

HF-Exposition

von biologischen Systemen in radialen Wellenleitern

Zusammenfassung

Für Untersuchungen der Melatoninsynthese von Dsungarischen Hamstern wurden Expositionseinrichtungen, basierend auf dem Prinzip der radialen Wellenleitung, konzipiert, dimensioniert, sowie messtechnisch und dosimetrisch analysiert. Die Durchführung der Experimente erfolgte bei 383 MHz (BOS-Frequenzband) mit einer Signalform gemäß dem TETRA 25-Standard und bei 900 MHz mit einem synthetischen GSM-Testsignal. Für 'in vivo'-Versuche sollten 120 Hamster mit einer mittleren spezifischen Absorptionsrate (SAR) von 80 mW/kg pro Hamster exponiert werden. Obwohl die Hamster sich in ihren Käfigen frei bewegen konnten, betrug die Variation der SAR in den hier entwickelten Wellenleitern nur 30 %. Für 'in vitro'-Experimente wurden ebenfalls radiale Wellenleitungen verwendet, die jedoch speziell für die Exposition der Pinealorgane der Hamster ausgelegt wurden. Aufgrund der ortsfesten Anordnung der Probengefäße und des geringen Volumens der Pinealorgane (ca. 1 mm³) zeigten Berechnungen eine Variation der Exposition von nur 2,4 %.

Die für beide Versuche sehr geringen Variationen ergeben sich aus der exzellenten Homogenität der elektromagnetischen Feldverteilung im Expositionsbereich. Dies ist eine direkte Folge der hohen Rotationssymmetrie der radialen Wellenleitungen, die im Wesentlichen durch das Design der Einkopplung und des Abschlusses der Wellenleitung beeinflusst wird. Dieser Bericht stellt die Beschreibung der technischen Aspekte der Expositionseinrichtungen in den Vordergrund.

1. Einleitung

Seit einigen Jahren untersuchen interdisziplinäre Arbeitsgruppen, ob schwache elektromagnetische Felder biologische Organismen beeinflussen. Im Zuge dieser Forschungen entwickelte der Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik der Universität Wuppertal verschiedene Expositionseinrichtungen, basierend auf Rechteckhohlleitungen [1, 2], radialen Wellenleitungen [3, 4] und Absorberkammern [5]. Während die grundlegenden Anforderungen für jede Expositionseinrichtung gleich und somit jedem Wissenschaftler bekannt sind [6], können sich die speziellen Randbedingungen für verschiedene Experimente stark unterscheiden.

Dieser Bericht befasst sich ausschließlich mit radialen Wellenleitungen für die Exposition einer großen Anzahl von lebenden Tieren und kultivierten biologischen Proben. Es wird besonders auf die praktische Umsetzung des Konzeptes sowie auf die Eigenschaften bezüglich der Exposition eingegangen. Für die feldtheoretischen Grundlagen der radialen Wellenleitung wird auf [7] verwiesen. Einige nützliche Details bezüglich der Exposition von biologischen Kulturen können auch aus [8] entnommen werden.

2. Grundlagen

Im Wesentlichen besteht die radiale Wellenleitung aus zwei kreisförmigen, parallelen, metallischen Platten (Bild 1).

Eine Konus-Antenne im Zentrum (Bild 2) regt Wellen an, die sich in radialer Richtung ausbreiten. Am Ende der Metallplatten befinden sich Absorber, damit eine gro-

