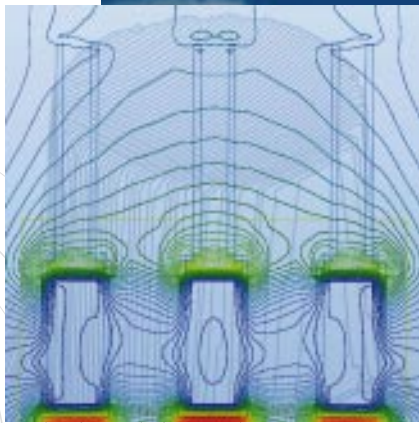


# Newsletter

# Edition Wissenschaft

Forschungsgemeinschaft Funk e.V. · G 14515 · Ausgabe Nr. 8 · Juni 1996



## Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf DNA, Proteine und DNA-Protein-Komplexe

Von V. Hansen, W. Rürger und  
Umweltagentur Bochum



Forschungsgemeinschaft Funk

Edition  
Wissenschaft

## Editorial

### Liebe Leserinnen und Leser,

Können HF-Felder biologische Systeme beeinflussen? Hinter dieser, auch in der Öffentlichkeit häufig diskutierten Frage steht die Besorgnis um eine mögliche krebsfördernde oder -auslösende Wirkung auf die menschliche Erbstubstanz (DNA) durch den digitalen Mobilfunk.

Dieser Frage hatte sich die Arbeitsgruppe „Molekulare Genetik“ am Lehrstuhl für Biologie der Mikroorganismen der Ruhr-Universität Bochum unter Leitung von Prof. Dr. Rürger angenommen. Ziel der Untersuchung war es, vermutete Effekte auf biologisch aktive Moleküle (DNA, Proteine) und einfache Organismen (Viren, Bakterien) nachzuweisen oder gegebenenfalls auszuschließen.

Die experimentelle Auslegung des Hochfrequenzbereiches und die Feldberechnungen erfolgten durch Prof. Dr. Hansen am Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik der Universität-GH Wuppertal. Das Projektmanagement lag bei der Umweltagentur in Bochum.

*Gerd Friedrich*

## Inhalt

Studie: <b>Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf DNA, Proteine und DNA-Protein-Komplexe</b>	3
Einleitung	3
<b>Teil Eins: Biologische Experimente</b>	4
1. Wirkungsmodelle	4
2. Auslegung der Experimente	7
2.1 HF-Auslegung des Experimentes	8
2.2 Biologische Untersuchungen, Material und Methoden	8
3. Untersuchungsmethoden und Versuchsprogramm	10
3.1 Untersuchungsmethoden	10
3.2 Untersuchungsprogramm	12
4. Experimentelle Ergebnisse	13
4.1 Allgemeines	13
4.2 HF-Technik	14
4.3 Ergebnisse der biologischen Experimente	14
5. Diskussion der biologischen Ergebnisse	21
<b>Teil Zwei: HF-Expositionssystem</b>	22
1. Einleitung	22
2. Auswahl der HF-Meßanordnung	22
2.1 Liste der Auswahlkriterien	22
2.2 Feldverteilung vor Einbringen des Meßobjekts	22
2.3 Größe des Meßvolumens	22
2.4 Auswahl der Signalform	22
2.5 Bestimmbarkeit der Feldverteilung im Meßobjekt	23
2.6 Schirmung	23
2.7 Besondere meßtechnische Anforderungen	24
2.8 Biologische / physiologische Erfordernisse	24
3. Meßaufbau	24
3.1 Komponenten des Meßaufbaus	24
3.2 Hohlleitungsbauteile für das D-Netz	25
3.3 Hohlleitungsbauteile für das E-Netz	26
4. Analyse der Meßzelle mit Probe	26
4.1 D-Netz	26
4.2 E-Netz	30
5. Bestimmung der Feldstärke in der Probe	32
5.1 D-Netz	32
5.2 E-Netz	34
6. Photometrische Untersuchungen	34
6.1 Meßaufbau	34
6.2 Aufbau des Meßplatzes	35
6.3 Abschätzung der Expositionsfeldstärke	36
7. Resümee	36
Literatur	37
<b>Summary: DNA and Protein Exposed to Modulated RF Fields</b>	38

# Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf DNA, Proteine und DNA-Protein-Komplexe

UMWELTAGENTUR GmbH, Beratungs-, Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH,  
Universitätsstr. 150, 44780 Bochum

Prof. Dr. W. Rüger, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Biologie, AG Molekulare Genetik (Teil Eins)

Prof. Dr.-Ing. V. Hansen, Universität-GHS-Wuppertal, Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik (Teil Zwei)

## Einleitung

Die Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer (em) Wellenfelder auf lebende Organismen ist ein komplexes, erst in den letzten Jahren verstärkt untersuchtes Forschungsfeld. Bisher nicht erklärbare Effekte bzw. behauptete Wirkungen lassen eine wissenschaftliche Klärung des Sachverhaltes dringend notwendig erscheinen. Insbesondere der Auf- und Ausbau des europäischen GSM-Netzes und anderer Kommunikationsnetze bedingen eine rasche Klärung von Hypothesen und zum Teil widersprüchlichen experimentellen Ergebnissen.

Als problematisch für das Studium und die Interpretation möglicher Effekte stellen sich dabei die im Mobilfunkbereich verwendeten Wellenfelder heraus. Hochfrequente Wellen, niederfrequent getastet und mit digitalen Informationen beauf-

schlagt, liefern ein komplexes Wellenfeld im GHz-Bereich.

Untersuchungen im Bereich der Wirkung von em-Wellenfeldern konzentrieren sich auf die folgenden drei Bereiche:

- Biophysikalische Studien auf zellulärer oder molekularer Ebene;
- Makroskopische Effekte wie räumliche Feldverteilung und Energieabsorption;
- Biomedizinische Experimente.

Eine Abdeckung aller denkbaren Untersuchungsfelder in diesem komplexen Arbeitsfeld ist innerhalb des Projektes allerdings weder möglich noch beabsichtigt.

Ziel des Projektes war es, eingeschränkt auf die Ebene biologisch aktiver Moleküle (DNA, Proteine) bzw. einfacher Organismen (Viren, Bakterien), Effekte nach-

zuweisen bzw. auszuschließen. Wir konzentrierten uns daher auf mögliche biophysikalische Effekte elektromagnetischer Wellenfelder.

Das Projekt gliederte sich dabei in die folgenden Arbeitspakete:

1. In einer Datenbankrecherche wurden anhand einer Analyse der relevanten Publikationen der Stand des Wissens erhoben und mögliche Wirkungsmodelle identifiziert. Diese Informationen sind bedeutsam für die Auslegung und Durchführung der folgenden Experimente, insbesondere für die Variation der Wellenfelder bei der Suche nach möglichen Fenstereffekten.
2. Besondere Sorgfalt wurde bei der Auslegung der biologischen Experimente auf den Hochfrequenzbereich gelegt. Hier liegt ein besonderer Kritikpunkt bei vielen experimentellen Untersuchungen.

Für die Interpretation der Ergebnisse ist die Kenntnis der Feldstärken und des Feldverlaufes in den Proben notwendig. Hierzu wurden numerische Berechnungen des Feldverlaufes im Hohlleiter und in den Proben durchgeführt.

3. In experimentellen Untersuchungen wurde der Einfluß von GSM/DCS1800-Wellenfeldern auf Strukturen und Aktivitäten biologisch bedeutsamer Moleküle (DNA, Protein etc.) untersucht. Der Nachweis einer direkten Protein- bzw. DNA-Schädigung im hochfrequenten Wellenfeld würde die Klärung der Wirkmechanismen vereinfachen. Schädigungen von lebenden Organismen ließen sich dann auf molekularer Ebene weiter untersuchen und diskutieren.

In Erweiterung der Untersuchungen wurden auch an einfachen biologischen Organismen (Bakterien, Viren) mögliche Effekte einer DNA/Proteinschädigung studiert. Dazu gehörten insbesondere Mutationsuntersuchungen an Bakterien und Viren, die zu Veränderungen des physiologischen Verhaltens (Wachstum, Infektiösität etc.) dieser Organismen führen. Ergebnisse sollten durch entsprechende Untersuchungsreihen statistisch abgesichert werden.

Um auch mögliche sehr kleine Effekte nachzuweisen, waren zusätzlich Langzeituntersuchungen im Meßprogramm vorgesehen.

TEIL EINS:

## Biologische Experimente

### 1. Wirkungsmodelle

Die Wirkung elektromagnetischer Wellenfelder auf biologische Systeme ist in den letzten Jahren in den Blickpunkt des öffentlichen Interesses gerückt. Damit zusammenhängend ist zu dieser Thematik sowohl die Zahl experimenteller Arbeiten als auch theoretischer Modelle zu Wirkungszusammenhängen stark angestiegen. Das Spektrum der Arbeiten erstreckt sich dabei vom niederfrequenten Netzfrequenzbereich bis in den Mikrowellenbereich. Allerdings tragen die zum Teil recht widersprüchlichen experimentellen Ergebnisse und die Vielfalt der diskutierten Modelle nicht unbedingt zur Klärung des Sachverhaltes bei.

Im hier interessierenden Bereich möglicher Wirkungen von gepulsten elektromagnetischen Feldern existieren bisher erst einige Modellvorstellungen und noch wenig experimentelle Arbeiten. Als eventuell problematisch erweist sich dabei die komplexe Struktur der Wellenfelder in Verbindung mit nichtlinearen Eigenschaften biologischer Systeme.

Aus diesem Grund haben wir im Rahmen einer Datenbankrecherche mögliche Wirkungsmodelle gesucht und deren Relevanz für die Auslegung der experimentellen Arbeiten bewertet. Soweit verfügbar wurden die Originalarbeiten ausgewertet. Die Ergeb-

nisse wurden bei der Auslegung der Versuche berücksichtigt, in denen die Feldparameter variiert wurden.

Es wurden die folgenden Datenbanken genutzt:

#### EMF-DB

US-Datenbank zur speziellen EMF-Problematik. Die Datenbank lag uns einschließlich der 94er Updates vor.

Quellen: Zeitschriften, Forschungsberichte, Konferenzberichte etc.

Verfügbarer Inhalt: ca. 17.280 Abstracts

#### BIOSIS

Bibliographische Datenbank, die den Bereich der Biowissenschaften und der Medizin abdeckt.

Quellen: > 9000 Zeitschriften, US-Patente, Bücher, Konferenzbeiträge etc.

Inhalt: ca. 7,9 Mio. Zitate

#### LIFESCI

Datenbank, die alle Bereiche der Lebenswissenschaften abdeckt; u.a. Biochemie, Genetik, Mikrobiologie, Toxikologie etc.

Quellen: > 5000 Zeitschriften, Bücher, Konferenzberichte etc.

Inhalt: 0,4 Mio. Zitate

#### NTIS

Der „National Technical Information Service“ ist eine multidisziplinäre bibliographische Datenbank. Die Inhalte entsprechen der Zeitschrift „Government Reports Announce-

ments & Index". Themengebiete sind u.a. Gesundheitswesen, Medizin, Biologie und Umweltschutz. Quellen: Forschungsberichte USA & andere Länder, US-Patente, US-Datenbanken von Regierungsstellen

Inhalt: ca. 1,6 Mio. Zitate

Es wurden Suchbegriffe aus den Bereichen der Biologie (gene, DNA, protein, cell, cancer etc.) und der Mobilfunktechnik (high frequency, resonance, GSM etc.) verwendet.

Die Datenbankrecherche zeigte, daß es eine sehr große Zahl an Publikationen gibt, die sich mit der Wirkung elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme befassen. Diese Arbeiten decken dabei ein breites Spektrum an Untersuchungsobjekten und Feldfrequenzen ab. Ganze Organismen, aber auch Tier-, Pflanzen- und Bakterienzellen wurden exponiert. Systematische Untersuchungen an einfachen und überschaubaren Systemen waren dagegen eher selten.

Aufgrund der großen Zahl an Publikationen in den Datenbanken BIOSIS, LIFESCI und NTIS wurde der Recherchezeitraum auf die Jahre 1993 - 1994 eingeschränkt. Als Ergebnis wurden insgesamt 517 Publikationen auf ihre Projektrelevanz geprüft. Die Auswertung der vorliegenden EMF-DB umfaßte einen Zeitraum von Anfang der 80er Jahre bis 1994.

In einigen Bereichen sind die Arbeiten von den Ergebnissen her widersprüchlich oder nicht eindeutig. Auch scheinen die verwendeten Methoden nicht immer geeignet, die gesuchten Effekte nachzuweisen.

Die Auswertung der Datenbankrecherche, insbesondere der EMF-Datenbank, ergab eine Vielzahl von Verweisen auf Arbeiten mit Bezug zu den uns interessierenden Fragestellungen. Eine Bewertung und Einschätzung der Arbeiten erfolgte nach Sichtung und Bewertung der Originalpublikationen.

Es ließen sich in den Arbeiten zahlreiche Verweise auf mögliche Wirkungsmodelle finden. Die Publikationen beschreiben sowohl theoretische Wirkungsmodelle als auch experimentelle Arbeiten, die solche Modelle zur Interpretation der Ergebnisse nutzen. Einige der Modelle bauen dabei unter zusätzlichen Annahmen auf anderen Theorien auf und führen zu neuen bzw. anderen Schlußfolgerungen.

Eine Auflistung möglicher Wirkungsmodelle ergibt das folgende Bild:

- Geometrische Resonanzen von Biomolekülen

Das Modell beschreibt die Anregung akustischer Schwingungen der DNA oder anderer Biomoleküle, wenn die Molekülabmessungen in der Größenordnung der angeregten akustischen Wellenlängen liegen. Erweiterungen des Modells gehen in Richtung Solitonenanregung, Beeinflussung von Transkriptionsprozessen etc. (Modelle: Belyaev [1,2], Davydov [3], Polozow [4], Experimente: Belyaev [2], Polunin [5]). Relevante Frequenzen liegen im GHz-Bereich.

- Anregung von Eigenschwingungen von Biomolekülen

Die Anregung von Rotations- und Schwingungszuständen von Biomolekülen im kHz- bis GHz-Bereich ist ein mögliches Wirkungsmodell.

Die Absorption von Feldenergie über eine Anregung von Rotationszuständen führt im allgemeinen nicht zu strukturellen Moleküländerungen. Die Moleküle rotieren starr, und die aufgenommene Energie wird über Stoßprozesse thermalisiert. Andere Anregungsmoden (Vibrationsanregungen) können auch strukturelle Änderungen der Molekülstruktur bewirken (Modell: Elder & Cahill [6]).

- Ion Cyclotron Resonance / Ion Parametric Resonance  
Gegenstand dieses Modells ist die resonante Anregung charakteristischer Cyclotronfrequenzen von Ionen im geomagnetischen Feld durch niederfrequente Wellenfelder. Relevante Frequenzen liegen im Bereich von ca. 16 - 800 Hz für  $Ka^+$ ,  $Ca^{++}$  bzw.  $H^+$ -Ionen (Experimente: Blackman [7], McLeod [8], Davies [9]). Beeinflusst werden möglicherweise der Ca-Fluß oder DNA-Aktivitäten. Eine Erweiterung des Modells erfolgte durch Polk [10].

- Jacobson Resonance  
Das Modell beschreibt die Wechselwirkung zwischen schwachen Magnetfeldern und Phononen in biologischen Systemen. Im Rahmen eines Massen-Geometrie-Modells werden für kritische Moleküle biologische Effekte vorhergesagt bzw. eine Vielzahl experimenteller Ergebnisse erklärt (Modell: Jacobson [11]).

- Zeeman-Stark Modell  
Beschreibung des Verhaltens gebundener Ionen im statischen (geomagnetischen) Feld und in zusätzlichem Wellenfeld im Bereich der Cyclotronresonanzen. Komplexe Modellrechnungen in einem Quantenmodell lassen auch bei niedrigen Feldstärken

biologische Effekte als möglich erscheinen. Diese Effekte basieren auf dem Zeeman- (magnetische Feldwirkungen) bzw. Stark-Effekt (elektrische Feldwirkungen) (Modell: Chiabrera [12]). Relevante Frequenzen liegen im Bereich  $< 1000$  Hz.

- **Magneto Chemistry**

Das Modell beschreibt den Einfluß statischer oder veränderlicher magnetischer Felder auf Moleküle mit einem oder mehreren ungepaarten Elektronen. Diese reaktionsfreudigen Moleküle, freie Radikale bzw. Triplet-Moleküle sind vielfach als Tumorpromotoren bekannt. So erhöht die Verringerung der Rekombinationsrate freier Radikale die Wahrscheinlichkeit einer Zellschädigung (Modelle: Adey [13], Scaiano [14], Experiment: Grundler [15], Harkins [16]). Das Modell beschreibt sowohl nichtresonante niederfrequente Effekte als auch hochfrequente Resonanzeffekte im Bereich bis zu einigen 100 GHz.

- **Zellmembran**

Der Einfluß elektromagnetischer Wellen auf die Zellmembran und damit die Beeinflussung zellulärer Abläufe ist eines der am intensivsten diskutierten und untersuchten Modelle. Unterschiedliche Wirkungsmechanismen werden diskutiert. Niederfrequente Anregung führt danach zu einer Veränderung des Zellstoffwechsels über die Beeinflussung von Form und Funktion der Rezeptormoleküle bzw. zur Beeinflussung der Signalwege, über die die Zellen kommunizieren (Modelle: Lednev [17], Adey [18], Experimente: Blackman [19], Bawin [20], Shepard [21] etc.). Hochfrequente Anregungen im Bereich einiger 10 GHz führen zur Anregung

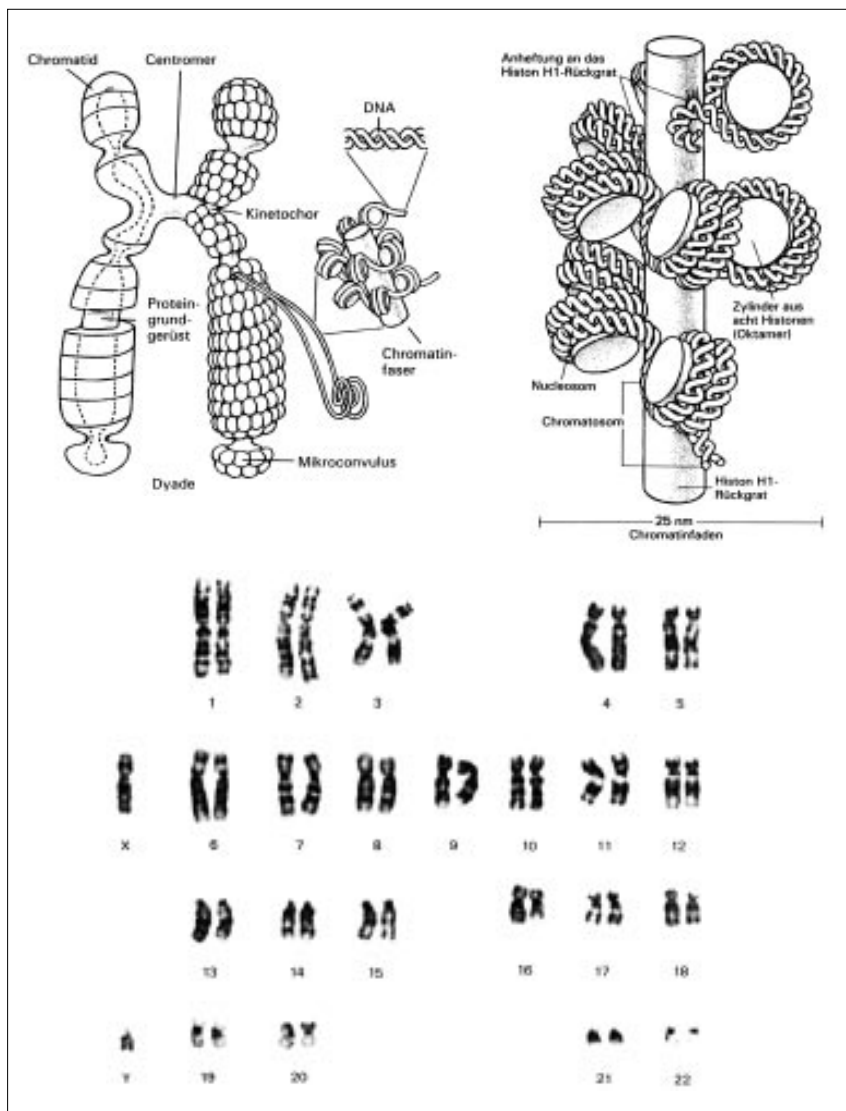


Abbildung 1: Chromosomenstruktur und menschlicher Chromosomensatz (aus: „A guided tour of the living cell“ by de Duve. Copyright (c) 1984 by the de Duve Trust. Used with permission of W.H. Freeman and Company)

elektroakustischer Schwingungen der Zellmembran und zur Anregung von Molekülschwingungen (Modell: Shaslow [22]; Experiment: Golant [23]).

