

HF-Exposition und Dosimetrie

Technischer Teil des BfS – Forschungsprojekts

"In vivo-Experimente unter Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern der Mobilfunkkommunikation. B Kanzerogenese"

Auftraggeber:

International University Bremen GmbH (IUB)
School of Engineering and Science
Prof. Dr. rer. nat. Alexander Lerchl
Campus Ring 1, 28759 Bremen

Auftragnehmer:

Bergische Universität Wuppertal
Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik
Prof. Dr.-Ing. Volkert Hansen
Rainer-Gruenter-Str. 21, 42119 Wuppertal

Bericht
September 2004

Autoren:

Dr.-Ing. Joachim Streckert
Dr.-Ing. Andreas Bitz



Zusammenfassung

Für Untersuchungen zur Kanzerogenese von weiblichen Mäusen des AKR/J-Stamms wurden 2 Expositionseinrichtungen, basierend auf dem Prinzip der radialen Wellenleitung, im Tierhaus der International University Bremen installiert, sowie messtechnisch und dosimetrisch analysiert. Die Durchführung der Experimente erfolgte bei 1966 MHz (UMTS-Frequenzband) mit einem synthetischen UMTS-Signal gemäß dem FDD-Standard (vgl. <http://www.3gpp.org>). Es wurden gleichzeitig bis zu 160 Mäuse mit einer mittleren spezifischen Absorptionsrate (Ganzkörper-SAR) von 0,4 W/kg exponiert und ebenso viele Tiere scheinexponiert (0 W/kg). Obwohl die max. 7 Tiere pro Käfig sich frei bewegen konnten, betrug die Variation der SAR in den hier entwickelten Wellenleitungen nur ca. 50 %.

1. Expositionsvorrichtungen

1.1 Prinzipieller Aufbau und Wellentypen der radialen Wellenleitung

Im Wesentlichen besteht eine radiale Wellenleitung aus zwei kreisförmigen, parallelen, metallischen Platten (Bild 1). Eine kegelförmige Antenne im Zentrum regt Wellen an, die sich in radialer Richtung ausbreiten. Am Rand der Leitung werden zwischen den Metallplatten Absorber eingesetzt, um eine große Stehwelligkeit des Feldes infolge Reflexionen zu vermeiden. Die zu exponierenden Objekte (z.B. Käfige) werden auf einem konzentrisch zum Zentrum liegenden Kreis platziert.

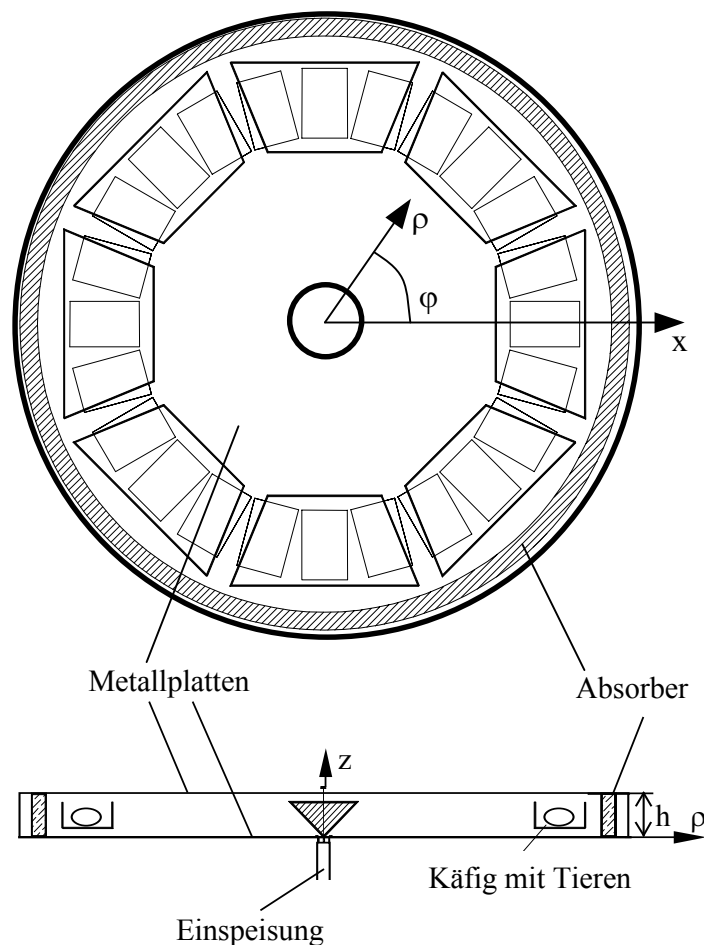


Bild 1: Grundaufbau einer radialen Wellenleitung
oben: Aufsicht; unten: Querschnitt



In der radialen Wellenleitung können TE_{mn}^z - und TM_{mn}^z - Moden existieren. Der Index z soll an die Herleitung des Feldes aus den Potenzialen A_z und F_z [Unger1981, Balanis 1989] erinnern.

Die TM_{00}^z -Grundmode ist ein transversal elektromagnetischer (TEM-)Wellentyp bezüglich der radialen Ausbreitungsrichtung.

