

# **Edition Wissenschaft**

Forschungsgemeinschaft Funk e.V.

Ausgabe Nr. 3

Januar 1996



## **Expositions- einrichtungen**

Von U. Neibig



Forschungsgemeinschaft Funk

Forschungsgemeinschaft  
**FUNK**

## Editorial

### Liebe Leserinnen und Leser,

die Forschungsgemeinschaft Funk e.V. wurde 1992 mit dem erklärten Ziel ins Leben gerufen, die biologischen Wirkungen elektromagnetischer Wellen auf Mensch und Umwelt zu untersuchen. Gleichzeitig hat die sachliche und objektive Information der Öffentlichkeit für uns einen hohen Stellenwert. Neben dem bewährten „Newsletter“, der das gesamte Thema EMV und EMVU behandelt, werden Sie künftig auch im Newsletter „Edition Wissenschaft“ über den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Forschung informiert.

Zahlreiche Forschungsaufträge wurden an unabhängige Wissenschaftlergruppen vergeben. Die Ergebnisse der Einzelprojekte werden wir Ihnen in loser Form in dem neuen Newsletter „Edition Wissenschaft“ vorstellen. Die beauftragten Projekte befaßten sich mit der biologischen Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder, wie sie im Mobilfunk genutzt werden. Fazit der Studien: Bislang konnte kein Hinweis auf eine krebserzeugende bzw. krebserfördernde Wirkung gefunden werden.

Die ersten vier Beiträge sind nicht als „Abschlußbericht“ der Forschungsgemeinschaft Funk e.V. zu verstehen. Vielmehr sind die Untersuchungsergebnisse eine Basis für weitere Studien. Die Forschungsgemeinschaft Funk wird daher in weiteren Ausgaben der „Edition Wissenschaft“ über den aktuellen Kenntnisstand die Öffentlichkeit informieren.

*Gerd Friedrich*

## Inhalt

Vorwort: <b>Biologische Wirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern</b>	3
Teilbericht: <b>„Expositionseinrichtungen“</b>	5
1. Zusammenfassung	5
2. Felderzeugende Einrichtungen	6
2.1. Auswahlkriterien	6
2.2. TEM-Zelle	7
2.3. GTEM-Zelle	7
3. Beschreibung der Versuchsaufbauten	8
3.1. 450 MHz – Braunschweig	8
3.2. 900/1800 MHz – Bonn	10
3.3. 900/1800 MHz – Berlin	12
3.4. 900/1800 MHz – Braunschweig	13
4. Feldbestimmung	14
4.1. Voraussetzungen	14
4.2. Rechenergebnisse	15
4.2.1 450 MHz – Braunschweig	16
4.2.2 900 MHz – Bonn	17
4.2.3 1800 MHz – Bonn	18
4.2.4 900 MHz – Braunschweig	18
4.2.5 1800 MHz – Braunschweig	19
4.2.6 900/1800 MHz – Berlin	19
4.3. Zusammenfassung der Feldverhältnisse	20
5. Literatur	21
Summary: <b>Experimental Set-up for Studying Electromagnetic Alternating Fields</b>	22

### Newsletter Edition Wissenschaft

#### Untersuchungsreihe „Biologische Wirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern“

**1. Ausgabe:** Wachstumsverhalten von humanen Leukämiezellen (Promyelozyten) unter Einfluß von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (1,8 GHz und 900 MHz, jeweils mit 217 Hz gepulst) zur Prüfung auf krebspromovierende Effekte

**2. Ausgabe:** Der Einfluß hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf die Calcium-Homöostase von Herzmuskelzellen und Lymphozyten

**3. Ausgabe:** Expositionseinrichtungen

**4. Ausgabe:** Zellproliferation, Schwesterchromatid-austausche, Chromosomenaberrationen, Mikrokerne und Mutationsrate des HGPRT-Locus nach Einwirkung von elektrischen Hochfrequenzfeldern (440 MHz, 900 MHz und 1,8 GHz) auf humane periphere Lymphozyten

# Biologische Wirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern

Prof.Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl Brinkmann,  
Prof. Dr.-Ing. Rudolf Elsner

Beim Einsatz von Mobilfunkgeräten setzt sich der Nutzer der Wirkung elektromagnetischer Strahlung aus. Deshalb muß sichergestellt werden, daß er keine körperliche Schädigung erleidet. Der Hersteller ist daher verpflichtet, Normenvorschriften einzuhalten. Diese Normen beruhen auf der Kenntnis der thermischen Wirkungen elektromagnetischer Felder. Bekannt ist, daß bei einer spezifischen Absorptionsrate (SAR) von 4 W/kg tierisches und damit vermutlich auch menschliches Gewebe sich um 1°C erwärmt [1]. Um die allgemeine Bevölkerung vor solcher Schädigung zu schützen, ist ein Fünftel dieses Wertes als SAR-Grenzwert von 80 mW/kg vorgeschrieben. Bei Einhaltung dieses Wertes treten sicher keine thermischen Wirkungen auf.

In letzter Zeit ist aber verschiedentlich darauf hingewiesen worden, daß elektromagnetische Felder auch athermische Wirkungen haben könnten. Festzustellen, ob solche Wirkungen auftreten, ist Inhalt unseres Forschungsvorhabens.

Es ist sinnvoll und üblich, solche Wirkungen am biologischen Verhalten tierischer oder menschlicher

Zellen zu beobachten. Die Zellen befinden sich in einer Nährflüssigkeit und werden für eine geeignete Zeitdauer einem hochfrequenten elektromagnetischen Feld ausgesetzt. Um Fremdeinflüsse eliminieren zu können, wird parallel eine Vergleichsprobe, ohne einem hochfrequenten Feld ausgesetzt zu sein, beobachtet. Unterschiedliches Verhalten der Zellen mit und ohne Exposition kann dann nur durch den Einfluß des elektromagnetischen Feldes verursacht sein. Offen muß allerdings bei dieser Untersuchungsmethode bleiben, ob diese Wirkungen auch Schädigungen hervorrufen. Das könnte nur durch Versuche am Gesamtorganismus geklärt werden. Richtig bleibt aber, wenn keine oder nur vernachlässigbare Wirkungen auftreten, können auch keine Schädigungen vorhanden sein. Untersucht wurden Lymphozyten gesunder männlicher Spender (Arbeitsgruppe Eberle, Braunschweig), Herzmuskelzellen und Lymphozyten (Arbeitsgruppe Meyer, Bonn) und humane Leukämiezellen (Arbeitsgruppe Fitzner, Berlin). Die Exposition erfolgte mit 440 MHz (C-Netz), 900 MHz (D-Netz) und 1.800 MHz (E-Netz). Im D- und E-Band wurden pulsmodierte Signale

verwendet. Die Nährflüssigkeit wurde auf  $37^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$  konstant gehalten. Die Probenhalter mit Zellen, Nährflüssigkeit und Weißöl zur Temperaturkonstanthaltung waren bei der Arbeitsgruppe Eberle und Fitzner mit Abmessungen von 10 cm relativ groß. Bei der Arbeitsgruppe Meyer mit Abmessungen von 1 cm entsprechend kleiner.

Die elektromagnetischen Felder sollten ohne störende Prüfobjekte in ihrer Struktur möglichst homogen sein. Dazu wurden geeignete Wellenleiter (Arbeitsgruppe Elsner/Neibig, Braunschweig) bereitgestellt. Diese Wellenleiter sind metallisch geschlossene Räume, so daß die inneren Hochfrequenzfelder nicht nach außen störend wirken können und fremde Felder nicht in den Meßraum verfälschend eindringen können.

Die Leistung, die der Wellenleiter am Ort des Prüfobjektes zur Verfügung stellt, ist wesentlich höher als die Leistung, die die Nährflüssigkeit annimmt. Das liegt an den elektromagnetischen Eigenschaften der Nährflüssigkeit. Die Leistungsdichte in der Nährflüssigkeit und damit auch in den Zellen kann



Einbringen des bestückten Probenhalters in die TEM-Zelle; am linken Bildrand sind einige Geräte zur Erzeugung und Aufnahme der hochfrequenten elektromagnetischen Felder sichtbar; die permanente Kontrolle und Meßdatenaufzeichnung der Feldstärken ist durch eine Computersteuerung gewährleistet.

nicht gemessen werden. Deshalb wurde mit Kenntnis der elektromagnetischen Eigenschaften der Nährflüssigkeit und des Materials des Probenträgers die elektrische und magnetische Feldstärke in der Nährflüssigkeit berechnet. Daraus ergeben sich über die elektrische Leitfähigkeit des Materials die SAR-Werte als Leistungsdichte der elektromagnetischen Strahlung in der Nährflüssigkeit. Die berechneten Werte konnten nur mit einigen Vereinfachungen gewonnen werden. Sie können daher maximal um den Faktor zwei nach oben oder unten von den wirklichen Werten abweichen. Die SAR-Werte sollten für alle Versuche bei 80 mW/kg bzw. 80  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$  liegen. Das konnte nur in der Größenordnung erreicht werden, da die Berechnungen aus zeitlichen Gründen durchgeführt wurden, während die biologischen Untersuchungen schon liefen. Die meisten berechneten Werte liegen unter diesen Normenwerten.

Für die elektrische und magnetische Feldstärke liegen nach DIN VDE 0848 Teil 2 die Grenzwerte bei 100 V/m bzw. 0,265 A/m (entsprechend einer magnetischen Flußdichte von 0,3  $\mu\text{T}$ ). Berechnungen

ergaben ferner, daß bei den verwendeten Nährflüssigkeiten die magnetische Feldstärke im Wellenleiter durch Einbringen des Prüfobjektes nur sehr wenig verändert wird, während die elektrische Feldstärke dabei wesentlich kleiner wird. Das geschieht auch im menschlichen Körper in gleicher Weise.

In den folgenden vier Teilberichten sind die biologischen Grundlagen, die Meßaufbauten und die Ergebnisse dargestellt. Alle Ergebnisse lassen keine athermischen Wirkungen erkennen.

- Teilbericht:  
Dipl.-Ing. Uwe Neibig, Technische Universität Braunschweig  
„Expositionseinrichtungen“
- Teilbericht:  
Dr. rer. nat. Susanne Diener, Prof. Dr. rer. nat. Paul Eberle, Technische Universität Braunschweig  
„Zellproliferation, Schwesterchromatidaustausche, Chromosomenaberrationen, Mikrokern und Mutationsrate des HGPRT-Locus nach Einwirkung von elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern (440 MHz, 900

MHz und 1,8 GHz) auf humane periphere Lymphozyten“

- Teilbericht:  
Dr. rer. nat. Rainer Meyer, Universität Bonn  
„Der Einfluß hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf die Calcium-Homöostase von Herzmuskelzellen und Lymphozyten“
- Teilbericht:  
Dr. med. R. Fitzner, E. Langer, Freie Universität Berlin  
„Wachstumsverhalten von humanen Leukämiezellen (Promyelozyten) unter Einfluß von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (1,8 GHz und 900 MHz, jeweils mit 217 Hz gepulst) zur Prüfung auf krebspromovierende Effekte“

Diese Arbeiten wurden mit Mitteln der Forschungsgemeinschaft Funk e.V. gefördert.

## Literatur

- [1] Heinrich Baggenstoes: „Dosismetrische Untersuchungen zum Mobilfunk“, Kleinheubacher Berichte, Band 37 (1993), S. 589

## Abschlußbericht

# „Expositionseinrichtungen“

Dr.-Ing. U. Neibig,

Institut für Nachrichtentechnik, Technische Universität Braunschweig

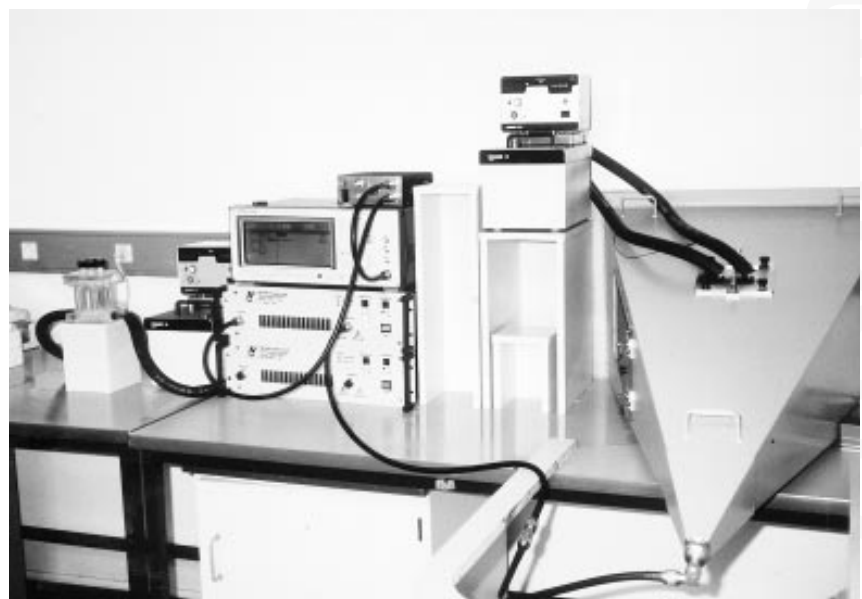
## 1. Zusammenfassung

In verschiedenen Experimenten sollte der Einfluß elektromagnetischer Felder in den Frequenzbereichen des C-, D- und E-Mobilfunknetzes auf biologische Systeme untersucht werden. Gemäß den Anforderungen der Experimente wurden als felderzeugende Einrichtungen die TEM-Zelle sowie die GTEM-Zelle ausgewählt. Es wurden Versuchsaufbauten mit diesen Felderzeugern, einer modulierbaren Hochfrequenz-Signalquelle und Einrichtungen zur Aufnahme und Temperierung des Nährmediums, das die biologischen Untersuchungsobjekte (Zellen) enthält, erstellt.