- **Nichtlineare Dynamik zellulärer Systeme**

Ein zelluläres System wird als nichtlinearer Oszillator fernab des thermodynamischen Gleichgewichtes beschrieben. Nichtthermische Wirkungen schwacher elek-

tromagnetischer Felder ergeben sich durch Beeinflussung biochemischer Prozesse in der Zellmembran. Damit verbunden sollen schwache em-Felder durch diese Prozesse soweit verstärkt und in die Zelle eingekoppelt werden, daß zelluläre Effekte auftreten. Kopplungsmechanismen können eine Beeinflussung der Aktivierung von G-Proteinen durch stimulierte Rezeptoren oder eine Veränderung der Reaktionskine-

tik von Radikal-Paar-Reaktionen in den Zellen sein (Modell: Eichwald & Kaiser [24], Experiment: Grundler [25]).

- Magnetomechanische Effekte  
In einigen Zellen bzw. Geweben sind Magnetitpartikel biologischen Ursprungs eingebunden. Auf diese ferrimagnetischen Teilchen üben magnetische Felder Kräfte aus, die zelluläre Effekte zur Folge haben können (Modell: Kirschvink [26]).

- Hydratation von Proteinen  
Änderungen der Hydratation von Proteinen durch hochfrequente Wellenfelder im GHz-Bereich werden als ein weiterer Wirkungsmechanismus diskutiert. Dadurch bedingt sollen sich Aktivitätsänderungen im Zellstoffwechsel ergeben (Modell: van Zandt [27]).

Weitere Modelle prognostizieren u.a. synergistische Effekte bei der Exposition von Zellen im elektromagnetischen Wellenfeld in Verbindung mit potentiellen Tumorpromotoren.

Die fachliche Bewertung der Vielzahl an Modellen war nicht Gegenstand unserer Arbeit. Wir halten es jedoch für sinnvoll, im Rahmen eines Forschungsauftrages diese zum Teil komplexen Modellvorstellungen aus biophysikalischer Sicht bewerten zu lassen.

Im hier interessierenden Bereich der GSM/DCS1800-Signale und unter Berücksichtigung eventueller nichtlinearer Effekte hielten wir folgende Hypothesen für die geplanten experimentellen Untersuchungen für relevant:

- Geometrische Resonanzen von Biomolekülen;

- Anregung von Eigenschwingungen von Biomolekülen;
- Hydratation von Proteinen.

## 2. Auslegung der Experimente

Die Desoxyribonukleinsäure der menschlichen Zellen tritt in verschiedenen Zustandsformen auf. Zum Zeitpunkt der Zellteilung sind die Chromosomen z.B. kondensiert, sie sind in der Metaphase als 46 deutlich getrennte Chromatidpaare sichtbar (Abb. 1). In dieser Konfiguration sind die Chromosomen auf etwa 1/8000 ihrer normalen Länge komprimiert. Zu beachten ist auch, daß die einzelnen Chromosomen unterschiedlich groß sind. Nach der Zellteilung (Mitose) entfaltet sich die DNA wieder. Die genetische Information kann nun abgelesen werden, die Zelle kann ihre physiologischen Aktivitäten entwickeln. Führt dies wiederum zu einer Zellteilung, dann durchläuft die DNA einen neuen Replikationszyklus mit einzelsträngigen Zwischenstadien, die sich nach und nach zu einem kompletten Doppelstrang ergänzen, bis sie sich nach Abschluß der Verdopplung wiederum kondensieren, um auf die Tochterzellen verteilt zu werden.

Zur Untersuchung der Mutagenität physikalischer und chemischer Agenzien werden bekanntermaßen Mikroorganismen herangezogen. Der Grund für diese Vorgehensweise liegt in den kurzen Generationszeiten dieser Zellen, ihrer hohen Vermehrungsrate und der Existenz selektiver Systeme, die auch das Erkennen sehr seltener Mutationsereignisse

ermöglichen. Außerdem ist das Genom von Mikroorganismen haploid, d.h. jedes Chromosom liegt, im Gegensatz zu den Verhältnissen bei den höher entwickelten diploiden Organismen, in nur einer Kopie vor. Mutative Veränderungen können daher viel schneller erkannt werden, als das bei höher entwickelten Organismen der Fall ist. Hinzu kommt, daß der Stoffwechsel und die an diesen Mechanismen mitwirkenden Enzyme bei Prokaryonten viel besser untersucht sind als bei Eukaryonten. Biochemisch gesehen ist das Erbmaterial in allen Organismen aus identischen Bausteinen aufgebaut. Unterschiede bestehen in den Größen der Nukleinsäuremoleküle und in ihrer Organisation.

Im Rahmen eines ersten Projektes der UMWELTAGENTUR wurden von den beteiligten Arbeitsgruppen Untersuchungen zu Wirkungen elektromagnetischer Wellenfelder auf einfache biologische Strukturen und Organismen bereits im Jahre 1993 durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse bedurften zum einen einer weiteren wissenschaftlichen Absicherung, zum anderen sollten sie ausgebaut werden. Sollten Effekte nachweisbar sein, so wären durch weitere Untersuchungen die Wirkungsmechanismen zu klären.

Unseren Untersuchungen lag die Hypothese zugrunde, daß em-Felder über physikalische Wirkungsmechanismen entweder DNA oder andere biologisch aktive Moleküle, z.B. Proteine schädigen könnten. Damit verbunden wäre auch eine Wirkung auf physiologische Prozesse in Organismen wie Viren, Bakterien etc.

## 2.1 HF-Auslegung des Experimentes

Bei der technischen Auslegung des Experimentes war insbesondere dem Hochfrequenzbereich besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die Experimente wurden im Wellenfeld eines Hohlleiters ( $H_{10}$ -Welle) bzw. im Wellenfeld einer Bandleitungsmeßzelle bei 900 MHz durchgeführt.

Dabei wurde das HF-Signal innerhalb der Untersuchungsreihen variiert, um mögliche Festerseffekte nachzuweisen. Um auch den Bereich des E-Netzes abzudecken, wurden zusätzliche Messungen bei 1,75 GHz durchgeführt.

Dabei wurden, um thermische Effekte auszuschließen, die Untersuchungen im Hohlleiter bei HF-Leistungen  $P \leq 8$  Watt (D-Netz) bzw.  $P \leq 1$  Watt (E-Netz) durchgeführt.

Die HF-Auslegung des Experimentes umfaßt die folgenden Punkte:

- Auslegung der Meßanordnungen,
- Auslegung und Optimierung des Hohlleiters / der Bandleitungsmeßzelle,
- Analyse der Meßzellen mit Proben,
- Bestimmung der Feldstärke und des Feldverlaufes in den Proben.

Eine ausführliche Beschreibung der HF-Auslegung des Experimentes mit Feldberechnungen im Hohlleiter bzw. der Bandleitungsmeßzelle und in den Proben finden sich in Teil 2 des Berichtes.

## 2.2 Biologische Untersuchungen, Material und Methoden

Die biologischen Experimente wurden entweder im Wellenfeld eines Hohlleiters oder dem einer Bandleitungsmeßzelle durchgeführt.

Folgende experimentelle Rahmenbedingungen lagen bei den Hohlleiterexperimenten vor:

- Es wurde eine hinreichend große Anzahl von Proben in den Hohlleiter eingebracht und dem EM-Feld ausgesetzt (Langzeitversuche: max. 30 Proben beim D-Netz-Hohlleiter).
- Parallel liefen Kontrollmessungen an Proben ohne Feldexposition in einer Metallbox mit gleichen Querschnittsabmessungen wie beim verwendeten Rechteckhohlleiter.
- Das Untersuchungsmaterial wurde, jeweils in Volumina von 0,1 ml, in kleine Glasampullen gefüllt, die zugeschmolzen wurden.
- Es wurde jeweils eine Ampulle nach dem Ende einer Expositionsperiode entnommen und der Gesamteinhalt analysiert.

Dadurch bedingt waren exakte experimentelle Rahmenbedingungen und Kontrollmöglichkeiten gegeben.

Der Hohlleiter befand sich in einer Wärmekammer, die durch eine Temperaturregelung auf konstant 37 °C gehalten wurde. Die Bandleitungsmeßzelle wurde in einem Photometer mit einer ty-

pischen Temperatur im Geräteinneren von ca. 29 °C eingesetzt.

Zu Kontrollzwecken wurden sowohl die Temperatur in der Wärmekammer aufgezeichnet als auch die relative Leistung des Senders gemessen.

Um thermische Effekte in den Proben bei den verwendeten Leistungen ( $P = 1$  Watt) ausschließen zu können, wurde die Temperatur in der Probe direkt nach einer ca. 10-minütigen Feldexposition gemessen und mit der Temperatur der unbestrahlten Probe verglichen. Eine Aufheizung der Proben durch das Wellenfeld im Hohlleiter war nicht nachweisbar.

Bei den Messungen in der Bandleitungsmeßzelle mußte die Ausgangsleistung des Verstärkers auf Werte  $P < 1$  Watt zurückgefahren werden, um eine Aufheizung der Probe zu verhindern.

### 2.2.1 Untersuchungsmaterialien

Als Untersuchungsmaterialien wurden DNA, Enzyme, Viren und Bakterien verwendet. DNA liegt bei 37 °C im nativen Zustand vor. Enterobakterien und die dazugehörigen Bakteriophagen haben ihr Wuchsoptimum bei 37 °C. Entsprechend zeigen auch daraus isolierte Enzyme bei dieser Temperatur ihr Reaktionsoptimum.

#### Freie DNA

Ein Ergebnis der Datenbankrecherche war u.a. die Hypothese, daß DNA durch resonante Prozesse, angeregt durch elektromagnetische Felder, zerstört wird.



Experimentelle Untersuchungen ergaben zum Teil Viskositätsabnahmen der DNA nach einer entsprechenden Feldexposition.

Messungen erfolgten daher u.a. an freier DNA, um die Frage zu klären, ob aufgefaltete DNA-Moleküle durch elektromagnetische Wellenfelder geschädigt würden. Ein Bruch der DNA läßt sich elektrophoretisch sichtbar machen.

Ergänzt wurden diese Untersuchungen durch Phagenexperimente, bei denen die DNA in einem viralen Kapsid dicht gepackt vorliegt. Dies könnte mögliche Effekte reduzieren. Ein DNA-Molekül in Lösung könnte in geometrischer Hinsicht ungleich sensibler gegen Feldeinwirkungen sein als das gleiche Molekül eng gepackt in einem viralen Kapsid.

## Enzyme

Die Datenbankrecherche hatte als einen möglichen Wirkungsmechanismus eine Änderung des Hydratationsmuster von Enzymen als Folge einer Feldexposition ergeben, was zu einer Veränderung der Enzymreaktionen führen würde.

Es wurden daher Versuche mit freien und gereinigten Enzymen im em-Wellenfeld durchgeführt. Dabei wurde ein Enzym ausgewählt, in dessen Reaktionsverlauf Wassermoleküle aktiviert werden. Sollte das angelegte Feld mit den Wassermolekülen in Wechselwirkung treten, wäre unter Umständen zu erwarten, daß Enzymreaktionen im Einfluß des Wellenfeldes mit veränderter Kinetik ablaufen. Die Enzymkinetik kann photometrisch erfaßt werden.

Außerdem liegen die potentiell zu aktivierenden Wassermoleküle sehr häufig im Innern eines globulären Proteins. Einmal durch den Einfluß elektromagnetischer Wellen aus ihrer Position und der chemischen Bindung gerissen, könnten diese Moleküle vielleicht

nicht so schnell ersetzt oder positioniert werden.

Sollte sich ein solcher nichtthermischer Effekt nachweisen lassen, wäre dies ein wichtiger Hinweis auf biologische Wirkungen von elektromagnetischen Wellenfeldern. Dies hätte weitreichende Folgen für die Reaktionsmuster von Enzymen, den zellulären Stoffwechsel und schließlich auch für das gesamte System.

## Viren

Untersuchungsobjekt war ein Bakterienvirus (Abb 2, Bakteriophage T4), der in hoher Konzentration ( $10^{11}$  Phagen/ml) zur Verfügung steht und zu 50 % aus DNA und zu 50 % aus einer Proteinhülle besteht. Eine Schädigung der Nukleinsäure oder der Hüllproteine müßte gegenüber Kontrollen außerhalb des em-Feldes zu einer Abnahme der Überlebensfähigkeit führen. Beispielsweise läßt sich eine schädigende Wirkung von Röntgenstrahlen oder UV-Licht sehr schnell an diesem System nachweisen.

Vorteil des Systems war außerdem, daß die Phagenzahl mittels reparaturdefekter Bakterienstämme bestimmt wurde. Eventuelle feldinduzierte DNA-Schäden werden dann wahrscheinlich nicht durch bakterielle Reparaturenzyme korrigiert.

## Bakterien

Einige der in der Datenbankrecherche gefundenen Arbeiten berichteten von einer erhöhten Mutationsauslösung bei Bakterien. In Bakterienkulturen wird während des Wachstumsprozesses die Nukleinsäure repliziert. Für man-

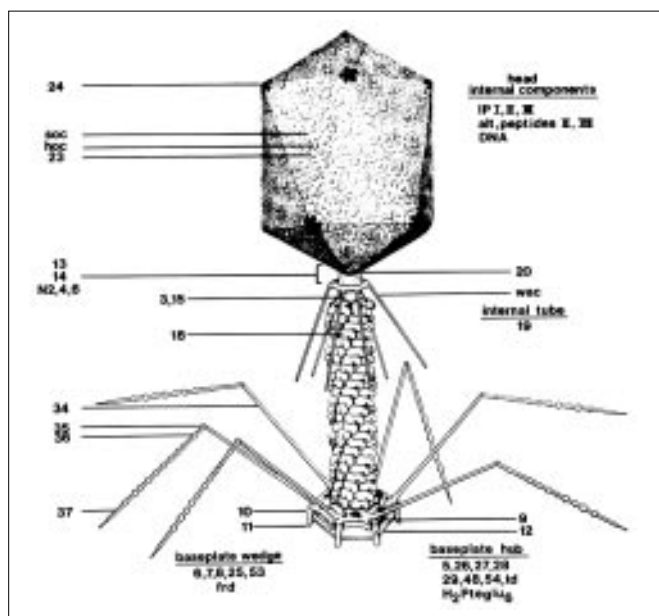


Abbildung 2:  
Modell des  
Phagen T4  
(aus: Bacterio-  
phage T4, Ame-  
rican Society for  
Microbiology)

che Schädigungsarten ist replizierende DNA ein sensibleres Substrat als nicht replizierende DNA, verpackt in einem viralen Kapsid oder als ein in Wasser gelöstes „statisches“ Molekül. Daher wäre eine physikalische Wirkung von em-Feldern hier u.U. einfacher nachweisbar.

Aus diesem Grund wurden auch solche Untersuchungen in unserem System durchgeführt. Insbesondere interessierte, ob sich der oben genannte Befund unter unseren Feldbedingungen und mit dazu besonders ausgesuchten sensiblen Bakterienstämmen reproduzieren ließe. Ausgewählt wurden zwei Bakterienstämme, die von der Deutschen Sammlung von Mikroorganismen (DSMZ, Braunschweig) für Mutagenitätstests empfohlen werden. Es sind dies die Stämme E. coli WP2 und WP2uvrA, die beide die Aminosäure Tryptophan nicht synthetisieren können. Mutationsauslösung würde diesen Defekt beheben, was experimentell leicht nachweisbar wäre. Gleichzeitig waren diese Versuche eine Ergänzung der zuvor beschriebenen Experimente.

## 3. Untersuchungs- methoden und Versuchsprogramm

Im Rahmen des Projektes war ein umfangreiches Arbeitsprogramm abzuwickeln mit dem Ziel, eventuelle Wirkungen von GSM/DCS1800-Wellenfeldern auf biologische Materialien bzw. biochemische Prozesse nachzuweisen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag im

Bereich des D-Netzes. Ergänzend kamen Experimente im Bereich des E-Netzes hinzu.

### 3.1 Untersuchungs- methoden

Gegenstand der Untersuchungen waren unterschiedliche biologische Materialien und Methoden. Im einzelnen wurden die folgenden Methoden angewandt.

#### 3.1.1 Überlebensfähigkeit von Viren

Als erstes wurde das Überleben von Bakteriophagen im elektromagnetischen Feld bei Langzeitexposition untersucht (3 Monate Expositionszeit). Bakteriophagen sind Viren mit dicht gepackter, doppelsträngiger DNA, die sich in Bakterienzellen vermehren. Eine Abnahme ihrer Zahl hätte bedeutet, daß entweder die Nukleinsäure selbst oder die Proteinhülle bzw. der proteingesteuerte Infektionsmechanismus geschädigt

worden wäre. In weiterführenden Untersuchungen ließe sich dann nachweisen, welche der beiden Komponenten durch den Schaden betroffen wäre.

Um auszuschließen, daß natürliche Reparaturmechanismen, wie sie in allen Organismen bei DNA-Schädigungen wirksam werden, auch in diesem Experiment einen induzierten DNA-Schaden wieder rückgängig machen, wurden feld-exponierte Phagen und Kontrollphagen auf vier unterschiedlichen reparatur-negativen Bakterienstämmen vermehrt.

Beschreibung des Versuchs-  
ansatzes:

0,1 ml einer Phagenlösung in einem Phosphatpuffer mit geringem Kochsalzzusatz wurde in 1,5 ml Glasampullen pipettiert. Die Glasampullen wurden durch Gummistopfen verschlossen, der mit Parafilm abgedeckt war. Der Parafilm wurde in der Bunsenbrennerflamme angeschmolzen, dies führte zu einem wachsartigen Verschuß der Versuchsam-pulle. Zu Beginn des Versuches

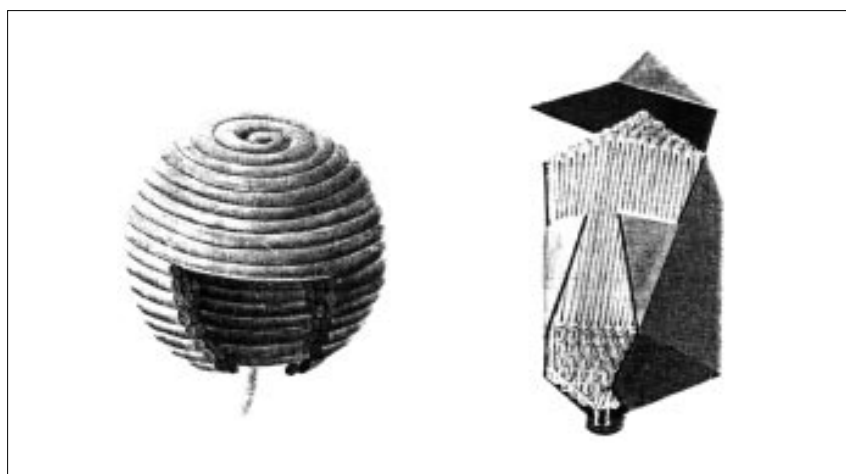


Abbildung 3: DNA-Faltungsmodelle (aus: Voeth & Voeth, Biochemistry, Verlag Chemie Weinheim)

wurden 30 Ampullen in Reihen von 3 mal 10 mittig in den Hohlleiter gestellt. Nach jeweils einer Woche Expositionszeit wurden 2 Ampullen ersatzlos entnommen und mit 0,9 ml sterilem Puffer versetzt. Wie in der Bakteriologie üblich, wurden dann die entsprechenden Verdünnungsreihen angefertigt und mit reparaturdefekten Indikatorbakterien ausplattiert. Nach Bebrütung wurden die Plaques ausgezählt, und über die Rückrechnung der jeweils angewendeten Verdünnung wurde auf die Zahl der überlebenden Viren geschlossen. Dabei erfolgte eine Doppelbestimmung mittels der vier verschiedenen reparatur-negativen Bakterienstämme.