Die Feldkomponenten dieser Grundwelle können folgendermaßen angegeben werden ($B_{00} = \text{const.}$):

$$E_\rho(\rho, \varphi, z) = E_\varphi(\rho, \varphi, z) = 0 \quad (1)$$

$$E_z(\rho, \varphi, z) = B_{00} H_0^{(2)}(k_0 \rho) \quad (2)$$

$$H_\rho(\rho, \varphi, z) = H_z(\rho, \varphi, z) = 0 \quad (3)$$

$$H_\varphi(\rho, \varphi, z) = -j B_{00} H_0^{(2)'}(k_0 \rho) \quad (4)$$

Das elektrische Feld ist in z -Richtung polarisiert, und alle Feldkomponenten der TEM-Mode sind konstant in z - und φ -Richtung. Gemäß dem Verhalten der Hankelfunktion $H_0^{(2)}(k_0 \rho)$ klingen die Felder näherungsweise proportional zu $1/\sqrt{\rho}$ für Argumente $k_0 \rho \gg 1$ ab. Der Wellenwiderstand lautet für die luftgefüllte Leitung

$$Z = -j Z_0 \frac{H_0^{(2)}(k_0 \rho)}{H_0^{(2)'}(k_0 \rho)}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}. \quad (5)$$

Für Abstände $\rho \geq \lambda_0$ nähert sich der Wellenwiderstand dem Wert $Z_0 = 377 \Omega$ einer homogenen ebenen Welle im freien Raum an.

Alle diese Eigenschaften belegen, dass die Grundwelle der radialen Wellenleitung in idealer Weise geeignet ist, identische Bedingungen für die gleichzeitige Exposition vieler Objekte zu erzielen.

Die TEM-Welle ist für jeden Abstand h der Metallplatten ausbreitungsfähig. Wellentypen höherer Ordnung mit einer azimuthalen Abhängigkeit der Felder ($\sim \cos(m\varphi)$ oder $\sim \sin(m\varphi)$, $m = 1, 2, \dots$) müssen hier nicht betrachtet werden, weil sie durch eine rotationssymmetrische Anregung vermeidbar sind. Allerdings können sich zusätzlich zur TEM-Welle höhere TE- und TM-Moden ausbreiten, wenn der Plattenabstand $h \geq \lambda/2$ beträgt (λ : Freifeld-Wellenlänge). Selbst wenn $h < \lambda/2$, ist es für $h \approx \lambda/2$ aufgrund des evaneszenten Charakters der Felder unterhalb ihrer Grenzfrequenzen möglich, dass Feldstörungen wegen Interferenzen zwischen verschiedenen Wellentypen auftreten, die eine gleichmäßige Exposition verhindern. Die Feldkomponenten der TE- und TM-Moden sind Funktionen der z -Koordinate gemäß $\cos(k_z z)$ und $\sin(k_z z)$ mit $k_z = \frac{n\pi}{h}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). Beispielsweise

lauten die Komponenten der TM_{01}^z -Mode:

$$E_\rho(\rho, \varphi, z) = -B_{01} \frac{k_z}{k_\rho} H_0^{(2)'}(k_\rho \rho) \sin\left(\frac{\pi}{h} z\right) \quad (6)$$

$$E_\varphi(\rho, \varphi, z) = 0 \quad (7)$$

$$E_z(\rho, \varphi, z) = B_{01} H_0^{(2)}(k_\rho \rho) \cos\left(\frac{\pi}{h} z\right) \quad (8)$$

$$H_\rho(\rho, \varphi, z) = H_z(\rho, \varphi, z) \quad (9)$$

$$H_\varphi(\rho, \varphi, z) = -j B_{01} \frac{\omega \epsilon}{k_\rho} H_0^{(2)'}(k_\rho \rho) \cos\left(\frac{\pi}{h} z\right) \quad (10)$$

mit $B_{01} = \text{const.}$



Bei geeigneter Wahl des Plattenabstandes im Vergleich zur Wellenlänge

$$h < \frac{\lambda}{2} \quad (11)$$

besteht das elektromagnetische Feld in der Leitung also nur aus der gewünschten TEM-Welle. Wie bereits gezeigt, besitzt dieser Wellentyp bei konstanten Radien eine homogene Feldverteilung im Leitungsquerschnitt und hat nur eine Abhängigkeit vom Radius ρ , die für große Abstände von der Einspeisung mit $\rho^{-1/2}$ angenähert werden kann.

Bei hohen Frequenzen und großen Käfigabmessungen (und damit großen Plattenabständen h) ist die Bedingung nach Gl. (11) allerdings häufig nicht einzuhalten. Dann muss mit der Ausbreitung von Wellentypen höherer Ordnung gerechnet werden.

1.2 Grunddimensionierung

Für die Experimente erwiesen sich prinzipiell die von der Bergischen Universität Wuppertal bereits für das Vorgängerprojekt zur Verfügung gestellten, für die GSM-Frequenz 900 MHz konzipierten radialen Wellenleitungen als geeignet. Sie mussten für das aktuelle Projekt neu dimensioniert und umgerüstet werden. Jede der beiden aus Aluminium aufgebauten Leitungen hat die Form eines Achtecks mit ca. 4 m maximaler Spannweite und ist in der Lage, 24 Käfige vom Standard-Typ III (800 cm² Grundfläche) aufzunehmen (Bild 2).