In der leeren TEM- und GTEM-Zelle liegt eine Feldverteilung vor, die sich in guter Näherung allein aus den geometrischen Abmessungen und der verwendeten Speiseleistung berechnen läßt. Durch Einbringen des Prüfobjektes in das Feld ändern sich jedoch die Verhältnisse erheblich. Zur Beurteilung der Versuche ist daher die Feldstärke im

Nährmedium am Ort der biologischen Untersuchungsobjekte von Interesse. Ihre Abschätzung erfolgt mit einem numerischen Rechenverfahren, da Feldstärkemessungen im Medium aufgrund des beträchtlichen Aufwands auscheiden und sich eine analytische Lösung nur für einfache geometrische Verhältnisse bestimmen ließe. Es werden die

elektrische Feldstärke und die magnetische Flußdichte in den leeren Felderzeugern angegeben und diesen Werten die Rechenergebnisse der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flußdichte gegenübergestellt, die sich im eingebrachten Medium ergeben. Weiterhin wird die im Medium auftretende Verlustleistung angegeben.



Versuchseinrichtung mit GTEM-Zelle zur Exposition von Zellkulturen im Frequenzbereich der Mobilfunknetze 890-960 MHz und 1700-1900 MHz. (Foto: TU Braunschweig)

## 2. Felderzeugende Einrichtungen

### 2.1. Auswahlkriterien

Die Auswahl einer geeigneten felderzeugenden Einrichtung wurde anhand folgender Kriterien vorgenommen:

- Feldstruktur,
- Prüfvolumen,
- Frequenzbereich,
- Abschirmung von Fremdfeldern,
- biologische Versuchsbedingungen.

Die Feldstruktur beinhaltet den Feldtyp, die räumliche Feldstärkeverteilung und die erreichbaren Feldstärkeamplituden in dem leeren Felderzeuger. Hier wurde als Feldtyp eine transversal-elektromagnetische (TEM-) Welle angesetzt, die beispielsweise auch im Fernfeld vor einer Sendeanenne vorliegt. Bei ihr stehen das elektrische und magnetische Feld senkrecht aufeinander und beide verlaufen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Im Freiraum ist das Verhältnis von elektrischer zu magnetischer Feldstärke durch den Freiraumwellenwiderstand  $Z_F = 377 \Omega$  gegeben. Die räumliche Feldstärkeverteilung sollte möglichst über das gesamte Volumen des eingebrachten Prüfobjekts homogen sein und der Felderzeuger so beschaffen sein, daß mit gängigen Speiseleistungen ausreichende Feldstärkewerte erzielt werden können.

Die als Untersuchungsobjekte verwendeten Zellen befinden sich in einem Nährmedium, das in einem Behältnis dem Feld aus-

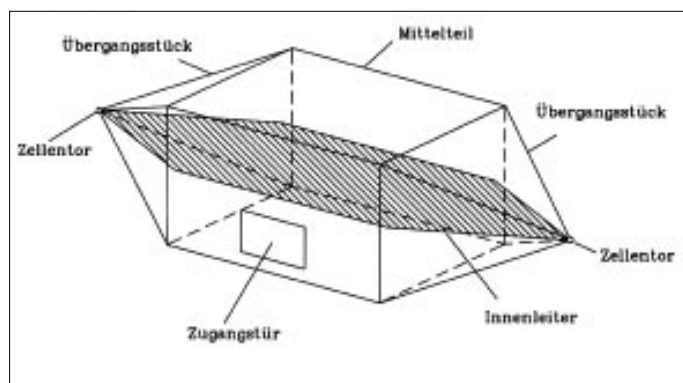


Abbildung 1:  
TEM-Zelle

gesetzt wird. Weiterhin sind Vorrichtungen zur Temperierung des Mediums vorzusehen. Durch diese Vorgaben sind die Abmessungen des Prüfobjektes, das in den Felderzeuger einzubringen ist und hier auch mit Probenhalter bezeichnet werden soll, festgelegt. Damit sind auch die minimalen Abmessungen des Felderzeugers festgelegt, da der Probenhalter nur einen gewissen Teil des Gesamtvolumens ausfüllen darf. So ist sichergestellt, daß die Rückwirkungen des Probenhalters auf den Meßaufbau gering bleiben.

Die felderzeugende Einrichtung ist für den geforderten Frequenzbereich des C-, D- oder E-Mobilfunknetzes auszulegen. Diese Funknetze umfassen jeweils eine Bandbreite von wenigen 10 MHz bei den Frequenzen von 450 MHz, 900 MHz bzw. 1800 MHz. Die erforderlichen Versuchsaufbauten lassen sich vereinfachen, wenn der nutzbare Frequenzbereich des Felderzeugers mehrere Mobilfunkfrequenzbereiche umfaßt. Dann besteht darüber hinaus die Möglichkeit, den Einfluß elektromagnetischer Felder in weiteren Frequenzbereichen, die in der Umwelt hohe Feldstärkewerte aufweisen, zu untersuchen.

Um eindeutige Ergebnisse bei den Versuchen zu erhalten, sind fremde Felder weitestgehend abzuschirmen. Als Felderzeuger sind daher geschirmte Räume zu bevorzugen; offene Anordnungen wie Freifeldmeßplätze oder offene Leitungen scheiden aus. Auf diese Weise werden gleichzeitig die postalischen Bestimmungen erfüllt, da die erzeugten Hochfrequenzfelder nicht in die Umgebung gelangen. Eine ausreichende Schirmung niederfrequenter magnetischer Felder, besonders des 50-Hz-Lichtnetzes, ist meist nur mit beträchtlichem Aufwand zu erreichen. Daher ist eine angemessene Entkopplung von diesen Feldern bei der Versuchsdurchführung sicherzustellen.

Schließlich sind die biologischen Anforderungen an den Versuchsaufbau zu erfüllen. Dazu zählen hier die Temperierung des Nährmediums auf eine vorgegebene, konstante Temperatur und die Möglichkeit, das Untersuchungsobjekt während des Versuchs mit einem Mikroskop zu beobachten.

Nach diesen Kriterien fiel die Wahl auf die TEM-Zelle und die GTEM-Zelle, deren Eigenschaften im folgenden näher erläutert werden sollen.

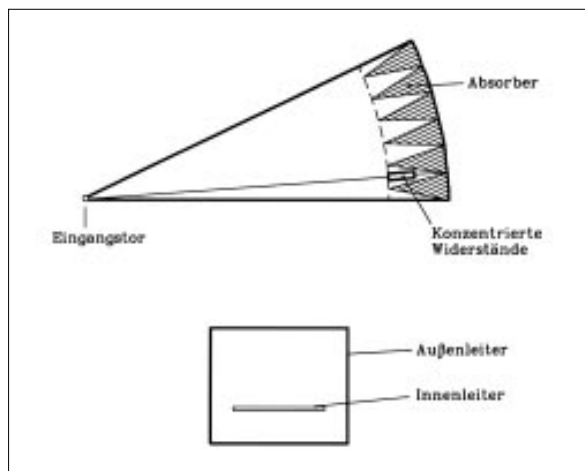


Abbildung 2:  
GTEM-Zelle

## 2.2. TEM-Zelle

Für Untersuchungen der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) stellt die TEM-Zelle ein wichtiges Meßwerkzeug dar [1]. Eine TEM-Zelle ist als aufgeweitete koaxiale Leitung mit großem, rechteckförmigem Querschnitt vorstellbar, der beidseitig mittels trichterförmiger Übergangsstücke auf die Querschnittsabmessungen gewöhnlicher Koaxialkabel überführt wird (Abb. 1). Der Innenraum ist durch eine Tür in der Seitenwand zugänglich. Die TEM-Zelle stellt einen geschirmten Raum dar, wobei die ungenügende Schirmung niederfrequenter magnetischer Felder zu beachten ist, wenn der Außenleiter aus Aluminium gefertigt ist.

Im längshomogenen Mittelteil der TEM-Zelle bildet sich in guter Näherung eine TEM-Welle aus. Dies gilt für einen Frequenzbereich, der sich von Gleichspannung (DC) bis zu einer oberen Grenzfrequenz erstreckt, von der an zusätzlich Hohlleiterwellen ausbreitungsfähig sind. Diese Hohlleiterwellen bewirken unerwünschte räumliche Feldstärkeinhomogenitäten, die sich z.B. in

resonanzartigen Extremstellen beträchtlicher Größe im Frequenzgang der elektrischen Feldstärke äußern [2]. Die Grenzfrequenz läßt sich aus der Querschnittsgeometrie des Zellenmittelteils berechnen und ist umso höher, je kleiner die Querschnittsabmessungen sind. Die kleinsten möglichen Abmessungen sind allerdings festgelegt, da das eingebrachte Prüfobjekt mit seinen vorgegebenen Abmessungen nur einen gewissen Teil des TEM-Zellenvolumens ausfüllen darf [1]. Danach sollte die Höhe des Prüfobjekts ein Drittel des Abstands zwischen Innen- und Außenleiter nicht übersteigen. Zum Betrieb wird in ein Tor der TEM-Zelle eine Hochfrequenzleistung eingespeist und das andere Tor mit einem Widerstand reflexionsfrei abgeschlossen. Die Leitungsimpedanz der TEM-Zelle läßt sich auf den üblichen Wert von  $50 \Omega$  dimensionieren.

## 2.3. GTEM-Zelle

Die GTEM-Zelle (Gigahertz-TEM-Zelle) wird ebenfalls in der EMV-Meßtechnik eingesetzt [3]. Sie ist als geschlossener trichterförmiger

Wellenleiter rechteckigen Querschnitts aufgebaut, der an seinem Ende durch eine Kombination aus konzentrierten Widerständen und Absorbern breitbandig abgeschlossen ist (Abb. 2). Dabei bilden im unteren Frequenzbereich, wo die Absorber nur eine geringe Wirkung aufweisen, die konzentrierten Widerstände den Abschluß. Zu höheren Frequenzen, wo ein Abschluß aus konzentrierten Bauelementen schwierig zu realisieren ist, sorgen dann die Absorber für geringe Reflexionen.

In der GTEM-Zelle bildet sich näherungsweise eine TEM-Welle aus. Höhere Moden sind zwar ausbreitungsfähig, können aber – im Gegensatz zur TEM-Zelle – wegen des großflächigen Abschlusses nicht zu Resonanzerscheinungen führen. Der nutzbare Frequenzbereich einer GTEM-Zelle ist damit größer als der einer TEM-Zelle und erstreckt sich von DC bis zu einigen GHz. Auch in der GTEM-Zelle sollte das eingebrachte Prüfobjekt in seiner Höhe auf ein Drittel des Abstandes zwischen Innen- und Außenleiter beschränkt sein. Zum Betrieb wird in das Eingangstor der GTEM-Zelle eine Hochfrequenzleistung gespeist, die sich als Welle ausbreitet und im ausgangsseitigen Abschluß absorbiert wird.

Bei der praktischen Ausführung von GTEM-Zellen besteht die Schwierigkeit, den hybriden Abschluß für den gesamten Frequenzbereich reflexionsarm auszuführen. Reflexionen jedoch bedeuten stehende Wellen, die mit einer inhomogenen Feldverteilung in Ausbreitungsrichtung der Welle gleichbedeutend sind.

## 3. Beschreibung der Versuchsaufbauten

Es wurden vier Versuchsaufbauten zur Untersuchung des Einflusses elektromagnetischer Hochfrequenzfelder auf Zellen für folgende Forschungsvorhaben entwickelt und aufgebaut:

- Institut für Humanbiologie, TU-Braunschweig: Einfluß auf periphere Lymphozyten bei 450 MHz,
- Physiologisches Institut II, Uni Bonn: Einfluß auf Herzmuskelzellen bei 900 MHz und 1800 MHz,
- Institut für Klinische Chemie und Klinische Biochemie, FU Berlin: Einfluß auf Promyelozyten bei 900 MHz und 1800 MHz,
- Institut für Humanbiologie, TU-Braunschweig: Einfluß auf periphere Lymphozyten bei 900 MHz und 1800 MHz.