### 3.1.2 Schädigung von DNA

In einer viralen Hülle ist die Nukleinsäure sehr dicht gepackt (Abb. 3). Diese dichte Packung des Erbmaterials kann in Abhängigkeit von der Art des schädigenden Einflusses dazu führen, daß dicht gepackte DNA weniger oder anders geschädigt wird als gelöste, freibewegliche DNA. Aus dieser Überlegung heraus wurde ein zweiter, geänderter Versuchsansatz gewählt.

Plasmid-DNA, die kovalent geschlossen in Supercoilkonformation vorliegt und ca. 2.9 Kilobasenpaare lang ist, wurde in wässriger Lösung in das Wellenfeld gebracht. Dabei war die Konzentration der DNA so berechnet, daß die Lösung wie auch schon vorher die Bakteriophagen als 0,1 ml Proben in den Ampullen exponiert werden konnten. Sollte das elektromagnetische Feld die Wirkung ha-

ben, daß das DNA-Molekül mechanisch geschädigt wird, dann sollten Einzel- bzw. Doppelstrangbrüche in dem Molekül auftreten. Diese Schädigungen würden zu Konformationsänderungen im DNA-Molekül führen. So ist bekannt, daß Einzelstrangbrüche zu einem relaxierten zirkulären DNA-Molekül führen, während Doppelstrangbrüche das Molekül linearisieren und nach längerer Exposition auch Molekülverkürzungen ergeben. Der Übergang vom zirkulären Supercoil in den relaxierten bzw. linearisierten Zustand und zunehmend verkürzte Moleküle sind am unterschiedlichen Laufverhalten in der Agarose-Gel-elektrophorese zu erkennen.

Beschreibung des Versuchsansatzes:

Plasmid-DNA (pBluescript, Stratagene, 2961 bp) wurde in Tris-EDTA-Puffer gelöst und 0,1 ml Aliquots auf die Probenröhrchen verteilt. Die Endkonzentration der DNA war auf ca. 1 µg/0,1 ml eingestellt. Die Probenröhrchen wurden hermetisch verschlossen. Nach jeweils einer Woche wurden je eine exponierte Probe und eine Kontrollprobe elektrophoretisch aufgetrennt, die DNA-Banden mit Ethidiumbromid gefärbt und die jeweiligen Laufstrecken sowie die Schärfe der Banden verglichen.

### 3.1.3 Mutationsuntersuchungen an Bakterien

Mit einer dritten Untersuchungsmethodik wurde sich teilende DNA untersucht. Bei der natürlichen Verdopplung der DNA während der Zellteilung kommt die DNA stellenweise in einzel-

strängiger Konformation vor. Solche einzelsträngige und sich replizierende DNA könnte wiederum eine besondere Zielscheibe für Wellenfeld-induzierte DNA-Schädigung sein. Eingesetzt wurden zwei Bakterienstämme (E. coli WP2 & WP2uvrA), die beide die Aminosäure Tryptophan nicht synthetisieren können. Bei Mutagenität des angewendeten Agens gewinnen die Bakterien per Mutation die Tryptophansynthesefähigkeit zurück. Während der Exposition wachsen die Bakterien auf einem Kompletmedium, das auch den Wuchs der Mutanten erlaubt. Nach der Exposition werden die Bakterien auf Minimal-medium ausplattiert. Hier wachsen nur die Rückmutanten. Der Vergleich von Rückmutantenhäufigkeit, beobachtet an den nicht-exponierten Kontrollbakterien und denen der exponierten Stämme, sollte eine eventuell vorhandene Mutagenität des Wellenfeldes erkennen lassen. Keine der Proben ließ erkennen, daß die exponierten Proben signifikant höhere Rückmutationshäufigkeiten aufwiesen als die nicht-exponierten Kontrollen.

Beschreibung des Versuchsansatzes:

Die Bakterien einer über Nacht gewachsenen Kultur (etwa  $3 \times 10^9$  Zellen pro ml) wurden in Aliquots von je 100 µl auf Petrischalen mit Komplettagar ausgespaltet, daß sich ein geschlossener Bakterienrasen bildete. Nach 24 Stunden Expositionszeit wurde von exponierten Bakterien und von den nicht exponierten Kontrollen je eine Impföse voll (Abstrich über den gesamten Plattendurchmesser hinweg) in 1 ml Phosphatpuffer suspendiert und

100 µl-Aliquote dieser Verdünnung abermals ausgespatelt und für weitere 24 Stunden exponiert. Nach 5 Übertragungen in der oben beschriebenen Art, also etwa 5 x 24 Stunden Exposition, wurde die Bakteriensuspension auf Minimal- und Komplettagarplatten hinsichtlich ihrer Rückmutationshäufigkeit untersucht. Dazu wurden die in 1 ml Phosphatpuffer suspendierten Bakterien (s. oben) verdünnt und jeweils 0,1 ml der verschiedenen Verdünnungsstufen auf Minimal- bzw. Komplettagarplatten ausgespatelt. Die Platten mit zählbaren Mengen an Kolonien wurden ausgezählt (100 - 300 Kolonien pro Platte) und einander gegenübergestellt. Bei chemischen Mutagenen werden Rückmutanten in derartigen Versuchen zwischen 10 bis zu 1000 mal häufiger beobachtet als auf den nicht exponierten Kontrollen. Gleichzeitig sinkt das Überleben der Bakterien.

### 3.1.4 DNA-Untersuchungen

In verschiedenen Arbeiten wird auch über die Möglichkeit der Anregung von Schwingungen von DNA-Molekülen im Wellenfeld berichtet. Ziel eines weiteren Experimentes war es zu untersuchen, ob Nukleinsäuren und speziell ihre Doppelstrangstruktur im elektromagnetischen Feld beeinflusst werden.

Beschreibung des Versuchsansatzes:

Zur Untersuchung eines direkten Einflusses des em-Feldes wurde eine DNA-Lösung (isoliert aus T4-Phagen durch Phenolisieren) in einer Quarzküvette von 1 cm<sup>2</sup> Grundfläche in eine Bandleitungs-

meßzelle eingebracht. Die Küvette enthielt eine DNA-Lösung von ungefähr 50 µg T4 DNA/ml. Änderungen in der Struktur des Doppelstranges sollten sich durch eine verstärkte UV-Absorption bemerkbar machen. In einer Versuchsserie haben wir jeweils über einen Zeitraum von ca. 10 Minuten eine feldexponierte DNA-Probe, eine feldfreie DNA-Probe und eine feldfreie Wasserprobe in einem Photometer (Wellenlänge 260 nm) ausgemessen. Würde die DNA durch die em-Feld-Exposition geschädigt, dann sollte sich das in einer zunehmenden Denaturierung der DNA und somit in einer Zunahme der optischen Dichte bemerkbar machen.

### 3.1.5 Ablauf enzymatischer Reaktionen

Gleichermaßen wurde die Reaktion der  $\beta$ -Galactosidase bei der Spaltung von Ortho-Nitrophenyl-Galactopyranosid beobachtet. Die Meßzeiträume erstreckten sich jeweils über 10 Minuten pro Feldeinstellung. Die Reaktion der  $\beta$ -Galactosidase erfolgt dadurch, daß innerhalb des Enzymmoleküls ein speziell angeordnetes Wassermolekül aktiviert wird und zur Spaltung des Ortho-Nitro-Phenols und der Galactose-Komponente führt. Störungen des Reaktionsablaufes durch das em-Feld hätten wahrscheinlich zur Folge, daß die Enzymreaktion einen anderen zeitlichen Verlauf hätte als in der Kontrolle.

Beschreibung des Versuchsansatzes:

Eine Kultur von E. coli (W575, lac-Repressor negativ, R<sup>-</sup>) wird bis zur Zelldichte  $5 \times 10^8$ /ml wachsen ge-

lassen. Die Zellen werden durch Zugabe von 1-2 Tropfen Toluol permeabilisiert. Aus dieser Suspension werden 0,5 ml in den  $\beta$ -Gal-Test gegeben.

Der Testansatz besteht aus 4 ml Phosphatpuffer (20 mM, pH 7,0), 0,5 ml Ortho-Nitrophenyl-Galactopyranosid-Lösung (5 mg/ml) und 0,5 ml Toluol-behandelter Zellsuspension.

Der Ansatz wird durchmischt und die Reaktion durch Zugabe der Zellsuspension ausgelöst. Danach wird der Ansatz in zwei Meßküvetten (exponierte Probe und Kontrollprobe) gefüllt. Während des Experimentes wird in Minutenabständen die optische Dichte in beiden Küvetten bei 420 nm, dem Absorptionsmaximum von Orthonitrophenol gemessen. Das freigesetzte Orthonitrophenol ist ein Maß für die Enzymaktivität. Unterschiedliche Reaktionsgeschwindigkeiten in der exponierten Probe und der Kontrollprobe zeigen sich in unterschiedlichen Steigungen der aufgenommenen Kurven optische Dichte o.D. über der Zeit t.

## 3.2 Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm setzte sich aus den fünf verschiedenen Experimenten zusammen.

### 3.2.1 Langzeituntersuchungen an Phagen und DNA (D-Netz)

Ziel dieser Untersuchungen war der Nachweis von Schäden an einfachen Systemen durch Bestimmung der Überlebensfähigkeit

von Viren bzw. Nachweis einer DNA-Schädigung im Wellenfeld eines Hohlleiters.

Versuchsaufbau:

- Meßzelle: D-Netz-Hohlleiter
- Signalquelle: D-Netz-GSM-Gerät / Leistung ca. 8 Watt
- Glasampullen: T4-Phagen / Meßdauer ca. 100 Tage
- Glasampullen: DNA-Lösung / Meßdauer ca. 30 Tage

### 3.2.2 Mutationsuntersuchungen an Bakterien / Schädigung von Phagen (D-Netz)

Das Experiment hatte zum Ziel, Mutationen an sich replizierender DNA nachzuweisen. Dies geschah durch Mutationsuntersuchungen an speziellen Bakterienstämmen. Gleichzeitig wurden die Phagenexperimente fortgesetzt. Dabei wurden insbesondere die Feldparameter variiert, um eventuelle Fenstereffekte zu finden.

Versuchsaufbau:

- Meßzelle: D-Netz-Hohlleiter
- Signalquelle: Rohde & Schwarz Signalgenerator SME 03
- D-Netz-Verstärker: SSB - PA 910 / 30 dB Verstärkung
- Glasampullen: T4-Phagen
- Petrischalen: E-coli WP<sub>2</sub> / WP<sub>2</sub>uvrA
- Variation: Feldstärke, Modulationsfrequenz
- Versuchsdauer: 1 Woche / Experiment

### 3.2.3 Untersuchungen an Phagen und Bakterien (E-Netz)

Ziel der Untersuchungen war der Nachweis möglicher Schäden im

Bereich höherer Frequenzen (E-Netz). Die Experimente beinhalteten die Bestimmung der Überlebensfähigkeit von Viren im Wellenfeld und Mutationsuntersuchungen an Bakterien.

Versuchsaufbau:

- Meßzelle: E-Netz-Hohlleiter
- Signalquelle: E-Netz-Gerät / Leistung ca. 1 Watt
- Glasampullen: T4-Phagen
- Petrischalen: E-coli WP<sub>2</sub> / WP<sub>2</sub>uvrA
- Versuchsdauer: 1 Woche / Experiment

### 3.2.4 DNA-Untersuchungen (D-Netz / E-Netz)

Die Untersuchungen hatten zum Ziel, einen möglichen Einfluß des Wellenfeldes auf die DNA-Struktur zu messen. Die Experimente fanden im Wellenfeld eines Bandleiters statt, in dem eine Quarzküvette mit der DNA-Lösung placiert wurde. Untersucht wurde das Verhalten einer DNA-Lösung im Wellenfeld der Bandleitungsmeßzelle bei Frequenzen von 900 MHz / 1750 MHz.

Versuchsaufbau:

- Meßzelle: Bandleitungsmeßzelle
- Signalquelle: Rohde & Schwarz Signalgenerator SME 03
- D-Netz-Verstärker: SSB - PA 910 / 30 dB Verstärkung
- E-Netz-Verstärker: SSB - PA 1810 / 30 dB Verstärkung
- Photometer: Philips PU 8735-50
- Quarzküvette: DNA-Lösung
- Variation: Frequenz, Modulationsfrequenz, Leistung

### 3.2.5 Ablauf enzymatischer Reaktionen (D-Netz / E-Netz)

Die Untersuchungen fanden im Wellenfeld eines Bandleiters statt, in dem eine Küvette mit der Enzymprobe placiert wurde. Untersucht wurde der Ablauf enzymatischer Reaktionen im Wellenfeld der Bandleitungsmeßzelle bei Frequenzen von 900 MHz / 1750 MHz.

Versuchsaufbau:

- Meßzelle: Bandleitungsmeßzelle
- Signalquelle: Rohde & Schwarz Signalgenerator SME 03
- D-Netz-Verstärker: SSB - PA 910 / 30 dB Verstärkung
- E-Netz-Verstärker: SSB - PA 1810 / 30 dB Verstärkung
- Photometer: Philips PU 8735-50
- Quarzküvette:  $\beta$ -Galactosidase-Lösung
- Variation: Frequenz, Modulationsfrequenz

## 4. Experimentelle Ergebnisse

### 4.1 Allgemeines

Die experimentellen Arbeiten erstreckten sich von Ende Oktober 1994 bis Ende Mai 1995.

Die Hohlleiterexperimente wurden in einer Wärmekammer bei einer Temperatur von 37 °C durchgeführt. Die Messungen der Temperatur in der Wärmekammer ergaben über den Un-

# Ergebnisse

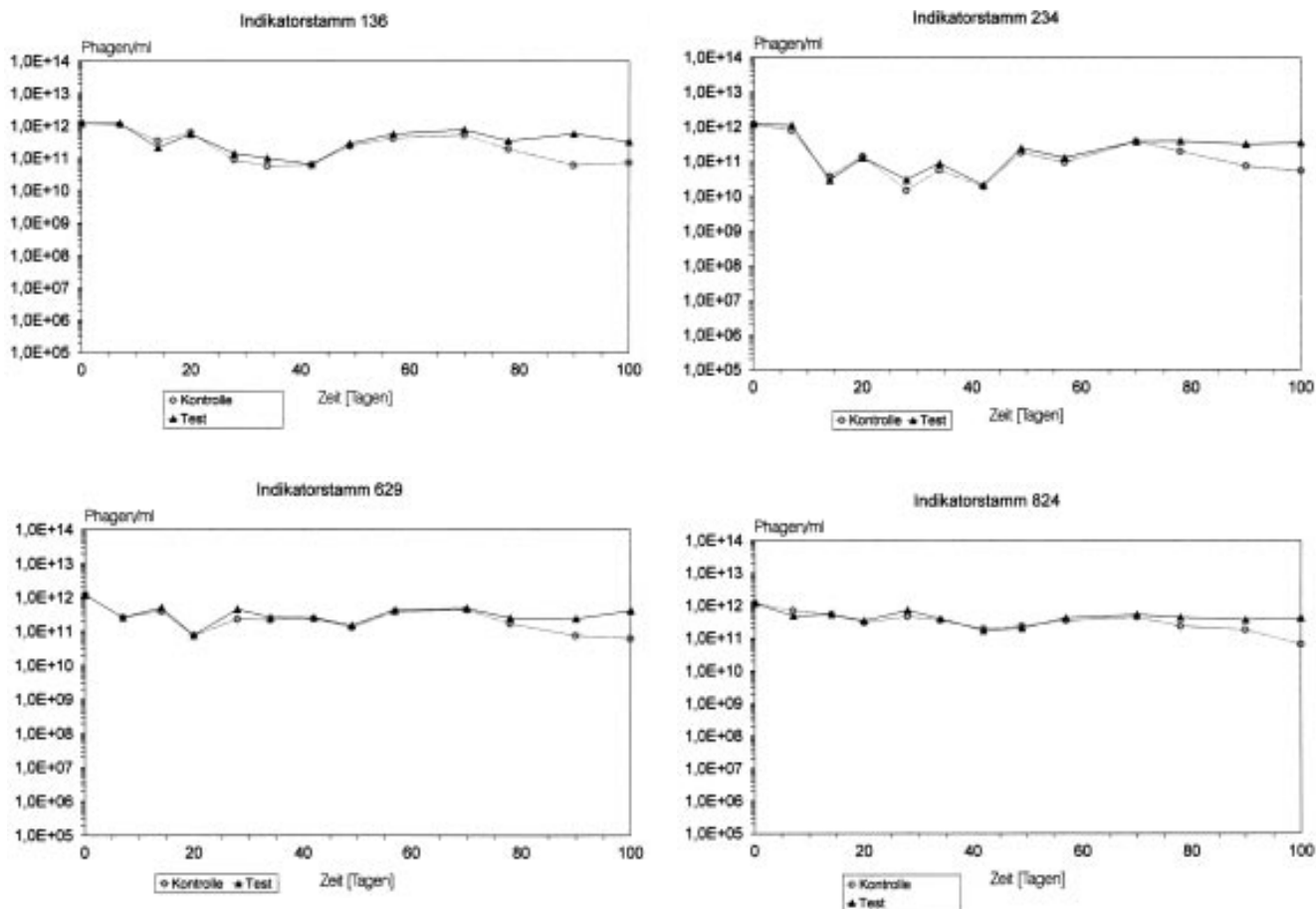


Abbildung 4: Langzeituntersuchungen an Phagen: Phagentiter für unterschiedliche Indikatorstämme

tersuchungszeitraum eine Konstanz besser als 0,5 °C.

Messungen des Temperaturanstieges in den exponierten Proben im Hohlleiter bei max. Leistungen von P = 8 Watt (D-Netz) mit einem Temperaturmesser ergaben keine merkliche Probenerwärmung (T < 1 °C).

Bei den Messungen in der Bandleitungsmeßzelle mußte zur Vermeidung einer übermäßigen Probenerwärmung die eingekoppelte Leistung auf Werte P < 1 Watt eingestellt werden. Der Temperaturanstieg in der feldexponierten Küvette betrug bei den photometrischen Messungen ca. 5 °C und

stieg auf Werte bis ca. 34 °C zum Ende der Meßreihe. Damit war die Temperatur immer noch in einem physiologisch unkritischen Bereich.

## 4.2 HF-Technik

Bei den Untersuchungen kamen die folgenden GSM/DCS1800-Geräte bzw. Signalgeneratoren zum Einsatz:

- D-Netz-Gerät (NOKIA Typ 6050)
- E-Netz-Gerät (NOKIA Typ 2140)
- Signalgenerator Rohde & Schwarz SME 03 & D-Netz-Verstärker SSB PA 910 / 30 dB

- Signalgenerator Rohde & Schwarz SME 03 & E-Netz-Verstärker SSB PA 1810 / 30 dB

## 4.3 Ergebnisse der biologischen Experimente

### 4.3.1 Langzeituntersuchungen an Phagen und DNA (D-Netz)

Die Untersuchungen wurden mit einem handelsüblichen D-Netz-GSM-Gerät durchgeführt.