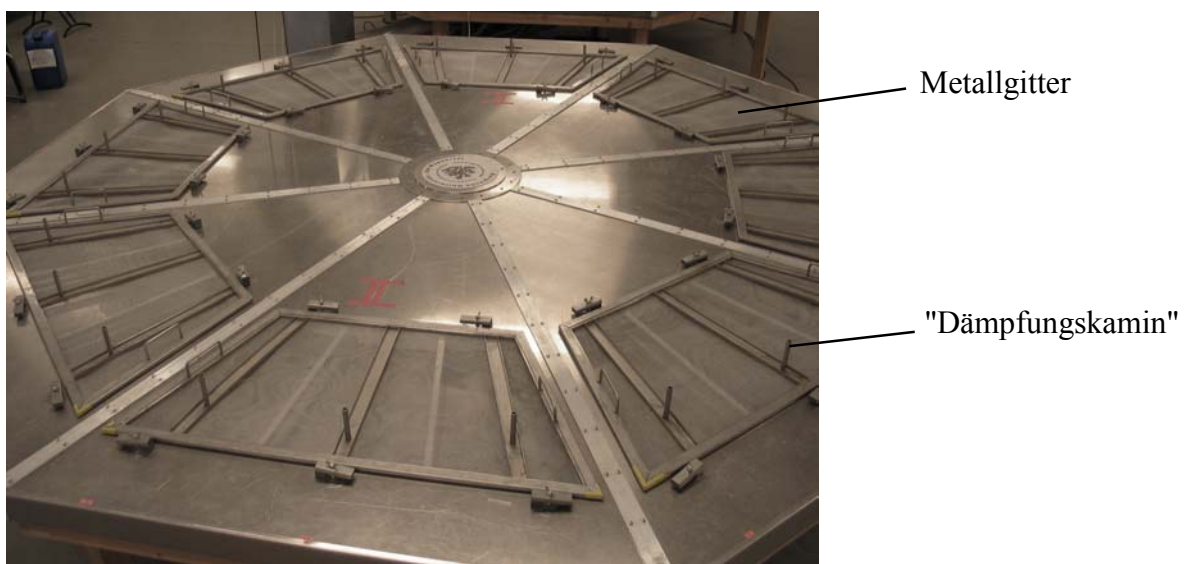


Bild 2: Aufsicht der aufgebauten Expositionseinrichtung

Das biologische Design der Experimente sieht vor, dass in jeden Käfig bis zu 7 Mäuse gesetzt werden. Die Licht-, Luft- und Trinkwasserzufuhr für die Tiere ist auch bei laufender Exposition gewährleistet, ohne dass hochfrequente Fremdfelder in die Anlage eindringen können oder das Expositionsfeld aus der Anlage abgestrahlt werden kann. Dazu sind die Zugangsklappen zu den perforierten Kunststoffkäfigen mit luft- und lichtdurchlässigen, aber elektrisch abschirmenden Metallgittern versehen, und die aus Glas bestehenden Nippel der Tränkflaschen werden durch metallische Rohrstopfen in die Leitung geführt, die als Rundhohlleitungen unterhalb ihrer Grenzfrequenz ("Dämpfungskamine") dimensioniert sind (s. Bild 2). Eine Belüftungsanlage mit einem zentralen Gebläse und Absaugöffnungen unter den Käfigböden sorgt dafür, dass jedem Käfig genügend temperierte Raumluft zugeführt wird, um einen Hitzestau bzw. bei den hier zu applizierenden mäßigen Spezifischen Absorptionsraten eine Erwärmung der Gewebetemperatur zu verhindern (Bild 3).

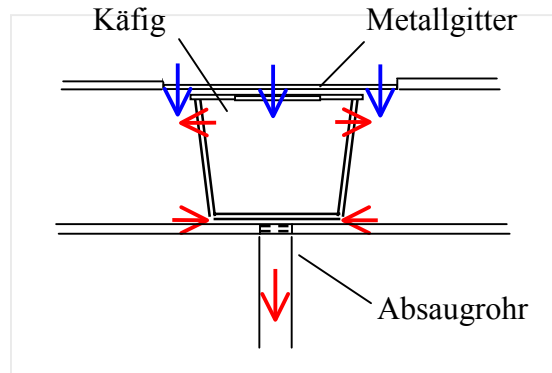


Bild 3: Luftströmung durch Zwangsbelüftung der Käfige

Die Experimente laufen verblindet ab, d.h., für das die Versuche durchführende Personal ist nicht erkennbar, in welcher der beiden Wellenleitungen die Exposition mit dem Hochfrequenzfeld bzw. die Scheinexposition erfolgt (Bild 4).



Bild 4: Ansicht der beiden umgerüsteten Expositionseinrichtungen mit der zentralen Belüftungsanlage

Zur Umrüstung der Anlage auf den Betrieb bei UMTS-Frequenzen um 2 GHz wurde geprüft, dass die oben erwähnten Abschirmmaßnahmen (Metallgitter, Dämpfungskamine) auch bei der höheren Frequenz effektiv funktionieren. Der gemessene Kopplungsfaktor von Expositions- und Schein-Expositionskammer beträgt weniger als -65 dB.

Der Plattenabstand h wurde von 17 cm auf 8 cm reduziert (siehe unten). Im Zuge dieser Umbauten musste auch die HF-Einspeisung neu konstruiert werden. Ferner war es erforderlich, einen neuen Ringabsorber einzubauen. Die vorhandenen Makrolon®-Käfige wurden von der Herstellerfirma (Ebeco) auf 7 cm Höhe abgesägt.