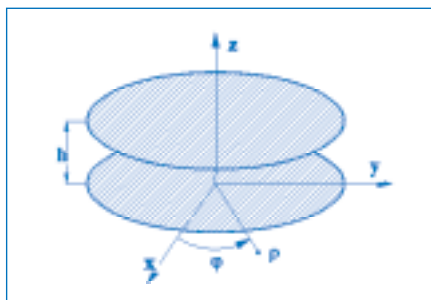


Bild 1: Grundaufbau einer radialen Wellenleitung

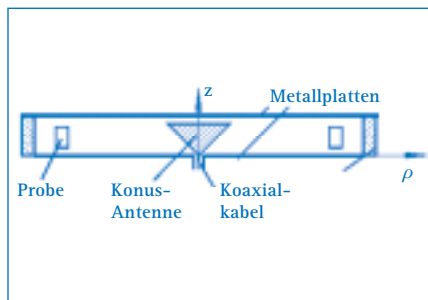


Bild 2: Schnitt durch eine radiale Wellenleitung

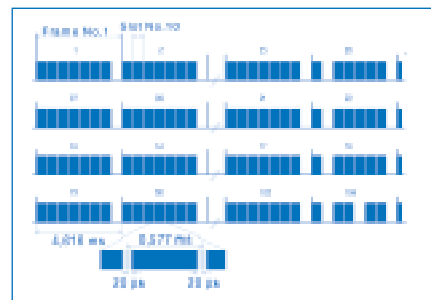


Bild 3a: Modulationssignal für das synthetische GSM Signal

Bei Stehwelligkeit der Feldverteilung durch die Reflexionen am Ende der Wellenleitung vermieden wird.

Bei geeigneter Wahl des Plattenabstandes besteht das elektromagnetische Feld in der Leitung nur aus der transversal elektromagnetischen (TEM-)Welle. Dieser Wellentyp besitzt 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. Die Anregung von Wellen mit einer Schlitzantenne, wie es in [9] vorgeschlagen wird, erfüllt im Vergleich nicht die Anforderungen einer homogenen Feldverteilung im Expositionsbereich. *In vivo*-Experimente

A. Biologische und technische Vorgaben

Um eine hohe statistische Aussagekraft der Ergebnisse zu erreichen, wurden für die 'in vivo'-Experimente 240 Hamster mit nahezu gleicher Größe und gleichem Gewicht (ca. 50 g) ausgewählt. Für die als Doppel-Blind-Studie angesetzten Versuche waren davon 120 Hamster der Expositionsgruppe und die anderen 120 Hamster der Kontrollgruppe zugeordnet. Beide Gruppen wurden in identischen radialen Wellenleitungen gehalten, wobei für das die Versuche durchführende Personal nicht zu erkennen war, in welcher der beiden Wellenleitungen die Einspeisung der Hochfrequenz-Leistung erfolgte. Jede Expositionskammer enthielt 40 Käfige (L x B x H: 0,3 m x 0,2 m x 0,1 m) mit jeweils 3 Hamstern. Die Belüftung und Beleuchtung der

Käfige war konstant während der 60-tägigen Versuchszeit. Da die Tiere in regelmäßigen Abständen Untersuchungen unterzogen wurden, musste die Entnahme der Käfige aus den Wellenleitern so einfach wie möglich realisiert werden. Der Mittelwert der SAR pro Hamster sollte 80 mW/kg bei einer möglichst geringen Variation betragen, ohne dass die lokalen SAR-Werte den Grenzwert von 2 W/kg gemäß dem ICNIRP Standard [10] in den Tieren überstieg. In einem ersten Experiment wurden die Versuche bei einer Trägerfrequenz von 900 MHz mit einem synthetischen GSM-Testsignal durchgeführt, welches den kombinierten Einfluss der 'downlink'-Strecke einer Basisstation und der 'uplink'-Verbindung eines Handys einschließlich der Frequenzkomponenten des DTX-Modus simuliert [11] (Bild 3a).

Im zweiten Experiment wurde eine Trägerfrequenz von 383 MHz mit einer Modulation gemäß dem TETRA 25 Standard verwendet (Bild 3b).

B. Aufbau der Expositionseinrichtung

Die Anordnung der Käfige erfolgte auf einem Kreis mit konstantem Abstand zur Konus-Antenne. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Käfige einen ausreichenden Abstand zum Nebenkäfig und zum Absorber haben (Bild 4).

Somit musste ein Durchmesser der Leitung von 4 m gewählt werden. Der Plattenabstand richtete sich nach der benötigten Höhe der Käfige und beträgt 14 cm. Diese Leitungshöhe garantiert auch, dass eine rotationssymmetrische Einspeisung,

wie sie die Konus-Antenne darstellt, nur den TEM-Wellentyp anregt.