#### D-Netz-GSM-Gerät

- Leistungsstufe 2: P = 8 Watt im Burst

- Mittlere Leistung  $\langle P \rangle = 1,00$  Watt
- Elektrische Feldstärke am Ort der Proben:  $|E_{y0}| = 729$  V/m

Versuchsreihen mit Expositionszeiten bis zu 100 Tagen führten mit unterschiedlichen Indikatorstämmen zu dem Ergebnis, daß zwischen den exponierten und nicht-exponierten Proben keine signifikanten Unterschiede zu finden sind (Abb. 4). Bei keiner der untersuchten Proben ließ sich eine durch das elektromagnetische Feld verursachte Abnahme der Phagenzahl erkennen. Kontrollen und exponierte Proben zeigten über einen Zeitraum von ca. 2.5 Monaten einen gleichen Inaktivierungsverlauf.

Die beobachtete leichte Inaktivierung auch der Kontrollproben über einen Zeitraum von drei Monaten ist eine bekannte Erscheinung, die auf die hohe Umgebungstemperatur von 37 °C zurückzuführen ist.

Nach einer Expositionszeit von 3 Monaten machte sich sogar eine stärkere Reduzierung der Phagenzahl in den Kontrollproben gegenüber den exponierten Proben bemerkbar. Die Untersuchung des Phänomens ergab, daß

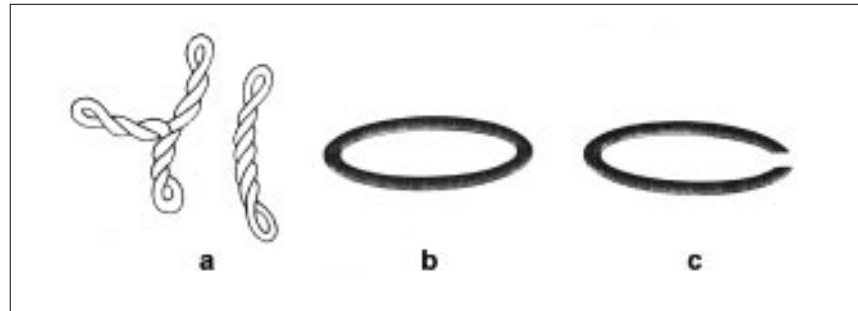


Abbildung 5a: Langzeituntersuchungen an DNA: natürliches Plasmid (a), Plasmid mit Einzelstrangbruch (b), Plasmid mit Doppelstrangbruch (c)

in der Wärmekammer im Bereich der Kontrollproben durch Luftströmungen bedingt ein Temperaturgradient existierte, der zu einer Temperaturdifferenz zwischen Boden und oberem Bereich der Glasampullen führte. Am Boden der Ampullen verdunstete Wasser und schlug sich an den Wänden nieder. Die Bakteriophagen trockneten nach 2.5 Monaten Standzeit am Grunde der Ampullen allmählich ein, obwohl die Ampullen hermetisch verschlossen waren. Da die im Versuch eingesetzten Bakteriophagen nicht in die Klasse trockenresistenter Viren gehören, führte das Eintrocknen zur Abnahme der Phagenzahl.

Bei den Langzeituntersuchungen

von DNA-Proben ergab sich das folgende Bild. Die DNA-Proben wurden bis zu vier Wochen dem Wellenfeld ausgesetzt und Einzelproben in Wochenabständen entnommen und mit den entsprechenden Kontrollen analysiert, d.h. elektrophoretisch aufgetrennt. Zwar wurden die beschriebenen Übergänge vom Supercoil zu relaxierten Molekülen (Einzelstrangbruch) beobachtet, aber diese Übergänge traten auch bei den Kontrollen auf (Abb. 5a - 5b). Die daraus erkennbare DNA-Schädigung ist wahrscheinlich auf die langen Verweilzeiten bei 37 °C zurückzuführen. Kontrollen, die über den gleichen Zeitraum bei 4 °C aufbewahrt wurden, zeigten diese Übergänge nicht.

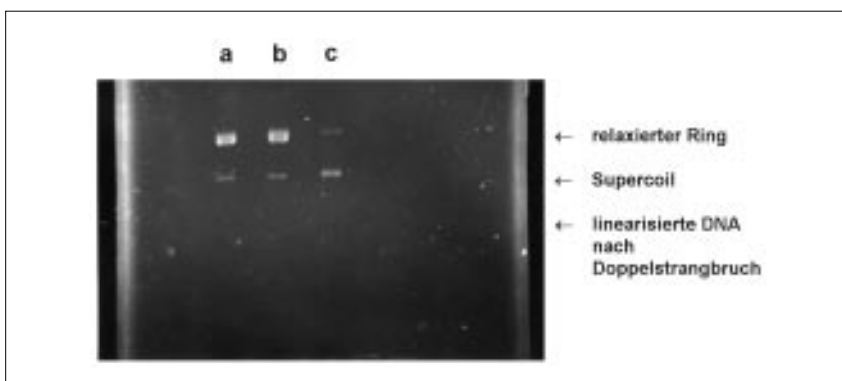


Abbildung 5b: Langzeituntersuchungen an DNA: elektrophoretische Auftrennung Feld-exponierte Probe (a), nicht exponierte Probe (b), 4°C-Probe (c)

## 4.3.2 Mutationsuntersuchungen an Bakterien / Schädigung von Phagen (D-Netz)

Diese Untersuchungen wurden mit dem SME 03-Signalgenerator von Rohde & Schwarz durchgeführt. Variiert wurde die Modulationsfrequenz und zusätzlich die HF-Leistung. Als Frequenzen wurden die Mobilfunk-typischen Modulationsfrequenzen 2 Hz / 8,3 Hz & 217 Hz gewählt. Als weitere Einstellung

# Ergebnisse

kam die Ionencyclotronfrequenz des Wasserstoffions im Erdmagnetfeld ( $B = 0.4804 \text{ G}$ ) mit  $730,2 \text{ Hz}$  hinzu. Die Messungen für diese Frequenzen wurden mit zwei unterschiedlichen Feldstärken durchgeführt. Folgende HF-Einstellungen wurden vorgenommen:

## Signalgenerator Rohde & Schwarz SME 03 & D-Netz-Verstärker SSB PA 910 / 30 dB

- Frequenz: 900 MHz
- Modulationsfrequenz: 2 Hz, 8,3 Hz, 217 Hz, 730,2 Hz
- Tastverhältnis: 1:867, 1:209, 1:8, 1:2,37
- Ansteuerleistung 9,3 dBm:  
P = 8 Watt im Burst
- Elektrische Feldstärke am Ort der Proben:  $|E_{y0}| = 729 \text{ V/m}$
- Ansteuerleistung 2,4 dBm:  
P = 2 Watt im Burst
- Elektrische Feldstärke am Ort der Proben:  $|E_{y0}| = 364.5 \text{ V/m}$

Bestimmt wurde die Rückmutationsrate ausgewählter Bakterienstämme und Phagentiter für exponierte Proben und Kontrollproben bei insgesamt 8 Frequenz-/ Leistungseinstellungen. Bei den Mutationsuntersuchungen gab es dabei teilweise Probleme mit Kontaminationen auf den Platten. Daher mußten einige der Messungen wiederholt werden.

Die Ergebnisse der Mutationsuntersuchungen sind in den Tabellen 1a - 1b dargestellt. Im Rahmen der experimentellen Schwankungen wurden keine Effekte gemessen. Signifikante Effekte würden hier Abweichungen der Rückmutationsrate Test / Kontrolle um einen Faktor 10 oder größer bedeuten.

Auch die Bestimmung der Pha-

Frequenz: 2,0 Hz/2 W	Vollmedium	Minimalmedium	Rückmutationshäufigkeit [Minimalmed./Vollmed.]
WP2 Kontrolle WP2 Test	2,90E+09 4,20E+09	190 100	6,55E-08 2,38E-08
WP2 uvra Kontrolle WP2 uvra Test	2,50E+09 3,90E+09	100 90	4,00E-08 2,31E-08

Frequenz: 8,3 Hz/2 W	Vollmedium	Minimalmedium	Rückmutationshäufigkeit [Minimalmed./Vollmed.]
WP2 Kontrolle WP2 Test	7,00E+09 5,70E+09	200 235	2,86E-08 4,12E-08
WP2 uvra Kontrolle WP2 uvra Test	3,10E+09 5,00E+09	50 60	1,61E-08 1,20E-08

Frequenz: 217 Hz/2 W	Vollmedium	Minimalmedium	Rückmutationshäufigkeit [Minimalmed./Vollmed.]
WP2 Kontrolle WP2 Test	6,00E+09 4,70E+09	200 300	3,33E-08 6,38E-08
WP2 uvra Kontrolle WP2 uvra Test	6,00E+09 5,60E+09	290 200	4,83E-08 3,57E-08

Frequenz: 730 Hz/2 W	Vollmedium	Minimalmedium	Rückmutationshäufigkeit [Minimalmed./Vollmed.]
WP2 Kontrolle WP2 Test	2,60E+09 1,60E+09	160 60	6,15E-08 3,75E-08
WP2 uvra Kontrolle WP2 uvra Test	3,40E+09 1,30E+09	220 60	6,47E-08 4,62E-08

Tabelle 1a: Mutationsuntersuchungen an Bakterien:  
Rückmutationsrate von E. coli für verschiedene Feldparameter

Frequenz: 2,0 Hz/8 W	Vollmedium	Minimalmedium	Rückmutationshäufigkeit [Minimalmed./Vollmed.]
WP2 Kontrolle WP2 Test	2,50E+09 2,40E+09	210 220	8,40E-08 9,17E-08
WP2 uvra Kontrolle WP2 uvra Test	7,00E+09 4,20E+09	30 90	4,29E-08 2,14E-08

Frequenz: 8,3 Hz/8 W	Vollmedium	Minimalmedium	Rückmutationshäufigkeit [Minimalmed./Vollmed.]
WP2 Kontrolle WP2 Test	3,50E+09 3,70E+09	150 50	4,29E-08 1,35E-08
WP2 uvra Kontrolle WP2 uvra Test	3,80E+09 3,50E+09	100 110	2,63E-08 3,14E-08

Frequenz: 217 Hz/8 W	Vollmedium	Minimalmedium	Rückmutationshäufigkeit [Minimalmed./Vollmed.]
WP2 Kontrolle WP2 Test	1,80E+09 7,90E+09	100 300	5,56E-08 3,80E-08
WP2 uvra Kontrolle WP2 uvra Test	1,20E+09 6,20E+09	30 100	2,50E-08 1,61E-08

Frequenz: 730 Hz/8 W	Vollmedium	Minimalmedium	Rückmutationshäufigkeit [Minimalmed./Vollmed.]
WP2 Kontrolle WP2 Test	2,70E+09 1,20E+09	135 35	5,00E-08 2,92E-08
WP2 uvra Kontrolle WP2 uvra Test	3,40E+09 1,30E+08	1010 35	2,97E-07 2,69E-07

Tabelle 1b: Mutationsuntersuchungen an Bakterien:  
Rückmutationsrate von E. coli für verschiedene Feldparameter



	Teststamm: 234	Teststamm: 136	Teststamm: 629	Teststamm: 824
Ausgangstitel	3,10E+09	2,50E+09	2,00E+09	2,40E+09

Frequenz	Kontrolle	Test	Kontrolle	Test	Kontrolle	Test	Kontrolle	Test
2 Hz/2 W	3,60E+09	4,90E+09	3,40E+09	5,20E+09	2,60E+09	2,30E+09	3,40E+09	3,50E+09
8,3 Hz/2 W	4,00E+09	9,40E+08	3,00E+09	7,80E+08	1,80E+09	9,40E+08	4,00E+09	1,20E+09
217 Hz/ 2W	3,40E+09	4,30E+09	2,80E+09	2,50E+09	1,70E+09	2,40E+09	4,90E+09	3,50E+09
730,2 Hz/2 W	7,40E+09	6,20E+09	5,40E+09	4,80E+09	2,80E+09	2,10E+09	3,40E+09	3,40E+09
2 Hz/8 W	1,70E+09	1,68E+09	2,40E+09	3,25E+09	2,70E+09	2,40E+09	3,10E+09	2,65E+09
8,3 Hz/8 W	3,70E+09	4,70E+09	3,10E+09	3,60E+09	2,10E+09	3,30E+09	4,10E+09	3,10E+09
217 Hz/8 W	1,90E+09	1,66E+09	2,90E+09	3,00E+09	2,20E+09	2,00E+09	2,90E+09	1,50E+09
730,2 Hz/8 W	3,50E+09	2,40E+09	3,00E+09	3,30E+09	2,30E+09	2,20E+09	3,50E+09	3,00E+09

	Vollmedium	Minimalmedium	Rückmutationshäufigkeit [Minimalmed./Vollmed.]
WP2 Kontrolle	9,50E+09	145	1,53E-08
WP2 Test	9,90E+09	145	1,46E-08
WP2 uvra Kontrolle	6,30E+09	70	1,11E-08
WP2 uvra Test	7,80E+09	190	2,44E-08

Tabelle 2: Schädigung von Phagen: Phagentiter für verschiedene Feldparameter

Tabelle 3: E-Netz-Untersuchungen: Rückmutationsrate von E. coli

Kontrollproben zeigte keinerlei auffällige Werte (Tab. 2).

Nach Abschluß dieses Teils der Experimente können wir festhalten,

daß sich bei den durchgeführten Tests keine signifikanten Effekte bei den exponierten Proben finden ließen. Fenstereffekte, wie sie zum Teil prognostiziert wer-

den, waren in unseren Experimenten bei den verwendeten Untersuchungsmaterialien und Feldeinstellungen im Rahmen der Meßgenauigkeit nicht nachweisbar. Es gab bei den Untersuchungen keinerlei Effekte, die auf eine mutagene Feldwirkung hindeuteten.

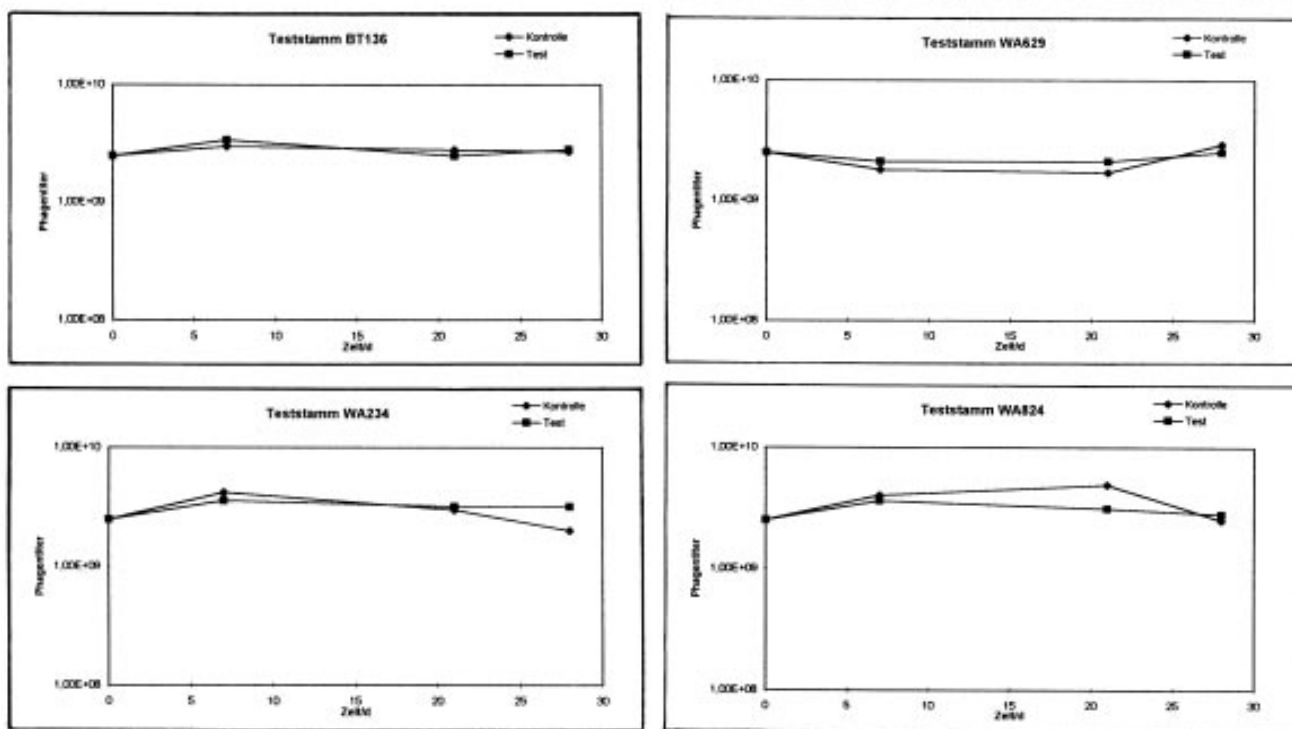


Abbildung 6: E-Netz-Untersuchungen: Phagentiter für verschiedene Indikatorstämme

## 4.3.3 Untersuchungen an Phagen und Bakterien (E-Netz)

Die Experimente wurden mit einem handelsüblichen E-Netz-Gerät (DCS1800 / Handy) durchgeführt. Die Messungen erfolgten mit der höchsten Leistungsstufe ( $P = 1$  Watt).

### E-Netz-Gerät

- Leistungsstufe 0:  $P = 1$  Watt im Burst
- Tastverhältnis: 1:8
- Elektrische Feldstärke am Ort der Proben:  $|E_{y0}| = 484,5$  V/m

Bestimmt wurde die Rückmutationsrate ausgewählter Bakterienstämme und Phagentiter für

exponierte Proben und Kontrollproben bei einer Frequenzeinstellung.

Die Ergebnisse der Mutationsuntersuchungen sind in Tabelle 3 dargestellt. Im Rahmen der versuchsbedingten Abweichungen fanden sich keine Effekte.