Im vorliegenden Experiment mit UMTS-Signalen beträgt die halbe Wellenlänge etwa 7,5 cm. Die Käfighöhe und damit der Plattenabstand müssten gemäß Gl. (11) also deutlich kleiner als dieses Maß gewählt werden, um eindeutige Feldverhältnisse zu gewährleisten. Bei einer mit der zuständi



gen Ethikkommission abgestimmten minimalen Käfighöhe von 7 cm musste der Plattenabstand aus Gründen des einfacheren Handlings aber zu 8 cm gewählt werden. Damit wurden die nachstehend beschriebenen, konstruktiven Maßnahmen erforderlich, um die Ausbreitung der störenden höheren Wellentypen zu verhindern und ein möglichst homogenes Expositionsfeld in jedem Käfig zu gewährleisten.

1.3 Unterdrückung höherer Wellentypen

1.3.1 Anregung des Expositionsbereichs mit der Grundmode

Eine Möglichkeit, die Anregung höherer Wellentypen zu vermeiden, ist die Verwendung einer Doppelkonus-Antenne am zentralen Einspeisepunkt. Berechnungen und Messungen zeigten jedoch, dass dann die Anforderungen an die Symmetrie der gesamten Expositionsanlage bezüglich der z-Richtung extrem hoch werden.

Stattdessen wurde eine Lösung favorisiert, bei der der Plattenabstand der radialen Wellenleitung für kleine Radien so gering gehalten wird, dass nur die Grundwelle existieren kann ($h = 6 \text{ cm} < \lambda/2$), und bei der erst unmittelbar vor dem Expositionsbereich ein symmetrischer Querschnittsprung auf die zur Aufnahme der Käfige benötigte Höhe erfolgt ($h = 8 \text{ cm} > \lambda/2$) (Bild 5).

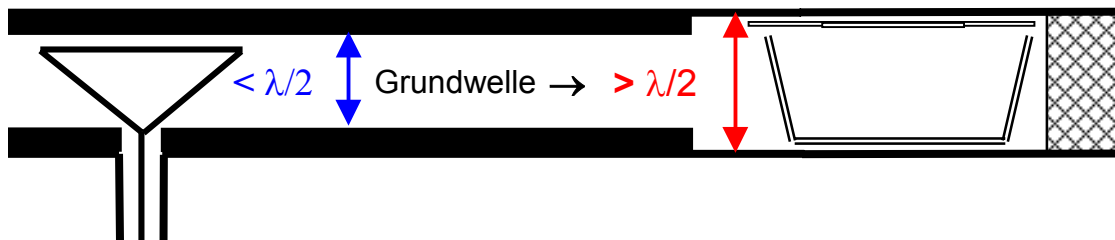


Bild 5: Querschnittsprung zur Anregung des Expositionsbereichs mit der Grundwelle

Bei sorgfältiger Ausführung dieser Konfiguration werden auch für größere Radien keine höheren Wellentypen beobachtet, obwohl der Plattenabstand im Käfigbereich größer als eine halbe Wellenlänge ist. Damit liegt eine sehr gleichmäßige und definierte Anregung des Expositionsbereichs vor. Sobald allerdings die Käfige mit den Mäusen eingebracht werden, ist das gestreute Feld zu berücksichtigen, das bei ungünstiger Gruppierung der verschiedenen Tiere zur Anregung höherer Wellentypen führen kann. Um dies zu verhindern, wurden die im Folgenden beschriebenen Zusatzmaßnahmen vorgesehen.

1.3.2 Erhöhung der Grenzfrequenzen

Unter bestimmten Umständen können unerwünschte Wellentypen unterdrückt werden, indem ihre Grenzfrequenzen durch Modifikationen des Leitungsquerschnitts so weit erhöht werden, dass sie außerhalb des Betriebsfrequenzbereichs zu liegen kommen.

Eine auch im vorliegenden Fall angewandte praktikable Methode ist die Einfügung von Metallrippen zwischen den Käfigen, die an der oberen und unteren Platte der radialen Wellenleitung vom Zentralbereich bis zum Absorber verlaufen (Bild 6).

Die genaue Dimensionierung dieser Rippen erfolgte durch Lösung des entsprechenden Eigenwertproblems mit nachfolgender numerischer Detailrechnung für die Feldverteilung.

Für die radiale Wellenleitung mit 8 cm Höhe erwies sich eine Rippenhöhe von 2 cm und eine ebenso große Rippenbreite als geeignet, die störenden TE_{01}^z - und TM_{01}^z -Moden bei der Betriebsfrequenz effektiv zu unterdrücken. Die in Bild 7 dargestellten Ergebnisse numerischer Feldberechnungen belegen, dass durch die Rippen im Käfigbereich ein quasi-homogenes Feld erzwungen wird und dass das Einbringen biologischer Objekte nur zu lokalen Feldstörungen, nicht jedoch zur Anregung der erwähnten höheren Wellentypen führt.