Im folgenden werden diese Versuchsaufbauten beschrieben und Meßergebnisse von Zweitorparametern und Feldstärkefrequenzgängen der verwendeten Felderzeuger vorgestellt.

### 3.1. 450 MHz – Braunschweig

Für dieses Experiment wurde ein Versuchsaufbau mit einer TEM-Zelle erstellt. Die Geometrie und das eingeführte Koordinatensystem der aufgebauten TEM-Zelle gehen aus Abb. 3 hervor.

Die Außenleiterabmessungen wurden so gewählt, daß sie etwa sechsmal so groß wie die Abmes-

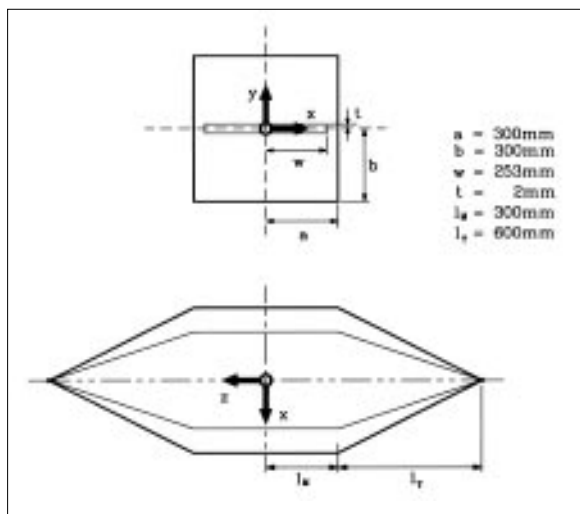


Abbildung 3: Geometrie und Koordinatensystem der TEM-Zelle für 450 MHz

sungen des Probenhalters sind. Damit sind nach [1] die Rückwirkungen auf den Meßaufbau zu vernachlässigen. Die Breite des Innenleiters wurde für eine Leitungsimpedanz von  $50 \Omega$  dimensioniert. Die Anpassung an den Wellenwiderstand des Meßsystems von  $50 \Omega$  zeigt sich im Frequenzgang des Eingangreflexionsfaktors  $S_{11}$ , dessen Betrag in Abb. 4 dargestellt ist. Im interessierenden Frequenzbereich bis 500 MHz ist  $|S_{11}|$  mit Ausnahme von schmalbandigen Maxima an Hohlleiterresonanzfrequenzen kleiner als 10%. Bei 450 MHz ergibt sich ein Wert von 5%, was eine gute Anpassung darstellt. Der Betrag des Transmissionsfaktors  $S_{21}$  weicht nur geringfügig von 1 ab (Abb. 4), die daraus berechenbare Durchgangsdämpfung ist also im gesamten Frequenzbereich sehr gering und liegt mit 0,1 dB im Bereich der Meßgenauigkeit. Die gute Anpassung und geringe Durchgangsdämpfung bleiben auch mit eingebrachtem Probenhalter erhalten.

Im Zentrum des unteren ( $x = 0, y = -15 \text{ m}, z = 0$ ) oder oberen ( $x = 0, y = 0,15 \text{ m}, z = 0$ ) Halbrau-

mes der leeren TEM-Zelle gilt für die elektrische Feldstärke  $E_0$  der TEM-Welle [1]:

$$E_0 = \frac{\sqrt{P \cdot Z_L}}{b} \quad (1)$$

Dabei ist P die eingespeiste Leistung,  $Z_L$  die Leitungsimpedanz ( $Z_L = 50 \Omega$ ) und b der Abstand zwischen Innen- und Außenleiter (vgl. Abb. 3). Da im Fall der TEM-Welle Freiraumverhältnisse vorliegen, kann aus  $E_0$  die magnetische Flußdichte  $B_0$  berechnet werden:

$$B_0 = \mu_0 \cdot H_0 = \mu_0 \cdot \frac{E_0}{Z_F} \quad (2)$$

Mit  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$  und  $Z_F = 120\pi \Omega$  sowie der Bezeichnung  $1 \text{ Vs/m}^2 = 1 \text{ T}$  folgt daraus:

$$\frac{B_0}{\mu\text{T}} = \frac{1}{300} \cdot \frac{E_0}{\text{V/m}} \quad (3)$$

Durch die Geometrie des Probenhalters sind die Abmessungen der TEM-Zelle festgelegt. Daraus resultiert eine Grenzfrequenz der ersten ausbreitungsfähigen Hohlleiterwelle ( $TE_{01}$ -Welle) von etwa 143 MHz. Die TEM-Zelle wird also oberhalb ihrer Grenzfrequenz betrieben. Dies ist zulässig, wenn die Feldverteilung bei der Unter-

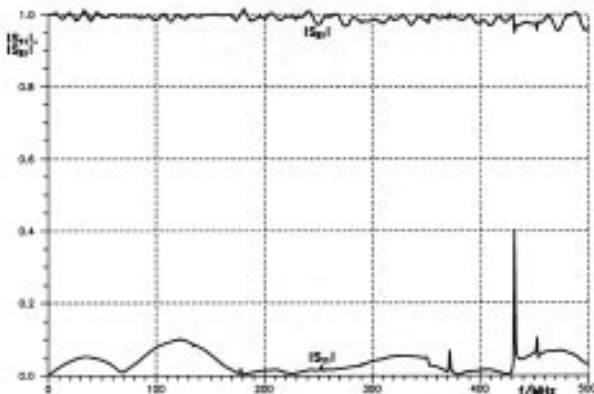


Abbildung 4: Zweitorparameter der TEM-Zelle für 450 MHz

suchungsfrequenz etwa derjenigen der TEM-Welle entspricht. Dazu wurden Messungen der Feldstruktur durchgeführt.

In Abb. 5 ist der normierte Frequenzgang der elektrischen Feldstärke im Zentrum des leeren, unteren Halbraumes dargestellt. Als Normierungsfeldstärke wurde  $E_0$  gewählt. Im unteren Frequenzbereich ergibt sich erwartungsgemäß  $E_y/E_0 \approx 1$ ; es liegt die gewünschte reine TEM-Welle vor. Ab etwa 250 MHz treten schmalbandige Resonanzen auf, bei denen die Feldstärkeverteilung sehr inhomogen verläuft und die daher gemieden werden müssen. Zwischen den Resonanzen überwiegt jedoch wieder der

TEM-Modus. Daher wurden die Versuche nicht bei 450 MHz, wo eine starke Resonanz auftritt, sondern bei 440 MHz durchgeführt. Messungen der räumlichen Verteilung der drei Feldkomponenten  $E_x$ ,  $E_y$  und  $E_z$  belegen, daß bei dieser Frequenz näherungsweise der gewünschte TEM-Modus vorliegt. Allerdings ist die Feldstärke insgesamt geringer und beträgt  $0,6 \cdot E_0$ . Dieser Faktor 0,6 ist bei der Berechnung der Feldstärke in der leeren TEM-Zelle nach Gl.(1) und Gl.(2) für 440 MHz stets zu berücksichtigen. Die Verwendung einer etwa 2% kleineren Untersuchungsfrequenz sollte keinen Einfluß auf das Verhalten der biologischen Prüfobjekte haben.

Die TEM-Zelle wird von einem Signalgenerator (Typ SMX, Rohde&Schwarz), dem ein Breitband-Leistungsverstärker nachgeschaltet ist, gespeist. Die eingespeiste Leistung beträgt 2 W. Damit ergibt sich unter Berücksichtigung des Faktors von 0,6 bei 440 MHz nach Gl.(1) eine elektrische Feldstärke von 20 V/m bzw. nach Gl.(2) eine magnetische Flußdichte von 67 nT in der leeren TEM-Zelle. Im C-Mobilfunknetz wird für die Sprechkanäle FM-Modulation verwendet, die durch eine konstante Trägerleistung gekennzeichnet ist. Zur Nachbildung in den Experimenten wurde daher die Signalquelle unmoduliert, also im Dauerstrich (CW) betrieben.

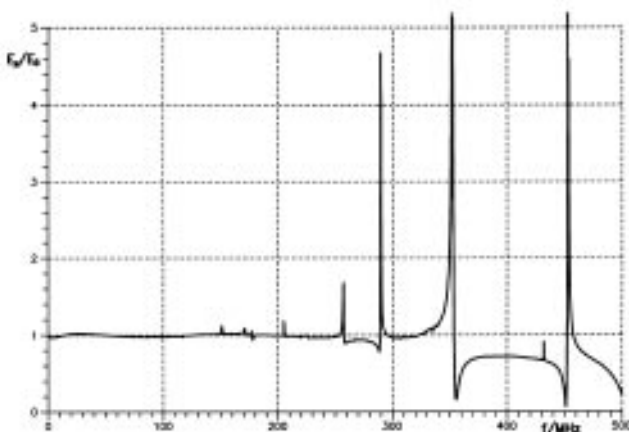


Abbildung 5: Feldstärkefrequenzgang im Zentrum des leeren unteren Halbraumes der TEM-Zelle für 450 MHz

Die Abmessungen des Probenhalters gehen aus Abb. 6 hervor. Zur Exposition wird er in das Zentrum des unteren Halbraumes der TEM-Zelle eingebracht. Er ist zur Aufnahme von 9 Reagenzgläsern, die mit dem Nährmedium und den zu untersuchenden Zellen gefüllt sind, bestimmt und besteht aus Acrylglas. Der Probenhalter dient weiterhin zur Temperierung des Nährmediums. Dazu ist er mit einer Flüssigkeit gefüllt, die über einen geschlossenen Kreislauf von einem Badthermostaten (Typ

Haake F3) außerhalb der TEM-Zelle umgewälzt und auf einer konstanten, einstellbaren Temperatur gehalten wird. Als Temperierflüssigkeit wird Weißöl verwendet, das eine geringe relative Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  besitzt. Wasser mit  $\epsilon_r = 81$  ist ungeeignet, da es zu einer erheblichen Verminderung der elektrischen Feldstärke im Probenhalter führen würde.

Der konstante Temperaturabfall auf dem Verbindungsschlauch zwischen Badthermostat und Probenhalter wird durch eine höhere Badtemperatur kompensiert. Mit einem Wert von  $37,7^\circ\text{C}$  konnte in allen 9 Reagenzgläsern die geforderte Temperatur von  $37,0^\circ\text{C}$  erreicht werden, wobei die Temperaturunterschiede zwischen den Reagenzgläsern kleiner als die Temperaturauflösung von  $0,1^\circ\text{C}$  des verwendeten Digitalthermometers sind. Ebenfalls zu vernachlässigen ist die Eigenerwärmung des Nährmediums aufgrund der eingestrahlichten Hochfrequenzleistung. Dies wurde durch eine Temperaturmessung unmittelbar nach einer Speisung von 2 W über eine Stunde festgestellt.

### 3.2. 900/1800 MHz – Bonn

Für diese Untersuchungen wurde ebenfalls eine TEM-Zelle als Felderzeuger verwendet, deren Abmessungen Abb. 7 zeigt. Aufgrund des hier nur sehr kleinen Prüfvolumens und der großen erforderlichen oberen Frequenz sind entsprechend geringe Querschnittsabmessungen notwendig, um eine möglichst hohe Grenzfrequenz zu erzielen. Die Abmessungen wurden so gewählt, daß

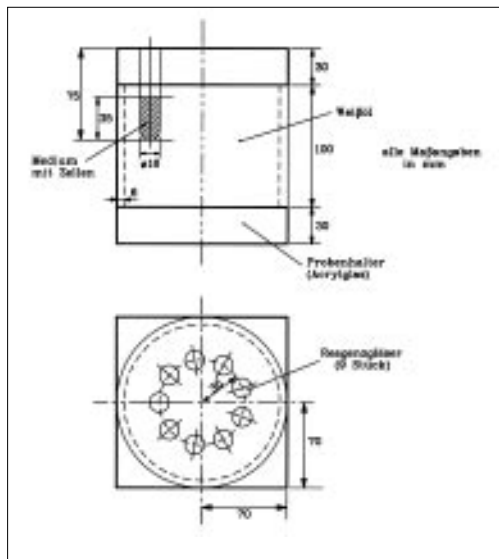


Abbildung 6:  
Probenhalter für  
450 MHz (Braunschweig)

einerseits der Einfluß des Prüfobjekts auf die Meßanordnung zu vernachlässigen ist und andererseits bei beiden Frequenzen näherungsweise eine TEM-Feldverteilung vorliegt. Die rechnerisch abgeschätzte Grenzfrequenz des ersten Hohlleitermodus beträgt 1,2 GHz. Damit liegt bei 900 MHz sicher allein die TEM-Welle vor. Vergleichende Abschätzungen mit anderen TEM-Zellen ergeben, daß die zweite Untersuchungsfrequenz von 1800 MHz bei dieser Geometrie gerade zwischen der ersten und zweiten schmalbandi-

gen Hohlleiterresonanzfrequenz liegt. So kann auch bei 1800 MHz näherungsweise von einer TEM-Feldverteilung ausgegangen werden.

