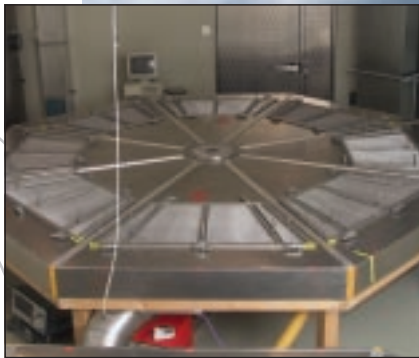
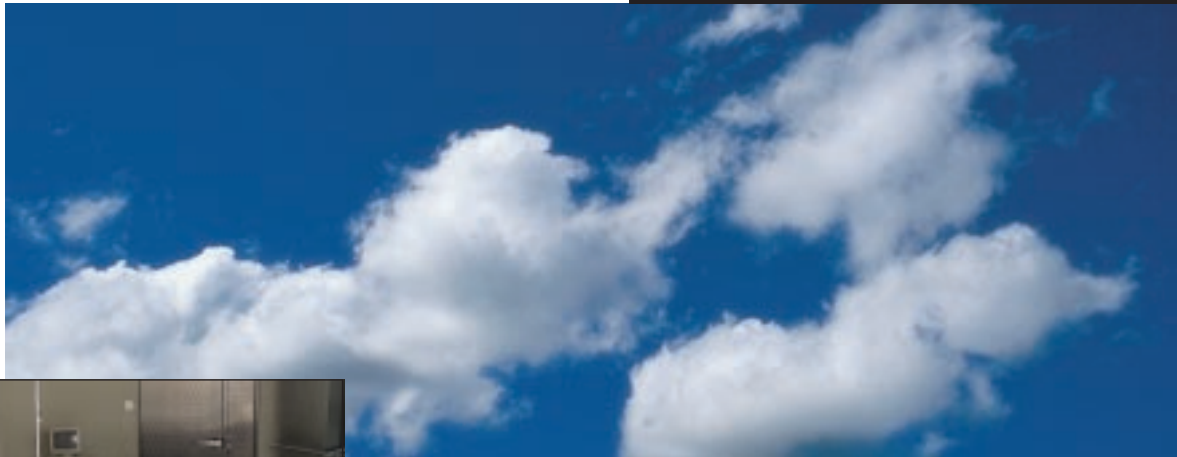


Edition Wissenschaft

Forschungsgemeinschaft Funk e. V. · G 14515 · Ausgabe Nr. 18 · Mai 2003



Joachim Streckert

Anforderungen an technische Einrichtungen zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme

Vortrag im wissenschaftlichen
Symposium in Berlin am 19.9.2002
anlässlich des 10-jährigen Jubiläums
der Forschungsgemeinschaft Funk e.V.



Forschungsgemeinschaft Funk

Edition
Wissenschaft

Die Forschungsgemeinschaft Funk e.V. hatte anlässlich ihres 10-jährigen Bestehens ein wissenschaftliches Symposium in Berlin veranstaltet.

Das sehr positive Echo auf das Symposium und die Nachfrage nach den Manuskripten der Beiträge haben uns bewogen, die Redner um die Ausarbeitung ihrer Vorträge zu bitten. In vier Beiträgen wurde eine Bestandsaufnahme aus der Sicht von Experten unterschiedlicher Fachrichtungen vorgenommen.

Der Einführungsvortrag zu diesem Symposium wurde von Prof. Roland Glaser „Zur Situation der Forschung über mögliche Gefahren durch elektromagnetische Felder“ gehalten. Dieser ist in der Festschrift zur 10-Jahres-Feier der Forschungsgemeinschaft Funk e.V. nachzulesen. Die ausgearbeiteten Vorträge der weiteren Redner werden in der Reihe „Edition Wissenschaft“ in drei Folgen abgedruckt. Wir beginnen die Reihe mit dem Vortrag zu den Anforderungen an hochfrequente Expositionseinrichtungen.

Die thermischen Wirkungen konzentrierter Hochfrequenzstrahlung sind allgemein bekannt: Biologisches Gewebe erwärmt sich und kann bei

sehr hohen Intensitäten zerstört werden. Die Schwelle für thermische Effekte ist exakt definierbar und wird auch dazu verwendet, für den Personenschutz maximal zulässige Grenzwerte elektromagnetischer Größen abzuleiten, die bei technischen Anwendungen einzuhalten sind. Mit Hilfe mathematischer Modelle kann der Wärmeeintrag im Zellgewebe sogar theoretisch vorausgesagt werden.

Neben thermischen Effekten wird verstärkt die Frage nach anderen Wirkungen unterhalb der thermischen Wirksamkeit diskutiert. Da trotz jahrelanger Forschung bis heute kein reproduzierbarer Nachweis biologischer Wirkungen schwacher elektromagnetischer Felder geführt wurde, konnten auch keine mathematischen Modelle entwickelt werden, die derartige Mechanismen beschreiben. Die einzige Möglichkeit, zu objektiven Aussagen zu gelangen, ist die sorgfältige Durchführung wissenschaftlicher Experimente unter eindeutig definierten Randbedingungen.

Die Forschungsgemeinschaft Funk e.V. hat vor mehr als zehn Jahren damit begonnen, Forschungsprojekte auf diesem Gebiet zu initiieren und deren Durchführung durch

unabhängige Forschungsinstitute finanziell zu fördern.

Bei Experimenten zu biologischen Effekten elektromagnetischer Felder steht meist das biologisch/medizinische Versuchsdesign im Mittelpunkt des Interesses. Damit eine Hochfrequenz-Exposition der beteiligten biologischen Objekte unter eindeutig definierten Bedingungen stattfindet, ist aber auch vertieftes elektrotechnisches Know-how erforderlich, um beispielsweise eine gewünschte räumliche Verteilung des elektromagnetischen Feldes über alle Proben in einer Expositionsanlage zu erzielen.

Der Bericht von Dr. Joachim Streckert, der die Vortragsreihe in der Edition Wissenschaft eröffnet, schildert an Beispielen aus dem Mobilfunkbereich, welche hohen Anforderungen von Seiten der Ingenieurwissenschaften (insbesondere der „Hochfrequenztechnik“) an technische Einrichtungen bei Experimenten zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme gestellt werden müssen.

Mit herzlichen Grüßen

Gerd Friedrich

Einleitung	4
Exposition biologischer Objekte	5
Beispiele für Expositionsanlagen	8
1. Experimente mit Zellkulturen	8
2. Experimente mit frei beweglichen Tieren	12
3. Experimente mit Versuchspersonen	16
Schlussfolgerung	17
Literatur	17
Impressum	18

Joachim Streckert

Anforderungen an technische Einrichtungen zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme

Vortrag im wissenschaftlichen Symposium in Berlin am 19.9.2002
anlässlich des 10-jährigen Jubiläums der Forschungsgemeinschaft Funk e.V.

Einleitung

Die Frage nach eventuellen Beeinflussungen oder gar Schädigungen biologischer Systeme durch elektromagnetische Felder wird weltweit stark diskutiert. Der bisher einzige, unbestrittene, nachweisbare und reproduzierbare Mechanismus ist die Wärmeerzeugung in biologischen Systemen, die sogenannte „thermische Wirkung“. Mit Hilfe mathematischer Modelle, also formelmäßiger Zusammenhänge, kann der Wärmeintrag in Zellgewebe auch theoretisch vorausgesagt werden.

Über diese Erkenntnisse hinaus bestehen besonders bei der Nutzung von Funkanwendungen, wie z.B. Mobilfunk, in der Öffentlichkeit Befürchtungen, dass auch unterhalb der thermischen Wirksamkeit Beeinflussungen oder gar Beeinträchtigungen auftreten können. Da trotz jahrelanger Forschung bis heute kein reproduzierbarer Nachweis biologischer Wirkungen schwacher elektromagnetischer

Felder geführt wurde, konnten auch keine mathematischen Modelle entwickelt werden, die derartige Mechanismen beschreiben und die weitere Erforschung auf theoretischer Ebene gestatten würden. So ist man weiter auf Beobachtungen angewiesen, die nur im Rahmen sorgfältig durchgeführter wissenschaftlicher Experimente unter eindeutig definierten Randbedingungen sinnvoll sind. Diese Vorgehensweise ist personell und technisch aufwändig und somit kostenintensiv, stellt aber in Anbetracht des kontroversen und teilweise auch durch Unsachlichkeit geprägten Meinungsbildes, das durch die Medien widergespiegelt wird, die einzige Möglichkeit dar, zu objektiven Aussagen zu gelangen.

Im Fokus des Interesses steht bei Experimenten zu biologischen Effekten elektromagnetischer Felder meistens das biologisch/medizinische Versuchsdesign und somit die Frage, welche Objekte (z. B. Gewebezellen, Kleintiere oder Versuchspersonen) exponiert und welche

Parameter (z. B. Membranströme, Tumorpromotion oder Reaktionsvermögen) untersucht werden. Damit eine Hochfrequenz-Exposition der am Experiment beteiligten biologischen Objekte unter eindeutig definierten Bedingungen stattfindet, ist aber auch vertieftes elektrotechnisches Know-how erforderlich, beispielsweise um eine gewünschte räumliche Verteilung des elektromagnetischen Feldes über alle Proben in einer Expositionsanlage zu erzielen oder um bei festgelegter Frequenz und Signalform die für eine bestimmte Expositionsstärke erforderliche Hochfrequenz-Sendeleistung zu berechnen.

Dieser Beitrag schildert an einigen Beispielen aus dem Mobilfunkbereich, welche Lösungen von Seiten der Ingenieurwissenschaften angeboten wurden, um Hochfrequenz-Expositionsanlagen für sehr unterschiedliche biologische Objekte hinsichtlich der Reproduzierbarkeit und Gleichmäßigkeit der applizierten elektromagnetischen Felder zu optimieren.

Exposition biologischer Objekte

Grundsätzlich besteht jede Hochfrequenzexpositionsanlage, wie in Bild 1 gezeigt, aus einem Hochfrequenz-Signalgenerator, meist gefolgt von einem Leistungsverstärker, aus der eigentlichen Expositionsvorrichtung für die biologischen Testobjekte, die z. B. von einem Messraum mit einer Antenne oder auch von einer kleinen Messkammer mit geeigneter Einspeisung gebildet wird, und aus einem definiert absorbierenden oder reflektierenden Abschluss. Obligatorisch sind heutzutage Paralleltests mit einer Kontrollgruppe in einer gleichartigen Expositionseinrichtung ohne Hochfrequenzsignal (so genannte Schein-Exposition).