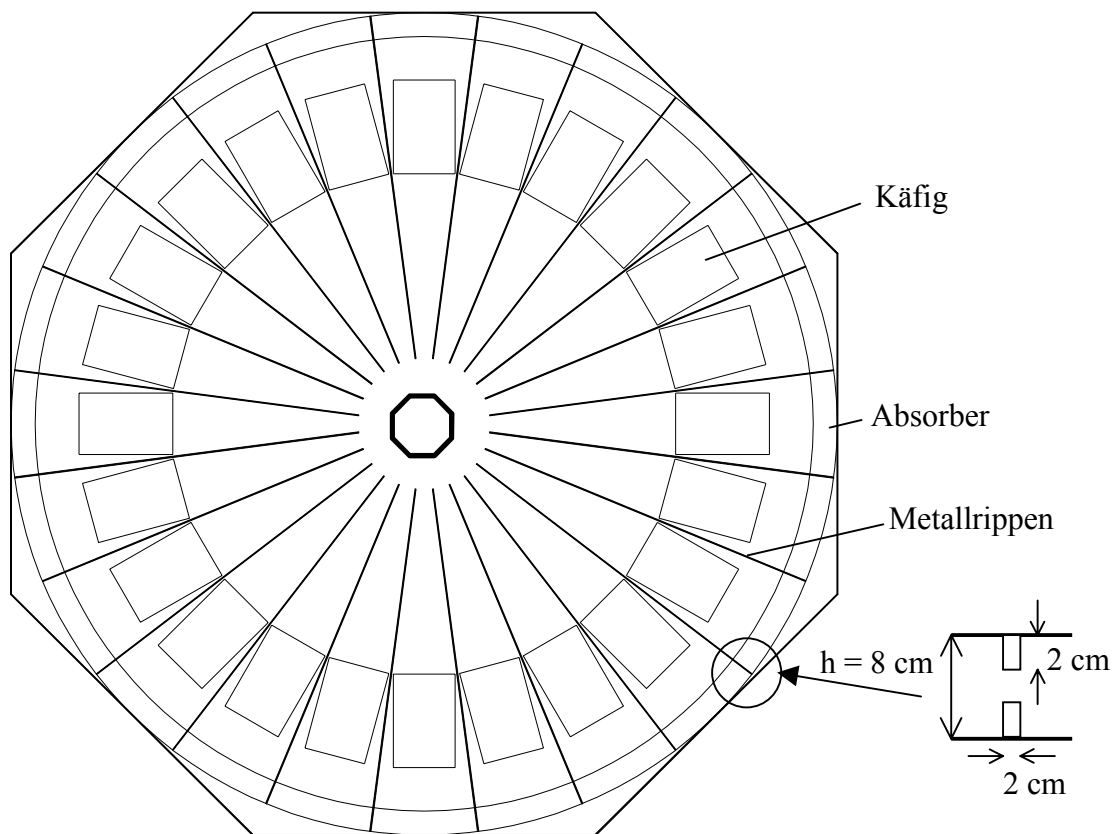


Bild 6: Metallrippen zur Unterdrückung höherer Wellentypen

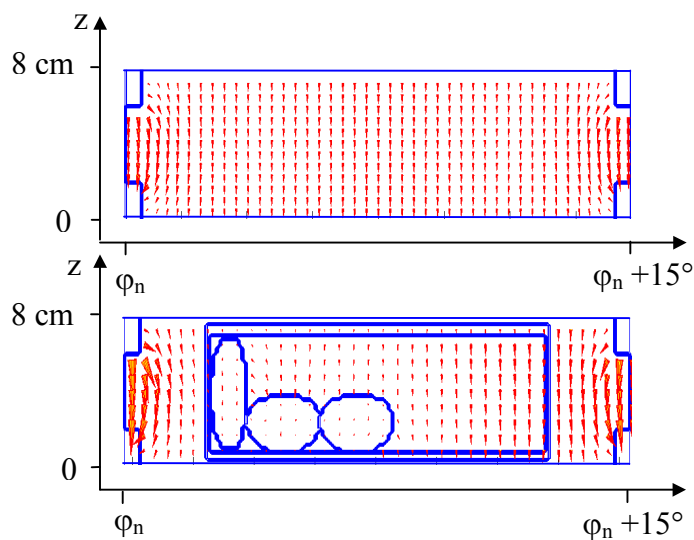


Bild 7: Numerisch berechnete Feldverteilungen im Querschnitt eines 15° -Sektors der radialen Wellenleitung mit und ohne Tiermodelle



2. Feldverteilung und Dosimetrie

Die Feldverteilung in der Expositionseinrichtung wurde einerseits numerisch mit Hilfe der Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich [Taflove 2000] auf der Basis eines detaillierten Computermodells der radialen Wellenleitung analysiert und andererseits am Originalaufbau messtechnisch ermittelt. Bild 8 zeigt den radialen Verlauf der elektrischen Feldstärke im Käfigbereich bei 1966 MHz für alle 24 Sektoren der leeren radialen Wellenleitung. Der durch Restreflexionen am Absorber bedingten Stehwelligkeit ist der typische $1/\sqrt{\rho}$ -Abfall des Feldes der Grundmode überlagert. Die Übereinstimmung der Rechen- und Messergebnisse ist im Rahmen der numerischen Modellierung des Absorbers, der Parameterschwankungen des segmentierten realen Absorbers (Emerson & Cuming, ECCOSORB AN-75) und der Genauigkeit des eingesetzten Messsystems (Schmid & Partner Engineering AG, EASY4 V4.0) sehr zufriedenstellend. Aus den Ergebnissen kann eine Variation des Feldes für alle Käfigbereiche von $\pm 17,7\%$ abgeschätzt werden.