In Abb. 8 ist der bis 2 GHz gemessene Betrag des Eingangsreflexionsfaktors dargestellt. Die Anpassung an den Bezugswellenwiderstand von  $50 \Omega$  ist gut; bei 900 MHz beträgt  $|S_{11}|$  etwa 5% und bei 1800 MHz etwa 9%. Der Einfluß des eingebrachten Prüfobjekts wurde durch Messung des Reflexionsfaktors im

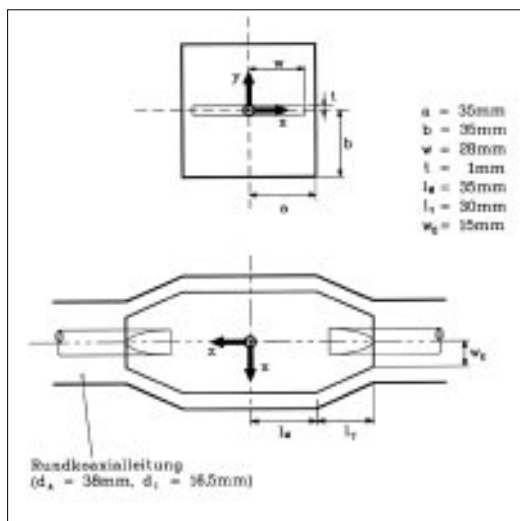


Abbildung 7: Geometrie und  
Koordinatensystem der TEM-  
Zelle für 900/1800 MHz (Bonn)

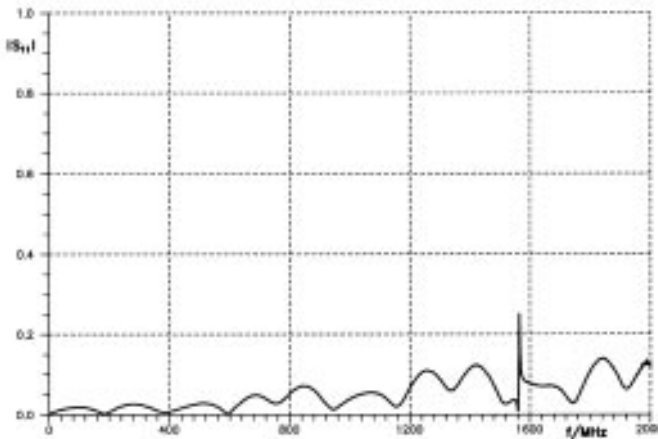


Abbildung 8: Eingangsreflexionsfaktor der TEM-Zelle für 900/1800 MHz (Bonn)

Zeitbereich mit einem Impulsreflektometer [4] überprüft. Es zeigt sich, daß die Leitungsimpedanz an der Stelle des Prüfobjekts nur um 2% kleiner ist als in der TEM-Zelle ohne Prüfobjekt. Die zum Betrieb der TEM-Zelle notwendige Bedingung geringer Reflexionen ist daher auch mit eingebrachtem Prüfobjekt erfüllt. Messungen der Feldstärkeverteilung im Zelleninneren sind aufgrund der geringen Abmessungen nicht möglich.

Bei diesem Versuch sollten die Zellen während der Feldeinwirkung mit einem Mikroskop zu beobachten sein. Der Probenhalter mußte daher auf dem Boden (Außenleiter) der TEM-Zelle angeordnet werden. Eine elektrostatische Abschätzung, die gleichfalls für die TEM-Welle gilt, ergibt, daß in der leeren TEM-Zelle an diesem Ort die Feldstärke gleich der 0,835-fachen Feldstärke nach Gl.(1) im Zentrum des Halbraumes ist. Ein kalibrierter Feldstärkesensor für den erforderlichen großen Frequenzbereich bis rund 1,8 GHz stand nicht zur Verfügung. Probenmessungen mit einem unkalibrierten Sensor ergeben jedoch schmalbandige Maxima im Feldstärkefre-

quenzgang bei 1568 MHz und 2252 MHz, die als Folge der beiden ersten Hohlleiterresonanzen der  $TE_{01}$ -Welle auftreten. Damit ist die TEM-Zelle auch oberhalb ihrer Grenzfrequenz von 1,2 GHz bis etwa 2 GHz unter Aussparung eines schmalen Frequenzbereiches um 1,57 GHz verwendbar.

Als Signalquelle wird ein UHF-Leistungsmeßsender vom Typ SLRD (Hersteller Rohde&Schwarz) verwendet, der um die Möglichkeit einer externen Pulsmodulation erweitert wurde. Im D- und E-Mobilfunknetz wird im Zeitmultiplex mit digitaler GMSK- (Gaussi-

an Minimum Shift Keying) Modulation gearbeitet. Das tatsächliche, relativ komplizierte Modulationssignal wird vereinfachend durch eine Pulsmodulation der Trägerfrequenz von 900 MHz bzw. 1800 MHz mit einer Pulsbreite von 0,577 ms und einer Periodendauer von 4,615 ms nachgebildet. Der Sender gibt also für eine Zeit von 0,577 ms eine vorgegebene Spitzenleistung ab, während in der übrigen Zeit einer Periode die Sendeleistung null ist. So wird der burstartige Charakter des Mobilfunksignals nachempfunden. Die in die TEM-Zelle eingespeiste Spitzenleistung beträgt 5 W bei 900

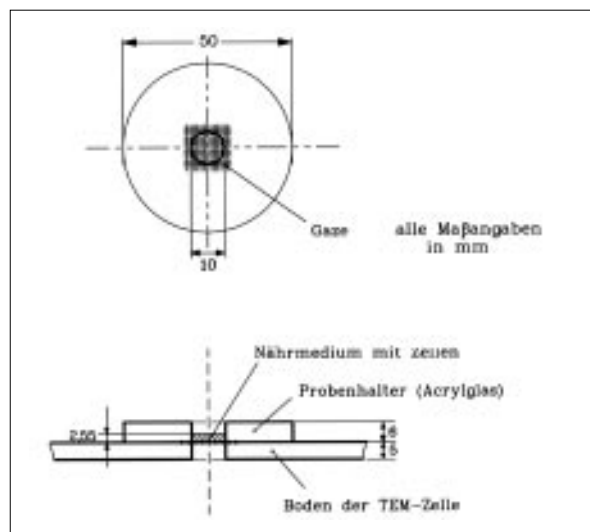


Abbildung 9: Probenhalter für 900/1800 MHz (Bonn)

MHz und 2 W bei 1800 MHz. Damit ergibt sich am Boden in der leeren TEM-Zelle gemäß Gl.(1) und Gl.(2) und unter Berücksichtigung des Faktors 0,835 eine elektrische Feldstärke von 377 V/m und eine magnetische Flußdichte von 1,26  $\mu\text{T}$  bei 900 MHz, während bei 1800 MHz 239 V/m und 0,80  $\mu\text{T}$  vorliegen.

Der Probenhalter besteht hier aus einem Acrylglasgefäß zur Aufnahme des Nährmediums mit den Zellen (Abb. 9). Dieses Gefäß befindet sich direkt auf dem Boden der TEM-Zelle, wo eine Bohrung von 1 cm Durchmesser eingebracht ist, die mit feinmaschiger, leitfähiger Gaze hochfrequenzmäßig verschlossen ist. Durch die Maschen der Gaze können die Zellen während der Feldeinwirkung mit einem Mikroskop beobachtet werden. Die Temperierung erfolgt durch einen in das Acrylglasgefäß eingearbeiteten Kanal, der von dem als Temperierflüssigkeit verwendeten Öl durchflossen wird. Zwei weitere Kunststoffschläuche, die vom Probenhalter aus der TEM-Zelle führen, dienen der Perfusion.

### 3.3. 900/1800 MHz – Berlin

Für diese Untersuchungen sollen mehrere, mit dem Nährmedium und den Zellen gefüllte Reagenzgläser einem Hochfrequenzfeld ausgesetzt werden. Aufgrund des dazu erforderlichen Probenhaltervolumens kommt eine TEM-Zelle in diesem Frequenzbereich nicht in Betracht. Als Feldgenerator wurde daher eine GTEM-Zelle (Modell 5302, Hersteller EMCO, U.S.A.) verwendet, deren wichtig-

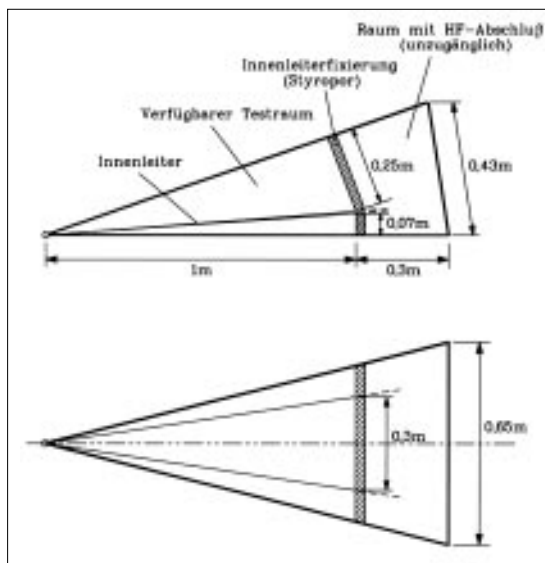


Abbildung 10:  
Geometrie der GTEM-Zelle  
für 900/1800 MHz  
(Berlin, Braunschweig)

ste Abmessungen aus Abb. 10 hervorgehen.

Laut Herstellerangaben weist diese GTEM-Zelle einen Frequenzbereich von DC bis 2 GHz und eine nominelle Eingangsimpedanz von 50  $\Omega$  auf. Die maximal zulässige Eingangsleistung beträgt 50 W. Die maximalen Prüfobjektanmessungen zur Ausnutzung einer möglichst homogenen Feldverteilung werden mit  $83 \cdot 83 \cdot 83 \text{ mm}^3$  angegeben. Die Abmessung von 83 mm entspricht gerade einem Drittel des maximal verfügbaren Abstandes zwischen Innenleiter

und Außenleiter. Der Betrag des Eingangsreflexionsfaktors soll im gesamten Frequenzbereich kleiner als 0,2 sein. Eine Messung von  $|S_{11}|$  (Abb. 11) bestätigt diesen Wert. Die Anpassung ist damit nicht so gut wie beispielsweise bei den vorgestellten TEM-Zellen. Bei 900 MHz beträgt  $|S_{11}|$  etwa 9% und bei 1800 MHz 18%.

Die Feldstärke in der leeren GTEM-Zelle läßt sich nicht explizit wie in der TEM-Zelle angeben. Näherungsweise kann diese Feldstärke nach Gl.(1) bestimmt werden, wenn für die Größe  $b$  der

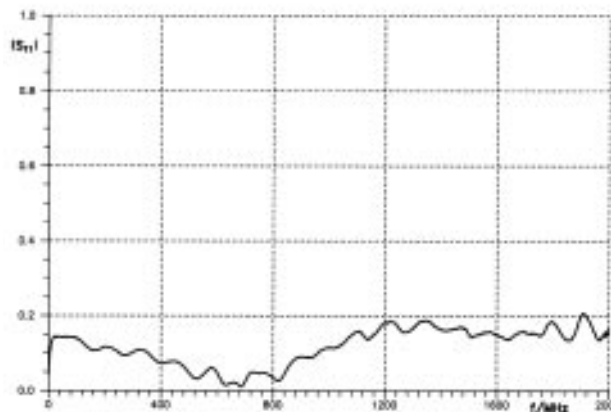


Abbildung 11:  
Eingangsreflexionsfaktor  
der GTEM-Zelle

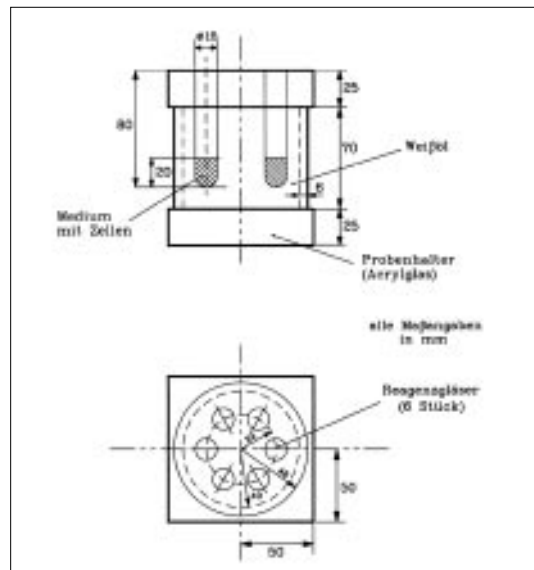


Abbildung 12:  
Probenhalter für  
900/1800 MHz (Berlin)

Abstand zwischen Innen- und Außenleiter an der Position des Prüfobjekts angenommen wird.