Um die alle oben genannten biologischen Anforderungen zu erfüllen, mussten am Grundaufbau der radialen Wellenleitung einige Modifikationen vorgenommen werden:

So erfolgte eine Segmentierung die beiden Metallplatten aus Gründen der besseren Handhabbarkeit. Die unteren Segmente wurden mit Schrauben auf einem Holzgestell durch Anschrauben fixiert, der Abstand zu den oberen Segmenten wurde mit Styroporblöcken eingestellt. Alle noch verbleibenden Schlitz zwischen den Platten wurden mit Aluminium-Abschirmband abgeklebt, um keine Abstrahlung der HF-Leistung durch die Schlitz zu ermöglichen. Jedes der oberen Metallsegmente besitzt eine trapezförmige Öffnung (ca. 1 m x 0.4 m), durch die die Käfige aus der Leitung entnommen bzw. in die Leitung eingesetzt werden können. Metallrahmen, über die ein Metalldrahtgewebe mit einer Maschenweite von ca. 1 mm gespannt ist, dienen als Verschluss für die Öffnungen und gewährleisten gleichzeitig die Belüftung und Beleuchtung der Käfige. Der Rahmen und die Maschenweite des Metalldrahtgewebes wurden so gearbeitet bzw. gewählt, dass keine Störung der Wellenführung im Inneren der Leitung vorliegt und eine hohe Schirmdämpfung und somit eine Entkopplung vom Außenraum erzielt wird. Bei 900 MHz wurden kommerziell erhältliche flache Schaumstoff-Absorber mit einem Reflexionsfaktor von ca. -15 dB verwendet, bei 383 MHz kamen dagegen selbst gebaute Absorber zum Einsatz, da die in diesem

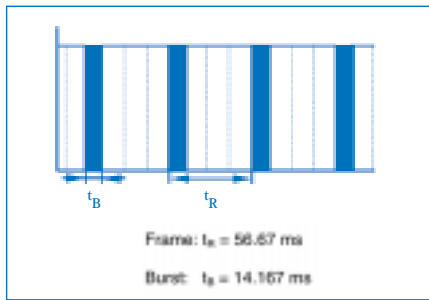


Bild 3b: Modulationssignal für das TETRA 25-Signal

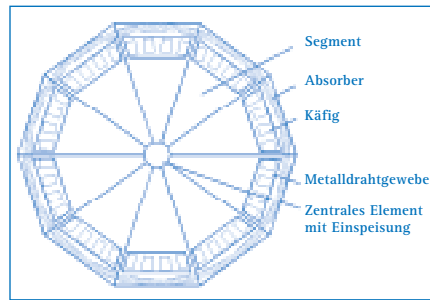


Bild 4: Aufsicht der radialen Wellenleitung für die 'in vivo' Experimente

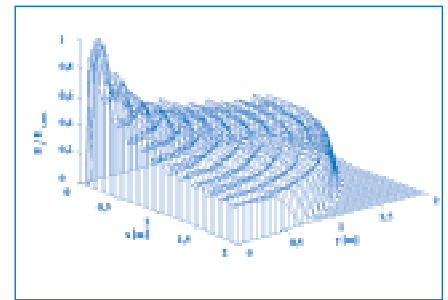


Bild 5: Betrag der z-Komponente des elektrischen Feldes in einem 90°-Sektor der leeren radialen Wellenleitung bei 900 MHz

Frequenzbereich üblicherweise eingesetzten Pyramidenabsorber eine zu große Bautiefe besitzen. Diese selbst hergestellten Absorber bestehen aus einem Kurzschluss, vor dem sich in einem Abstand von $\lambda/4$ eine auf 377Ω angepasste Widerstandsfolie befindet. So konnten die gleichen Reflexionseigenschaften wie bei 900 MHz erreicht werden.

Der gemessene Kopplungsfaktor von Expositions- und Schein-Expositionskammer beträgt weniger als -75 dB.

C. Feldverteilung und Dosimetrie

Die Feldverteilung in der radialen Wellenleitung wurde unter anderem auch numerisch mit Hilfe der Finite Differenzen Methode im Zeitbereich [12] analysiert.

Bild 5 zeigt die elektrische Feldstärke bei 900 MHz und 383 MHz in einem 90°-Sektor der leeren radialen Wellenleitung. Die $r^{-1/2}$ -Abhängigkeit der Feldstärke ist durch die Stehwelligkeit als Folge der Reflexionen am realistischen Absorbermodell überlagert. Die Feldstärke ist in Umfangsrichtung konstant.