Der Generator erzeugt das mit einem typischen Mobilfunksignal modulierte Hochfrequenzsignal bei einer Trägerfrequenz im Bereich des nachzubildenden Funksystems (zum Beispiel 900 MHz für GSM (D1/D2-Netz), 1800 MHz für GSM (E-Netz) oder 2000 MHz für UMTS). Da die Einstellungen der möglichen Signalparameter beliebig vielfältig sind, wurden im Rahmen von Arbeitsgruppen der FGF Standard-Signalmuster für biologische Experimente mit GSM- und UMTS-Signalen entwickelt. In den Bildern 2 und 3 sind Zeit- und Spektralverläufe dieser GSM- und UMTS-Signale skizziert. Eine ausführliche Darstellung des generischen UMTS-Signals findet sich in [Streckert et al. 2001]. Der auf den Generator folgende Verstärker hebt das Signal auf die für das Experiment benötigten Leistungspegel an. Die Expositionseinrichtung soll u.a. eindeutige und reproduzierbare

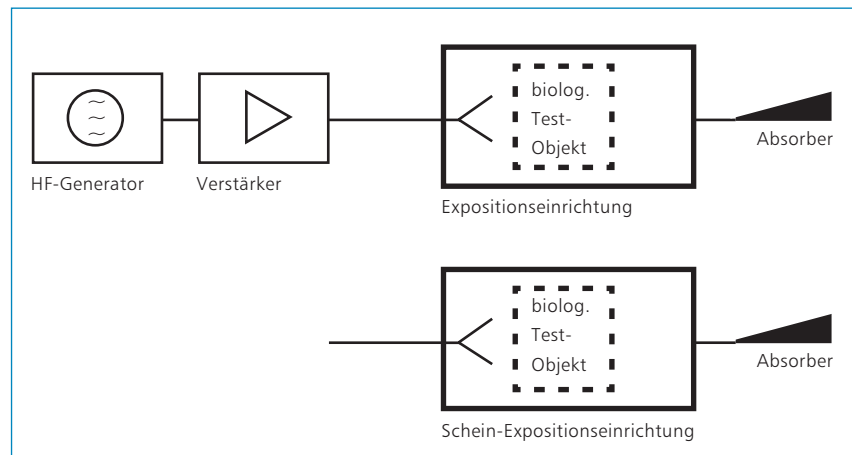


Bild 1: Schema einer Expositionsanlage

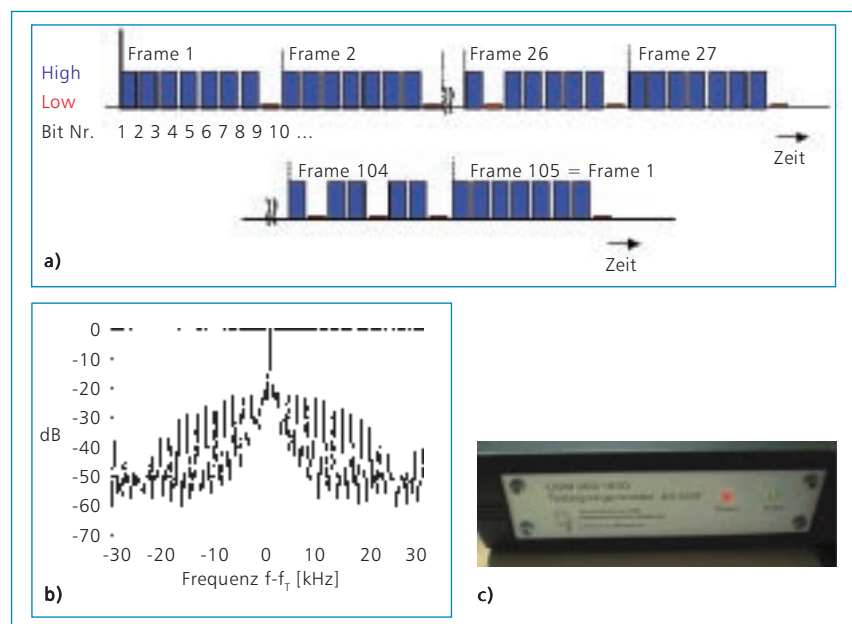


Bild 2: Generisches GSM-Testsignal

- a) Zeitliches Modulationsschema des Hochfrequenzträgers
- b) Frequenzspektrum in der Umgebung der Trägerfrequenz f_T
- c) Ansicht des im Auftrag der FGF entwickelten Modulations-Signalgenerators

Anforderungen an Hochfrequenz-Expositionseinrichtungen

Ausreichendes Messvolumen

Abschirmung gegen externe Felder

Erzeugung eindeutig definierter Feldverteilungen am Testobjekt

Gleichwertige Exposition aller Objekte/Probanden

Zuführung von Licht, Luft, Nährstoffen, Wärme usw.

Integration von Messvorrichtungen usw...

Tabelle 1: Notwendige Eigenschaften von Expositionseinrichtungen

Exposition

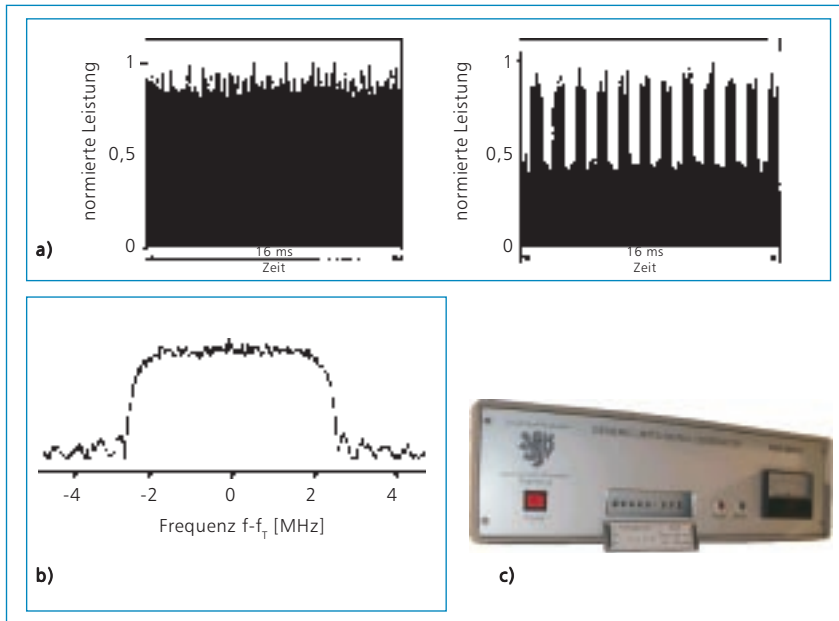


Bild 3: Generisches UMTS-Testsignal
 a) Ausschnitte aus dem Zeitverlauf des Hochfrequenzsignals
 b) Frequenzspektrum in der Umgebung der Trägerfrequenz f_T
 c) Ansicht des im Auftrag der FGF entwickelten HF-Signalgenerators

Felder bereitstellen, was aus hochfrequenztechnischer Sicht vor allem impliziert, unkontrollierbare Interferenzeffekte infolge von Mehrfachreflexionen oder Superpositionen mit unbeabsichtigten Wellentypen zu vermeiden sowie Abschirmmaßnahmen gegen externe Feldeinflüsse zu treffen (vgl. Tabelle 1).

Abhängig von der Größe und Anzahl der Messobjekte kommen sehr unterschiedliche Bauformen für die Expositionseinrichtung in Betracht. Für kleine Probenvolumina sind immer geschlossene Messzellen zu bevorzugen, die aufgrund ihrer Dimensionierung als Wellenleiter im Frequenzbereich der Grundmode ausgebildet sind und stabile charakteristische Feldverteilungen besitzen.

Der Einsatz von linearen Messzellen, wie Rechteck-Hohlleitungen (Bild 4), stößt dann an Grenzen, wenn viele Proben gleichzeitig exponiert werden sollen, sodass aufgrund von Abschattungseffekten die Belastung der Proben zu ungleichmäßig wird. In solchen Fällen kann z. B. die radiale Parallelplattenleitung verwendet werden (Bild 5), deren Durchmesser der beabsichtigten Anzahl von Messobjekten im Prinzip beliebig angepasst werden kann. Auch sie ist als geschlossene und somit für externe hochfrequente Felder abgeschirmte Messzelle ausführbar.

Falls die Abmessungen der Testobjekte deutlich größer sind als eine halbe Wellenlänge, kommen nur Absorberräume ('anechoic chambers') als Expositionseinrichtungen in Betracht, die mit absorbierenden Wandverkleidungen versehen und zusätzlich nach außen hin metallisch abgeschirmt sind (Bild 6). Die Erzeugung des HF-Feldes geschieht über ein Antennensystem innerhalb

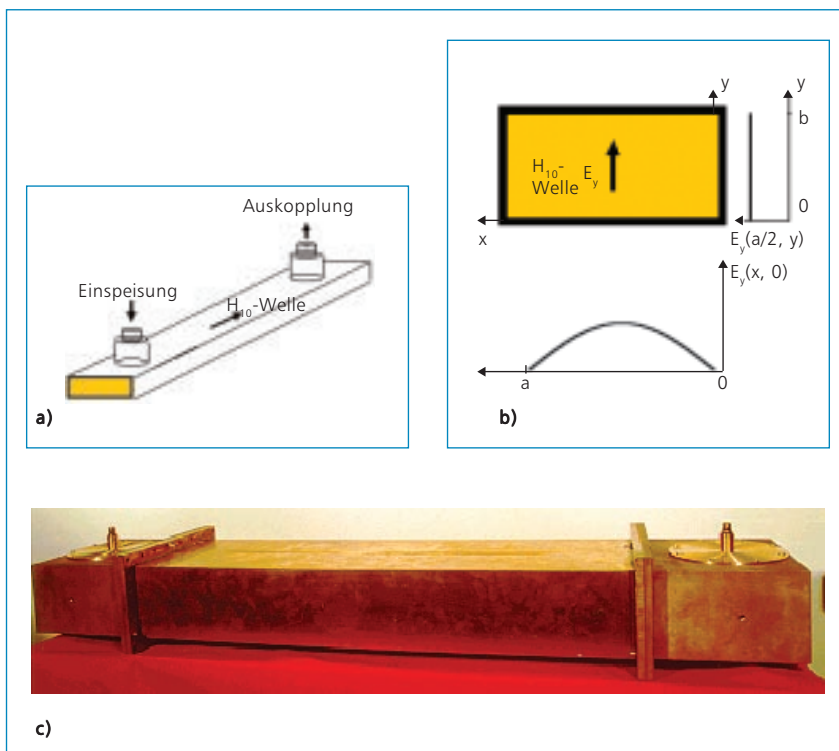


Bild 4: Rechteckhohlleitung
 a) Prinzipieller Aufbau
 b) Transversale Feldverteilung der Grundwelle
 c) Ausführungsbeispiel

des Messraums, sodass die Feldverteilung offensichtlich nicht nur von den Eigenschaften des Raumes, sondern auch von der speziellen Antennenkonfiguration abhängt.