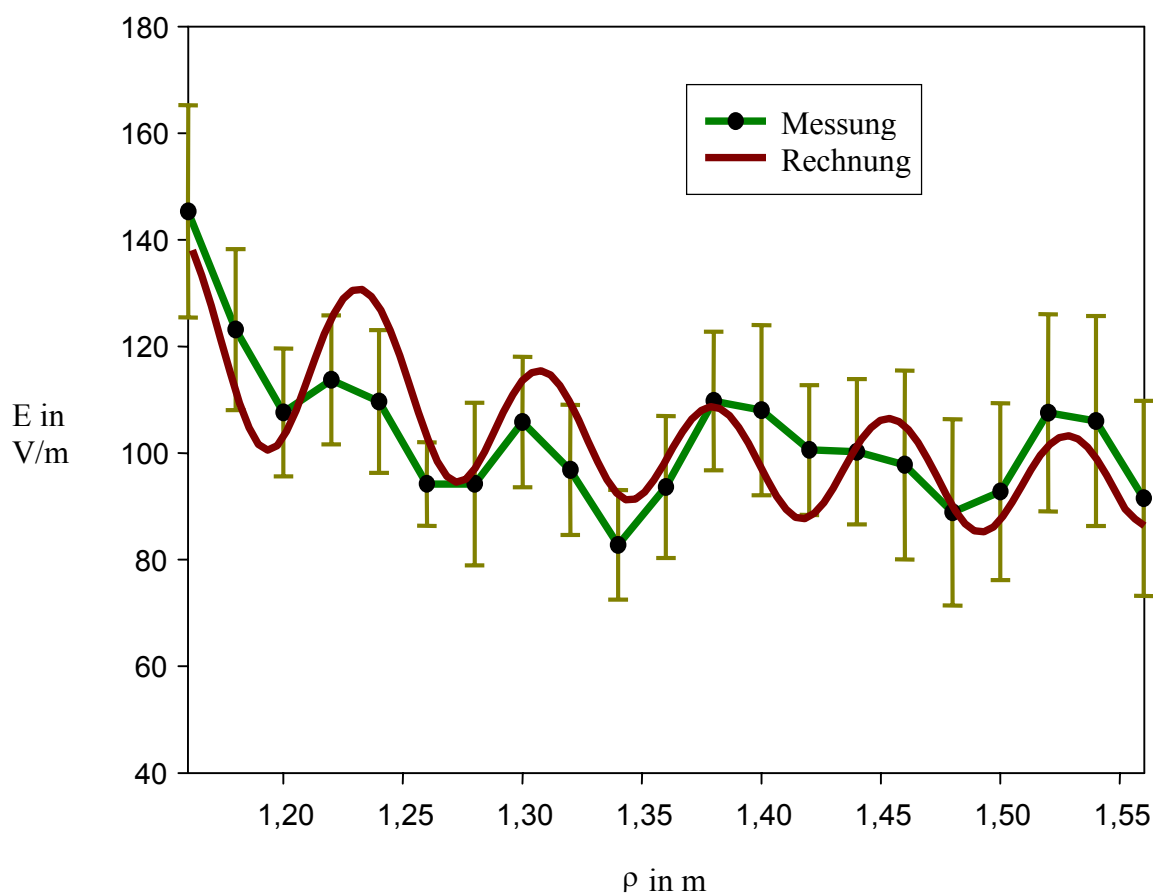


Bild 8: Radialer Verlauf der berechneten und gemessenen elektrischen Feldstärke (Mittelwert und Standardabweichung für alle Käfige)

Es wurde bereits gezeigt, dass das Einsetzen der Tiere nicht zur Anregung unerwünschter höherer Wellentypen bzw. zu großen Feldstörungen in der mit der Rippenstruktur versehenen radialen Wellenleitung führt. Um zu untersuchen, welche Leistung in die Expositionsanlage eingespeist werden muss, um den gewünschten mittleren SAR-Wert von $0,4 \text{ W/kg}$ zu erreichen und wie groß die SAR-Variationen von Tier zu Tier sind, wurden numerische Berechnungen mit verschiedenen Anordnungen von Tiermodellen durchgeführt.



Dazu wurde ein seitlich durch magnetische Wände begrenzter 15° Sektor der radialen Wellenleitung mit einem Käfig und verschiedenen Positionen und Körperhaltungen der sieben Mäuse simuliert (Bild 9). Als Grundlage für die Berechnungen dienten in Absprache mit dem Bundesamt für Strahlenschutz vereinfachte Mausmodelle, bestehend aus homogenen Ellipsoiden mit einer Länge von 6 cm, einem Durchmesser von 3 cm und Materialparametern $\epsilon_r = 44,65$ und $\kappa = 0,85$ S/m. Bild 9 zeigt beispielhaft Feldverteilungen für drei konkrete Anordnungen der Tiere, die sich bevorzugt in Gruppen zusammendrängen. Man erkennt quer und längs zur einfallenden Welle liegende sowie aufrecht stehende Tiermodelle. Die Auswertung aller durchgeführten Rechnungen ergab, dass ein Mittelwert der SAR pro Maus von $0,4$ W/kg bei einer in die Wellenleitung eingespeisten zeitlich gemittelten Gesamtleistung von 15 W erreicht wird. Die Standardabweichung des Ganzkörper-SAR-Wertes beträgt 50% unter Berücksichtigung der nicht ideal homogenen Reflexionseigenschaften des Absorbers in jedem Sektor der aufgebauten Leitung und einer daraus resultierenden Variation der Feldstärke in Umfangsrichtung.