Als Signalquelle wird ein Signalgenerator (Typ SMT-03, Rohde&Schwarz) verwendet, dem ein Bandverstärker für den Frequenzbereich von 900 MHz und für 1800 MHz nachgeschaltet wird. Da der Signalgenerator nicht pulsmulierbar ist, wurde ein Pulsmodulator entwickelt und aufgebaut, der zwischen Signalgenerator und Leistungsverstärker in den HF-Pfad eingefügt wird. Dieser Pulsmodulator erlaubt ein manuelles Ein- und Ausschalten der Trägerfrequenz (CW), eine Pulsmodulation mit einem externen Modulationssignal und eine Pulsmodulation mit einem internen Pulsgenerator. Dieser Pulsgenerator bildet das GSM-Zeitmultiplexsignal nach, indem er mit einer Periodendauer von 4,615 ms den Hochfrequenzträger für eine Dauer von 0,577 ms tastet. Dabei wird in beiden Frequenzbereichen eine Spitzenleistung von 10 W in die GTEM-Zelle eingespeist. Mit einem Abstand  $b$

von 0,24 m am Ort des Probenhalters läßt sich dann die elektrische Feldstärke in der leeren GTEM-Zelle nach Gl.(1) zu 93 V/m und die magnetische Flußdichte zu 0,31  $\mu\text{T}$  abschätzen.

Der Probenhalter ist ähnlich wie der Probenhalter für die 450-MHz-Versuche in der TEM-Zelle aufgebaut und dient ebenfalls zur Aufnahme der Reagenzgläser (hier 6 Stück) und der Temperierung der Untersuchungsobjekte mit einem Weißölkreislauf. Die Abmessungen gehen aus Abb. 12 hervor.

Mit einer Höhe von 120 mm übersteigt er die maximal empfohlene Prüfobjekthöhe von 83 mm. Messungen des Eingangsreflexionsfaktors der GTEM-Zelle zeigen jedoch, daß die Rückwirkungen des Probenhalters auf den Meßaufbau noch tolerierbar sind. Der Probenhalter wird an dem Ort des größtmöglichen Abstandes zwischen Innen- und Außenleiter, nämlich direkt vor der Innenleiterfixierung (vgl. Abb. 10) in die GTEM-Zelle eingebracht, und

zwar mittig zwischen Innen- und Außenleiter. Durch entsprechende Styroporhalterungen sind drei Orientierungen der Reagenzgläser möglich: stehend, liegend und schräg unter einem Winkel von 45°. Die Temperaturkonstanz in den Reagenzgläsern ist sichergestellt; in allen 6 Reagenzgläsern wurde die geforderte Temperatur von 37,0°C mit einer Abweichung von weniger als  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  erreicht. Dazu ist am Badthermostaten eine Badtemperatur von 38,1°C (Erfahrungswert) einzustellen. Eine meßbare Eigenerwärmung des Nährmediums durch die Hochfrequenzenergie tritt nicht auf. Dies wurde bei einer einstündigen Speisung mit einem ungetasteten Träger von 10 W Leistung mit direkt anschließender Temperaturmessung festgestellt.

### 3.4. 900/1800 MHz – Braunschweig

Für diese Versuche wurde die gleiche GTEM-Zelle und der gleiche Probenhalter wie bei den Untersuchungen in Berlin verwendet. Hier wurden die Reagenzgläser nur in der vertikalen Position in die GTEM-Zelle eingebracht. Als Signalquelle dient ein UHF-Leistungsmeßsender vom Typ „SLRD“ (Rohde&Schwarz), der so modifiziert wurde, daß er das bereits beschriebene, dem GSM-Standard nachgebildete Signal abgibt. Die Spitzenleistung, die in die GTEM-Zelle eingespeist wird, beträgt in beiden Frequenzbereichen 5 W, so daß sich in der leeren GTEM-Zelle am Ort des Probenhalters die elektrische Feldstärke zu 66 V/m und die magnetische Flußdichte zu 0,22  $\mu\text{T}$  abschätzen läßt.

## 4. Feldbestimmung

### 4.1. Voraussetzungen

Zur Beurteilung der Expositionsversuche ist die Feldstärke in der Flüssigkeit, in der sich die Zellen befinden, zu bestimmen. Feldstärkemessungen scheiden wegen der geringen Abmessungen und der Leitfähigkeit des Nährmediums aus. Eine analytische Berechnung ist aufgrund der komplizierten Geometrie ebenfalls nicht möglich. Daher wurde ein numerisches Berechnungsverfahren verwendet. Dazu stand bei der Telekom das Programmpaket „MAFIA“ zur Verfügung, das nach der Finite-Differenzen-Methode arbeitet und das sich zur Feldberechnung in geschlossenen dreidimensionalen Strukturen eignet [5]. Das zu untersuchende Gebiet ist mit einem orthogonalen Gitter zu überziehen, und die tatsächliche Materialverteilung ist auf das Gitter abzubilden.

Aufgrund der dreidimensionalen Geometrie ergeben sich beträchtliche Gitterelementanzahlen. Um die Berechnungen auf der verfügbaren Rechenanlage überhaupt und dazu noch in akzeptabler Rechenzeit durchführen zu können, sind vereinfachende Annahmen bei der Modellierung notwendig. So werden die Felderzeuger nicht in ihrer vollständigen Geometrie einschließlich der verhältnismäßig kleinen Einspeisestellen nachgebildet. Vielmehr wurde bei beiden TEM-Zellen nur das längshomogene Mittelteil und bei der GTEM-Zelle ein kurzes, ebenfalls längshomogenes Leitungstück modelliert, das die mittleren Querschnittsabmessungen am Ort des eingebrachten

Probenhalters repräsentieren soll. Diese Wellenleiterabschnitte mit den nachgebildeten Probenhaltern wurden vereinfachend mit einer TEM-Welle gespeist. Die Anregung höherer Moden, die ja in den trichterförmigen Übergängen erfolgt, und ihre Ausbreitung wurden also nicht berücksichtigt. Der dadurch bedingte Rechenfehler konnte für den Fall der TEM-Zelle mit einer Kontrollrechnung abgeschätzt werden. Dazu wurde ein vereinfachter Probenhalter modelliert, der zum einen in den Wellenleiterabschnitt und zum anderen in eine vollständig nachgebildete TEM-Zelle eingebracht wurde. In beiden Fällen wurde die gleiche Frequenz und Speiseleistung verwendet. Es zeigt sich, daß die elektrischen Feldstärken und magnetischen Flußdichten zwischen den beiden Modellen um maximal  $\pm 10\%$  voneinander abweichen. Diese geringen Abweichungen dürften auch für die vorliegenden Probenhalter in der TEM-Zelle gelten.

Für die GTEM-Zelle konnte eine solche Abschätzung nicht vorgenommen werden, da über das Absorbermaterial, das bei den verwendeten Frequenzen den HF-Abschluß bildet und damit die Feldstruktur mitbestimmt, keinerlei Daten verfügbar sind.

Die Gitterelementweite wurde im Bereich des Nährmediums so gewählt, daß sie bei allen Modellen maximal 1,5% der kleinsten vorkommenden Wellenlänge beträgt. Weiterhin können mit MAFIA Materialbegrenzungen auch auf den Raumdiagonalen der kartesischen Gitterelemente festgelegt werden, so daß sich die runde Form der Nährmedien gut approximieren läßt. Rechen-

fehler aufgrund einer möglicherweise zu groben Diskretisierung sollten daher zu vernachlässigen sein.

Das Speisesignal hat einen sinusförmigen Verlauf mit der Frequenz des entsprechenden Mobilfunknetzes (450 MHz, 900 MHz, 1800 MHz). Bei allen Frequenzen wurde einheitlich eine Speiseleistung von 1 W verwendet; eine Umrechnung auf andere Speiseleistungen ist aufgrund der vorausgesetzten Linearität der Anordnung zulässig. Die Berechnung mit MAFIA erfolgt mit dem T3-Modul im Zeitbereich. Dazu wird als Anfangswert auf allen Gitterelementen eine Feldstärke von null vorgegeben und zum Zeitpunkt  $t = 0$  das anregende Signal in das Eingangstor des Wellenleiters eingespeist. Die Berechnung ist solange durchzuführen, bis auf allen Gitterelementen der eingeschwingene Zustand erreicht ist. Die sich über der letzten vollständigen Periode der Anregfrequenz einstellenden Feldstärkewerte können zur Beurteilung der Feldstruktur herangezogen werden.

Die elektrischen Materialeigenschaften sind in Form der relativen Permeabilität  $\mu_r$ , der relativen Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  und der Leitfähigkeit  $\kappa$  vorzugeben. Es werden die Stoffe Acrylglas, Weißöl, das Nährmedium (HAM's F-10 oder eine Tyrode-Lösung) und eine Mischung des Nährmediums mit den Zellen verwendet. Für alle diese Stoffe gilt  $\mu_r = 1$ . Die beiden übrigen Größen  $\epsilon_r$  und  $\kappa$  wurden durch Messungen ermittelt. Dazu stand im Frequenzbereich bis 1000 MHz ein Meßverfahren zur Verfügung, das auf der Bestimmung der Leitungskon-

Material	450 MHz		900 MHz		1800 MHz	
	$\epsilon_r$	$\kappa$	$\epsilon_r$	$\kappa$	$\epsilon_r$	$\kappa$
Acrylglas	2,6	0,001	2,6	0,002	2,6	0,0039
Weißöl	2,2	0,0008	2,2	0,0017	2,2	0,0033
HAM's F-10	70	1,5	65	1,75	62	2,0
Tyrode			70	1,6	67	1,8

Tabelle 1: Verwendete elektrische Materialparameter

stanten einer mit der Stoffprobe gefüllten Koaxialleitung beruht [6]. Kleine Verlustfaktoren  $\tan\delta$  sind mit diesem Verfahren schwer zu erfassen. Daher wurden für das Acrylglas und das Weißöl ein frequenzunabhängiger Wert aus der Literatur [7] von  $\tan\delta = 0,015$  angenommen. Aus dem Verlustfaktor  $\tan\delta$  berechnet sich die Leitfähigkeit  $\kappa$  bei der Frequenz  $f$  zu:

$$\kappa = 2\pi f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan\delta. \quad (4)$$

Weiterhin standen für das Nährmedium HAM's F10 Meßergebnisse der komplexen Permittivität  $\underline{\epsilon}'_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$  in einem Frequenzbereich von 10 MHz bis 3 GHz zur Verfügung. Hierfür wurde ein Meßaufbau verwendet, bei dem der Reflexionsfaktor einer kurzen, mit der Flüssigkeit gefüllten Leitung bestimmt wird [8]. Aus  $\underline{\epsilon}'_r$  lassen sich  $\epsilon'_r$  und  $\tan\delta$  zu

$$\epsilon_r = \epsilon'_r \quad , \quad (5)$$

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} \quad (6)$$

bestimmen. Die Meßergebnisse stimmen mit den Meßwerten, die nach dem ersten vorgestellten Meßverfahren bestimmt wurden, gut überein. Daher ist es zulässig, die Materialeigenschaften der Tyrode-Lösung bei 1,8 GHz, die ja nicht gemessen werden konnten,

durch Extrapolation des Frequenzgangs zu gewinnen.

Nach dem ersten Verfahren durchgeführte Messungen ergeben, daß die Materialeigenschaften eines homogenen Gemisches aus dem Nährmedium HAM's F-10 und Blut den Eigenschaften des Mediums sehr ähnlich sind. Es kann davon ausgegangen werden, daß dies für alle hier verwendeten Gemische aus Nährmedium und Zellen gilt. Vereinfachend wurden daher für die Reagenzglasflüssigkeiten stets die Materialeigenschaften des Mediums zugrunde gelegt. Sämtliche für die numerischen Berechnungen erforderlichen elektrischen Materialparameter sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Bei den Leitfähigkeiten  $\kappa$  für Acrylglas und Weißöl handelt es sich um Werte, die mit Gl.(4) aus den Literaturangaben [7] für die Verlustfaktoren dieser Stoffe berechnet wurden. Die übrigen Werte resultieren aus den durchgeführten Messungen.