Es ist zu erwarten, dass sich die Feldverteilung der leeren Leitung nach Einsetzen der Hamster ändert. Um zu überprüfen, ob durch die Hamster keine unerwünschten höheren Wellentypen angeregt werden bzw. ob die Hamster zu großen Feldstörungen in der Wellenleitung führen, wurden Feldmessungen sowie numerische Berechnungen mit verschiedenen Anordnungen von Hamsterphantomen durchgeführt. Ein weiterer wichtiger Punkt war dabei die gegenseitige Abschattung

der Hamster im Käfig und die daraus resultierenden SAR-Verteilungen in den Tieren. Zur Untersuchung der globalen Auswirkung der Hamster auf die Feldverteilung in der Wellenleitung dienten zunächst als Grundlage für die Berechnungen vereinfachte Hamsterphantome, bestehend aus homogenen Ellipsoiden mit einer Länge von 7 cm und Halbachsen von 2 cm und mit den Materialparametern $\epsilon_r = 50$ und $K = 1.25 \text{ S/m}$.

Bild 6 zeigt die Feldverteilung im 90° Sektor mit den zufällig angeordneten Hamsterphantomen bei 900 MHz. Wie zu erwarten, treten Reflexionen und Feldstörungen an den Hamstern auf, die jedoch auf ihre nähere Umgebung beschränkt sind. Ein weiteres Ergebnis dieser Berechnungen war, dass die Feldkomponenten, die auf die Anregung höherer Moden schließen lassen, vernachlässigbar sind. Somit ist also das Expositionsfeld vollständig durch die TEM-Welle charakterisiert.

Für eine genauere Untersuchung des Einflusses der Hamsterpositionen auf die SAR-

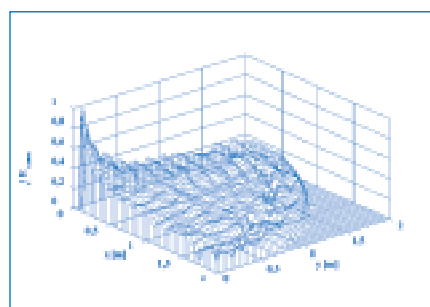


Bild 6: Betrag der z-Komponente des elektrischen Feldes in einem 90°-Sektor der radialen Wellenleitung mit zufällig angeordneten Hamsterphantomen bei 900 MHz

Verteilungen in den Tieren wurde ein seitlich durch magnetische Wände begrenzter 9° Sektor der radialen Wellenleitung mit einem Käfig und verschiedenen Anordnungen der drei Hamstern simuliert (Bild 7).

Bild 8 zeigt die Feldverteilung für vier verschiedene Anordnungen der Phantome bei 900 MHz. Derartige Rechnungen ergaben, dass ein Mittelwert der SAR pro Hamster von 80 mW/kg bei einer in die Wellenleitung eingespeisten zeitlich gemittelten Gesamtleistung von 2,9 W erreicht wird. Bei dem hier verwendeten GSM-Testsignal mit einem Tastverhältnis von ca. 7:8 bedeutet dies, dass im Burst eine Leistung von 3,3 W zur Verfügung gestellt werden muss. Die Standardabweichung des Ganzkörper-SAR-Wertes beträgt 30 % unter Berücksichtigung der nicht ideal homogenen Reflexionseigenschaften des Absorbers in jedem Sektor der aufgebauten Leitung und einer daraus resultierenden Variation der Feldstärke in Umfangsrichtung von 7 %. Anzumerken ist noch, dass von den 30 % Standardabweichung allein

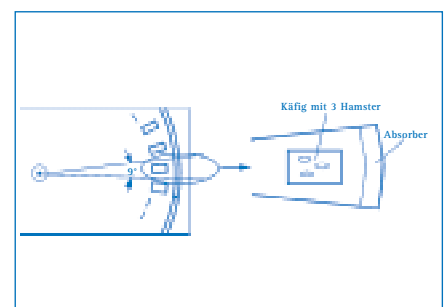


Bild 7: 9°-Sektor der radialen Wellenleitung mit einem Käfig und drei Hamstern

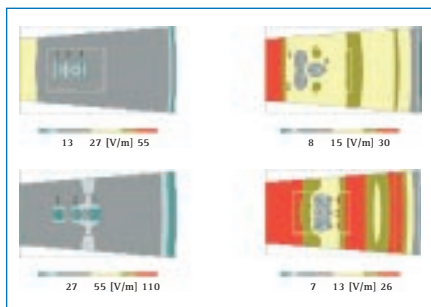


Bild 8: Elektrische Feldverteilung in einem 9°-Sektor der radialen Wellenleitung für verschiedene Anordnungen der drei Hamster bei einer eingespeisten Leistung von 1 W.

