-574

Cairnie AB, Harding RK (1981) Cytological studies in mouse testis irradiated with 2.45-GHz continuous-wave microwaves. *Radiat Res* 87:100-108

Chazan B, Janiak M, Kobus M, Marcickiewicz J, Troszynski M, Szmigielski S (1983) Effects of microwave exposure in utero on embryonal, fetal and postnatal development of mice. *Biol Neonate* 44:339-348

Chernovetz ME, Justesen DR, King NW, Wagner JE (1975) Teratology, survival, and reversal learning after fetal irradiation of mice by 2450-MHz microwave energy. *J Microw Power* 10:391-409

Cobb BL, Jauchem JR, Mason PA, Dooley MP, Miller SA, Ziriak JM, Murphy MR (2000) Neural and behavioral teratological evaluation of rats exposed to ultra-wideband electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 21:524-537

Dasdag S, Akdag MZ, Ayyildiz O, Demirtas ÖC, Yayla M, Sert C (2000) Do cellular phones alter blood parameters and birth weight of rats? *Electro- and Magnetobiology* 19:107-113

Dasdag S, Ketani MA, Akdag Z, Ersay AR, Sari I, Demirtas ÖC, Celik MS (1999) Whole-body microwave exposure emitted by cellular phones and testicular function of rats. *Urol Res* 27:219-223

Dasdag S, Akdag MZ, Aksen F, Yilmaz F, Bashan M, Dasdag MM, Celik MS (2003) Whole body exposure of rats to microwaves emitted from a cell phone does not affect the testes. *Bioelectromagnetics* 24:182-188

Heynick LN, Merritt JH (2003) Radiofrequency fields and teratogenesis. *Bioelectromagnetics Supplement 6.*, 2003. Published 2003 Wiley-Liss, Inc. 6:S174-S186

Heynick LN, Polson P (1996) Radiofrequency radiation and teratogenesis: a comprehensive review pertinent to Air Force operations. Armstrong Laboratory, Brooks Air Force Base, Texas

IEGMP (2000) Mobil phones and health. Report of an independent expert group on mobile phones. UK Minister of Public Health. National Radio Protection Board, Chilton, Oxon: www.iegmp.org.uk

Inouye M, Galvin MJ, McRee DI (1983) Effect of 2,450 MHz microwave radiation on the development of the rat brain. *Teratology* 28:413-419

Inouye M, Matsumoto N, Galvin MJ, McRee DI (1982) Lack of effect of 2.45-GHz microwave radiation on the development of preimplantation embryos of mice. *Bioelectromagnetics* 3:275-283

Jensh RP (1984a) Studies of the teratogenic potential of exposure of rats to 6000-MHz microwave radiation. I. Morphologic analysis at term. *Radiat Res* 97:272-281

Jensh RP (1984b) Studies of the teratogenic potential of exposure of rats to 6000-MHz microwave radiation. II.

- Postnatal psychophysiological evaluations. *Radiat Res* 97: 282-301
- Jensh RP (1997) Behavioral teratologic studies using microwave radiation: is there an increased risk from exposure to cellular phones and microwave ovens? *Reprod Toxicol* 11:601-611
- Jensh RP, Vogel WH, Brent RL (1983a) An evaluation of the teratogenic potential of protracted exposure of pregnant rats to 2450-MHz microwave radiation. II. Postnatal psychophysiological analysis. *J Toxicol Environ Health* 11:37-59
- Jensh RP, Weinberg I, Brent RL (1983b) An evaluation of the teratogenic potential of protracted exposure of pregnant rats to 2450-MHz microwave radiation: I. Morphologic analysis at term. *J Toxicol Environ Health* 11:23-35
- Johnson L, Lebovitz RM, Samson WK (1984) Germ cell degeneration in normal and microwave-irradiated rats: potential sperm production rates at different developmental steps in spermatogenesis. *Anat Rec* 209:501-507
- Lary JM, Conover DL, Johnson PH (1983a) Absence of embryotoxic effects from low-level (nonthermal) exposure of rats to 100 MHz radiofrequency radiation. *Scand J Work Environ Health* 9:120-127
- Lary JM, Conover DL, Johnson PH, Burg JR (1983b) Teratogenicity of 27.12-MHz radiation in rats is related to duration of hyperthermic exposure. *Bioelectromagnetics* 4: 249-255
- Lebovitz RM, Johnson L (1983) Testicular function of rats following exposure to microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 4:107-114
- Lebovitz RM, Johnson L (1987) Acute, whole-body microwave exposure and testicular function of rats. *Bioelectromagnetics* 8:37-43
- Lebovitz RM, Johnson L, Samson WK (1987) Effects of pulse-modulated microwave radiation and conventional heating on sperm production. *J Appl Physiol* 62:245-252
- Magras IN, Xenos TD (1997) RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice. *Bioelectromagnetics* 18:455-461
- Marcickiewicz J, Chazan B, Niemiec T, Sokolska G, Troszynski M, Luczak M, Szmigielski S (1986) Microwave radiation enhances teratogenic effect of cytosine arabinoside in mice. *Biol Neonate* 50:75-82
- Merritt JH, Hardy KA, Chamness AF (1984) In utero exposure to microwave radiation and rat brain development. *Bioelectromagnetics* 5:315-322
- Nakamura H, Matsuzaki I, Hatta K, Nobukuni Y, Kambayashi Y, Ogino K (2003) Nonthermal effects of mobile-phone frequency microwaves on uteroplacental functions in pregnant rats. *Reprod Toxicol* 17:321-326
- Nakamura H, Nagase H, Ogino K, Hatta K, Matsuzaki I (2000) Uteroplacental circulatory disturbance mediated by prostaglandin F₂ α in rats exposed to microwaves. *Reprod Toxicol* 14:235-240
- Nawrot PS, McRee DI, Galvin MJ (1985) Teratogenic, biochemical, and histological studies with mice prenatally