## 4.2. Rechenergebnisse

Im folgenden werden die Ergebnisse der numerischen Berechnungen für die Expositionseinstellungen vorgestellt. Angegeben werden die Feldverteilung im

Felderzeuger, ein Näherungswert für den Abfall der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flußdichte im Nährmedium bezogen auf die Verhältnisse am gleichen Ort *ohne* Medium sowie die spezifische Absorptionsrate (SAR) im Medium. Der SAR-Wert gibt die in einem Stoff umgesetzte Leistung aufgrund von Verlusten bezogen auf die Masse an:

$$SAR = \frac{P_J}{m} \quad (7)$$

Dabei berechnet sich die Joulesche Verlustleistung  $P_J$  in einem Körper der Leitfähigkeit  $\kappa$  und des Volumens  $V$  zu:

$$P_J = \int_{(V)} E^2 \cdot \kappa \cdot dV \quad (8)$$

Daraus ergibt sich:

$$SAR = \frac{P_J}{V \cdot \rho} \quad (9)$$

wobei  $\rho$  die Dichte des Körpers ist. Das Programmpaket MAFIA bietet in seinem P-Modul die Möglichkeit, die Joulesche Verlustleistung  $P_J$  nach Gl.(8) numerisch aus den zuvor bestimmten Feldstärkewerten und der bekannten Leitfähigkeit  $\kappa$  in einem gewünschten, quaderförmigen Volumen zu berechnen. Im folgenden wird stets der zeitliche Mittelwert über eine Periode der anregenden Sinusschwingung angegeben, wobei allen Berechnun-

gen eine zeitlich konstante Leistung (CW-Betrieb) von 1 W zugrunde gelegt wurde. Der SAR-Wert ist aufgrund der vorausgesetzten Linearität der verwendeten Materialien proportional der Speiseleistung, so daß er einfach auf andere Speiseleistungen umgerechnet werden kann.

## 4.2.1 450 MHz – Braunschweig

In Abb. 13 ist die Verteilung der elektrischen Feldstärke und in Abb. 14 die Verteilung der magnetischen Flußdichte in einer Querschnittsebene durch ein Reagenzglas dargestellt.

Das Reagenzglas ist etwa zur Hälfte mit dem Gemisch aus Nährmedium und Blut gefüllt, der obere Teil enthält Luft. Die magnetische Flußdichteverteilung wird durch den eingebrachten Probenhalter nahezu nicht verändert und entspricht damit derjenigen einer TEM-Welle. Dies gilt entsprechend für die elektrische Feldverteilung im oberen Teil der TEM-Zelle. Im unteren Teil hingegen ist die Verteilung im Bereich des Probenhalters verzerrt. Zur

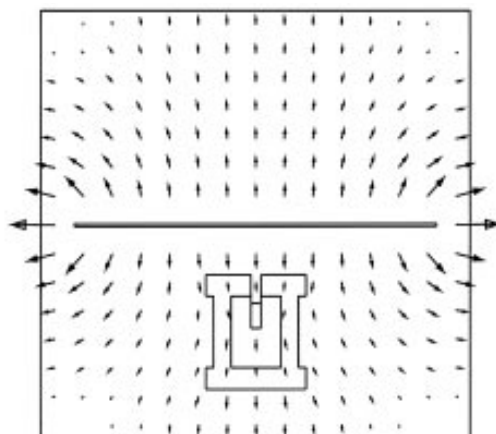


Abbildung 13: Verteilung der elektrischen Feldstärke in einer vertikalen Schnitt-ebene durch ein Reagenzglas (450 MHz, Braunschweig)

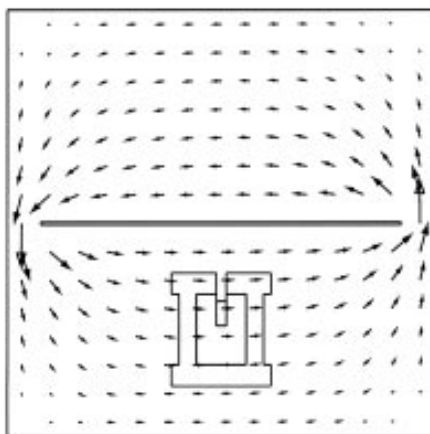


Abbildung 14: Verteilung der magnetischen Flußdichte in einer vertikalen Schnitt-ebene durch ein Reagenzglas (450 MHz, Braunschweig)

numerischen Auswertung ist der Verlauf der elektrischen Feldstärke entlang einer senkrechten Linie durch das erste Reagenzglas in Abb. 15 aufgetragen. Es zeigt sich, daß die elektrische Feldstärke

ke  $E_{Fl}$  in der Flüssigkeit auf den Betrag  $0,145 \cdot E_0$ , also auf etwa  $1/7$  der Feldstärke  $E_0$  in der leeren TEM-Zelle abgesunken ist. Dies ist auf die hohe relative Dielektrizitätszahl und die Leitfähigkeit der Flüssigkeit zurückzuführen. Diese Verringerung ist in allen 9 Reagenzgläsern gleich. Zum Vergleich wurde eine weitere Rechnung durchgeführt, bei der nur das erste Reagenzglas mit Flüssigkeitsfüllung angenommen wurde und alle 8 anderen Reagenzgläser Luft enthielten. Dann sinkt  $E_{Fl}$  auf etwa  $1/5$  der Leerfeldstärke  $E_0$ . Um gleiche Versuchsbedingungen sicherzustellen, sollten daher stets alle 9 Reagenzgläser gefüllt sein.

In Abb. 16 ist der Verlauf der magnetischen Flußdichte  $B$  entlang

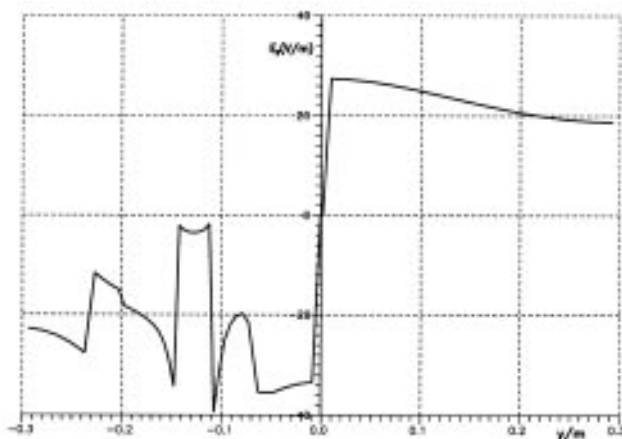


Abbildung 15: Verlauf der elektrischen Feldstärke entlang einer vertikalen Linie durch ein Reagenzglas (450 MHz, Braunschweig)

der senkrechten Linie durch das erste Reagenzglas aufgetragen. Im oberen Teil der TEM-Zelle ( $0 < y < 0,3 \text{ m}$ ) zeigt sich der ungestörte Verlauf der TEM-Welle. Im unteren Teil ( $-0,3 \text{ m} < y < 0$ ), wo sich der Probenhalter befindet, ergeben sich geringfügige Veränderungen. In der Flüssigkeit beträgt die magnetische Flußdichte  $1,02 \cdot B_0$ , ist also nahezu gleich der nach Gl.(2) berechenbaren magnetischen Flußdichte  $B_0$  in der leeren TEM-Zelle.

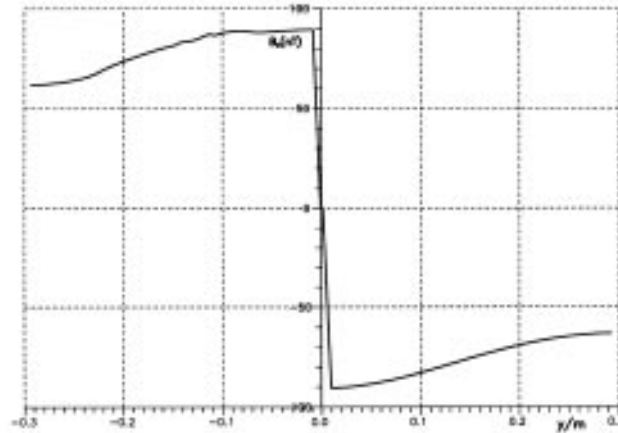


Abbildung 16: Verlauf der magnetischen Flußdichte entlang einer vertikalen Linie durch ein Reagenzglas (450 MHz, Braunschweig)

Die Jouleschen Verluste im Probenhalter aus Acrylglas einschließlich der Weißölfüllung betragen  $175 \mu\text{W}$  und in der Flüssigkeit eines Reagenzglases  $19 \mu\text{W}$ . Mit der zugrunde gelegten Geometrie ergibt sich daraus für den

Probenhalter einschließlich der Weißölfüllung ein volumenbezogener Leistungsumsatz von lediglich  $0,09 \text{ W/m}^3$ . Die spezifische Absorptionsrate in einem Reagenzglas beträgt  $3,7 \text{ mW/kg}$ . Auf-

grund dieser geringen Verlustleistungen ist eine Eigenerwärmung der Flüssigkeit in den Reagenzgläsern zu vernachlässigen, wie bereits die Messungen gezeigt haben.

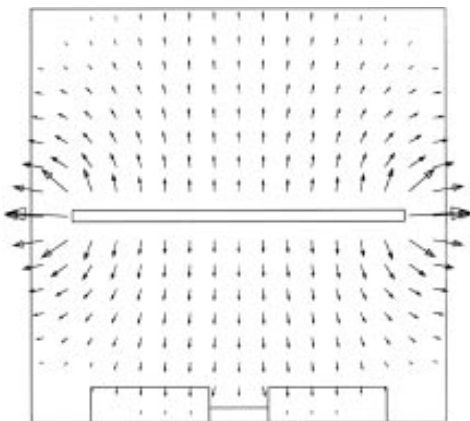


Abbildung 17: Verteilung der elektrischen Feldstärke in einer vertikalen Schnittebene mittig durch den Probenhalter (900 MHz, Bonn)

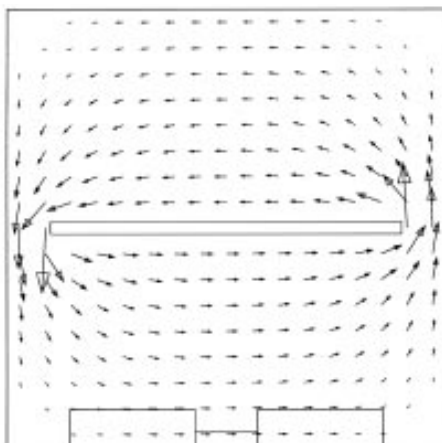


Abbildung 18: Verteilung der magnetischen Flußdichte in einer vertikalen Schnittebene mittig durch den Probenhalter (900 MHz, Bonn)

## 4.2.2 900 MHz – Bonn

Die elektrische Feldverteilung in einer Querschnittsebene mittig durch den Probenhalter ist in Abb. 17 dargestellt. Im unteren Halbraum befindet sich der Probenhalter, der in der Mitte die Tyrode-Lösung mit den Zellen enthält. Die Bohrung mit der feinmaschigen Gaze-Abdeckung unter der Lösung wurde nicht modelliert, sondern vereinfachend ein geschlossener Außenleiter angenommen.

Die Feldverteilung ist in beiden Halbräumen sehr ähnlich; im Acrylglas und besonders in der Tyrode-Lösung sinkt die elektrische Feldstärke allerdings ab. Eine Auswertung der Zahlenwerte ergibt, daß die elektrische Feldstärke in der Tyrode-Lösung auf etwa das  $0,0185$ -fache ( $\approx 1/54$ ) der Feldstärke am gleichen Ort in der leeren TEM-Zelle abgesun-

ken ist. Die Verteilung der magnetischen Flußdichte (Abb. 18) wird durch die eingebrachten Materialien praktisch nicht verändert. In der Tyrode-Lösung beträgt die magnetische Flußdichte das 1,08-fache der Flußdichte am gleichen Ort in der *leeren* TEM-Zelle. Aufgrund der geringen elektrischen Feldstärkewerte betragen die Jouleschen Verluste in der Lösung lediglich etwa 2,2  $\mu\text{W}$ . Mit einem Volumen von 0,2 ml ergibt sich daraus ein SAR-Wert von 11 mW/kg in der Lösung (Speiseleistung 1 W). Da weiterhin die Jouleschen Verluste im Acrylglas nur 9  $\mu\text{W}$  betragen, ist eine Eigenerwärmung zu vernachlässigen.