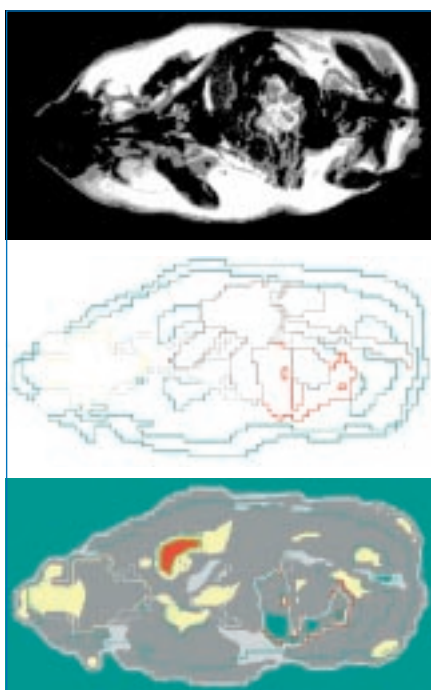


Bild 9: SAR-Berechnung für das auf Kernspin-Aufnahmen basierende Hamsterphantom. (a) Kernspin-Aufnahme. (b) Phantom des Hamsters für die numerischen Berechnungen. (c) SAR-Verteilung

25 % durch das biologische Design mit freilaufenden Tieren bedingt sind.

Durch die größere Wellenlänge bei 383 MHz und das damit günstigere Verhältnisses zu den Körperabmessungen der Hamster beträgt die Standardabweichung der spezifischen Absorptionsrate pro Hamster bei dieser Frequenz nur 16 %. Der Mittelwert von 80 mW/kg wird bei einer zeitlich gemittelten eingespeisten Leistung von 45 W erreicht. Da das TETRA 25-Signal ein Tastverhältnis von 1:4 hat, benötigt man eine Leistung von 180 W im Burst des Signals.

Für die Berechnung der lokalen SAR-Werte wurde ein Hamsterphantom, basierend auf Kernspin-Aufnahmen, entwickelt, das eine räumliche Auflösung von 1mm³ hat und 22 unterschiedliche Gewebe berücksichtigt (Bild 9).

Die Rechnungen zeigten, dass ein über 1g Gewebe gemittelter lokaler SAR Wert von 600 mW/kg im Hamster nicht überschritten wird.

3. 'In vitro'-Experimente

Auch für die Exposition von Pinealorganen der Dsungarischen Hamster mit dem synthetischen GSM-Testsignal bei Trägerfrequenzen von 900 MHz und 1,8 GHz wurden radiale Wellenleitungen verwendet. Die Kammern für die Expositions- und Kontrollgruppe sind für die gleichzeitige Aufnahme von 24 Proben dimensioniert (Bild 10).

Die Pinealorgane befinden sich in zylindrischen Glasröhrchen mit einem Durchmesser von 0,8 cm und einer Höhe von 1,5 cm, die oben und unten durch Gummistopfen verschlossen werden. Da es notwendig ist, jede Probe während der Versuche über dünne Schläuche mit Nährlösung zu versorgen, mussten entsprechende Durchführungen für die Schläuche ins Innere der Wellenleitung entwickelt werden. Diese Durchführungen dürfen die Wellenführung und die Abschirmung zum Außenraum nicht beeinflussen. Die Abschirmung spielt eine wichtige Rolle, da beide

radiale Wellenleitungen in demselben Inkubator untergebracht werden. Die Versuche sollen bei verschiedenen, über ein Pinealorgan gemittelten SAR-Werten von 8, 80 und 800 mW/kg durchgeführt werden. Des Weiteren ist das Einführen und Entnehmen der Probengefäße in bzw. aus den Wellenleitern möglichst einfach zu realisieren.

Um eine homogene Exposition zu erreichen, werden die Proben in einem Abstand von 30 cm um die zentrale Antenne angeordnet. Der Durchmesser der Wellenleitung hängt von der Dicke der verwendeten Absorber ab. In dem durchgeführten Experiment werden bei beiden Frequenzen flache Schaumstoffabsorber verwendet. Somit ist ein Durchmesser von 1,1 m ausreichend. Der Plattenabstand wurde zu 7 cm gewählt. Messungen der Feldstärke am Ort der Proben in der aufgebauten Leitung zeigten eine Variation der Feldstärke von 2,4 %.