$f_{Mod} = 2$ HZ		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,128	1,128	1,128
DNA mit HF	OD	1,131	1,131	1,131

$f_{Mod} = 8,3$ HZ		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,129	1,127	1,127
DNA mit HF	OD	1,130	1,129	1,130

$f_{Mod} = 217$ HZ		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,128	1,128	1,128
DNA mit HF	OD	1,130	1,131	1,131

$f_{Mod} = 730,2$ HZ		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,128	1,128	1,127
DNA mit HF	OD	1,131	1,131	1,132

$f_{Mod} = 2$ HZ		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,128	1,129	1,129
DNA mit HF	OD	1,134	1,133	1,134

$f_{Mod} = 8,3$ HZ		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,125	1,129	1,129
DNA mit HF	OD	1,132	1,134	1,134

$f_{Mod} = 217$ HZ		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,128	1,129	1,129
DNA mit HF	OD	1,132	1,134	1,134

$f_{Mod} = 730,2$ HZ		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,129	1,129	1,130
DNA mit HF	OD	1,133	1,134	1,133

Tabelle 4a: DNA-Untersuchungen in Bandleitungsmeßzelle (D-Netz): Optische Dichte für unterschiedliche Modulationsfrequenzen ( $P = 0$  dBm)

Tabelle 4b: DNA-Untersuchungen in Bandleitungsmeßzelle (E-Netz): Optische Dichte für unterschiedliche Modulationsfrequenzen ( $P = 0$  dBm)

$f = 900$  MHz

$P = 3$ dBm		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,129	1,129	1,130
DNA mit HF	OD	1,129	1,128	1,128

$P = 6$ dBm		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,130	1,130	1,130
DNA mit HF	OD	1,128	1,128	1,128

$P = 9$ dBm		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,130	1,130	1,130
DNA mit HF	OD	1,128	1,128	1,129

$f = 1750$  MHz

$P = 3$ dBm		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,129	1,129	1,129
DNA mit HF	OD	1,133	1,132	1,132

$P = 6$ dBm		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,128	1,129	1,129
DNA mit HF	OD	1,131	1,131	1,130

$P = 6$ dBm		0	T/min	
			1	2
Wasser	OD	0	0	0
DNA ohne HF	OD	1,129	1,129	1,129
DNA mit HF	OD	1,130	1,128	1,128

Tabelle 4c: DNA-Untersuchungen in Bandleitungsmeßzelle (D-Netz / E-Netz): Optische Dichte für unterschiedliche HF-Leistungen ( $f_{Mod} = 8,3$  Hz)

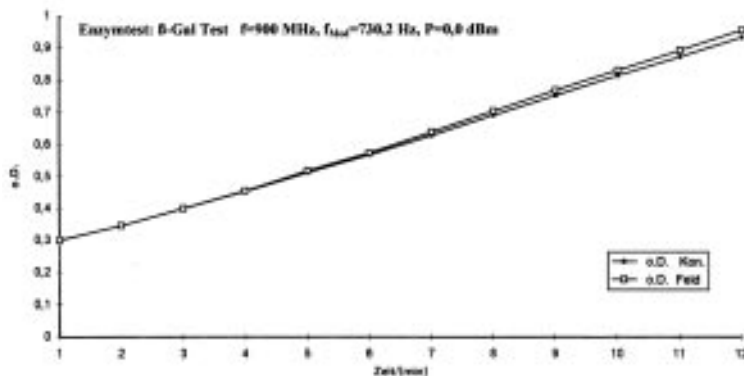
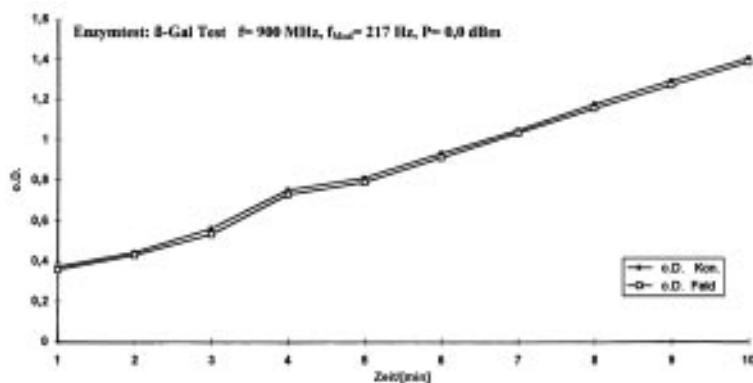
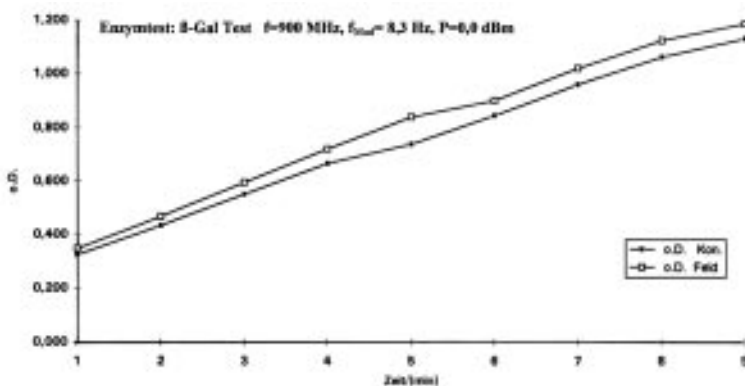
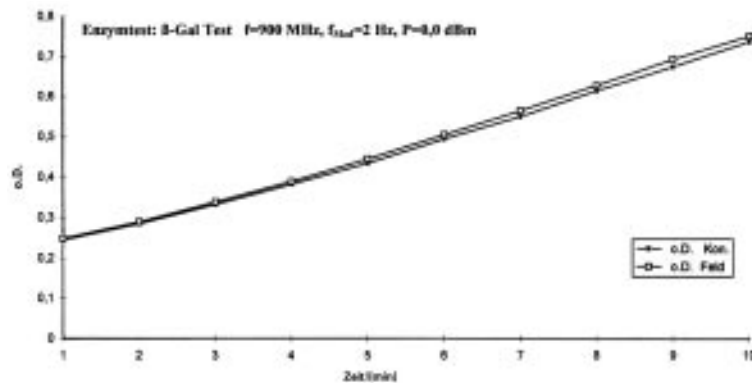


Abbildung 7a: Ablauf enzymatischer Reaktionen für verschiedene Feldparameter (D-Netz)

Auch die Bestimmung der Phagentiter bei exponierten und Kontrollproben zeigte keinerlei auffällige Werte (Abb. 6).

Nach Abschluß der E-Netz-Untersuchungen können wir feststellen, daß sich bei den durchgeführten Tests keinerlei Effekte bei den exponierten Proben finden ließen.

## 4.3.4 DNA-Untersuchungen (D-Netz / E-Netz)

Die Untersuchungen wurden in einer Bandleitungsmeßzelle in einem Photometer durchgeführt. Signalquelle war der SME 03-Signalgenerator von Rohde & Schwarz. Variiert wurden die Frequenz, die Modulationsfrequenzen und zusätzlich die HF-Leistung.

Als Frequenzeinstellungen wurden 900 MHz für die D-Netz-Messungen bzw. 1750 MHz für die E-Netz-Messungen gewählt. Die Ansteuerleistung lag bei 0 dBm, was einer Ausgangsleistung von ca. 0,75 Watt (D-Netz) bzw. 0,88 Watt (E-Netz) entsprach. Als Modulationsfrequenzen wurden wieder 2 Hz / 8,3 Hz / 217 Hz & 730,2 Hz eingestellt. Folgende HF-Einstellungen wurden gewählt:

### Signalgenerator Rohde & Schwarz SME 03 & D-Netz-Verstärker SSB PA 910 / 30 dB

- Frequenz: 900 MHz
- Modulationsfrequenzen: 2 Hz, 8,3 Hz, 217 Hz, 730,2 Hz
- Tastverhältnis: 1:867, 1:209, 1:8, 1:2,37
- Ansteuerleistung 0 dBm:  $P = 0,75$  Watt im Burst
- Elektrische Feldstärke in der Meßzelle:  $|E_{y0}| = 577$  V/m

## Signalgenerator Rohde & Schwarz SME 03 & E-Netz-Verstärker SSB PA 1810 / 30 dB

- Frequenz: 1750 MHz
- Modulationsfrequenzen: 2 Hz, 8,3 Hz, 217 Hz, 730,2 Hz
- Tastverhältnis: 1:867, 1:209, 1:8, 1:2,37
- Ansteuerleistung 0 dBm:  
P = 0,88 Watt im Burst
- Elektrische Feldstärke in der Meßzelle:  $|E_{y0}| = 625 \text{ V/m}$

Gemessen wurde die optische Dichte einer DNA-Lösung in einer Bandleitungsmeßzelle über einen Zeitraum von ca. 3 Minuten. Vergleichsmessungen mit einer nicht exponierten Probe und einer Wasserprobe erfolgten parallel. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Tabellen 4a (D-Netz) und 4b (E-Netz) dargestellt. Abweichungen in der optischen Dichte zwischen den exponierten und nicht exponierten Proben traten nicht auf.

Zum Abschluß der Untersuchungen wurden noch die Ansteuerleistungen des Signalgenerators variiert (P = 3 dBm / 6 dBm / 9 dBm), entsprechend einer max. Ausgangsleistung von ca. 8 Watt (bei 9 dBm). Die Modulationsfrequenz lag bei 8,3 Hz. Auch hier gab es keinerlei Hinweise auf mögliche feldstärkeabhängige Absorptionsmechanismen, die zu einer Schädigung der DNA führten (Tab. 4c).

### 4.3.5 Ablauf enzymatischer Reaktionen (D-Netz / E-Netz)

Die Untersuchungen wurden wieder in einer Bandleitungsmeßzelle in einem Photometer durchgeführt. Signalquelle war der SME03-Signalgenerator von

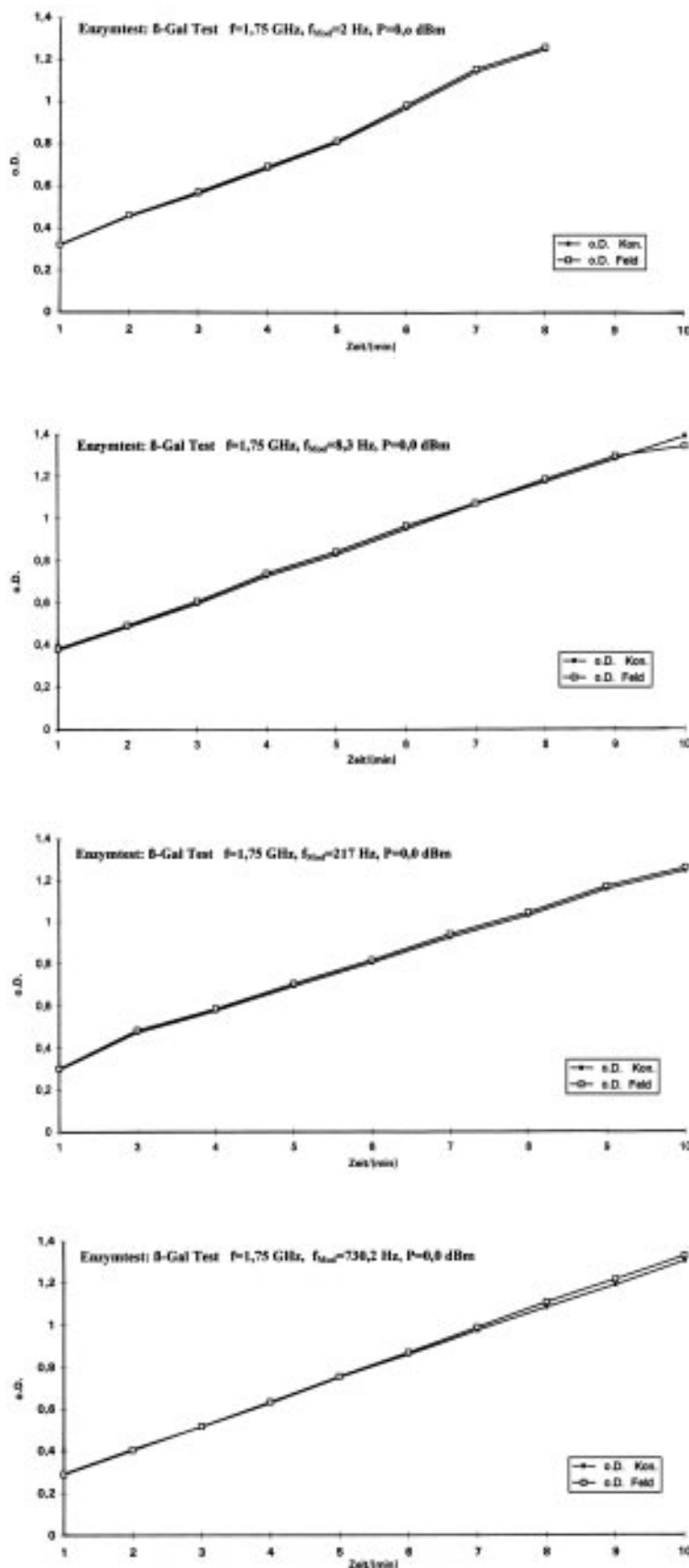


Abbildung 7b: Ablauf enzymatischer Reaktionen für verschiedene Feldparameter (E-Netz)

Rohde & Schwarz. Variiert wurden die Frequenz und die Modulationsfrequenzen.

Als Frequenzeinstellungen wurden 900 MHz für die D-Netz-Messungen bzw. 1750 MHz für die E-Netz-Messungen gewählt. Die Ansteuerleistung lag bei 0 dBm, was einer Ausgangsleistung von ca. 0,75 Watt (D-Netz) bzw. 0,88 Watt (E-Netz) entsprach. Als Modulationsfrequenzen wurden wieder 2 Hz / 8,3 Hz / 217 Hz & 730,2 Hz eingestellt. Folgende HF-Einstellungen wurden gewählt:

### Signalgenerator Rohde & Schwarz SME 03 & D-Netz-Verstärker SSB PA 910 / 30 dB

- Frequenz: 900 MHz
- Modulationsfrequenzen: 2 Hz, 8,3 Hz, 217 Hz, 730,2 Hz
- Tastverhältnis: 1:867, 1:209, 1:8, 1:2,37
- Ansteuerleistung 0 dBm:  
P = 0,75 Watt im Burst
- Elektrische Feldstärke in der Meßzelle:  $|E_{y0}| = 577 \text{ V/m}$

### Signalgenerator Rohde & Schwarz SME 03 & E-Netz-Verstärker SSB PA 1810 / 30 dB

- Frequenz: 1750 MHz
- Modulationsfrequenzen: 2 Hz, 8,3 Hz, 217 Hz, 730,2 Hz
- Tastverhältnis: 1:867, 1:209, 1:8, 1:2,37
- Ansteuerleistung 0 dBm:  
P = 0,88 Watt im Burst
- Elektrische Feldstärke in der Meßzelle:  $|E_{y0}| = 625 \text{ V/m}$

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Abbildungen 7a (D-Netz) und 7b (E-Netz) dargestellt. Der zeitliche Verlauf der Reaktion zeigt keinerlei signifikante Abweichungen zwischen exponierten Proben und nicht exponierten Proben.

## 5. Diskussion der biologischen Ergebnisse

Unsere Untersuchungen zur Wirkung hochfrequenter gepulster elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme (DNA, Enzyme, Phagen und Bakterien) zeigten trotz unterschiedlichster Versuchsansätze bei den verwendeten Materialien und Versuchsparametern keine nachweisbaren und gegebenenfalls reproduzierbaren Effekte.

Exponierte Proben und Kontrollproben zeigten im Rahmen der Meßgenauigkeit gleiches Verhalten. Dies bedeutet, daß im Rahmen unserer Versuchs- und Meßbedingungen weder *in vitro* noch *in vivo* Effekte an Nukleinsäuren oder Proteinen durch das elektromagnetische Feld zu erkennen waren.

Allerdings wurden im Bereich des E-Netzes aus zeitlichen Gründen nur in sehr eingeschränktem Umfang Untersuchungen durchgeführt. Eine Ausdehnung der Experimente auf andere Feldparameter halten wir für sinnvoll.

Die Versuchsbedingungen waren durchweg so gewählt, daß Effekte hätten erkennbar sein müssen. Dennoch lassen sich kleine Effekte, die unter Umständen erst über lange Zeiträume zu meßbaren Schädigungen führen, mit unseren Meßanordnungen nicht unbedingt erkennen. Von daher sollte bei der Auslegung künftiger Experimente die Erfassung derartig geringer Effekte ein wesentlicher Schwerpunkt sein.

Ansatzpunkte könnten hier sein:

- Auslegung von hochselektiven Experimenten ähnlich dem

Ames-Test, die auch die Erfassung geringster Effekte ermöglichen;

- Auslegung von DNA-Experimenten mit dem Ziel, zu längeren Expositionszeiten zu kommen.

Als Ergebnis der Datenbankrecherche erhielten wir eine Vielzahl unterschiedlicher Wirkungsmodelle, die noch aus biophysikalischer Sicht bewertet werden sollten. Ein interessanter Ansatz ist beispielsweise die Beeinflussung enzymatischer Reaktionen an der DNA durch elektromagnetische Felder (Regulation, Transkription). Experimente in diesem Bereich existieren bisher kaum. Auch hier sehen wir ein Feld für weitere Forschungsarbeiten.

Ein Fazit unserer Untersuchungen ist die Aussage, daß sich im Rahmen der durchgeführten Experimente mit den eingesetzten Untersuchungsmethoden und -materialien keine meßbaren und reproduzierbaren Hinweise auf mögliche Schädigungen fanden. Auch ließen sich bei unseren Experimenten keinerlei Hinweise auf Effekte finden, wie sie von unterschiedlichen Wirkungsmodellen vorhergesagt wurden. Dies betrifft sowohl die Anregung geometrischer Resonanzen bzw. von Eigenschwingungen bei biologisch aktiven Molekülen als auch die Hydratation von Proteinen im hochfrequenten em-Feld.

Gleichzeitig sehen wir jedoch die Notwendigkeit weiterer Forschungsanstrengungen in unterschiedlichsten Gebieten. Dies gilt insbesondere auch für den Bereich möglicher Wirkungen gepulster elektromagnetischer Felder auf molekularer und zellulärer Ebene.

TEIL ZWEI:

## HF-Expositionssystem

### 1. Einleitung

Das Konzept für den Meßaufbau muß gewährleisten, daß zum einen das Versuchsziel Aufdeckung oder Ausschluß von möglichen Wechselwirkungen erreicht wird, und daß zum anderen die Versuche eindeutig reproduzierbar sind und dadurch jederzeit an einem anderen Ort durch andere Wissenschaftler wiederholt werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich der Nachweis eines Ausschlusses von Wirkungen immer nur auf eine konkrete Versuchskonfiguration mit heute verfügbaren Meß- und Auswertungsmethoden beziehen kann.

Die nachfolgenden Abschnitte beschränken sich ausschließlich auf die Darstellung der hochfrequenztechnischen Aspekte des Versuchsaufbaus.

### 2. Auswahl der HF-Meßanordnung

#### 2.1 Liste der Auswahlkriterien

Um eine systematische Auswahl der Meßanordnung zu ermöglichen, werden folgende einzelne Gesichtspunkte diskutiert:

- Auswahl der Feldverteilung vor Einbringen des Meßobjekts,
- Größe des Meßvolumens,
- Auswahl der Signalform,

- Bestimmbarkeit der Feldverteilung im Meßobjekt,
- Schirmung,
- besondere meßtechnische Anforderungen,
- biologisch/physiologische Erfordernisse.

#### 2.2 Feldverteilung vor Einbringen des Meßobjekts

In bisher veröffentlichten Untersuchungen werden verschiedene Feldtypen, z.B. fortschreitende oder stehende Welle, Nahfeld, Feldtypen nur mit E- oder H-Feldanteil, eingesetzt. Dabei gibt es zur Zeit keine Erkenntnis, daß bei einem bestimmten Feldtyp Wirkungen wahrscheinlicher sind als bei anderen. Auch ist die in der Praxis vorgegebene Exposition – z.B. Exposition von Nervenzellen in bestimmten Bereichen des menschlichen Hirns bei Nutzung eines Mobilfunktelefons – von den genannten Standardfällen durchaus verschieden. Die Auswahl des Feldtyps kann deshalb so vorgenommen werden, daß die Eindeutigkeit und Reproduzierbarkeit der Feldverteilung möglichst gut gewährleistet ist.

#### 2.3 Größe des Meßvolumens

Die Größe des benötigten Meßvolumens ist zunächst durch das Vo-

lumen der Lösung  $V_L$  mit den Bakterien, Viren oder biologisch aktiven Molekülen und durch das Gefäß gegeben. Bei der Festlegung von  $V_L$  ist zu beachten, daß die Eindringtiefe von elektromagnetischen Feldern in physiologische Lösungen besonders im oberen Frequenzbereich sehr gering ist. Damit ergibt sich in großen Volumina eine stark inhomogene Feldverteilung. Die Feldexposition der in der Lösung frei beweglichen Bakterien oder Viren ist damit je nach Aufenthaltsort unterschiedlich. Hinsichtlich der hochfrequenztechnischen Seite ergibt sich daraus, daß die Volumina für die einzelnen Proben möglichst klein gewählt werden sollten. Es werden hier Ampullen mit einer maximal möglichen Füllung von  $1\text{ cm}^3$  verwendet. Zur Beschleunigung der Experimente ist es sinnvoll, mehrere Proben auf einmal in der Meßanordnung zu untersuchen, wodurch sich das benötigte Meßvolumen drastisch erhöht.

#### 2.4 Auswahl der Signalform

Die im D- und E-Netz verwendeten Signale sind sehr komplex aufgebaut, eine Reduktion auf einfache Signalformen ist folglich immer sehr willkürlich. Es wird deshalb zunächst mit einem handelsüblichen Gerät, das in einem Testmodus „Senden“ betreibbar ist, gearbeitet. Es muß jedoch betont werden, daß man damit nur einen speziellen Betriebszustand realisiert.