## 4.2.3 1800 MHz – Bonn

Bei dieser Frequenz sinkt die elektrische Feldstärke in der Tyrode-Lösung nicht so stark ab wie bei 900 MHz, und die magnetische Flußdichte ändert sich stärker. Die numerische Berechnung ergibt, daß die elektrische Feldstärke in der Lösung auf den 0,029-fachen Wert ( $\approx 1/35$ ) der Feldstärke am gleichen Ort in

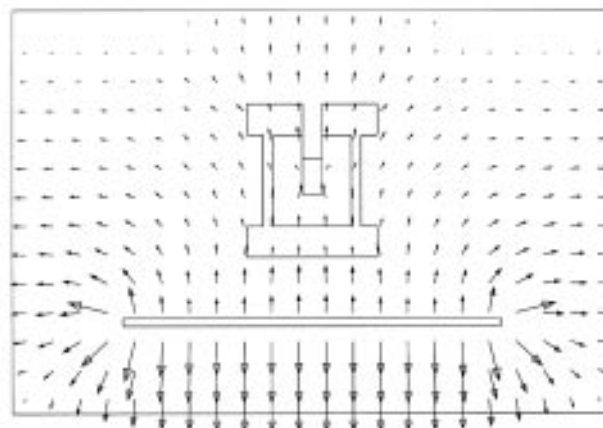


Abbildung 19: Verteilung der elektrischen Feldstärke in einer vertikalen Schnittebene durch ein Reagenzglas (900 MHz, Braunschweig)

der *leeren* TEM-Zelle absinkt, während die magnetische Flußdichte auf das 1,38-fache der Flußdichte in der *leeren* TEM-Zelle ansteigt. Offensichtlich kann bei 1800 MHz nicht mehr von einer elektrostatischen Näherung wie bei 900 MHz ausgegangen werden. Wegen der im Vergleich zu 900 MHz höheren elektrischen Feldstärke in der Tyrode-Lösung und ihrer höheren Leitfähigkeit treten bei 1800 MHz größere Joulesche Verluste auf. Sie betragen 6,9  $\mu\text{W}$ , so daß sich ein SAR-Wert von 34 mW/kg ergibt. Die Jouleschen Verluste im Acrylglas betragen 42  $\mu\text{W}$ .

## 4.2.4 900 MHz – Braunschweig

In Abb. 19 ist die elektrische Feldstärkeverteilung in einer Querschnittsebene durch ein Reagenzglas in der GTEM-Zelle dargestellt. Das Nährmedium (HAM's F-10) mit einem Volumen von 5,1 ml befindet sich im Zentrum des Probenhalters.

Unterhalb des Innenleiters der GTEM-Zelle zeigt sich eine sehr homogene Feldverteilung, während die Feldstruktur im Bereich des Probenhalters verzerrt ist. In Abb. 20 ist der Verlauf der dominierenden y-Komponente der elektrischen Feldstärke entlang einer vertikalen Schnittlinie mittig durch das Reagenzglas gezeigt. In der Flüssigkeit ist die elektrische Feldstärke auf etwa das 0,19-fache ( $\approx 1/5$ ) der Feldstärke am gleichen Ort in der *leeren* GTEM-Zelle abgesunken.

Die magnetische Flußdichte dagegen steigt im Reagenzglas auf etwa das 2,3-fache des Wertes in der *leeren* GTEM-Zelle an. Eine Analyse der dreidimensionalen Feldverteilung zeigt, daß im Bereich des Probenhalters und sei-

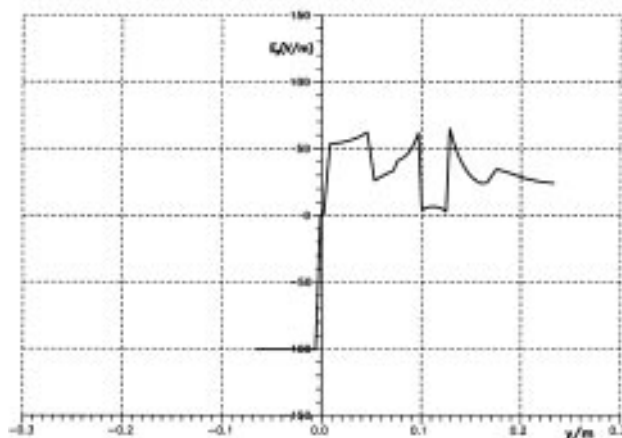


Abbildung 20: Verlauf der elektrischen Feldstärke entlang einer vertikalen Linie durch ein Reagenzglas (900 MHz, Braunschweig)

ner näheren Umgebung „Verwirbelungen“ der eingespeisten, ebenen Wellenfront auftreten. Der Probenhalter wirkt nämlich als Streukörper, da seine Abmessungen bei der Frequenz von 900 MHz in den Bereich der Wellenlänge ( $\lambda \approx 0,333$  m) kommen. Eine elektrostatische Näherung ist hier also sicher nicht zulässig. Vielmehr sind elektrische Feldstärke und magnetische Flußdichte durch die Maxwell'schen Gleichungen verknüpft, was die numerischen Rechenergebnisse belegen.

Die Jouleschen Verluste im Medium eines Reagenzglases betragen etwa  $50 \mu\text{W}$ , so daß sich eine spezifische Absorptionsrate von rund  $10 \text{ mW/kg}$  ergibt (Speiseleistung  $1 \text{ W}$ ). Im Acrylglas und in der Weißölfüllung des Probenhalters werden etwa  $240 \mu\text{W}$  umgesetzt, die zu keiner meßbaren Eigenerwärmung führen.

### 4.2.5 1800 MHz – Braunschweig

Bei dieser Frequenz bewegen sich die Probenhalterabmessungen noch mehr im Bereich der Wellenlänge ( $\lambda \approx 0,167$  m), so daß sich das Verhalten des Probenkörpers als Streukörper gegenüber 900 MHz noch verstärkt. Es treten starke Inhomogenitäten der Feldstärkeverteilung im Bereich des Mediums auf, so daß nur ungefähre, mittlere Werte angegeben werden können. Die elektrische Feldstärke im Medium sinkt auf das  $0,23$ -fache ( $\approx 1/4$ ) der Feldstärke in der leeren GTEM-Zelle, während die magnetische Flußdichte auf das  $2,8$ -fache der Flußdichte in der leeren GTEM-Zelle ansteigt. Die Berechnung ergibt

Joulesche Verluste von  $240 \mu\text{W}$  im Medium eines Reagenzglases, wobei aufgrund der hohen Feldstärkeinhomogenitäten auch eine inhomogene Leistungsdichte innerhalb der Reagenzgläser auftritt. Es ergibt sich ein SAR-Wert von  $47 \text{ mW/kg}$ . Im Acrylglas und der Weißölfüllung treten Joulesche Verluste von etwa  $1,9 \text{ mW}$  auf.

### 4.2.6 900/1800 MHz – Berlin

Bei diesen Experimenten wurde der gleiche Felderzeuger und ein baugleicher Probenhalter wie bei den Untersuchungen in Braunschweig verwendet. Allerdings weisen die Reagenzgläser eine geringfügig andere Geometrie auf, das Volumen des Nährmediums beträgt  $3 \text{ ml}$  anstatt  $5,1 \text{ ml}$  und als Nährmedium wird RPMI 1640 anstatt HAM's F-10 verwendet. Die elektrischen Materialeigenschaften des Mediums RPMI 1640 lagen nicht vor. Dieses Medium weist jedoch etwa die gleiche Zusammensetzung an Mineralsalzen, die die elektrischen Eigenschaften maßgeblich bestimmen, auf wie das Medium HAM's F-10, so daß vereinfachend dessen elektrische Materialeigenschaften (vgl. Tabelle 1) zugrunde gelegt wurden.

Weiterhin sind bei diesen Experimenten neben der senkrechten Stellung der Reagenzgläser noch eine waagerechte und eine schräge Stellung unter einem Winkel von  $45^\circ$  vorgesehen. Zum Vergleich mit den Ergebnissen der Anordnung in Braunschweig wurde die senkrechte Stellung berechnet. Weiterhin wurde die waagerechte Stellung, die in den

Expositionsversuchen bislang noch nicht verwendet wurde, untersucht. Die schräge Stellung der Reagenzgläser wurde nicht berechnet, da die Elementarkörper „Kreiszylinder“ und „Quader“, aus denen der Probenhalter mit den gefüllten Reagenzgläsern im M-Modul von MAFIA modelliert wird, nur parallel zu den Koordinatenachsen orientiert werden können.

Bei senkrechter Stellung der Reagenzgläser sind die Ergebnisse mit denen, die für die Anordnung in Braunschweig bestimmt wurden, vergleichbar. Für 900 MHz gilt: Im Medium beträgt die elektrische Feldstärke das  $0,21$ -fache ( $\approx 1/5$ ) der Feldstärke am gleichen Ort in der leeren GTEM-Zelle. Die magnetische Flußdichte steigt auf das  $2,0$ -fache des Wertes in der leeren GTEM-Zelle. Die Jouleschen Verluste im Medium betragen  $28 \mu\text{W}$  (Speiseleistung  $1 \text{ W}$ ). Mit dem kleineren Volumen von  $3 \text{ ml}$  ergibt sich wie auch bei der Anordnung in Braunschweig ein SAR-Wert von rund  $10 \text{ mW/kg}$ .

Bei 1800 MHz zeigen sich wiederum starke Feldstärkeinhomogenitäten im Bereich des Mediums. Die folgenden Angaben sind daher nur als Mittelwerte zu verstehen. Die elektrische Feldstärke im Medium sinkt auf das  $0,28$ -fache der Leerfeldstärke, während die magnetische Flußdichte auf das  $3,4$ -fache der Flußdichte in der leeren GTEM-Zelle ansteigt. Die Jouleschen Verluste im Medium eines Reagenzglases betragen etwa  $220 \mu\text{W}$ , so daß sich eine spezifische Absorptionsrate von  $73 \text{ mW/kg}$  ergibt. Auch hier ist die inhomogene Verteilung der Leistungsdichte innerhalb eines Reagenzglases zu beachten.

# Feldbestimmung

Versuch (Felderzeuger)	$f$ (MHz)	P (W)	Leerfeld		Änderung		Feld im Medium		SAR ( $\frac{mW}{kg}$ )
			$E_{\text{leer}}$ (V/m)	$B_{\text{leer}}$ ( $\mu\text{T}$ )	$\frac{E_{\text{Med}}}{E_{\text{leer}}}$	$\frac{B_{\text{Med}}}{B_{\text{leer}}}$	$E_{\text{Med}}$ (V/m)	$B_{\text{Med}}$ ( $\mu\text{T}$ )	
Braunschweig (TEM-Zelle)	450	2	20	0,067	0,145	1,0	3 $\pm 40\%$	0,067 $\pm 5\%$	7,4 $\pm 20\%$
Bonn (TEM-Zelle)	900	5	380	1,26	0,0185	1,1	7 $\pm 25\%$	1,4 $\pm 5\%$	6,9 $\pm 20\%$
Bonn (TEM-Zelle)	1800	2	240	0,80	0,029	1,4	7 $\pm 30\%$	1,1 $\pm 10\%$	8,5 $\pm 20\%$
Braunschweig (GTEM-Zelle)	900	5	66	0,22	0,19	2,3	12 $\pm 50\%$	0,5 $\pm 20\%$	6,2 –
Braunschweig (GTEM-Zelle)	1800	5	66	0,22	0,23	2,8	15 $\pm 60\%$	0,6 $\pm 40\%$	29,4 –
Berlin (GTEM- Zelle) (senkrecht)	900	10	93	0,31	0,21	2,0	19 $\pm 35\%$	0,6 $\pm 10\%$	12,5 –
Berlin (GTEM- Zelle) (senkrecht)	1800	10	93	0,31	0,28	3,4	26 $\pm 50\%$	1,0 $\pm 60\%$	91,0 –

Tabelle 2:  
Zusammenstellung der Feldverhältnisse aller Versuche

Bei waagerechter Stellung würde sich das Flüssigkeitsvolumen von 3 ml ohne weitere Maßnahmen auf der gesamten Länge des Reagenzglases verteilen. Da das Reagenzglas 80 mm tief in den Probenhalter eintaucht und auf einer Länge von 40 mm außen übersteht, ergäbe sich eine ungleichmäßige Temperatur- und Feldverteilung innerhalb des Mediums. Daher ist eine Begrenzung des Mediums auf einen Bereich im Zentrum des Probenhalters vorzuziehen. Es empfiehlt sich dazu die Begrenzung auf eine Länge von 40 mm. Das Medium füllt dann dieses eingegrenzte Reagenzglasvolumen in der Höhe etwa zur Hälfte aus. Diese Konfiguration wurde den Berechnungen zugrunde gelegt.