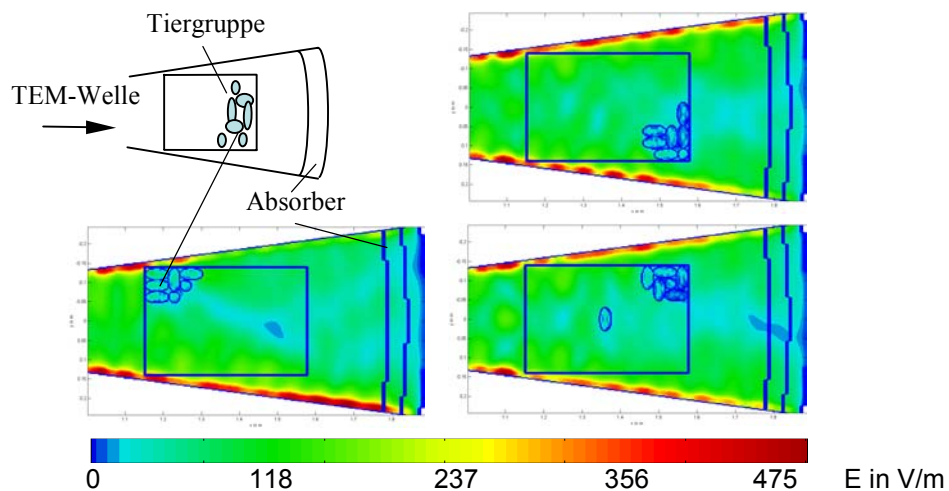


Bild 9: Beispiele für die elektrische Feldverteilung bei verschiedenen Gruppierungen von 7 Mäusen im Käfig ($P_{in} = 15$ W)

Um eine Überprüfung der lokalen SAR-Werte durchführen zu können, wurde in Ermanglung eines anatomischen Mausmodells, für dessen Entwicklung vom BfS keine Mittel bereitgestellt werden konnten, ein über die Forschungsgemeinschaft Funk e.V. (FGF) verfügbares Modell einer 21 Tage alten Ratte verwendet, das in etwa die gleiche Körpermasse wie die im Experiment eingesetzten Mäuse repräsentiert. Dieses hoch aufgelöste Computermodell wurde anstelle eines Ellipsoids in den Simulationsprozess eingeführt (Bild 10). Die Kantenlänge eines Voxels des Rechengitters beträgt $1,2$ mm. Für die gezeigte Konfiguration wird bei der eingestellten Speiseleistung von 15 W ein Maximalwert der über 10 g Gewebemasse gemittelten Spezifischen Absorptionsrate von $0,3$ W/kg nicht überschritten; die Ganzkörper-SAR beträgt für diesen Einzelfall $0,253$ W/kg.

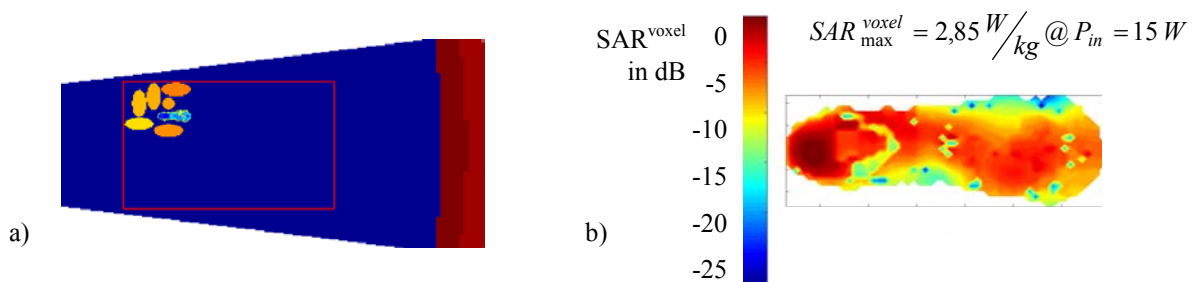


Bild 10: Abschätzung der lokalen SAR
a) Einfügung eines hoch aufgelösten Tiermodells
b) SAR-Verteilung

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 [Bitz et al. 2001, Streckert et al. 2001, 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 Bild 11 dargestellt. Zur Erzeugung dieses Signals wurde ein Signalgenerator (GUS 6960S) zur Verfügung gestellt, der an der Bergischen Universität entwickelt worden ist [Glasmachers et al. 2002].