Die Frequenzen und erforderlichen Bandbreiten für das D- und E-Netz sind:

## D-Netz:

- Verbindung BS → MS:  
935 MHz - 960 MHz
- Verbindung MS → BS:  
890 MHz - 915 MHz
- 124 Kanäle im Abstand von  
200 kHz
- Modulationsverfahren GMSK  
(Gaussian Minimum Shift Key)

## E-Netz:

- Verbindung FuFst → Mobil:  
1805 MHz - 1880 MHz
- Verbindung Mobil → FuFst:  
1710 MHz - 1785 MHz
- 374 Kanäle im Abstand von  
200 kHz
- Modulationsverfahren GMSK

Experimente, die mit diesen Signalformen durchgeführt werden sollen, erfordern also *keinen* besonderen Aufwand hinsichtlich der Bandbreite!

Signale nach dem GSM-Standard sind vor allem durch drei Parameter gekennzeichnet:

- Frequenz des Trägers,
- Länge der Bursts von 0,577 ms,
- Abstand zwischen zwei Bursts von 4,6 ms bis 0,5 s je nach Gesprächsmodus.

Um Auswirkungen von Modifikationen der Signalform nach dem GSM-Standard zu untersuchen, werden zusätzlich amplitudenmodulierte Signale mit den Trägerfrequenzen 900 MHz und 1750 MHz eingesetzt. Das Modulations-

signal ist eine Rechteckfunktion (Modulationsgrad 1) mit einer Pulsbreite von 0,577 ms und einer Frequenz von 2 Hz, 8,3 Hz, 217 Hz und 730,2 Hz. Die ersten drei Frequenzen ergeben sich aus dem GSM-Standard (2 Hz SID, 8,3 Hz Measurement, 217 Hz Talk-Modus). Die letzte Frequenz ist die Zyklotronresonanzfrequenz oder Larmorfrequenz des Wasserstoffions im Erdmagnetfeld.

## 2.5 Bestimmbarkeit der Feldverteilung im Meßobjekt

Um bei begrenzten Rechnerkapazitäten eine möglichst realistische Modellierung der Anordnung durchführen zu können, sollte die Geometrie so einfach wie möglich gewählt werden. Es bietet sich deshalb der Einsatz einer Rechteckhohlleitung mit einer fortschreitenden  $H_{10}$ -Welle an, wobei sich die Querschnittsabmessungen aus den Frequenzen des D- und E-Netzes ergeben. Die erforderlichen Längsabmessungen resultieren aus der Größe des benötigten Meßvolumens, d.h. vor allem aus der Anzahl der Proben, die gleichzeitig dem Feld ausgesetzt werden sollen. Selbstverständlich kommt die Wahl einer im Grundmodus betriebenen Rechteckhohlleitung auch der eingangs gestell-

ten Forderung nach Eindeutigkeit der Feldverteilung entgegen.

Um das Feld in einem ersten Schritt qualitativ numerisch analysieren zu können, werden die Wände der Gefäße zunächst vernachlässigt. Die Bereiche mit den Lösungen sind entsprechend der Forderung

$$\Delta V = (\Delta_i)^3, \quad i = x, y, z, \quad \text{mit } \Delta_i \leq \frac{\lambda_{\text{eff}}}{10}$$

zu diskretisieren. Zur Verdeutlichung sei folgendes Beispiel gegeben:

D-Netz:  $f = 900 \text{ MHz} \rightarrow \lambda_0 = 333 \text{ mm}$   
 Hohlleitung:  $R9 \ 247,65 \times 123,80 \text{ mm}^2$   
 Länge der Meßzelle:  $900 \text{ mm}$   
 Volumen einer Probe:  $4000 \text{ mm}^3$

Zur Diskretisierung dieser Meßzelle mit 15 Proben auf der Mittelachse benötigt man ca. 700.000 Gitterpunkte. Für die Diskretisierung des Übergangs Koaxialkabel-Rechteckhohlleitung sind zusätzlich ca. 200.000 Gitterpunkte erforderlich. Damit ist das Problem auf einer Workstation mit 128 MB RAM noch rechenbar. Rechenergebnisse werden im Abschnitt 4 vorgestellt. Die numerische Analyse einer Hohlleitermeßanordnung wird durch sehr genau ausführbare Streuparametermessungen abgesichert.

## 2.6 Schirmung

Die Hohlleitermeßzelle kann für hochfrequente Felder vollständig abgeschirmt ausgeführt werden. Eine Schirmwirkung hinsichtlich niederfrequenter Magnetfelder ist technisch nur sehr aufwendig erreichbar.

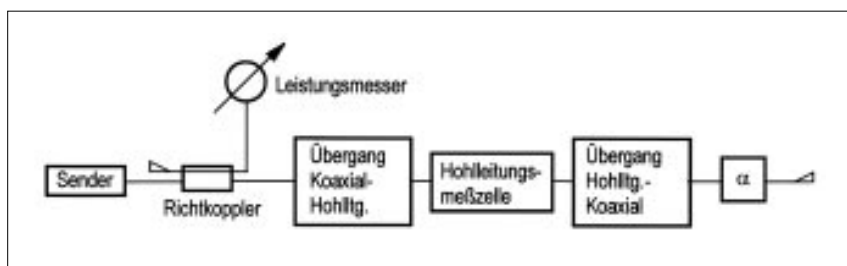


Abbildung 1: Versuchsaufbau

## 2.7 Besondere meßtechnische Anforderungen

Da der Versuchsaufbau sehr einfach und damit sehr genau definiert ist, sind hinsichtlich der hochfrequenztechnischen Aspekte keine besonderen meßtechnischen Anforderungen zu stellen. Vor allem kann auf eine meßtechnisch aufwendige und kritische Abtastung des Feldes in der Hohlleitung durch Sensoren usw. verzichtet werden.

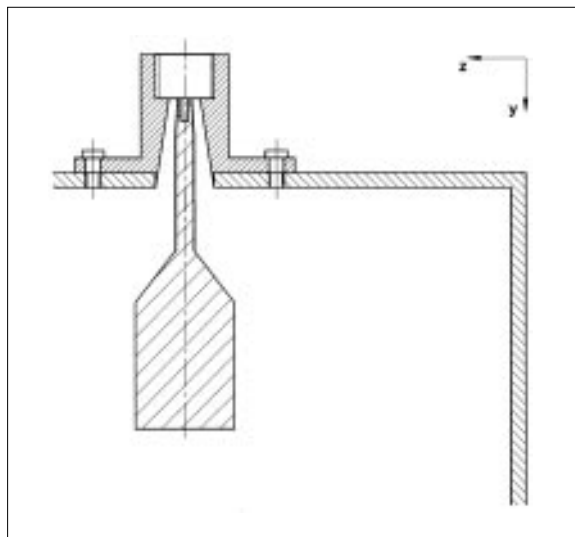


Abbildung 2: Konstruktionszeichnung Übergang Koaxialkabel-Hohlleitung (D-Netz)

## 2.8 Biologische / physiologische Erfordernisse

Die Untersuchungsobjekte befinden sich entweder in Ampullen mit einer Nährlösung (10 mM Tris 7,4, 1 mM MgCl<sub>2</sub>, 0,1% NaCl) oder in einer Petrischale auf Komplettagar. Die Dielektrizitätskonstanten beider Substanzen wurden meßtechnisch (HP Netzwerkanalysator mit Dielectric Probe Kit HP85070B) bestimmt zu:

Lösung:	} 37°C
$\epsilon_r = 73,9 - j6,6$ 900 MHz	
$\epsilon_r = 73,4 - j8,1$ 1800 MHz	
Komplettagar:	
$\epsilon_r = 76,4 - j32,0$ 900 MHz	
$\epsilon_r = 73,9 - j21,7$ 1800 MHz	

Ansonsten sind die Experimente so konzipiert, daß keine besonderen biologischen / physiologischen Erfordernisse wie z.B. Belüftung notwendig sind.

## 3. Meßaufbau

### 3.1 Komponenten des Meßaufbaus

In diesem Abschnitt werden alle Komponenten des Meßaufbaus aufgeführt. In den folgenden Abschnitten 3.2 und 3.3 werden zusätzlich die selbsterstellten Bauteile erläutert.

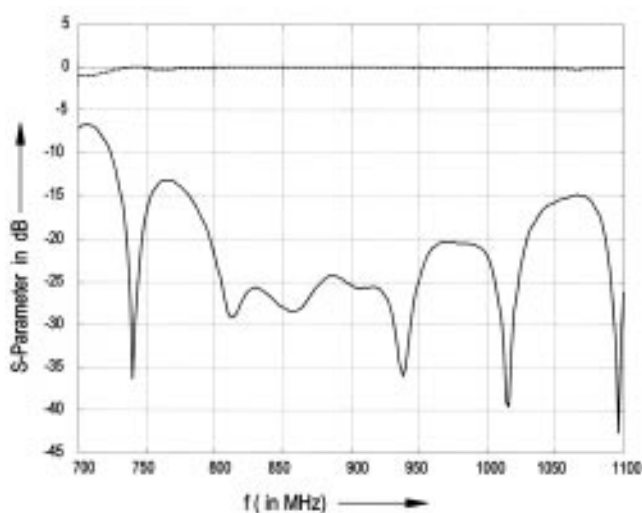


Abbildung 3.1: Streuparameter der leeren Hohlleitung mit Übergängen (D-Netz, S11 (—), S21 (- - - -))

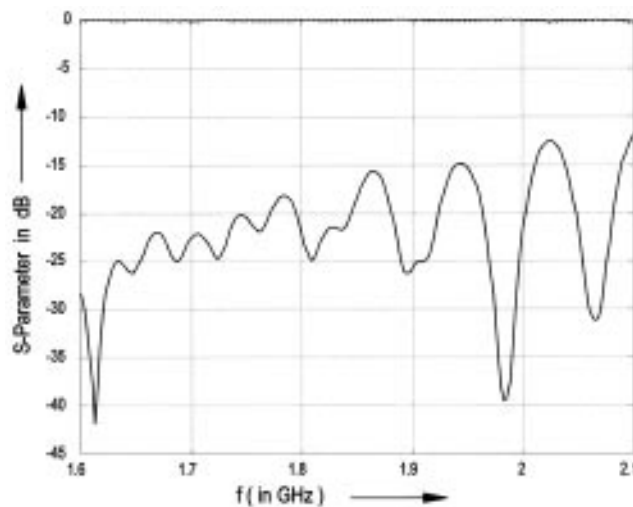


Abbildung 3.2: Streuparameter der leeren Hohlleitung mit Übergängen (E-Netz, S11 (—), S21 (- - - -))



Der Meßaufbau besteht aus folgenden Komponenten (Abb. 1):

- Handelsübliches GSM- oder DCS 1800-Telefon (D- oder E-Netz) als Sender mit koaxialem Ausgang (50  $\Omega$ )
- Signalgenerator, Typ Rohde & Schwarz SME 03
- Endverstärker, D-Netz: Typ SSB-Elektronik PA 910, E-Netz: Typ PA 1810
- Richtkoppler in koaxialer Technik, D-Netz: 20 dB, Typ Narda Microwave 3001-20, E-Netz: 10 dB, Typ 3002-10
- Leistungsmesser, Typ HP 436A
- Übergang Koaxialkabel-H<sub>10</sub>-Rechteckhohlleitung (Eigenbau)
- Meßzelle (Eigenbau)
- Übergang H<sub>10</sub>-Rechteckhohlleitung-Koaxialkabel (Eigenbau)
- Leistungsdämpfungsglied in koaxialer Technik, Typ RLC-

Electronics A-201-20N

- Crystal-Detector, Typ HP 420 A
- 50  $\Omega$  Abschluß in koaxialer Technik, Typ HP 908 A

Mit Hilfe des Leistungsmessers läßt sich kontrollieren, ob der Sender einwandfrei arbeitet. Durch die Verwendung des rechten zweiten Übergangs Rechteckhohlleiter-Koaxialkabel mit Leistungsdämpfungsglied und Abschluß in koaxialer Technik wurde der Einsatz eines Leistungsabsorbers in Hohlleitertechnik, der deutlich höhere Baulängen besitzt, vermieden.

### 3.2 Hohlleitungsbauteile für das D-Netz

Es bietet sich die Hohlleitung R9 mit den Querschnittsabmessungen

gen (Innenmaße) 247,65 x 123,80 mm<sup>2</sup> an. Der nutzbare Frequenzbereich ist 760 MHz bis 1150 MHz, wobei die Bandgrenze durch 1,25  $f_c$  und 1,9  $f_c$  mit  $f_c$  gleich der Grenzfrequenz der H<sub>10</sub>-Welle definiert ist. Offensichtlich ist die Bandbreite für das GSM-Signal bereits ausreichend. Die Länge der Meßzelle von 900 mm wurde so gewählt, daß zum einen die gesamte Meßanordnung in einer Klimakammer untergebracht werden kann, und andererseits ein möglichst großes Meßvolumen zur Verfügung steht.

Als Material für den Übergang und die Meßzelle wurde Messing verwendet. Die Konstruktion des Übergangs Rechteckhohlleitung-Koaxialkabel ist aus Abbildung 2 ersichtlich.

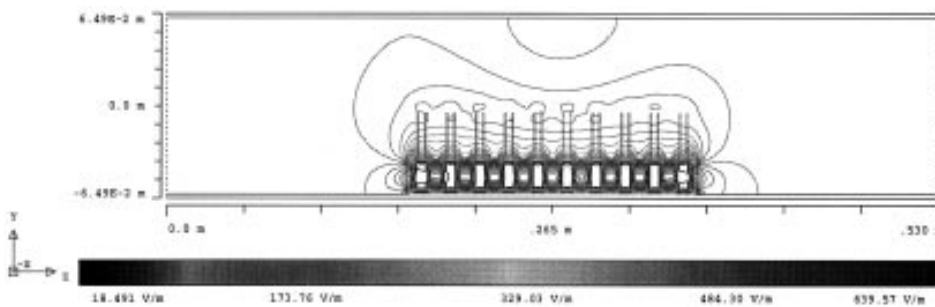


Abbildung 4.1: Betrag der elektrischen Feldstärke, Probenreihe auf der Hohlleitungsachse (D-Netz, 30 Proben, Probenvolumen 1 cm<sup>3</sup>)

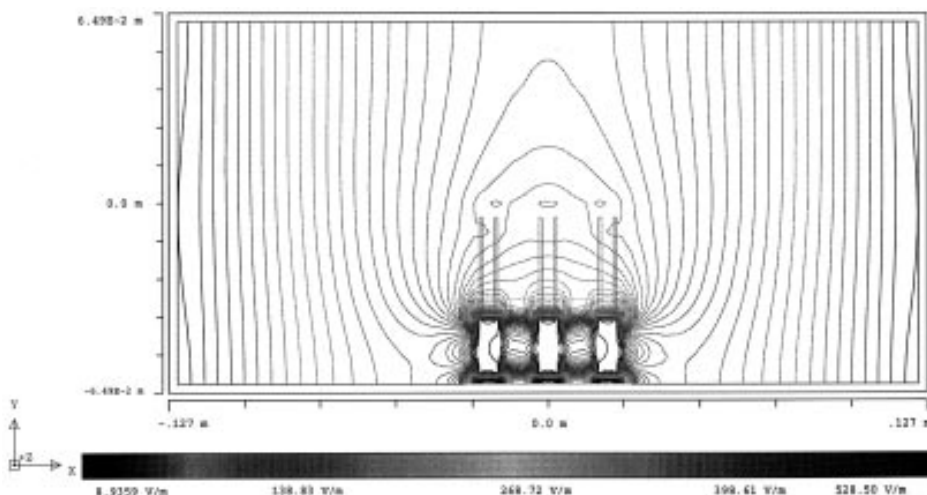


Abbildung 4.2: Betrag der elektrischen Feldstärke, Probenreihe quer zur Hohlleitungsachse (D-Netz, 30 Proben, Probenvolumen 1 cm<sup>3</sup>)

Zur Kontrolle des Übergangs und der leeren Meßzelle wurden die Streuparameter  $S_{11}$  und  $S_{21}$  gemessen (Abb. 3.1). In dem interessierenden Bereich ist  $|S_{11}|$  kleiner als -20 dB und  $|S_{21}|$  ungefähr gleich 1 im Rahmen der Meßgenauigkeit. Damit ist die Anordnung für die gewünschten Messungen deutlich besser als erforderlich. Die numerische Analyse zeigt, wie zu erwarten, den glatten Verlauf der  $H_{10}$ -Welle.

## 3.3 Hohlleitungsbau- teile für das E-Netz

Es bietet sich die Hohlleitung R18 mit den Querabmessungen (Innenmaße)  $129,54 \times 64,77 \text{ mm}^2$  mit dem nutzbaren Frequenzbereich 1450 MHz bis 2200 MHz an. Die Länge der Meßzelle wurde zu 995 mm gewählt. Die Abmessungen des Übergangs Koaxialkabel-Hohlleitung erhält man aus denen des D-Netzes durch einfache Skalierung.

Abbildung 3.2 zeigt die Meßwerte der  $|S_{11}|$  und  $|S_{21}| \cdot |S_{11}|$  liegt im interessierenden Frequenzbereich unter -15 dB,  $|S_{21}|$  über -0,3 dB, was ausreichend ist. Deutlich bessere Werte sowohl für das D-Netz wie für das E-Netz kann man erzielen, wenn man

- statt der preiswerten Kabel und Anschlüsse in N-Technik aufwendige Präzisionsbauteile verwendet und
- Abstimmeelemente anbringt.

Dieser zusätzliche Aufwand ist hier jedoch nicht angebracht, da die Ausgangsimpedanz des Mobilfunkgerätes nur mit  $50 \Omega \pm 2 \Omega$  angegeben wird und durch das Einbringen des Meßobjektes ebenfalls Störungen erfolgen (siehe Abschnitt 4).

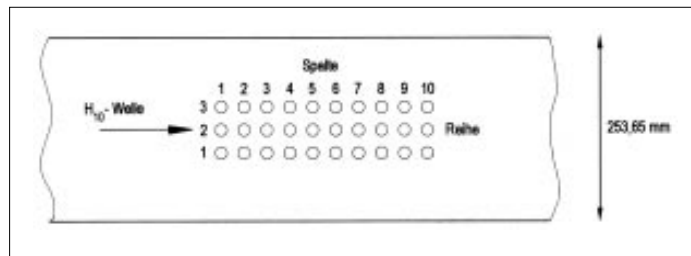


Abbildung 4.3:  
Numerierung  
der Proben

## 4. Analyse der Meß- zelle mit Probe

### 4.1 D-Netz

Die Gefäße mit den Proben werden innerhalb der Hohlleitung in einen Styroporblock gestellt. Vorabmessungen des leeren Blockes bestätigen, daß dieser keinen meßbaren Einfluß auf die Ausbreitung der  $H_{10}$ -Welle hat.