Die Entwicklung einer für ein spezifisches Experiment geeigneten Expositionseinrichtung geht in mehreren Schritten vor sich:

1. Unabhängig von der Anzahl und Größe der Messobjekte steht zweckmäßigerweise die Optimierung der leeren Expositionseinrichtung am Anfang. Ziel dieses Schritts ist, über dem gesamten späteren Expositionsvolumen ein elektromagnetisches Feld zur Verfügung zu stellen, das eine eindeutige (meist möglichst homogene) räumliche Verteilung aufweist und allein durch die Speiseleistung in seinen Feldamplituden kontrolliert werden kann. Zur Lösung des elektromagnetischen Feldproblems werden analytische bzw. numerische Berechnungsverfahren eingesetzt und durch Messungen des Leerfeldes an der aufgebauten Expositionseinrichtung abgestützt.

2. Im zweiten Schritt finden die biologischen Messobjekte Berücksichtigung. Da die meisten biologischen Materialien verlustbehaftete Dielektrika darstellen, die zudem häufig in sehr inhomogene Strukturen eingebunden sind, können zur dosimetrischen Analyse des Problems nur numerische Verfahren eingesetzt werden, wobei sich für biologische Anordnungen insbesondere die Finite Differenzen-Methode [Taflove and Hagness, 2000] im Zeitbereich als geeignet erweist. Ein rein messtechnischer Zugang mit Feldsonden scheidet aus verschiedenen Gründen meist aus (Verfälschung des Feldes,

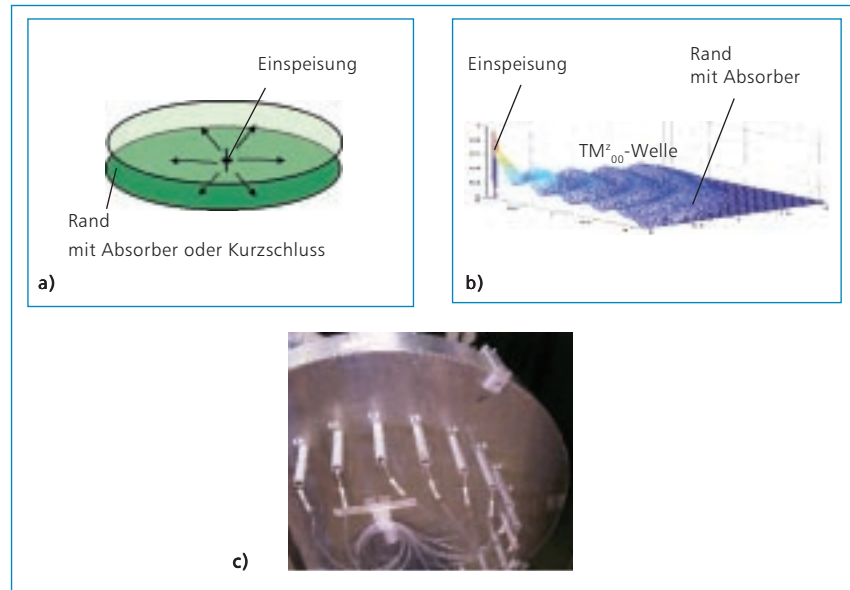


Bild 5: Radiale Parallelplattenleitung
 a) Prinzipieller Aufbau
 b) Radiale Feldverteilung der Grundwelle
 c) Ausführungsbeispiel

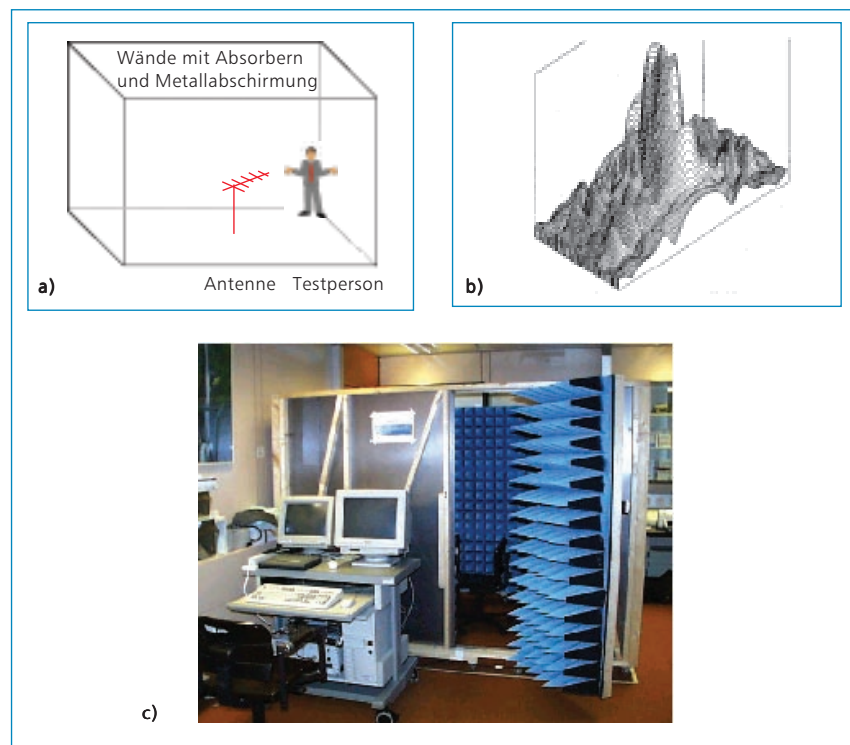


Bild 6: Absorberraum
 a) Prinzipieller Aufbau
 b) Beispiel für Feldverteilung im Absorberraum
 c) Ausführungsbeispiel

Sterilität, Gewebeerstörung). Sind die in die biologischen Objekte eindringenden Felder bekannt, kann auch die Spezifische Absorptionsrate

$$SAR = \frac{1}{2} \frac{\kappa}{\rho} |\vec{E}|^2$$

ermittelt werden (κ : elektrische Leitfähigkeit des Gewebes; S : Materialdichte; \vec{E} : Phasor der elektrischen Feldstärke), die gemäß [IEC 1997] definiert ist als die pro Zeiteinheit in einem Gewebeelement der Masse Δm in Wärme umgesetzte Feldenergie ΔW_v :

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta W_v}{\Delta m} \right)$$

In Experimenten mit Versuchspersonen kann die SAR unmittelbar als Maß eingesetzt werden, um zwischen thermischen und athermischen Wirkungen von Hochfrequenzfeldern zu trennen, weil Grenzwerte für den Menschen bekannt und durch einschlägige Bestimmungen festgelegt sind (z. B. [BlmSchV, 1996], [ICNIRP, 1998] und [BGR B11, 2001]). Bei anderen biologischen Objekten, also Versuchstieren und insbesondere Zellsystemen, können die absoluten SAR-Werte dagegen nicht ohne zusätzliche Temperaturerhöhung als Bewertungskriterium für die Stärke der Exposition herangezogen werden, weil beispielsweise Versuchstiere andere thermische Schwellen als Menschen aufweisen und bei Zellkulturen die SAR stark von Probenform und -volumen abhängig ist. Daher wird die Exposition bei 'in vivo'- und 'in vitro'-Experimenten häufig besser durch Angabe von Feldstärken oder Leistungsdichten als durch Spezifische Absorptionsraten charakterisiert.

Beispiele für Expositionsanlagen

1. Experimente mit Zellkulturen

A. Einzelzellen

In einem gemeinsam mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. R. Meyer an der Universität Bonn durchgeführten Projekt wurde der mögliche Einfluss von Mobilfunksignalen auf den

Calcium-Ionenstrom durch die Zellwand von Herzmuskelzellen untersucht. Dazu ist es erforderlich, mit Hilfe der so genannten 'patch clamp'-Technik eine elektrische Verbindung mit dem Zellinneren herzustellen und gleichzeitig die Zelle mit hochfrequenten Feldern zu exponieren. Es wurde eine flache Rechteckhohlleitung (Maße: 3cm x 12cm x 50cm) mit den zur Anwendung der 'patch clamp'-Technik erforderlichen Öffnungen und einem

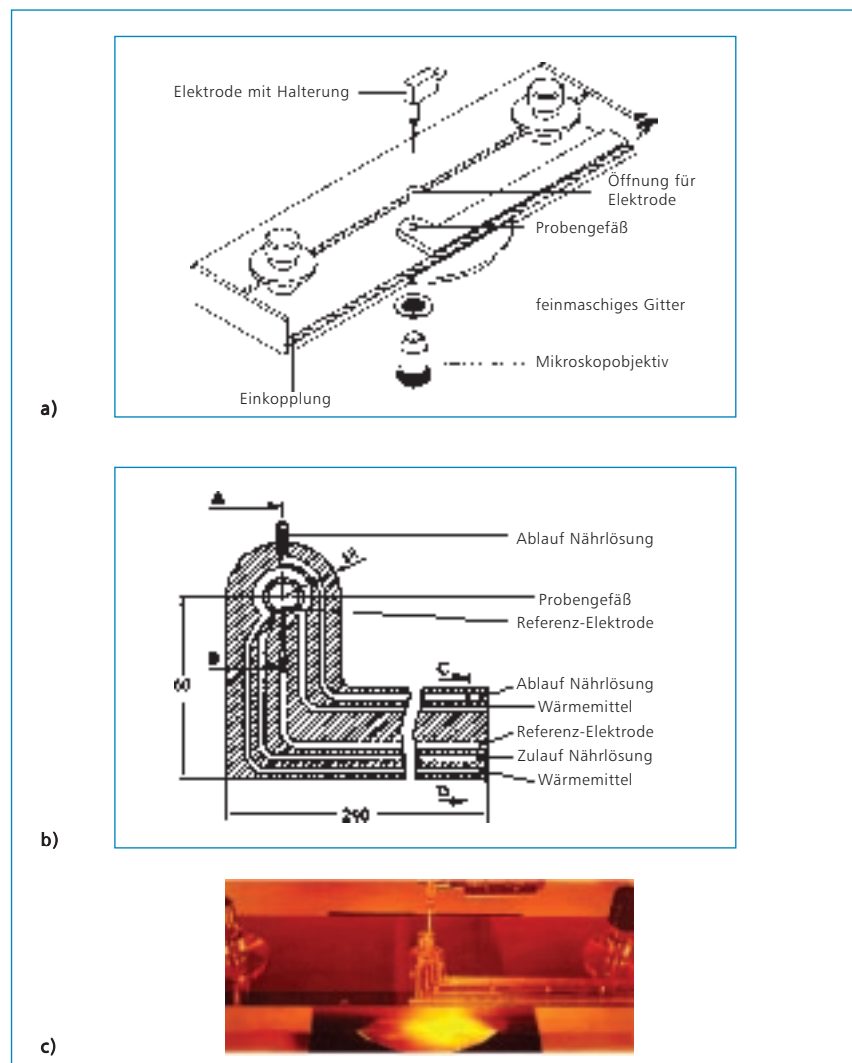


Bild 7: 'Patch clamp'-Untersuchungen in einer Rechteckhohlleitung

- a) Prinzipieller Aufbau
- b) Probenhalter aus Acrylglas
- c) 1800MHz-Hohlleitung mit 'patch clamp'-Elektrode und Probenhalter (hier auf Deckel der Hohlleitung aufgelegt)