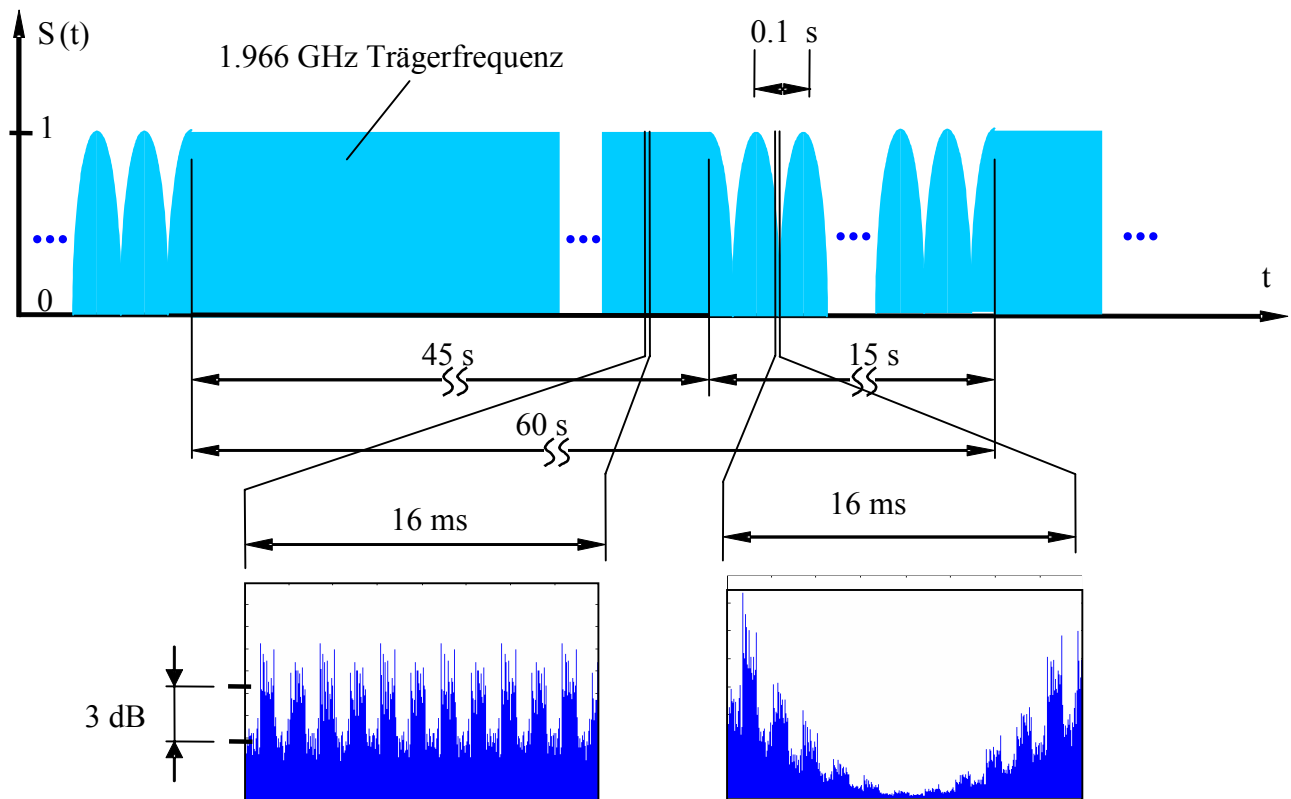


Bild 11: Zeitverlauf des mit 1 Minute periodischen generischen UMTS-Testsignals
(Quelle: G. Schmid, ARCS Seibersdorf)

Zur Anhebung des Signalpegels auf die o.g. zur Exposition der Tiere erforderliche Leistung muss dem 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 wurde ein Spezial-Verstärker (BEKO UMTS400) mit einer CW-Nennleistung von 400 W eingesetzt, der vom Berichter gemeinsam mit einem Verstärkerproduzenten konzipiert worden ist. Das verstärkte UMTS-Signal wird der Expositionsvorrichtung über ein Koaxialkabel (Suhner SA17272) zugeführt. Die Verblindung (Expositionsvorrichtung – Scheinexpositionsvorrichtung) erfolgt in einer 'black box' unmittelbar hinter dem Leistungsverstärker.

Die Expositionsvorrichtung ist mit einer (unkalibrierten) Feldsonde mit nachgeschaltetem Diodendetektor (Agilent 423B) ausgestattet, die – beispielsweise über einen xt-Schreiber oder ein digitales Messwerterfassungssystem – die laufende Registrierung des Expositionssignals erlaubt.



Literatur

- Balanis, C. A.: Advanced Engineering Electromagnetics, New York: J. Wiley & Sons, 1989.
- Bitz, A., Bökelmann, V., Gerhardt, D., Hansen, V., Hombach, V., Streckert, J., Ndoumbè Mbonjo Mbonjo, H.: A generic UMTS test signal for bio-experiments. 5th International Congress of the European BioElectromagnetics Association (EBEA), Helsinki, Finland, September 2001, pp. 173-174.
- Bitz, A. K., Streckert, J., Sommer, A. M., Lerchl, A., Hansen, V. W.: 2 GHz-exposure of non-restrained AKR/J mice in a slightly over-moded radial waveguide. *26th BEMS Annual Meeting*, Washington, DC, June 2004, 139.
- 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, June 2002, 63-64.
- 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.
- Taflove, A., Hagness, S.C.: Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. 2nd Edition, Artech House, London, 2000.
- Streckert, J., Ndoumbè Mbonjo Mbonjo, H., Bitz, A., Hansen, V.: Ein UMTS-Testsignal für bioelektromagnetische Experimente. *Newsletter*, Forschungsgemeinschaft Funk, S. 11-17, 3/2001.
- Unger, H.-G.: Elektromagnetische Theorie für die Hochfrequenztechnik, Heidelberg: Hüthig Verlag, 1981.