Ziel der durchgeführten numerischen Analyse ist es zu gewährleisten, daß das Feld in den Proben eindeutig bestimmt und reproduziert werden kann. Dieses Ziel ist besonders einfach erreichbar, wenn die Proben nur eine lokale Störung des  $H_{10}$ -Feldes darstellen. Rechnungen mit nur einer Probe mit bis zu  $5 \text{ cm}^3$  Volumen zeigten unmittelbar, daß diese Bedingung erfüllt ist. Wünschenswert ist jedoch, daß zur Beschleunigung der Experimente möglichst viele Proben

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	19,72	18,14	17,34	16,79	16,47	16,47	16,70	17,11	17,79	19,71
2	19,88	18,18	17,32	16,83	16,52	16,52	16,74	17,15	17,83	19,34
1	19,72	18,14	17,34	16,79	16,47	16,47	16,70	17,11	17,79	19,71

Tabelle 1.1: Feldstärke [V/m] in den Proben (D-Netz, Volumen  $1,0 \text{ cm}^3$ ), Feldstärke der anregenden  $H_{10}$ -Welle auf der Hohlleitungssachse  $181,6 \text{ V/m}$ .

$$\text{Max. Abweichung: } \frac{|E_{Pr 1,5}|}{|E_{Pr 2,1}|} = 0,828$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	17,82	17,04	16,68	16,37	16,24	16,19	16,23	16,36	16,65	17,43
2	18,14	17,26	16,89	16,58	16,45	16,41	16,45	16,58	16,88	17,77
1	17,82	17,04	16,68	16,37	16,24	16,19	16,23	16,36	16,65	17,43

Tabelle 1.2: Feldstärke [V/m] in den Proben (D-Netz, Volumen  $0,5 \text{ cm}^3$ ), Feldstärke der anregenden  $H_{10}$ -Welle auf der Hohlleitungssachse  $181,6 \text{ V/m}$ .

$$\text{Max. Abweichung: } \frac{|E_{Pr 1,6}|}{|E_{Pr 2,1}|} = 0,892$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	4,26	4,22	4,17	4,14	4,12	4,12	4,14	4,12	4,19	4,23
2	4,40	4,33	4,28	4,25	4,23	4,23	4,24	4,27	4,30	4,35
1	4,26	4,22	4,17	4,14	4,12	4,12	4,14	4,12	4,19	4,23

Tabelle 1.3: Feldstärke [V/m] in den Proben (D-Netz, Volumen  $0,1 \text{ cm}^3$ ) Feldstärke der anregenden  $H_{10}$ -Welle auf der Hohlleitungssachse  $181,6 \text{ V/m}$ .

$$\text{Max. Abweichung: } \frac{|E_{Pr 1,5}|}{|E_{Pr 2,1}|} = 0,936$$

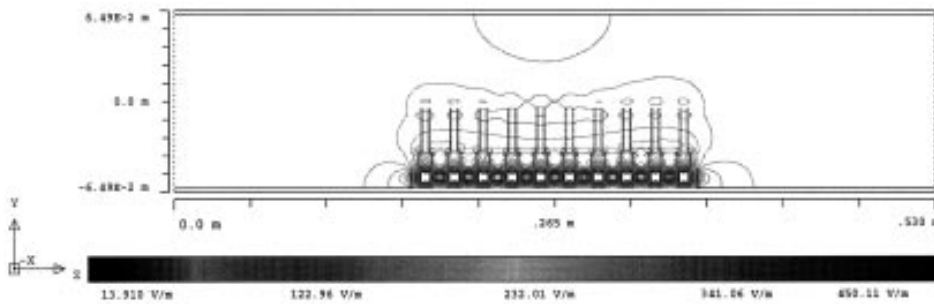


Abbildung 4.4:  
Betrag der elektrischen Feldstärke, Probenreihe auf der Hohlleitungsachse (D-Netz, 30 Proben, Probenvolumen 0,5 cm<sup>3</sup>)

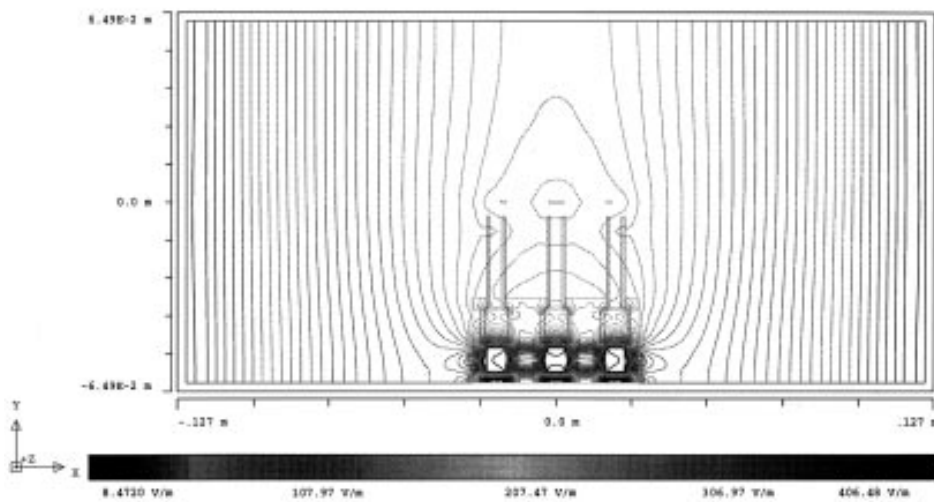


Abbildung 4.5:  
Betrag der elektrischen Feldstärke, Probenreihe quer zur Hohlleitungsachse (D-Netz, 30 Proben, Probenvolumen 0,5 cm<sup>3</sup>)

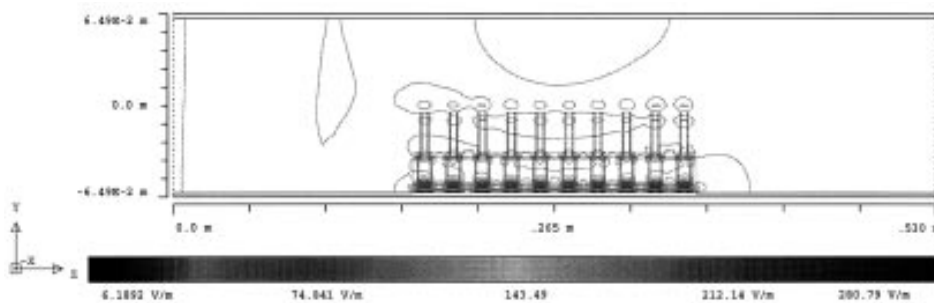


Abbildung 4.6:  
Betrag der elektrischen Feldstärke, Probenreihe auf der Hohlleitungsachse (D-Netz, 30 Proben, Probenvolumen 0,1 cm<sup>3</sup>)

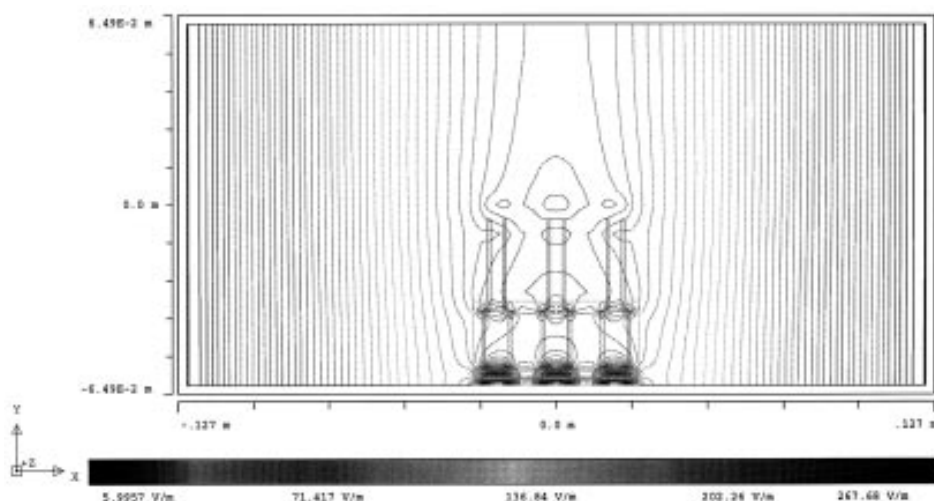


Abbildung 4.7:  
Betrag der elektrischen Feldstärke, Probenreihe quer zur Hohlleitungsachse (D-Netz, 30 Proben, Probenvolumen 0,1 cm<sup>3</sup>)

auf einmal untersucht werden können. Dazu wurden verschiedene Anordnungen untersucht. Für die Rechenergebnisse in den Abbildungen 4.1 und 4.2 wurden 30 Proben von je  $1 \text{ cm}^3$  in drei Reihen mit einem Abstand von 20 mm in der Hohlleitung angenommen. In Abbildung 4.1 ist die Pegelverteilung des elektrischen Feldes im Längsschnitt durch die mittlere, auf der Hohlleitungsachse befindliche Probenreihe dargestellt. Man erkennt, daß der Pegel im Bereich der Probe nahezu konstant ist. Insbesondere erfährt die  $H_{10}$ -Welle keine merkliche Dämpfung. Abbildung 4.2 zeigt einen Schnitt quer zur Hohlleitungsachse. Wegen des kosinusförmigen Abfalls der elektrischen Feldstärke der  $H_{10}$ -Welle zum Rand hin, aber auch wegen der

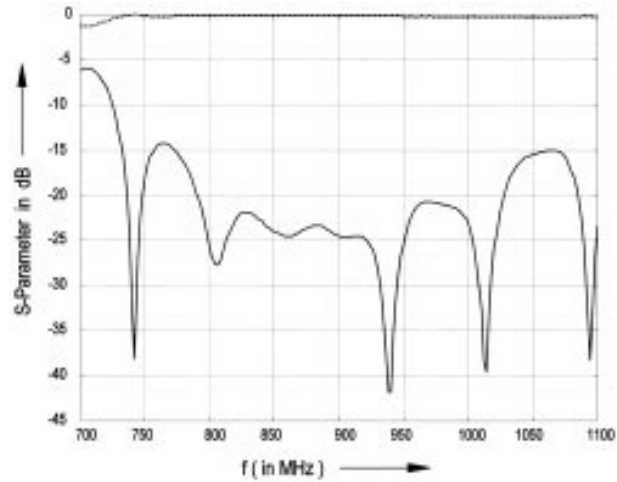


Abbildung 4.8: Streuparameter der Hohlleitung mit Übergängen (D-Netz), 30 Proben, Probenvolumen  $1 \text{ cm}^3$ , (S11 (—), S21 (- - - -))

unterschiedlichen Positionen der Proben zueinander, sind die Feldverteilungen in den Proben leicht unterschiedlich. Für eine quantitative Diskussion werden die Proben entsprechend Abbildung 4.3 durchnummeriert. Tabel-

le 1.1 gibt die elektrische Feldstärke in V/m jeweils in der Probenmitte an.

Für zwei weitere Rechnungen wurden Volumina von  $0,5 \text{ cm}^3$  und  $0,1 \text{ cm}^3$  gewählt. In den

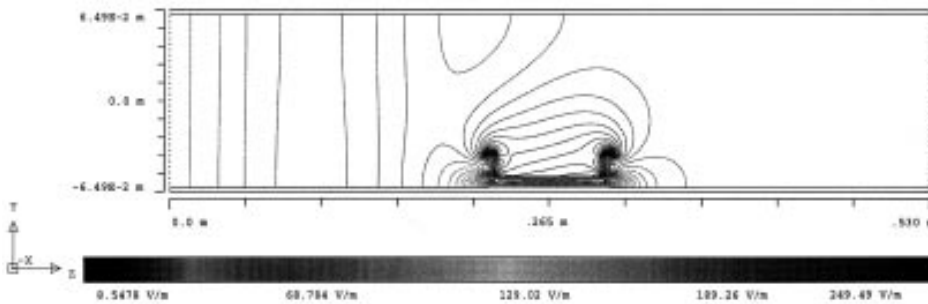


Abbildung 5.1: Betrag der elektrischen Feldstärke in der Petrischale auf der Hohlleitungsachse (D-Netz,  $\varnothing 8 \text{ cm}$ , Probenvolumen  $25 \text{ cm}^3$ )

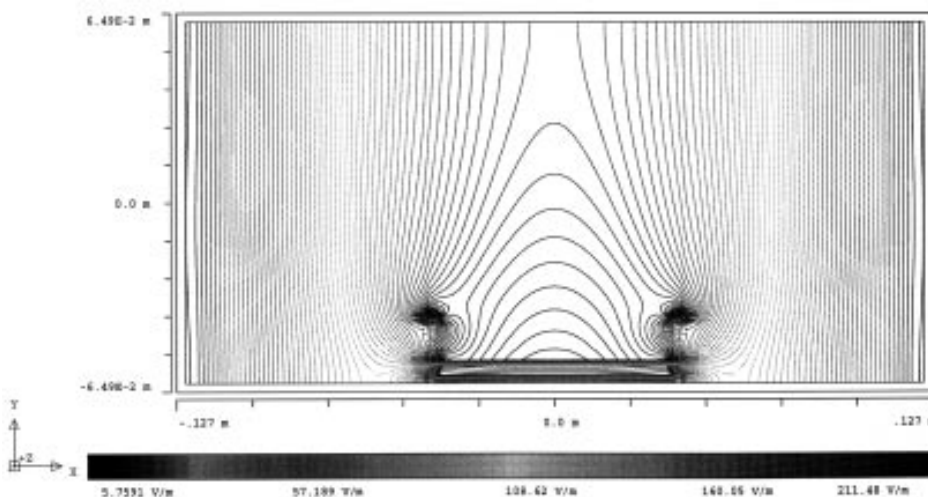
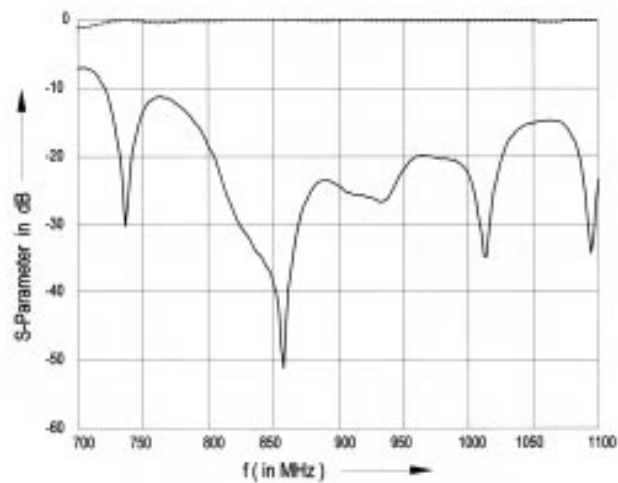


Abbildung 5.2: Betrag der elektrischen Feldstärke in der Petrischale quer zur Hohlleitungsachse (D-Netz,  $\varnothing 8 \text{ cm}$ , Probenvolumen  $25 \text{ cm}^3$ )

Abbildung 5.3:  
Streuparameter  
der Hohlleitung  
mit Übergängen  
(D-Netz),  
Petrischale,  
ø 8 cm, Proben-  
volumen 25 ml,  
(S11 (—)),  
S21 (- - - -)



durchzuführenden Experimente tolerierbar sind, ist mit dem jetzigen Kenntnisstand nicht eindeutig klärbar. Eine geringe Abweichung erhält man offensichtlich mit weniger Proben pro Experiment, allerdings ist dann auch die Anzahl der auswertbaren Proben geringer, wodurch die Basis für die statistische Auswertung schmaler wird. Da es sich hier um Experimente zum Auffinden von möglichen Effekten handelt, wurde die höhere Probenzahl als wichtigeres Kriterium eingestuft.

Abbildungen 4.4 bis 4.7 sind wieder die Pegellinien für den Längsschnitt durch die Hohlleitungsachse und für einen Schnitt quer zur Achse dargestellt. Anhand der Farbkodierung erkennt man, daß sich die Feldverteilungen in den einzelnen Proben mit Abnahme

des Probevolumens deutlich weniger unterscheiden. Dieses wird durch die Tabellen 1.2 und 1.3 bestätigt.

Die Frage, welche Abweichungen für die Feldstärke in den Proben im Rahmen der hier

Das numerisch ermittelte Ergebnis der geringen Rückwirkung der Proben auf die H<sub>10</sub>-Welle läßt sich meßtechnisch bestätigen. Dazu wurden die Streuparameter S<sub>11</sub> und S<sub>21</sub> an Probenvolumina von 1 cm<sup>3</sup> gemessen (Abb. 4.8). Der Vergleich mit Abbildung 3.1

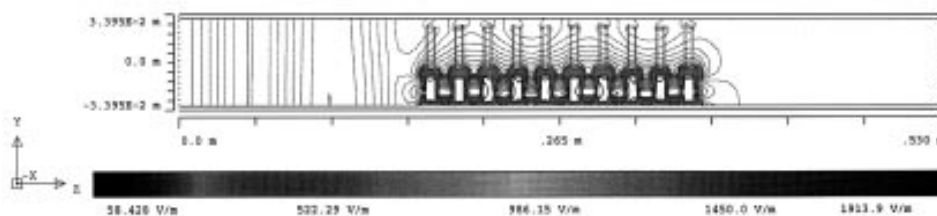


Abbildung 6.1:  
Betrag der elektrischen Feld-  
stärke, Probenreihe auf der  
Hohlleitungsachse (E-Netz, 30  
Proben, Probenvolumen 1 cm<sup>3</sup>)

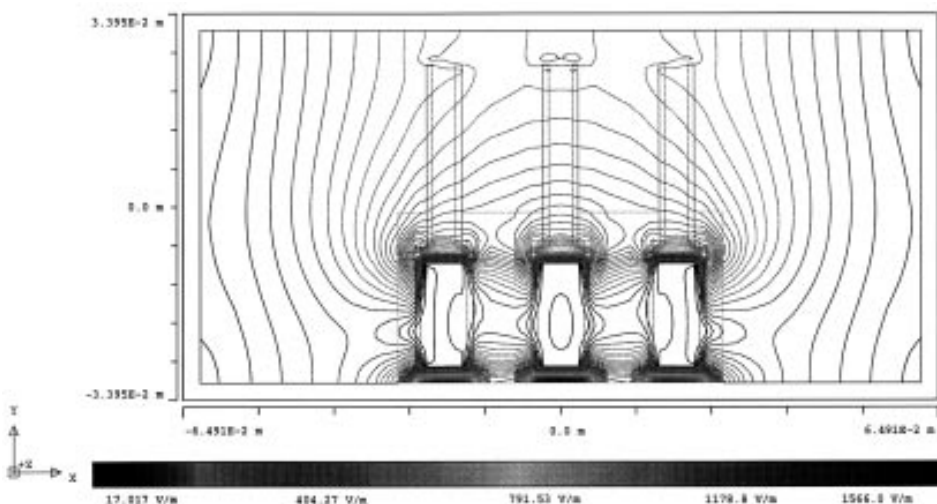


Abbildung 6.2:  
Betrag der elektrischen Feld-  
stärke, Probenreihe quer zur  
Hohlleitungsachse (E-Netz, 30  
Proben, Probenvolumen 1 cm<sup>3</sup>)

zeigt, daß bereits für diese relativ großen Proben gegenüber der leeren Hohlleitung nur unwesentliche Änderungen eingetreten sind.

Die Abbildungen 5.1 und 5.2 zeigen die berechnete Feldstärkeverteilung für eine Petrischale von 8 cm Durchmesser, die mit 25 ml der Lösung gefüllt ist. Im Vergleich zu den 30 Ampullen mit je  $1,0 \text{ cm}^3$  Probenvolumen ist die Rückwirkung nur unwesentlich höher.

Es wurden auch Streuparametermessungen an der Hohlleitungsmeßzelle, die mit einer Petrischale (Inhalt 25 ml) belastet ist, durchgeführt (Abb. 5.3). Auch in diesem Fall zeigt sich kaum eine Rückwirkung auf  $|S_{11}|$  und  $|S_{21}|$ . Es muß jedoch festgehalten werden, daß erst die ausführliche, detaillierte numerische Analyse konkrete Aussagen ermöglicht.

## 4.2 E-Netz

Die zum vorherigen Abschnitt analogen Rechnungen für das E-Netz an Volumina von  $1 \text{ cm}^3$  werden in den Abbildungen 6.1 und 6.2 dargestellt. Da der Quotient Probenvolumen/(Wellenlänge)<sup>3</sup> um den Faktor 8 größer als beim D-Netz ist, ist die Rückwirkung beim E-Netz wesentlich größer. Die Anordnung von 30 Proben führt zu einer deutlichen Fehlanpassung und Dämpfung der  $H_{10}$ -Welle, was besonders aus Abbildung 6.3 ersichtlich ist. Die Fehlanpassung äußert sich in Form einer stehenden Welle im Bereich vor den Proben, die Dämpfung in Form einer Amplitudenabsenkung hinter den Proben.