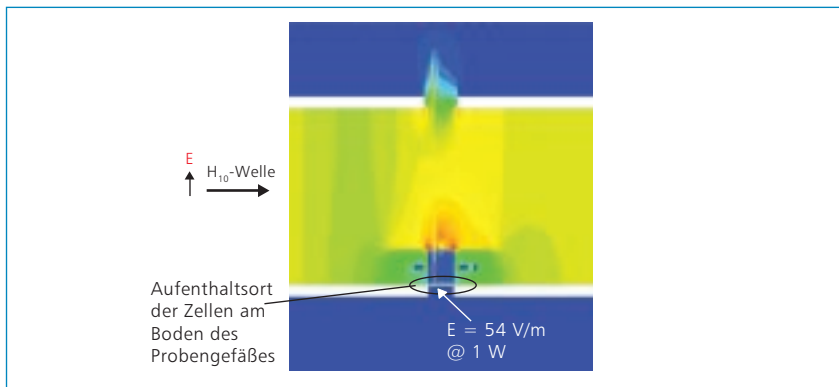


Bild 8: Berechnete Feldverteilung (Betrag der elektrischen Feldstärke) bei 1800MHz im Längsschnitt durch die Hohlleitung mit eingesetztem Probenhalter

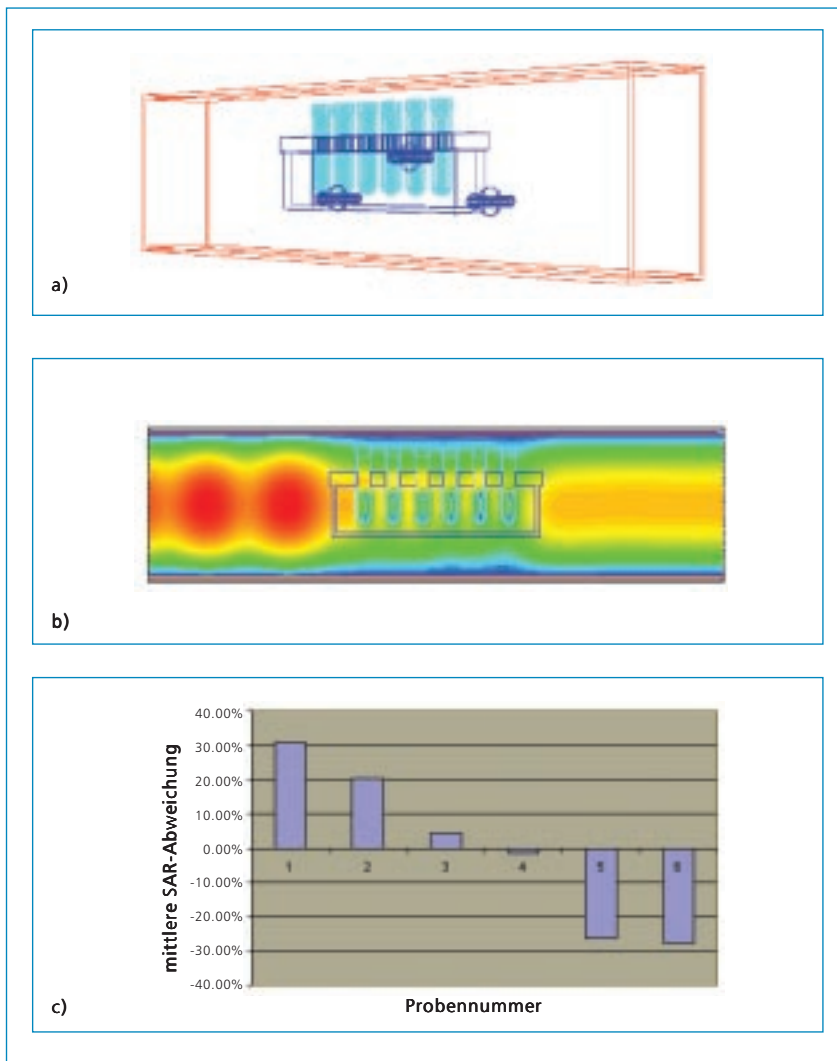


Bild 9: Exposition von 6 Proben in einer Rechteckhohlleitung
a) Anordnung der Probengefäße in hochkant stehender Hohlleitung
b) Berechnete Feldverteilung (Betrag der elektrischen Feldstärke) bei 1800MHz
c) Prozentuale Abweichung der mittleren Spezifischen Absorptionsrate für jede Probe vom Gesamtmittelwert

speziell angepassten Probenhalter konstruiert (Bild 7). Computersimulationen der Konfiguration ergaben, dass bei 1800MHz und 1W eingespeister Leistung mit einer elektrischen Feldstärke am möglichen Aufenthaltsort der zu untersuchenden Zellen von 54V/m (Abweichung kleiner 10%) gerechnet werden kann (Bild 8).

B. Zellkulturen mit geringer Probenanzahl

Bei Zellkulturen mit größeren Volumina ist die Anzahl möglicher Proben in einer Hohlleitung sehr begrenzt. Als Beispiel zeigt Bild 9 das Modell einer linearen Anordnung von Probengefäßen, die jeweils 5cm³ Nährlösung mit biologischen Zellen enthalten. Bereits bei nur 6 Proben ändert sich das Expositionsfeld von Probe zu Probe so stark, dass die gemittelte Spezifische Absorptionsrate längs der Probenreihe um ca. $\pm 30\%$ variiert.

C. Zellkulturen mit vielen Proben

Sehr viel gleichmäßigere Expositionen bei deutlich gesteigerter Probenanzahl lassen sich in radialen Wellenleitungen erzielen. Bild 10 zeigt eine für die Exposition von 30 Proben entwickelte Parallelplattenleitung. Die Konusantenne zur HF-Einkopplung lässt sich optimal an den Leitungswellenwiderstand der Koaxialzuleitung anpassen. Der Tefloneinsatz dient zur Fixierung der Probengefäße und soll gleichzeitig das freie Leitungsvolumen reduzieren, in dem sich Verunreinigungen bilden könnten. Am Rand sorgt ein Flachabsorber dafür, dass der Einfluss der reflektierten Welle auf das Expositionsfeld minimiert wird.

Beispiele

Zwei derartige Expositionseinrichtungen sind für ein Projekt zum Verhalten der Blut-Hirn-Schranke bei Exposition mit UMTS-Signalen aufgebaut worden, das in der Arbeitsgruppe von PD Dr. F. Stögbauer am Universitätsklinikum Münster bearbeitet wird. Die Leitungen mit 40cm Gesamtdurchmesser, einem Plattenabstand von 11mm und einem Probendurchmesser von 24mm können gemeinsam in einem Inkubator untergebracht werden (Bild 11a). Die gemessene Variation der elektrischen Feldstärke ist für beide Leitungen in Bild 11b dargestellt. Das Feld am Probenort schwankt in den leeren Leitungen um weniger als $\pm 7\%$.

Um die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke zu testen, sollen an dem in Münster entwickelten 'in vitro'-Modell, das aus einer planaren Zellschicht von ca. 1 cm^2 Fläche besteht, während der Hochfrequenz-Exposition elektrische Widerstandsmessungen im Frequenzbereich von 1Hz bis 1MHz durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde ein spezieller Probenhalter entwickelt (Bild 12), der den Einsatz mit der Zellschicht, das Probengefäß mit der Nährlöslichkeit und die Messelektroden mit der Anschluss-Buchse enthält und gleichzeitig den Wellenleiter hochfrequenzdicht verschließt. Damit die Wellenausbreitung in der radialen Wellenleitung möglichst wenig gestört wird, wurden die scheibenförmigen Mess-Elektroden in die Ebenen der Leitungsplatten gelegt.

Bild 13 zeigt bei einer Frequenz von 2GHz und für eine in die radiale Wellenleitung eingespeiste Leistung von 5W die Verteilung der elektrischen Feldstärke über der Zellschicht. Die räumliche Variation des Feldes

ist allein auf die zylindrische Form des Probengefäßes bzw. auf die Struktur des biologischen Objektes zurückzuführen und somit physikalisch unvermeidbar und deutet nicht

etwa auf eine mangelnde Homogenität des durch die Wellenleitung erzeugten Expositionsfeldes hin. Im Mittel stellt sich ein Spitzenwert der Feldstärke von 150V/m bei einer

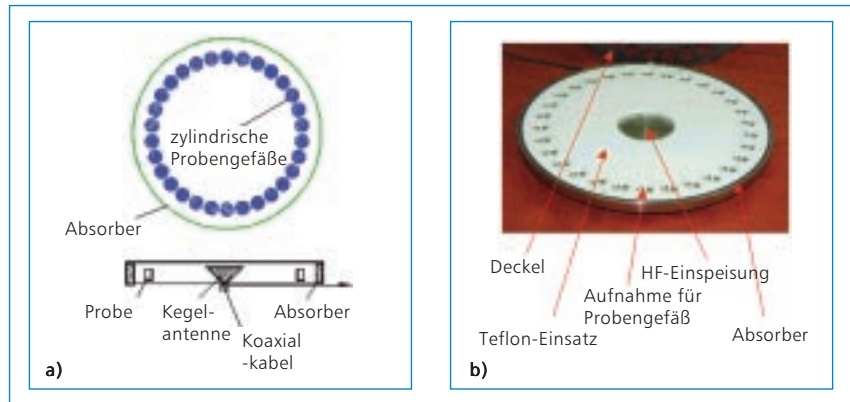


Bild 10: Radiale Wellenleitung für 30 Proben
a) Prinzipskizze der Draufsicht und des Querschnitts
b) Realisierte Leitung (obere Platte und Kegelantenne entfernt)