Ein spezielles Problem stellt hier die Durchführung der Schläuche durch die Metallplatten der Wellenleitung dar. Üblicherweise benutzte man bisher Öffnungen in den Metallplatten, die durch abschraubbare Deckel verschlossen wurden. Dies macht jedoch die Entnahme der Proben zeitaufwendig und umständlich. Für die hier entwickelten radialen Wellenleiter wurden für jede der 24 Proben Metallrohre an die obere und untere Metallplatte angeschraubt, deren Durchmesser und Länge so gewählt wurden, dass sie als Rundhohlleitungen fungieren, die weit unterhalb der Grenzfrequenz ihrer Grundwelle betrieben werden. Dabei reicht es aus, den Durchmesser nur der oberen Rundhohlleitungen so zu wählen, dass die Probengefäße hindurchpassen. Durch die unteren Rundhohlleitungen müssen dann nur die Schläuche mit der Nährlösung geführt werden (Bild 11).

Die Rundhohlleitungen müssen nicht verschlossen werden, da sie unterhalb der Grenzfrequenz arbeiten und somit die eingekoppelten Felder nur nicht ausbreitungsfähige Wellentypen anregen. So wird also

einerseits eine einfache Handhabung der Proben und andererseits auch die hohe Abschirmung des Wellenleiters gewährleistet.

Die erste, grobe Dimensionierung der Durchführungen wurde auf der Basis der klassischen Leitungstheorie vorgenommen. Da sich aber hier stark verlustbehaftetes Material (Nährlösung) in der Rundhohlleitung befindet, wurden zusätzliche numerische Berechnungen durchgeführt. Diese hatten zum Ziel, die Ausbreitungskonstante der Grundwelle zu bestimmen, über die dann die Dämpfung der Felder ermittelt wurde.

Bild 12 zeigt in einem Ausschnitt (siehe gestricheltes Gebiet in Bild 11) die Feldverteilung in der oberen Hälfte des Probengefäßes und in der oberen Durchführung. Bei einem Durchmesser von 1 cm und einer Länge von 2,5 cm beträgt die Dämpfung der Durchführung 42 dB. Die Dämpfung der unteren Rundhohlleitung mit einem Durchmesser von 0,15 cm und einer Länge von 1 cm beträgt 52 dB.

Die Berechnung der Feldverteilung für ein Pinealorgan lieferte eine weitgehend homogene SAR-Verteilung im Probengefäß. Bei 900 MHz erhält man eine spezifische Absorptionsrate von 340 mW/kg bei einer eingespeisten Leistung von 1 W. Somit benötigt man eine zeitlich gemittelte eingespeiste Leistung von 2,35 W, um eine spezifische Absorptionsrate von 800 mW/kg zu erreichen. Im Verlaufe des Projektes werden noch weitere Berechnungen bei beiden Frequenzen durchgeführt. Insbesondere wird eine verbesserte Modellierung des Pinealorgans vorgenommen, um die Auswirkung der Änderungen von Position und Ausrichtung des Organs bezüglich der einfallenden Welle auf die SAR-Werte genauer zu untersuchen.

5. Schlussbemerkung

Es wurde gezeigt, dass radiale Wellenleitungen aufgrund ihrer hochsymmetrischen Geometrie besonders für die gleichförmige Exposition einer grossen Zahl von biologischen Proben geeignet sind. Obwohl in den hier gezeigten Beispielen

Öffnungen für Belüftung, Beleuchtung sowie Durchführung der Probengefäße und der Schläuche, realisiert werden mussten, konnte durch geeignetes Design eine ausreichende Entkopplung zum Außenraum sichergestellt werden. Da die Leistung auf den Querschnitt der Leitung beschränkt bleibt, erreicht man zusätzlich eine hohe Effizienz bezüglich absorbiertes und eingespeistes Leistung.