Bei 900 MHz liefert die numerische Berechnung folgende Ergebnisse: Die elektrische Feldstärke im Medium sinkt auf etwa  $\frac{1}{28}$  der Leerfeldstärke, während die magnetische Flußdichte auf etwa

das 1,1-fache der Flußdichte in der leeren GTEM-Zelle ansteigt. Diese im Vergleich zur senkrechten Stellung sehr viel größere Abschwächung der elektrischen Feldstärke im Medium läßt sich anschaulich so erklären, daß die zumeist senkrecht verlaufenden elektrischen Feldlinien das Weißöl unterhalb *und* oberhalb des waagerechten Reagenzglases durchdringen müssen. Entsprechend der geringeren elektrischen Feldstärke ergeben sich auch kleinere Joulesche Verluste im Medium als bei senkrechter Stellung. Sie betragen etwa  $4 \mu\text{W}$ , aus denen ein SAR-Wert von  $1,4 \text{ mW/kg}$  resultiert.

Bei 1800 MHz treten wiederum starke „Verwirbelungen“ der eingesperrten ebenen Wellenfront auf, die zu beträchtlichen Feldstärkekomponenten in Ausbreitungsrichtung der Welle führen. Da die Reagenzgläser in dieser Richtung angeordnet sind, ergibt sich eine sehr ungleichmäßige

Feldverteilung innerhalb des Mediums. Durchschnittliche Feldänderungen im Medium im Vergleich zu den Werten in der leeren GTEM-Zelle können daher nicht angegeben werden. Lediglich die Angaben der Jouleschen Verluste als integrale Größe über das Mediumvolumen eines Reagenzglases sind sinnvoll: Sie betragen etwa  $42 \mu\text{W}$ , so daß sich eine spezifische Absorptionsrate von  $14 \text{ mW/kg}$  ergibt. Dabei ist zu beachten, daß die Leistungsdichte innerhalb des Mediums inhomogen verteilt ist.

## 4.3. Zusammenfassung der Feldverhältnisse

In einer Übersicht sind die Feldverhältnisse aller Versuchsanordnungen zusammengefaßt (Tabelle 2). In den ersten Spalten sind Ort und Felderzeuger als Kurzbezeichnung des Versuchs sowie die verwendete Frequenz aufgeführt.

In Spalte 3 ist die in den Felderzeuger eingespeiste Leistung  $P$  angegeben. Bei 450 MHz ist dies die Dauerleistung des unmodulierten Trägers, während es sich bei den pulsmodulierten Signalen bei 900 MHz und 1800 MHz um die Spitzenleistung handelt. Aus der Speiseleistung  $P$  und der Geometrie des Felderzeugers läßt sich die elektrische Feldstärke  $E_{\text{leer}}$  am Ort des Nährmediums in dem *leeren* Felderzeuger abschätzen (Spalte 4). Die Berechnung der magnetischen Leerflußdichte  $B_{\text{leer}}$  aus  $E_{\text{leer}}$  erfolgt unter Annahme von Freiraumverhältnissen. In den beiden folgenden Spalten 6 und 7 sind die Feldänderungen im Nährmedium als Quotienten  $E_{\text{Med}}/E_{\text{leer}}$  bzw.  $B_{\text{Med}}/B_{\text{leer}}$  angegeben, die mit dem FD-Rechenprogramm MAFIA numerisch berechnet wurden. Dabei handelt es sich jeweils um den Mittelwert über das Volumen des Nährmediums. Damit kann die elektrische Feldstärke  $E_{\text{Med}}$  und die magnetische Flußdichte  $B_{\text{Med}}$  im Medium, denen die untersuchten Zellen ungefähr ausgesetzt sind, angegeben werden. In den Spalten 8 und 9 sind diese Größen als Mittelwerte mit ihren maximalen Abweichungen im Volumen des Nährmediums aufgeführt. Bei den pulsmodulierten Signalen handelt es sich wiederum um Spitzenwerte. Die elektrische Feldstärke und magnetische Flußdichte sind proportional zu  $\sqrt{P}$ ; die angegebenen Werte lassen sich somit umrechnen, wenn andere Leistungen verwendet werden. In der letzten Spalte ist schließlich die spezifische Absorptionsrate (SAR) im Nährmedium als zeitlicher Mittelwert angegeben. Bei den pulsmodulierten Signalen wurde das Tastverhältnis von 8 berücksichtigt. Für die Ver-

suche mit einer TEM-Zelle als Felderzeuger ist die rechnerisch abgeschätzte Unsicherheit des SAR-Wertes in Prozent aufgeführt. Bei den Versuchen mit der GTEM-Zelle können keine Angaben über diese Unsicherheit gemacht werden.

Die angegebenen SAR-Werte liegen mit Ausnahme des Versuchs bei 1800 MHz in Berlin deutlich unterhalb des zugelassenen Grenzwertes von 80 mW/kg. Thermische Wirkungen durch die

elektromagnetischen Felder können daher ausgeschlossen werden.

Für athermische Wirkungen sind neben den SAR-Werten auch die Leerfeldstärken von Bedeutung. Hier treten Werte sowohl oberhalb als auch unterhalb der Grenzwerte auf, die nach DIN VDE 0848, Teil 2 [9] bei 100 V/m und 0,33  $\mu\text{T}$  liegen. Dadurch wird mit den Untersuchungen ein weiterer Bereich möglicher athermischer Wirkungen abgedeckt.

### 5. Literatur

- [1] Crawford, M.L.; Workman, J.L.: „Using a TEM Cell for EMC Measurements of Electronic Equipment“, Technical Bureau of Standards, Boulder, Colorado, U.S.A., April 1979
- [2] Hill, D.A.: „Bandwidth Limitations of TEM Cells due to Resonances“, Journal of Microwave Power, 18(2), 1983, S. 181-195
- [3] Hansen, D.; Garbe, H.: „Eigenschaften und Anwendungen der GTEM-Zellen“, Tagungsband zur Vortragsveranstaltung TEM-Wellenleiter, Frankfurt, 6. Februar 1991, S. 12.1-12.22
- [4] Meinke, Gundlach (Hrsg.): „Taschenbuch der Hochfrequenztechnik“, 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo, 1992
- [5] Weiland, T. [u.a.]: „Maxwell's Grid Equations“, FREQUENZ 33 (1990) 1, S. 9-16
- [6] Altmaier, H.: „Messung komplexer Materialkonstanten von Absorbermaterialien mit einem automatischen Netzwerkanalysator“, Tagungsband zum Kongreß „Elektromagnetische Verträglichkeit“, Karlsruhe, 13.-15. März 1990, VDE-Verlag, Berlin, 1990, S. 189-202
- [7] Brinkmann, Curt: „Die Isolierstoffe der Elektrotechnik“, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1975
- [8] Kaatze, U.; Lönnecke-Gabel, V.; Pottel, R.: „Broad-band Dielectric Relaxation Study of Aqueous Samples with High Content of Organic Molecules“, Zeitschrift für Physikalische Chemie Neue Folge, Bd. 175, 1992, S. 165-186
- [9] DIN VDE 0848, Teil 2: „Gefährdung durch elektromagnetische Felder: Schutz von Personen im Frequenzbereich von 10 kHz bis 3000 GHz“, VDE-Verlag, Berlin, Juli 1984

Research Project "Biological Effects of High-Frequency Electromagnetic Field"

# Experimental Set-up for Studying Electromagnetic Alternating Fields

Professor R. Elsner, Doctor of Engineering,  
U. Neibig, Doctor of Engineering  
Technical University of Braunschweig

The suspicion raised by many parties that electromagnetic alternating fields from mobile telephones may have harmful effects on living organisms has given rise to several research projects in Germany, among other countries. In principle, the purpose is to study the effects of electromagnetic fields on biological systems, such as cells. Such projects have proven to be interdisciplinary, since in addition to medical researchers and biologists, physicists and electrical engineers are involved. The particular task for electrical engineers is to develop equipment that meets the particular conditions for the planned trials. A research project done at the Communications Engineering Institute at the Technical University of Braunschweig was dedicated to the exposure equipment for such tests. The assumptions to be made regarding this experimental equipment played a particularly significant role in that project. These assumptions are sketched out briefly below.

The frequencies of the electromagnetic wave field that are used

in radio networks must be generated and metrologically recorded with these devices. These are frequencies of 450 MHz, 900 MHz, and 1.8 GHz, with the corresponding bandwidths of a few dozen MHz. These frequencies are now used in mobile radio networks of the C, D, and E types.

Since special conditions apply with regard to the structure of the fields and the amplitudes that characterize them, TEM and GTEM cells (TEM refers to transversal electromagnetic, and G refers to gigahertz) were used for these experiments. In keeping with the laws of physics, the electrical and magnetic field components are perpendicular to each other, and both run transversally with respect to the direction of propagation of the waves. To achieve a uniform (homogenous) field, they must run parallel in all areas of the measurement space. The tests were designed so that the same field strength values that occur in practice occurred during the experiment, as well.

The measurement spaces must be shielded in both directions; on the one hand, the biological systems must be protected from external electromagnetic fields, and on the other hand, the high-frequency field generated in the testing apparatus must not radiate into the environment.

In keeping with the task at hand, objects are located inside the measurement space—namely, the material under test and the means necessary for containing it. Since the structure and amplitude of each field is modified when objects are present, efforts must be made to make the best with as little sample material as possible, and the sample holder must also occupy only a small part of the overall volume.

In addition to the conditions imposed for metrological reasons, there are also conditions related to the biological nature of the samples. Working with living cells requires that the temperature be kept constant, at 37°, for example.

Finally, the apparatus must allow the necessary application and measuring instruments to be used. Usually this takes place from the outside, but the housing of the measurement space must be designed, through transparent wall sections, for example, so that, among other things, microscope observations can be carried out.

Apparatus mounted outside the measuring space is available for generating the high-frequency electromagnetic energy. The measuring spaces are so-called TEM or GTEM cells. The TEM cells can be thought of as coaxial lines with a large, rectangular cross-section. In the lower frequency range, the desired homogenous TEM waves exist in the middle section of the TEM cell. Interference occurs at higher frequencies because of the waveguide waves, but this interference can be rendered ineffective if appropriate measures are taken. GTEM cells are similar in construction; the waveguide is terminated with respect to the broadband energy by means of resistors and absorbers. Their purpose is to suppress reflections that could result in heterogeneous fields.

In the course of the development works, four test arrangements were designed to examine the influence of high-frequency electromagnetic fields on human cells.

In the arrangement for the Institute for Human Biology at the Braunschweig Technical University, the purpose was to examine the influence of 450 MHz alternating fields on white blood cells (lymphocytes). Since undesirable resonance occurred in the TEM

cell at the prescribed 450 MHz, the tests were done at 440 MHz, a difference that does not cause any appreciable difference in the results from a biological perspective. To maintain the temperature of the nutritive medium, a white oil circuit was used, whereby the temperature was kept constant by means of a bath thermostat.

In the studies done at the Physiological Institute II of the University of Bonn, the focus was on the influence of 900 MHz and 1.8 GHz wave fields on cells of the heart muscle. In preliminary trials, it was determined that a TEM cell could be used at the prescribed frequencies. One special requirement was that the sample had to be observable by microscope as the fields were causing their effects. A clear acrylic container was used as a sample holder; it contained the nutritive medium and the cells, and was placed directly on the floor of the TEM cell. Observations were made through a hole one centimeter in diameter that was made in the cell. The hole was filled with a fine-mesh conductive gauze, which acted as a blocking device for the high-frequency fields.

At the Institute for Clinical Chemistry and Clinical Biochemistry at the Free University of Berlin, the study focused on the influence of 1.8 GHz alternating fields on a special type of cell (promyelocytes). In this sequence of measurements, several test tubes filled with the nutritive medium and cells were to be exposed to the high-frequency field. Since a larger volume is required for this purpose, a GTEM cell had to be used as a measuring chamber instead of a TEM cell. The test

tubes could be arranged vertically, horizontally, or at 45° angles in the GTEM cell. The signal generator was completed with a pulse modulator. This makes it possible to turn the carrier frequency on and off manually, and allows for pulse modulation with an external or internal modulation signal. Additional tests applied to the sample container, which exceeded the recommended dimensions. It turned out that the reaction on the field was still within tolerable range.

Another measurement arrangement was developed for the Institute for Human Biology at the Braunschweig Technical University, specifically again for measuring the effects of 900 MHz and 1.8 GHz alternating fields on blood cells—in this instance, peripheral lymphocytes. The arrangement used in this case was analogous to the one developed for Berlin. The only difference was the fact that, this time, the test tubes were placed into the GTEM cell only in the vertical position.

In implementing these trials in general, field strengths that were lower than the limit values set forth in DIN 0848 were selected. This made it possible to examine athermal effects.



## **Impressum**

### **Newsletter Edition Wissenschaft der FGF e.V.**

**Herausgeber:** Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Rathausgasse 11a,  
D-53113 Bonn, Telefon: 0228 / 72622-0, Telefax: 0228 / 7262211

**Redaktion:** Gerd Friedrich (verantw.)

**Grafik, Satz, Layout:** Autoren Societät, Bonn

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.

**ISSN 1430-1458**