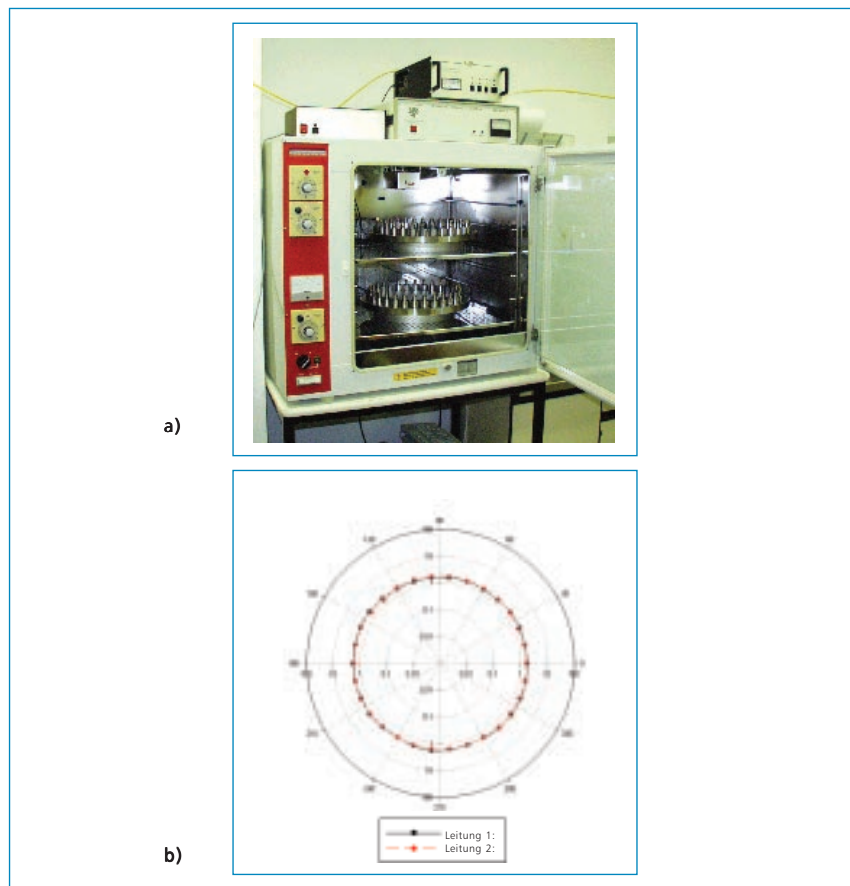


Bild 11: Expositionsanlage für Experimente zur Blut-Hirn-Schranke
a) Versuchsaufbau mit Inkubator, 2 Wellenleitungen, Signalgenerator und Verstärker
b) Messergebnisse für die elektrische Feldstärke am Ort der Probengefäße

Standardabweichung von 34% ein. Dabei erhält man für ein mit 3,5ml Nährlösung gefülltes Probengefäß eine mittlere Spezifische Absorptionsrate von 4,5W/kg. Durch hoch-

empfindliche Temperaturmessungen wurde kontrolliert, dass bei dieser HF-Exposition der durch den Inkubator vorgegebene Sollwert von $37^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ eingehalten wird.

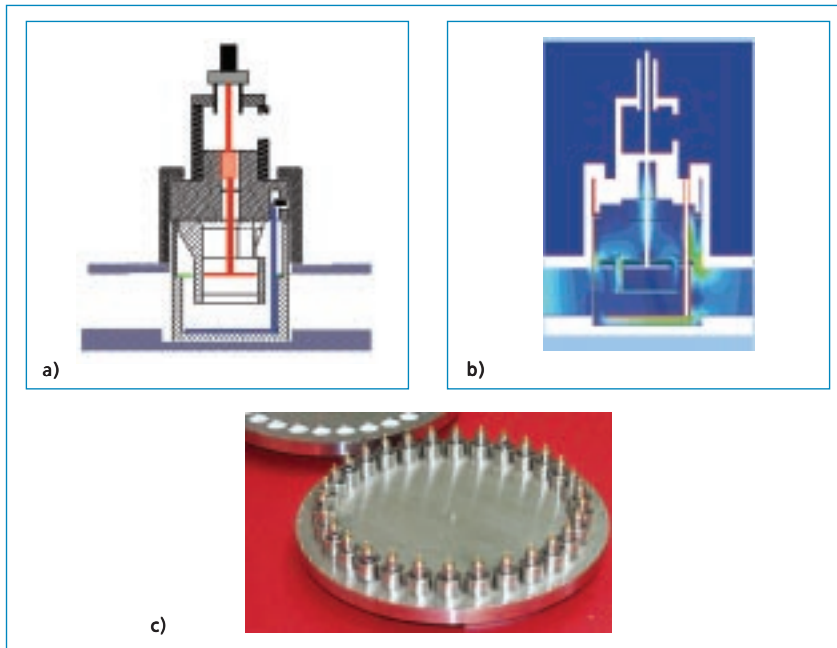


Bild 12: Probenhalter

- a) Aufbau mit Probengefäß für Nährlösung, Insert mit Membran und Blut-Hirnschranke-Zellmodell, Haupt-, Gegen- und Abschirm-Elektrode, Deckel mit Durchführungsfilter und SMB-Stecker, sowie Verschraubung
- b) Computer-Simulation des Hochfrequenzfeldes im Probenhalter
- c) Mit Probenhaltern bestückte Expositionseinrichtung

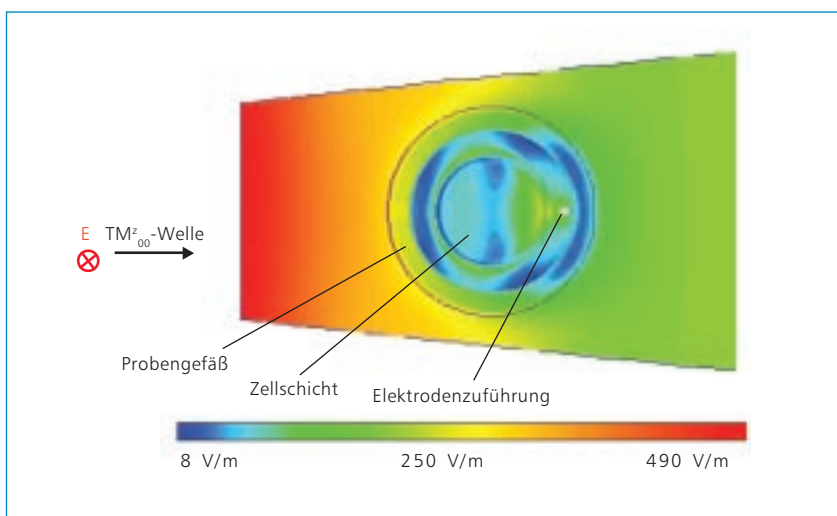


Bild 13: Verlauf der elektrischen Feldstärke in der Ebene der Zellschicht

Beispiele

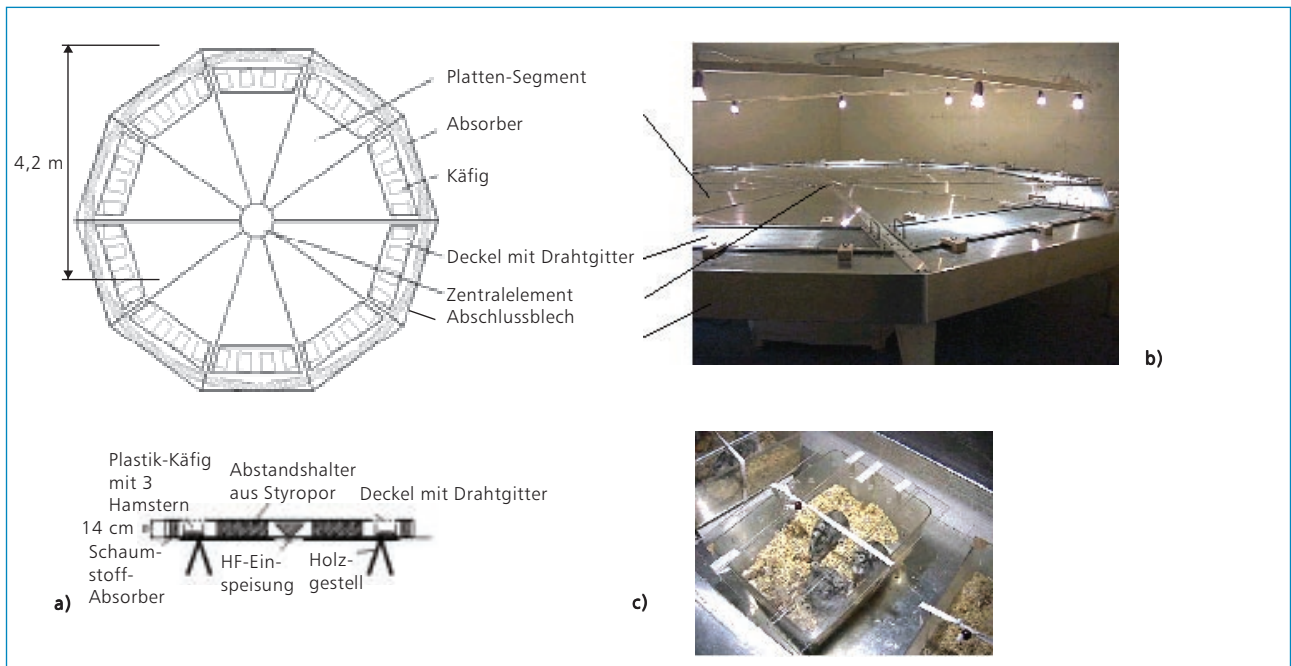


Bild 14: Expositionsvorrichtung für 120 Hamster
 a) Konstruktion der radialen Wellenleitung
 b) Außenansicht
 c) Kunststoffkäfig mit 3 Hamstern (Drahtgitter entfernt)

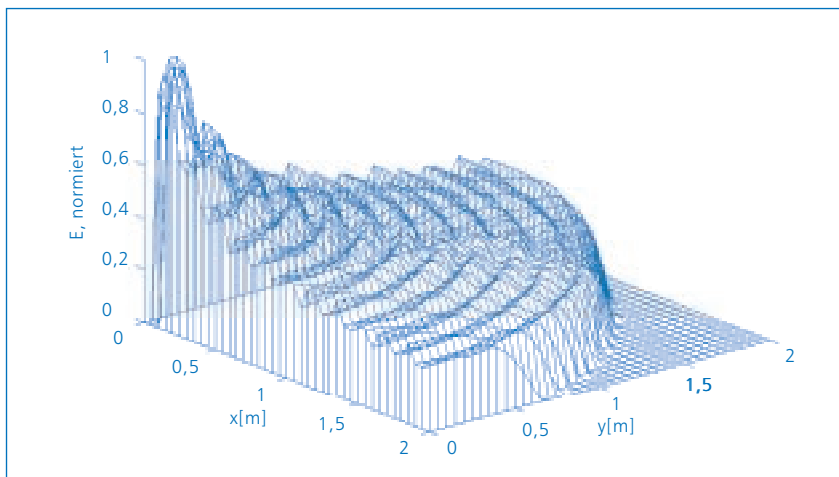


Bild 15: Räumliche Verteilung des elektrischen Feldes in der leeren Radialwellenleitung