Referenzen

- [1] Linz, K. W., von Westphalen, C., Streckert, J., Hansen, V., Meyer, R.: Membrane potential and currents of isolated heart muscle cells exposed to pulsed radio frequency fields. *Bioelectromagnetics*, Vol. 20, 1999, No. 8, 497-511.
- [2] J. Streckert and V. Hansen, „Design of high-frequency exposure setups for the experiments in Bonn and Essen“, in: K. Brinkmann, and G. Friedrich (Editors): *Electromagnetic Compatibility of Biological Systems*, vol. 5, Berlin: VDE-Verlag, 1997.
- [3] V. W. Hansen, A. K. Bitz, and J. R. Streckert, „A fully shielded setup for uniform exposure of 120 hamsters with radio frequency electromagnetic fields“ *BEMS Annual Meeting*, St. Pete Beach, Florida, June 7-11, 1998.
- [4] A. Lerchl, H. Brendel, J. R. Streckert, A. K. Bitz, and V. W. Hansen, „Investigations on the effects of 900 MHz electromagnetic fields on growth, melatonin, and testicular cell composition in djungarian hamsters“, *BEMS Annual Meeting*, St. Pete Beach, Florida, June 7-11, 1998.
- [5] J. Streckert, A. Bitz, and V. Hansen, „Non-thermal radio frequency exposure of humans, animals and other biological objects“, in *Proc. Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility EMC '98*, Rom, 1998, pp. 194-199.
- [6] V. Hansen, „Guidelines for experiments to investigate the effect of radio-frequency electromagnetic fields on biological systems - Radio-frequency aspects -“, *Edition Wissenschaft*, No. 11/E, pp. 3-27, 1997.
- [7] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, New York: J. Wiley & Sons, 1989.
- [8] E. G. Moros, W. L. Straube, and W. F. Pickard, „The radial transmission line as a broad-band shielded exposure system for microwave irradiation of large numbers of culture flasks“, *Bioelectromagnetics*, vol. 20, pp. 65-80, 1999.
- [9] S. J. Bonasera, J. C. Toler, and V. P. Popovic, „Long-term bioeffects of 435 MHz radiofrequency radiation on blood-borne end points in cannulated rats. I. engineering considerations“, *J. Microwave Power EE*, vol. 23, pp. 95-104, 1988.
- [10] ICNIRP, „Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)“, *Health Physics*, vol. 74, pp. 494-522, 1998.
- [11] M. Schüller, J. Streckert, A. Bitz, K. Menzel, B. Eicher, „Proposal for generic GSM test signal“, *Proc. 22st BEMS Annual Meeting*, Munich, June 2000, pp. 122-123.
- [12] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, Boca Raton: CRC Press, 1993.

Prof. Dr. V. Hansen, Dipl. Ing. A. Bitz,
Dr. J. Streckert, Lehrstuhl für Theoretische
Elektrotechnik, Bergische Universität -
Gesamthochschule Wuppertal
Dr. A. Lerchl, Institut für Reproduktionsmedi-
zin, Universität Münster

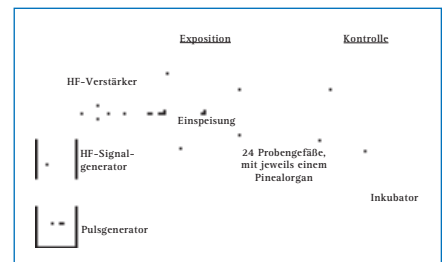


Bild 10: Anordnung für die 'in vitro'-Experimente.

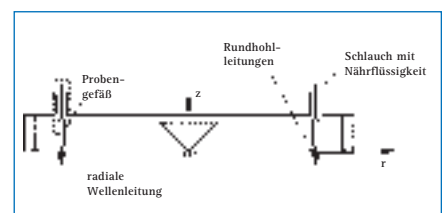


Bild 11: Durchführungen in den Metallplatten der radialen Wellenleitung. Die Durchführungen werden aus Rundhohlleitungen, die weit unterhalb der Grenzfrequenz ihrer Grundwelle betrieben werden, realisiert.

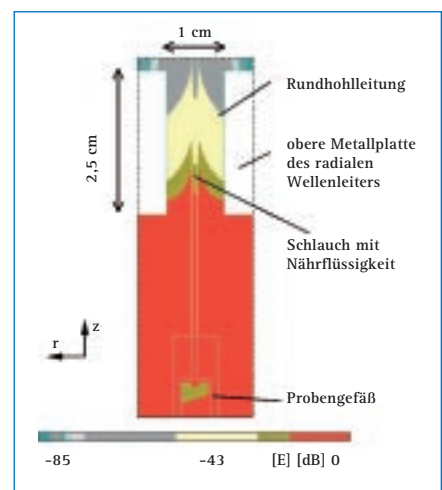


Bild 12: Elektrische Feldverteilung in dem in Bild 11 durch gestrichelte Linien eingegrenzten Gebiet.