- exposed to 2.45-GHz microwave radiation. *Radiat Res* 102:35-45
- Nawrot PS, McRee DI, Staples RE (1981) Effects of 2.45 GHz CW microwave radiation on embryofetal development in mice. *Teratology* 24:303-314
- Ndoumbè Mbonjo Mbonjo H, Streckert J, Bitz A, Hansen V, Glasmachers A, Gencol S, Rozic D (2004) Generic UMTS test signal for RF bioelectromagnetic studies. *Bioelectromagnetics* 25:415-425
- Nelson BK, Conover DL, Brightwell WS, Shaw PB, Werren D, Edwards RM, Lary JM (1991) Marked increase in the teratogenicity of the combined administration of the industrial solvent 2-methoxyethanol and radiofrequency radiation in rats. *Teratology* 43:621-634
- Nelson BK, Snyder DL, Shaw PB (2001) Developmental toxicity interactions of methanol and radiofrequency radiation or 2-methoxyethanol in rats. *Int J Toxicol* 20:89-100
- Nelson BK, Snyder DL, Shaw PB (1999) Developmental toxicity interactions of salicylic acid and radiofrequency radiation or 2-methoxyethanol in rats. *Reprod Toxicol* 13:137-145
- O'Connor ME (1999) Intrauterine effects in animals exposed to radiofrequency and microwave fields. *Teratology* 59:287-291
- Ono T, Saito Y, Komura J, Ikehata H, Tarusawa Y, Nojima T, Goukon K, Ohba Y, Wang J, Fujiwara O, Sato R (2004) Absence of Mutagenic Effects of 2.45 GHz Radiofrequency Exposure in Spleen, Liver, Brain, and Testis of lacZ-Transgenic Mouse Exposed in Utero. *Tohoku J. Exp. Med* 202:93-103
- Ozguner M, Koyu A, Cesur G, Ural M, Ozguner F, Gokcimen A, Delibas N (2005) Biological and morphological effects on the reproductive organ of rats after exposure to electromagnetic field. *Saudi Med J* 26:405-410
- Pyrpasopoulou A, Kotoula V, Cheva A, Hytiroglou P, Nikolakaki E, Magras IN, Xenos TD, Tsiboukis TD, Karkavelas G (2004) Bone morphogenetic protein expression in newborn rat kidneys after prenatal exposure to radiofrequency radiation. *Bioelectromagnetics* 25:216-227
- Saunders RD, Kowalczyk CI (1981) Effects of 2.45 GHz microwave radiation and heat on mouse spermatogenic epithelium. *Int J Radiat Biol Relat Stud Phys Chem Med* 40:623-632
- Saunders RD, Kowalczyk CI, Beechey CV, Dunford R (1988) Studies of the induction of dominant lethals and translocations in male mice after chronic exposure to microwave radiation. *Int J Radiat Biol Relat Stud Phys Chem Med* 53:983-992
- Schmidt RE, Merritt JH, Hardy KH (1984) In utero exposure to low-level microwaves does not affect rat foetal development. *Int J Radiat Biol Relat Stud Phys Chem Med* 46:383-386
- Steiner B (2000) Neue Technologie UMTS - Das Mobilfunksystem der nächsten Generation. *FGF Newsletter* 1/00:16-

Thalau H-P (2002) Effects of high- and low-frequency electromagnetic fields on embryonal development. An inventory of teratologic studies. Edition Wissenschaft 17:1-82
UNEP/IRPA/WHO (1993) Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz). World Health Organization, Geneva