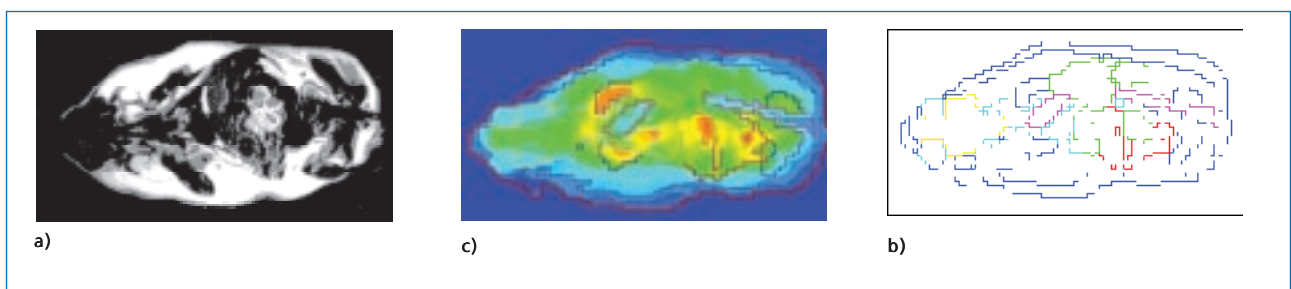


Bild 16: Computermodell eines Hamsters
 a) NMR-Schichtaufnahme b) Schnitt durch 3D-Strukturmodell c) SAR-Verteilung in Schnittebene

2. Experimente mit frei beweglichen Tieren

Bei den bisher dargestellten Experimenten mit starr angeordneten biologischen Testobjekten muss durch technische Maßnahmen dafür gesorgt werden, dass an allen Probenorten möglichst die gleiche elektromagnetische Feldverteilung vorliegt. Die Exposition von Versuchstieren, die während des Experiments fixiert werden, unterliegt in etwa den gleichen Feld-Anforderungen wie eine 'in vitro'-Studie. Aus verschiedenen Gründen bevorzugen die bisher im Auftrag der FGF forschenden Biologen und Tiermediziner aber ein Versuchsdesign, das den Tieren eine weitgehende Bewegungsfreiheit wie bei normaler Käfighaltung lässt. Für die Exposition bedeutet dies, dass Felder erzeugt werden müssen, die in einem viel größeren Raumbereich als bei einer 'restrained animal study' homogen, eindeutig, stabil und damit reproduzierbar sein müssen. Je nach Tiergröße und -anzahl ist erheblicher Aufwand von technischer Seite nötig, um dieses Ziel – zumindest näherungsweise – zu erreichen.

A. Hamster

In einem gemeinsamen Projekt mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. A. Lerchl an der Universität Münster sollte der Einfluss von GSM-Mobilfunkfeldern auf Wachstum, Melatonin und reproduktive Funktionen von Dsungarischen Hamstern untersucht werden. Für die gleichzeitige Exposition von 120 Tieren bei 900MHz (GSM-Signal) wurde eine radiale Wellenleitung mit fast 4,5 m Durchmesser konstruiert (Bild 14).

Jeweils 3 Hamster waren in einem Kunststoffkäfig untergebracht. Der Plattenabstand der Wellenleitung konnte mit 14cm deutlich unter einer halben Wellenlänge gehalten werden ($\lambda/2 = 16,7\text{cm}$ bei 900MHz). Dies hat den Vorteil, dass die Homogenität des Expositionsfeldes allein von der Qualität des Abschlusses und von der Rotationssymmetrie der Leitung bzw. der HF-Einspeisung abhängt, die allerdings sehr sorgfältig eingehalten werden muss, um möglichst nur die gewünschte TM_{00}^2 -Grundwelle zu erhalten. Die in Bild 15 gezeigte berechnete Feldverteilung weist eine hervorragende Symmetrie in azimuthaler Richtung auf. Die Welligkeit in radialer Richtung ist auf die Überlagerung der am Abschluss reflektierten Welle zurückzuführen. Im vorliegenden Projekt wurde als Abschluss ein kommerzieller Schaumstoffabsorber mit ca. 20dB Reflexionsdämpfung verwendet. Messungen der elektrischen Feldstärke in den Käfigbereichen der aufgebauten Wellenleitung zeigten in Umfangsrichtung eine Variation von unter 7%. Um die Spezifische Absorptionsrate in den Tieren zu ermitteln, wurde mit Hilfe von NMR-Schichtbildern ein 3D-Computermodell eines Hamsters

erstellt (Bild 16). Die Auswertung aller numerischen Berechnungen und Messungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Körperhaltungen und relativer Positionen der Tiere ergab im Mittel ein Verhältnis von Ganzkörper-SAR zu eingespeister HF-Leistung von $28\text{mW}/(\text{kg}\cdot\text{W})$ bei einer Standardabweichung von nur 30%.

Als Kontrollgruppe wurden während der Experimente weitere 120 Hamster in einer gleichartigen Anlage ohne HF-Signal gehalten. Eine ausführlichere Beschreibung der Expositionsanlage findet sich in [Hansen et al. 2000].

B. Ratten

Bei Experimenten mit größeren Versuchstieren ist es schwieriger, alle Käfige gleichmäßig zu exponieren, weil mit den Käfigmaßen auch die Querschnittsabmessungen der Wellenleitung ansteigen und somit Wellentypen höherer Ordnung ausbreitungsfähig werden, deren Felder sich ortsabhängig dem gewünschten Feld der Grundwelle überlagern und somit zu undefinierten Expositionsverhältnissen führen. Es wird daher angestrebt, die Anregung höherer Wellentypen zu unterdrücken.

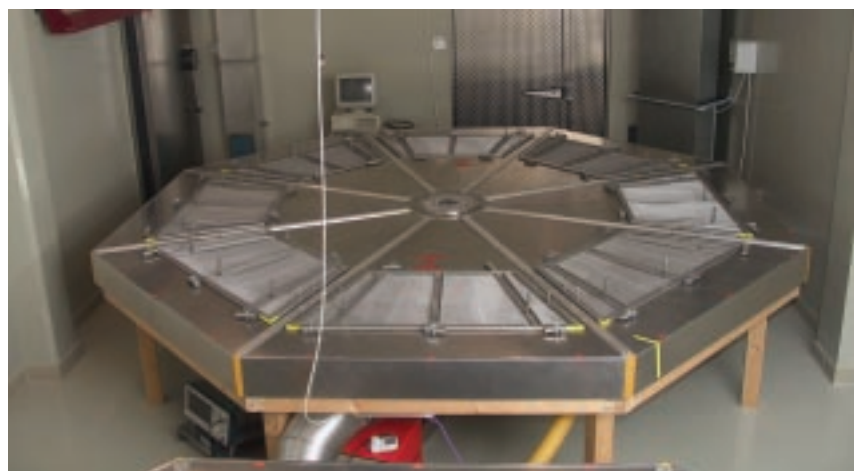


Bild 17: Radiale Wellenleitung als Expositionseinrichtung für 24 Ratten

Beispiele

Zwei Maßnahmen, dies zu erreichen, wurden in einem Projekt mit Dr. J. Buschmann vom Fraunhofer Institut für Toxikologie und Aerosolforschung, Hannover, beim Bau einer 900MHz-GSM-Expositionsanlage für Wistar-Ratten umgesetzt. 24 Käfige mit einer Höhe von 17cm befanden sich in einer Radialwellenleitung von 3,5m Durchmesser (Bild 17). Bei dem zur Aufnahme der Käfige erforderlichen Plattenabstand von mehr als $\lambda/2 = 16,7\text{cm}$ konnten prinzipiell neben der TM_{00}^z -Grundwelle noch die TM_{01}^z - und die TE_{01}^z -Mode existieren (Bild 18a). Um im Expositionsbereich nur die Grundmode anzuregen, wurde die Höhe der Wellenleitung durch Einbau zusätzlicher Metallplatten von der Einspeisestelle bis unmittelbar vor die Käfige so weit reduziert, dass auf diesem Weg höhere Wellentypen nicht ausbreitungsfähig waren (Bild 18b). Damit möglichst keine Feldenergie in die im Expositionsbereich ausbreitungsfähigen höheren Wellentypen überkoppelt, wurden zusätzlich metallische Stege zwischen den Käfigen angeordnet (Bild 18c), wodurch die Grenzfrequenzen dieser Wellen in den Bereich oberhalb der Expositionsfrequenz verschoben wurden, sodass eine effektive Dämpfung ihrer evaneszenten Felder zu Stande kam. In Bild 19 sind die leitenden Stege und eine berechnete Feldverteilung im Käfig mit eingesetztem Rattenmodell gezeigt. Aufgrund der Stege bleibt das Feld im Wesentlichen homogen; das an dem Tier entstehende Streufeld ist lokal begrenzt. Die Exposition sollte an der oberen Grenze des athermischen Bereichs erfolgen, d.h. die HF-Leistung wurde so gewählt, dass die Thermoregulierung der Tiere gerade noch in der Lage war, die Körpertemperatur

konstant zu halten (s. Bild 20, obere Kurve). Die Leistungsdichte in den Käfigen wurde somit auf $60\text{W}/\text{m}^2$ eingestellt; dazu war eine in die Radialwellenleitung eingespeiste

mittlere Leistung von 203W erforderlich. Um Hitzestaus in der Leitung zu verhindern und die entstehende Wärmeenergie rasch nach außen abzuführen, wurde ein aktives

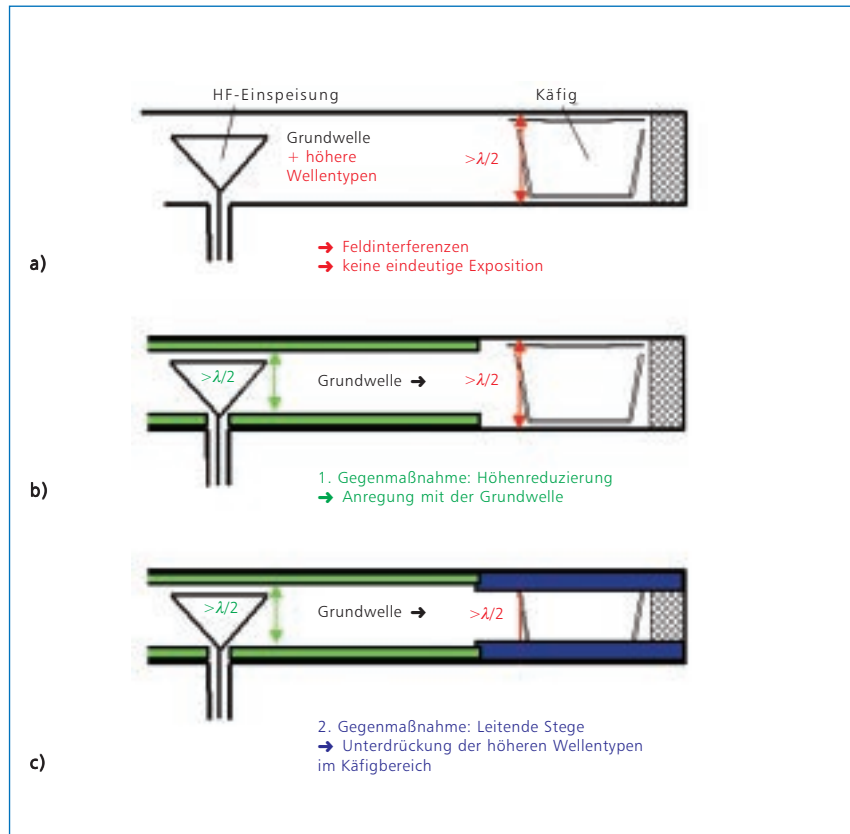


Bild 18: Maßnahmen zur Vermeidung höherer Wellentypen in der radialen Wellenleitung
 a) Mehrwellige Leitung
 b) Einwellige Anregung des Expositionsbereichs
 c) Verschiebung der Grenzfrequenz höherer Wellentypen im Expositionsbereich

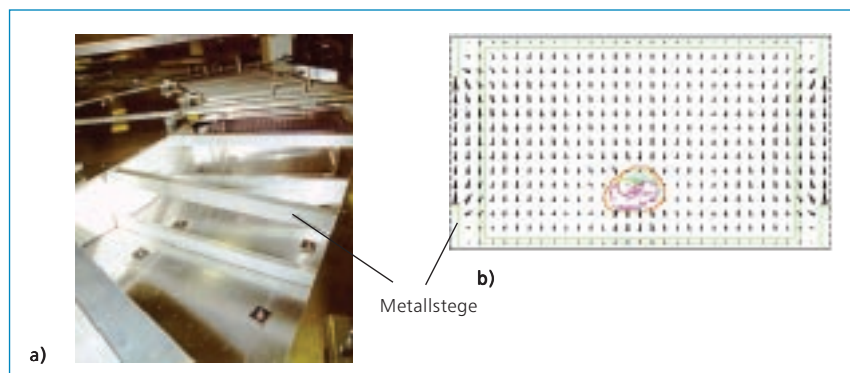


Bild 19: Metallstege in der radialen Wellenleitung
 a) Expositionsbereich mit Käfigen
 b) Berechnete elektrische Feldverteilung im Expositionsbereich mit Rattenmodell

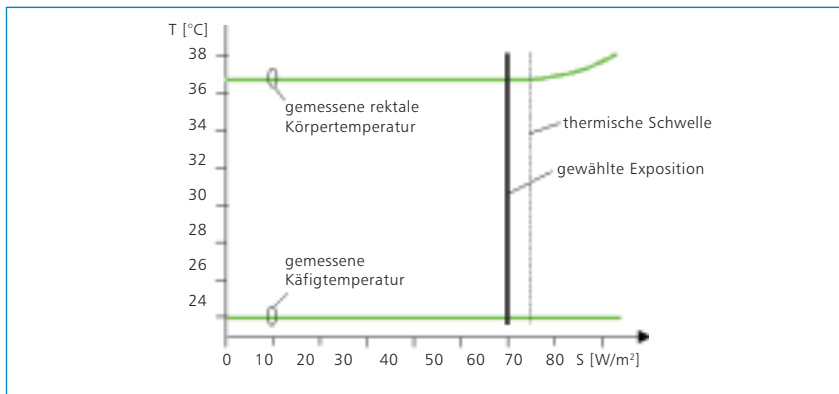


Bild 20: Messung der Käfig- und Körpertemperatur als Funktion der Leistungsdichte bei 900MHz

Belüftungssystem mit einer Absaugöffnung unter jedem Käfig installiert (Bild 21).

Computersimulationen zur Dosimetrie mit einem hoch aufgelösten Rattenmodell (Bild 22) ergaben für die gewählte Exposition eine Ganzkörper-SAR von 1,28W/kg, gemittelt über 24 Tiere, bei einer Streuung von 41%. Darin sind alle Feldvariationen sowie unterschiedliche Körperhaltungen und Tierpositionen im Käfig berücksichtigt.

Eine besondere Forderung war die Versorgung der Tiere mit frischem Wasser von außen. Um das Wasser in den Käfigbereich zu bringen, ohne das Expositionsfeld nachhaltig zu beeinflussen, konnten die Trinkstutzen aus Glas durch so genannte Dämpfungskamine gesteckt werden, die über jedem Käfigdeckel angebracht waren. Dabei handelt es sich um Hohlleitungen, die so dimensioniert sind, dass sie unterhalb ihrer Grenzfrequenz betrieben werden und daher zwar mechanisch offen sind, aber keine elektromagne-

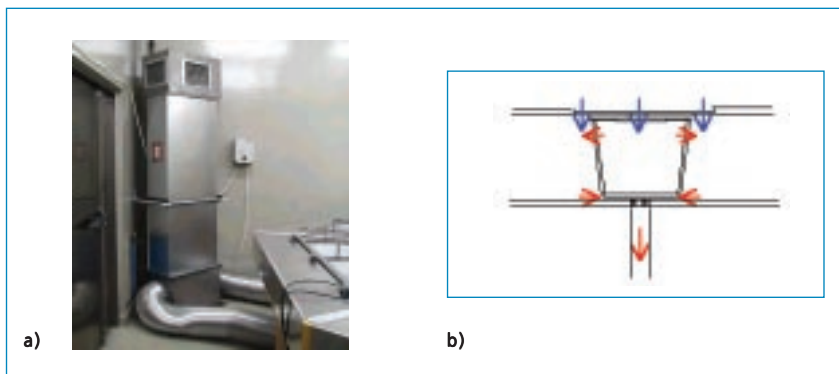


Bild 21: Belüftungsanlage

a) Zentrales Absauggebläse

b) Schema der Luftströmung am Käfig

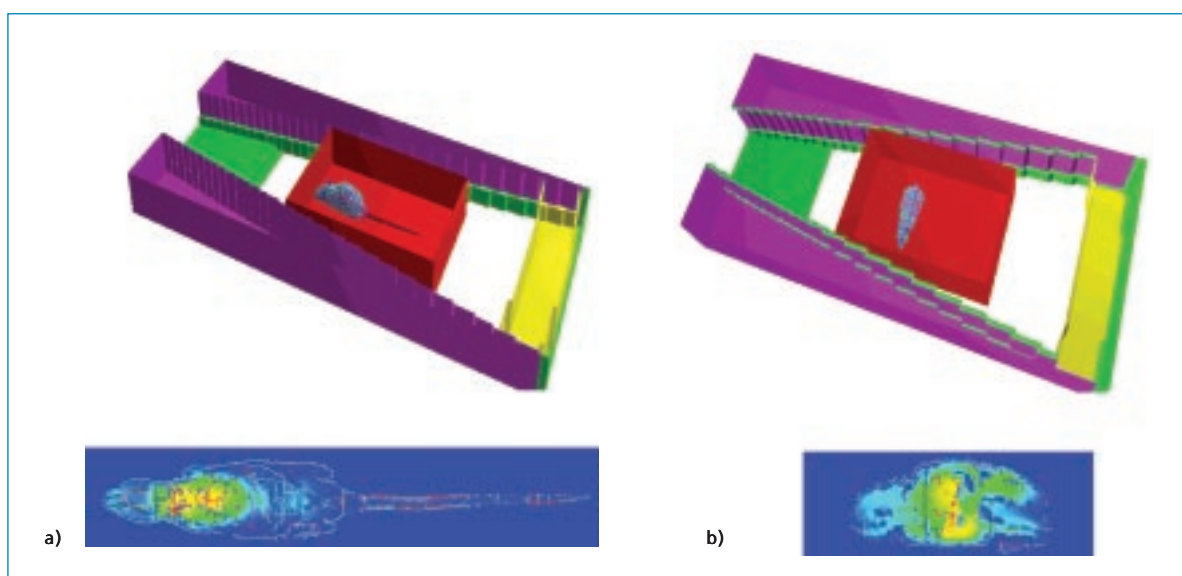


Bild 22: Dosimetrie an hoch aufgelöstem Rattenmodell in radialer Wellenleitung

a) Gesamtmodell und SAR-Verteilung bei Exposition von der Kopfseite

b) Gesamtmodell und SAR-Verteilung bei seitlicher Exposition

Beispiele

tische Feldenergie durchlassen.
Im selben Laborraum war noch eine baugleiche Schein-Expositionsanlage für die Kontrollgruppe installiert, deren Innenraum um mehr als 75dB gegenüber dem Expositionsfeld abgeschirmt war.



Bild 23: Rundhohlleitungsstücke als Dämpfungskamine über den Käfigen zur Durchführung der Trinkwasserstutzen

Expositionsbereich	SAR Ganzkörper	SAR lokal, über 10 g gemittelt
1 (unterwiesene Personen; kontrollierte Bereiche)	400 mW/kg	10 W/kg
2 (Allgemeinbevölkerung; frei zugängliche Bereiche)	80 mW/kg	2 W/kg

Tabelle 2: Personenschutz-Grenzwerte der Spezifischen Absorptionsrate für frei zugängliche und kontrollierte Bereiche

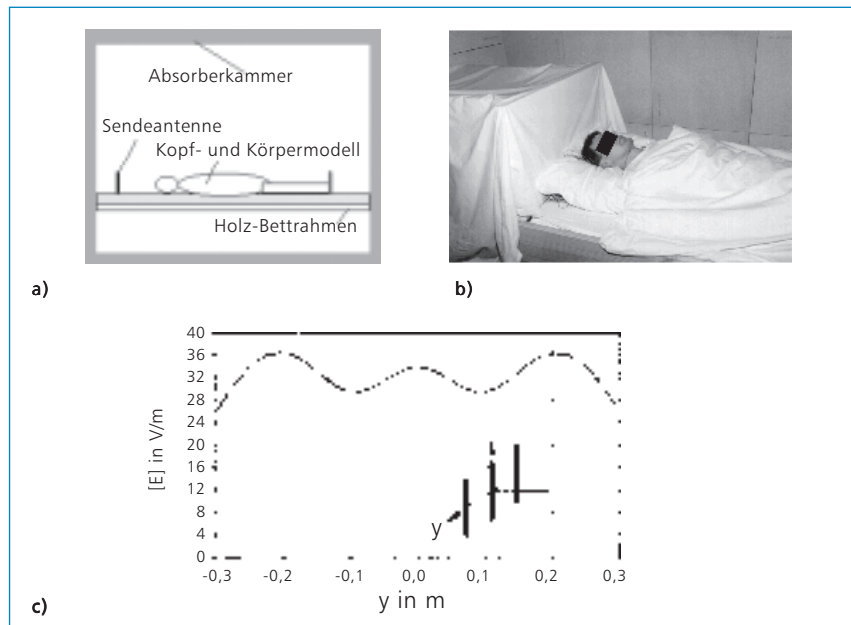


Bild 24: Kopfexposition bei schlafenden Probanden

a) Anordnung von Bett und Antenne in einer Absorberkammer

b) Proband vor dem abgedeckten Antennensystem

c) Elektrische Feldverteilung quer zur Körperachse in 40cm Abstand vom Antennensystem

(Sendeleistung: 1W)

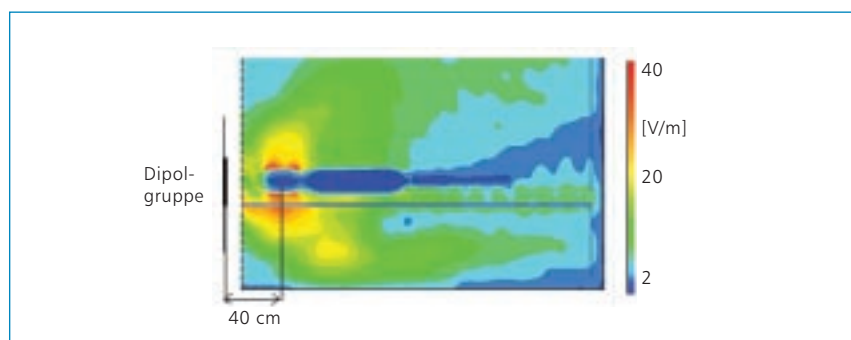


Bild 25: Elektrische Feldverteilung für die Versuchsanordnung mit Testperson

3. Experimente mit Versuchspersonen

Bei Experimenten mit Menschen, die die Exposition durch elektromagnetische Felder beinhalten, sind die Freiheitsgrade deutlich geringer als bei 'in vitro'- oder 'in vivo'-Versuchen.

Dies liegt daran, dass einerseits bei Humanexperimenten die gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte für die Feldstärken bzw. Spezifischen Absorptionsraten eingehalten werden müssen (Tabelle 2) und andererseits – bedingt durch das ungünstige Verhältnis von Körpergröße zu Wellenlänge oberhalb von etwa 300MHz – keine Wellenleitungen, sondern nur noch Antennenanordnungen in Absorberräumen als Expositionsrichtungen eingesetzt werden können, was einen zusätzlichen erheblichen Kostenaufwand bedeutet. Es ist daher nachvollziehbar, dass der Anteil der in der Vergangenheit durchgeführten Experimente mit Testpersonen vergleichsweise gering ist, wobei ausschließlich lokale Expositionen, insbesondere des Kopfes, vorgenommen wurden, um eventuelle Einflüsse auf Parameter wie Reaktionsvermögen, Schlafverhalten oder visuelle Leistungsfähigkeit zu untersuchen.

Als ein Beispiel für mehrere von der Forschungsgemeinschaft Funk beauftragte Projekte sei eine Studie an der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Kiel unter der Leitung von Prof. Dr. J. Aldenhoff erwähnt, die die Untersuchung von Auswirkungen elektromagnetischer Hochfrequenzfelder auf die Qualität des menschlichen Schlafes zum Ziel hatte. Dazu wurden Elektroenzephalogramme

schlafender Testpersonen aufgenommen, die gleichzeitig einem definierten elektromagnetischen Mobilfunkfeld bei 900MHz ausgesetzt waren.

Seitens der Elektrotechnik legte die Bergische Universität Wuppertal die Ausstattung des Versuchsraums, die Konfiguration und die Position der Antennen, die Signalform und die Sendeleistung so fest, dass eine reproduzierbare und möglichst effektive Exposition des Kopfes zustande kam. Bild 24 zeigt schematisch die Versuchsanordnung. Um das metallfrei aufgebaute Bett für die Probanden wurde eine ca. 3,1 m x 1,8 m x 2,4 m (L x B x H) große Absorberkammer errichtet, um die Stehwelligkeit des Feldes im Raum zu unterdrücken. Die Antennenkonfiguration, bestehend aus drei Einzeldipolen, wurde in eine Halterung aus Holz und Styropor eingepasst, die gleichzeitig die Funktion eines Sichtschutzes und Abstandhalters hatte, sodass der Kopf der Testperson nicht näher als 30 cm an die Sendeantennen gelangen konnte. Die drei Antennen waren so angeordnet und gespeist, dass auch bei seitlicher Bewegung des Kopfes keine starke Veränderung der Exposition stattfand. Die zusätzlich zu Feldmessungen durchgeführten Computersimulationen belegen (Bild 25), dass das von den Antennen erzeugte Feldmaximum im Bereich des Kopfes auftritt. Die numerische Auswertung dieser Rechnungen ergab bei einer Sendeleistung von 25W eine lokale Spezifische Absorptionsrate im Kopf von bis zu 1W/kg und eine ebenfalls deutlich unter den Grenzwerten liegende Ganzkörper-SAR von 24mW/kg.

Schlussfolgerung

Es wurde eine Auswahl der in den vergangenen 10 Jahren von der Bergischen Universität Wuppertal für Projekte der Forschungsgemeinschaft Funk entwickelten Hochfrequenz-Expositionsanlagen gezeigt. Die dargestellten Beispiele belegen, dass Expositionsrichtungen technisch und feldtheoretisch sorgfältig konzipiert werden müssen, wenn die Chance bestehen soll, eventuelle nicht thermische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme reproduzierbar aufzudecken. Der konstruktive Aufwand steigt dabei mit zunehmender Komplexität des Testobjektes und seiner Umgebung und mit wachsendem Verhältnis von Objektgröße zu Wellenlänge.

Literatur

BGR B11: BG-Regeln „Elektromagnetische Felder“, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 2001.

BImSchV: Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV), 1996.

Hansen, V., Bitz, A., Streckert, J., Lerchl, A.: HF-Exposition von biologischen Systemen in radialen Wellenleitern. FGF Newsletter, 4, 9-13, 2000.

ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics, vol. 74, 494-522, 1998.

IEC: Measurement and assessment of human exposure to high frequency (10 kHz to 300 GHz) electromagnetic fields. IEC TC85 WG15, Draft 1997.

Streckert, J., Ndoumbè Mbonjo Mbonjo, H., Bitz, A., Hansen, V.: Ein UMTS-Testsignal für bio-elektromagnetische Experimente. Newsletter, Forschungsgemeinschaft Funk, Bd. 3, 11-17, 2001.

Taflove, A., Hagness, S. C.: Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Artech House, Inc., Boston, 2000.

Dr. Joachim Steckert, Chair for Theoretical Electrical Engineering,
Bergische University- Polytechnic Wuppertal

Requirements for technical institutions investigating the effects of high frequency electromagnetic fields on biological Systems

It has been known for a long time that concentrated high frequency irradiation of biological tissue increases its temperature and at very high intensities it can also destroy it. In the meantime a controlled use of these warming effects, e.g. as a therapeutic agent or in microwave ovens is quite widespread today. The threshold for thermal effects is accurately definable and is used, for example, to derive for the maximum permissible exposure limits of electromagnetic field sizes, in particular to protect people while using technical appliances, especially those which are legally prescribed, for mobile radio radiation and especially field generators must adhere to the exposure limits. With the help of mathematical equations the thermal effects can be predicted. The question as to whether or not biological systems are affected by mobile radio radiation below the thermal effectiveness is, as in the past, still being discussed. Since to date, no reproducible proof of biological effects of weak electromagnetic fields could be established, there are also no mathematical models, i.e., no formal relationships, which would describe this kind of

mechanism and would permit the further investigation on a theoretical level.

As in the pioneer days of the discovery of today generally understood physical phenomena, one is dependent on observations, which are significant only in the context of carefully carried out scientific experiments under clearly defined boundary conditions. This way of proceeding is very cost intensive in terms of personnel and technology, however this represents the only possibility to be able to make an objective statement on the issue, when one considers the controversy involved and at times public opinion is anything but objective; this is also reflected in the media.

The Forschungsgemeinschaft Funk began 10 years ago to initiate research projects in these fringe areas between biology/medicine and between engineering/physics. The FGF has also promoted and financially supported the execution of this research with independent research institutions. What has come to light is the fact that these types of experiments have an interdisciplinary approach; what is necessary, however is collaboration between biolo-

gists and high frequency technicians who are able to design an experimental approach which is suitable to the task at hand.

For those doing the experiments the complexity of determining exposure conditions and exposure values, which are influenced by various material and geometrical factors, is always a great challenge. Many practical examples help in making the right choice concerning what research approach should be taken and which method will be used for taking measurements. Actually, one can emphasize that every experiment requires its very own approach in establishing a suitable technique for taking measurements because this decision is based on the diversity of the biological conditions. Nevertheless, a successful attempt is being made to standardize the technical measuring procedure, in order to allow for a better comparability of the experiments.

In order to support this the FGF has published a guide for experiments investigating the effects of high frequency electromagnetic fields on biological systems in "Edition Wissenschaft" (edition no. 11; September 1996; author: Professor

Volker Hansen, Chair for Theoretical Electrical Engineering, Bergische University –Polytechnic Wuppertal). This article demonstrates with some examples which technical procedures were used to develop the required high frequency irradiation equipment for very different biological specimens, such as, tissue cells, small animals or test persons and to optimise the replication and symmetry of the applied electromagnetic fields. An example of this is shown in a photograph on one of the posters on display here. It is a picture of an installation of approx. 4m in diameter, in which 24 female pregnant rats were exposed to a typical mobile radio field of 900 MHz for over 3 weeks, 20 hours a day in order to find out if there were any possible effects on their offspring.

Impressum

Edition Wissenschaft der FGF e. V.

Herausgeber: Forschungsgemeinschaft Funk e. V., Rathausgasse 11a,
D-53111 Bonn, Telefon: 0228 / 72 62 2-0, Telefax: 0228 / 72 62 21 1
E-Mail: info@fgf.de, <http://www.fgf.de>

Redaktion: Gerd Friedrich (verantw.), Gudrun Westendörpf

Layout: setz it. Richert GmbH, Sankt Augustin

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag der Forschungsgemeinschaft Funk e. V. durchgeführt. Die Berichte geben die Meinungen der Autoren wieder und stellen daher nicht unbedingt auch die Meinung der FGF dar.