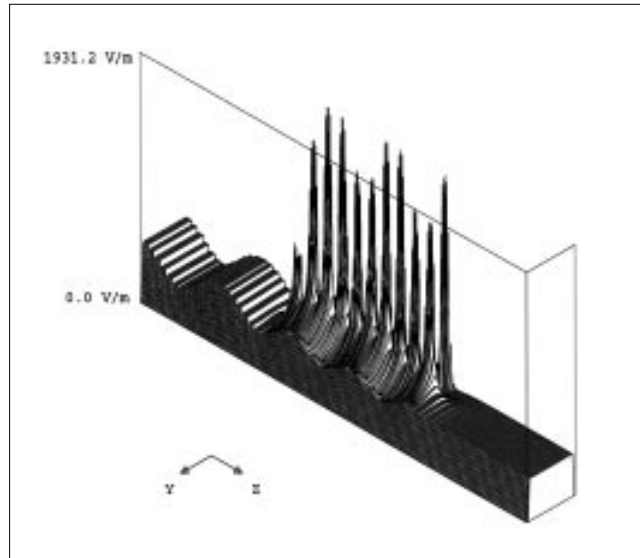


Abbildung 6.3: Betrag der elektrischen Feldstärke, Probenreihe auf der Hohlleitungsachse (E-Netz, 30 Proben, Probenvolumen  $1 \text{ cm}^3$ )

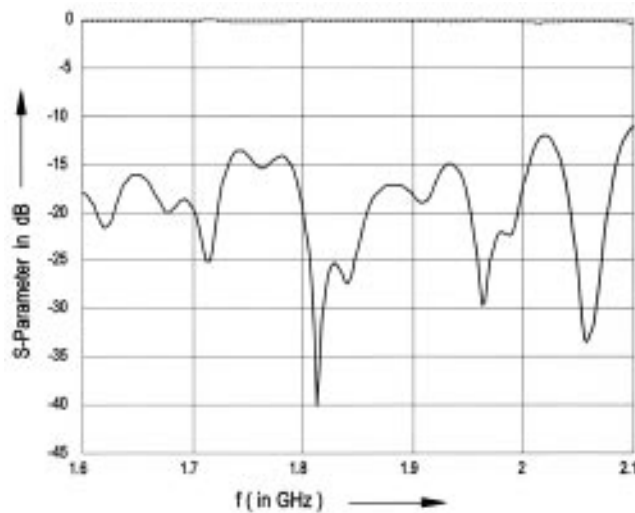


Abbildung 6.4: Streuparameter der Hohlleitung mit Übergängen (E-Netz), 20 Proben, Probenvolumen  $1 \text{ cm}^3$ , ( $S_{11}$  (—),  $S_{21}$  (- - - -))

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	35,54	38,00	36,76	32,18	33,75	38,44	37,00	31,17	31,52	40,04
2	54,45	61,86	58,13	51,58	53,81	61,99	59,06	50,22	50,74	60,22
1	35,54	38,00	36,76	32,18	33,75	38,44	37,00	31,17	31,52	40,04

Tabelle 2.1: Feldstärke [V/m] in den Proben (E-Netz, Volumen  $1,0 \text{ cm}^3$ ), Feldstärke der anregenden  $H_{10}$ -Welle auf der Hohlleitungsachse  $363,7 \text{ V/m}$ .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	10,87	10,76	10,83	10,96	11,04	10,99	10,87	10,78	10,76	10,86
1	10,87	10,76	10,83	10,96	11,04	10,99	10,87	10,78	10,76	10,86

Tabelle 2.2: Feldstärke [V/m] in den Proben (E-Netz, Volumen  $0,1 \text{ cm}^3$ ), Feldstärke der anregenden  $H_{10}$ -Welle auf der Hohlleitungsachse  $363,7 \text{ V/m}$ .

Max. Abweichung:  $\frac{|E_{Pr 1,2}|}{|E_{Pr 1,5}|} = 0,975$

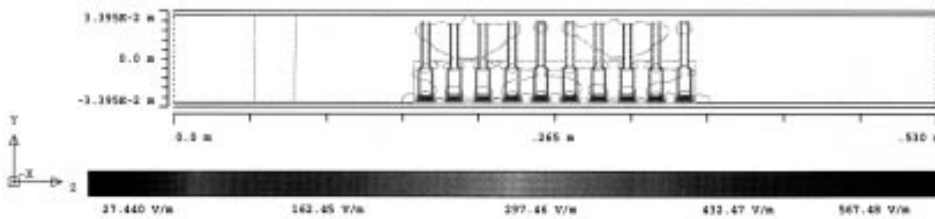


Abbildung 6.5:  
Betrag der elektrischen Feldstärke, Probenreihe bei  $x = -0,02$  m parallel zur Hohlleitungsachse (E-Netz, 20 Proben, Probenvolumen  $0,1 \text{ cm}^3$ )

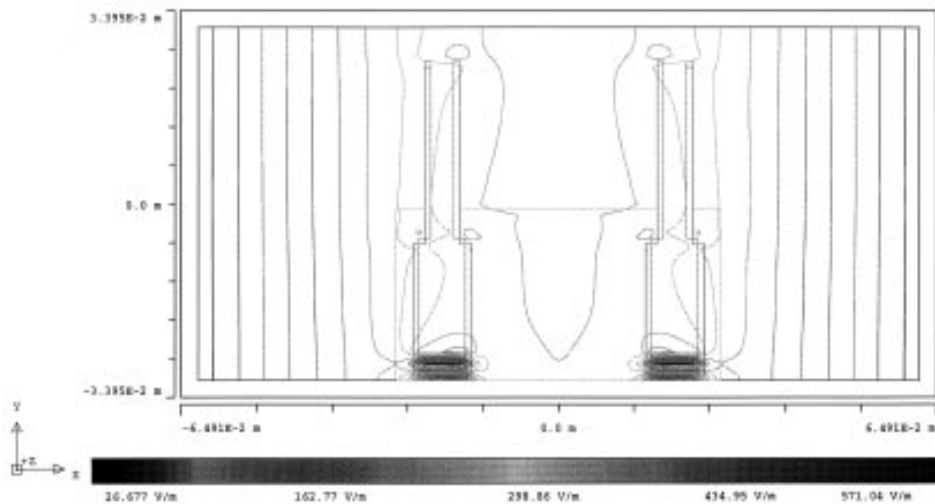


Abbildung 6.6:  
Betrag der elektrischen Feldstärke, Probenreihe bei  $z = 0,255$  m quer zur Hohlleitungsachse (E-Netz, 20 Proben, Probenvolumen  $0,1 \text{ cm}^3$ )

Auch im Bereich der Proben kommt es zu großen Feldstärkeunterschieden, wie aus Tabelle 2.1 ersichtlich.

Für die Streuparametermessungen wurde deshalb die Zahl der Pro-

ben auf 20 herabgesetzt. Abbildung 6.4 zeigt, daß  $|S_{21}|$  noch über  $-0,1$  dB und  $|S_{11}|$  unter  $-15$  dB liegt. Es ist jedoch festzustellen, daß sich der Kurvenverlauf von  $|S_{11}|$  gegenüber dem der leeren Hohlleitung geändert hat.

Erst die Verringerung des Probenvolumens auf  $0,1 \text{ cm}^3$  bei 20 Proben in zwei symmetrisch zur Hohlleitungsachse angeordneten Reihen im Abstand von  $40 \text{ mm}$  brachte die gewünschte Reduzierung der Rückwirkung (Abb. 6.5 bis 6.7). Aus Tabelle 2.2 ist ersichtlich, daß sich jetzt auch die Feldstärkewerte in den einzelnen Proben nur geringfügig unterscheiden.

Es soll jedoch betont werden, daß eine definierte und reproduzierbare Feldverteilung auch bei hoher Dämpfung erreicht werden kann. Man muß dann jedoch zusätzlich beachten, daß bei mehreren Proben in der Hohlleitung das Feld vom Ort der Probe in der Probenhalterung abhängt und daß bei einer größeren Probe die Feldverteilung in der Probe stark inhomogen sein kann.

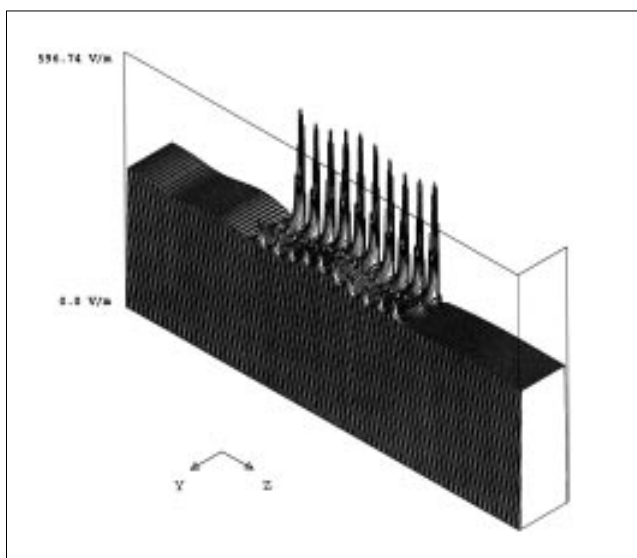


Abbildung 6.7:  
Betrag der elektrischen Feldstärke in einem Längsschnitt durch eine Probenreihe (E-Netz, 20 Proben, Probenvolumen  $0,1 \text{ cm}^3$ )

## 5. Bestimmung der Feldstärke in der Probe

### 5.1 D-Netz

#### 5.1.1 Feldstärke der ungestörten H<sub>10</sub>-Welle

Als Sender wird – wie bereits gesagt – entweder ein Mobiltelefon (D-Netz) oder ein Signalgenerator verwendet. Das Mobiltelefon wird mit Hilfe eines PCs auf den Test Modus „Senden“-Dauerbetrieb eingestellt. Die Sendefrequenz ist 900 MHz, die Sendeleistung des Mobiltelefons läßt sich in 15 Stufen einstellen. Die Versuche werden ausschließlich mit der Leistungsstufe 2, d.h. mit  $\bar{P} = 8\text{ W}$  gefahren. Dabei bezieht sich die Leistungsangabe auf die zeitlich gemittelte Sendeleistung während eines Pulses  $\bar{P}$ . Der Zusammenhang zwischen  $\bar{P}$  und der mittleren Sendeleistung ist genähert:

$$P_{\text{mittel}} = \frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0} \cdot \bar{P}$$

$$= \frac{0,577\text{ ms}}{4,614\text{ ms}} \cdot 8\text{ W} = 1\text{ W}$$

Da es sich nicht um ideale Rechteckimpulse handelt, liegt die mittlere abgegebene Leistung etwa 25 - 35 % niedriger. Dies wird durch die Anzeige des Leistungsmeßgeräts von 6,7 mW (mit 20 dB-Koppler) bestätigt. Da der Reflexionsfaktor unter 20 dB liegt, kann die reflektierte Leistung vernachlässigt werden.

Beim Einsatz des Signalgenerators wurde mit  $\bar{P} = 8\text{ W}$  und  $\bar{P} = 2\text{ W}$  Sendeleistung gearbeitet.

Die Feldkomponenten der H<sub>10</sub>-

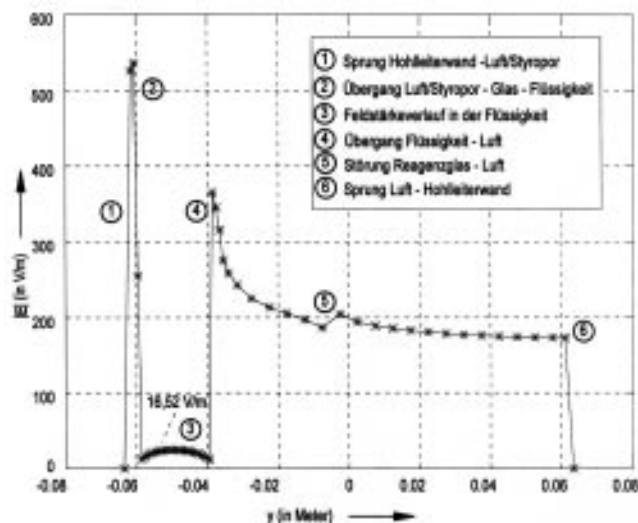


Abbildung 7.1: Betrag der elektrischen Feldstärke in der Hohlleitung auf einer Linie, die senkrecht durch die Probe (2,5) führt (D-Netz, 30 Proben, Probenvolumen 1 cm<sup>3</sup>)

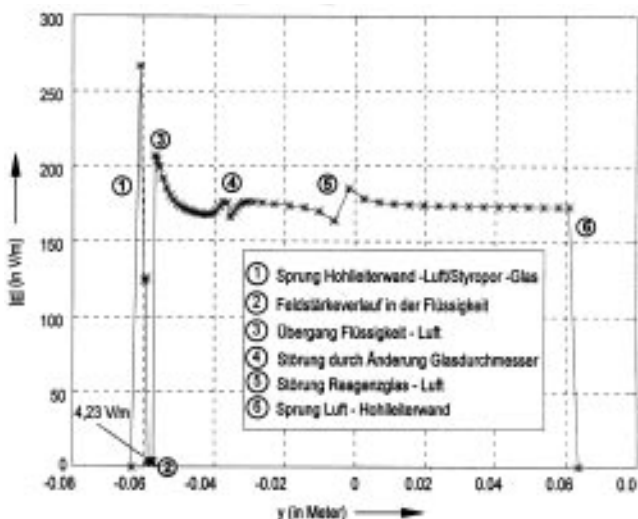


Abbildung 7.2: Betrag der elektrischen Feldstärke in der Hohlleitung auf einer Linie, die senkrecht durch die Probe (2,5) führt (D-Netz, 30 Proben, Probenvolumen 0,1 cm<sup>3</sup>)

Welle berechnen sich aus den Gleichungen

$$H_z = H_0 \cos(k_x x) e^{-jk_z z}$$

$$E_y = \frac{-j\omega\mu_0}{k_x} H_0 \sin(k_x x) e^{-jk_z z}$$

$$H_x = j \frac{k_z}{k_x} H_0 \sin(k_x x) e^{-jk_z z}$$

mit  $k_x = \pi/a$  und  $k_z = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - k_x^2}$  und die transportierte Leistung aus der Gleichung

$$P = \frac{1}{4} ab \frac{k_z}{k_x^2} \omega \mu_0 H_0^2$$

Damit ergibt sich der Betrag  $|E_{y0}|$  der Feldstärke in der Mitte der

Hohlleitung, bezogen auf die Wurzel der transportierten Leistung, zu

$$\frac{|E_{y0}|}{\sqrt{P}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\frac{1}{4}abk_z}} \quad (1)$$

Als zugeschnittene Größengleichung ergibt sich für  $f = 900\text{ MHz}$

$$\frac{|E_{y0}|^2}{P} = 6,651 \cdot 10^{-2} \frac{\Omega}{\text{mm}^2}$$

oder

$$|E_{y0}| = 258 \sqrt{P[\text{W}]} \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (2)$$

Für  $\bar{P}$  ist hier die zeitlich gemittelte Leistung während eines Impulses einzusetzen.



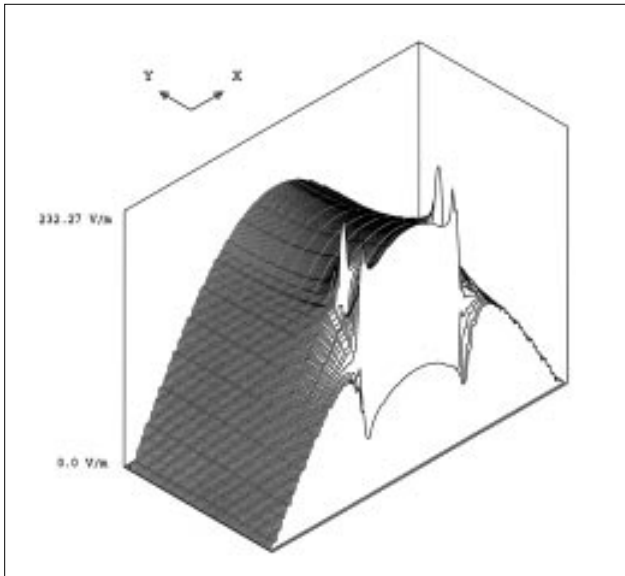


Abbildung 8.1: Betrag der elektrischen Feldstärke in der Hohlleitung mit Petrischale in der Ebene  $z = 0,265$  m quer zur Hohlleitungsachse (D-Netz,  $\varnothing$  8 cm, Probenvolumen  $25 \text{ cm}^3$ )

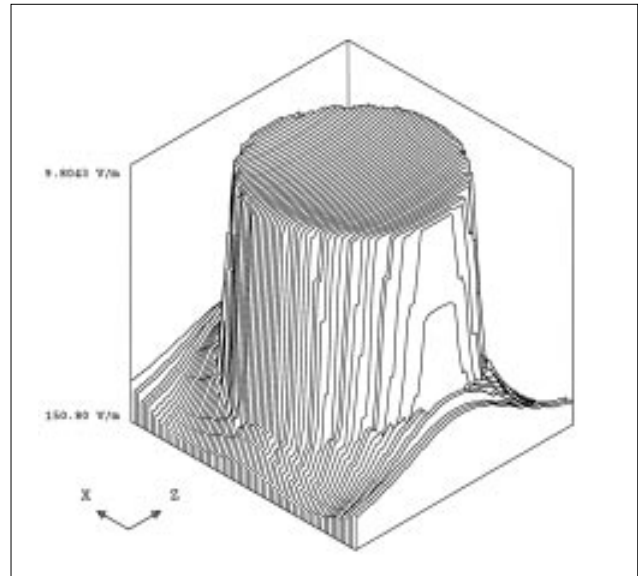


Abbildung 8.2: Betrag der elektrischen Feldstärke in der Hohlleitung mit Petrischale in der Ebene  $y = -0,057$  m parallel zur Hohlleitungsachse (D-Netz,  $\varnothing$  8 cm, Probenvolumen  $25 \text{ cm}^3$ , Abstand vom Boden der Schale 3,5 mm)

## 5.1.2 Feldstärke und spezifische Absorptionsrate (SAR) in den Proben

Die Abbildungen 7.1 und 7.2 zeigen die Beträge der elektrischen Feldstärke entlang der Mittelachse der Probe (2,5) für  $1,0 \text{ cm}^3$  und  $0,1 \text{ cm}^3$  Probenvolumen. Zur Verdeutlichung der auftretenden Effekte sind die einzelnen Abschnitte der Kurven mit Hilfe von Ziffern der Geometrie zugeordnet. Anhand dieser Ergebnisse läßt sich eine zunächst widersprüchlich erscheinende Aussage der Tabellen 1.1 bis 1.3 deuten: Aufgrund der hohen Dämpfung der Flüssigkeit würde man vermuten, daß die Feldstärke im Inneren des  $0,1 \text{ cm}^3$  Volumens größer ist als die im  $1,0 \text{ cm}^3$  Volumen. Da jedoch mit der Reduzierung der Höhe des zylindrischen Meßvolumens auch der Anteil der Oberfläche parallel zu dem anregenden Feld abnimmt, verringert sich auch die Höhe des eingekoppelten Feldes.

Die Berechnung der SAR-Werte in den Proben wird für den geometrischen Probenmittelpunkt durchgeführt. Aus Gleichung 2 ergibt sich bei  $\bar{P} = 8 \text{ W}$  Sendeleistung während eines Bursts für die Feldstärke auf der Mittelachse der Hohlleitung

$$|E_{y0}| = 729 \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

Die numerischen Untersuchungen wurden für  $|E_{y0}| = 181,6 \text{ V/m}$  durchgeführt, so daß sich ein Umrechnungsfaktor von

$$F_D = 4,01$$

ergibt. In der Mitte der Probe (2,5) mit  $0,1 \text{ cm}^3$  Volumen tritt folglich bei  $\bar{P} = 8 \text{ W}$  während eines Bursts eine Feldstärke von  $16,96 \text{ V/m}$  auf. Die spezifische Absorptionsrate SAR berechnet sich aus

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

mit  $\kappa = 0,33 \text{ 1}/\Omega\text{m}$  und  $\vec{E}$  gleich der elektrischen Feldstärke in

dem betrachteten Aufpunkt. Man erhält für SAR während eines Bursts von  $8 \text{ W}$

$$\text{SAR} (8\text{W}) = 0,047 \frac{\text{W}}{\text{kg}}.$$

Für die Materialdichte  $\rho$  wird  $1000 \text{ kg/m}^3$  angesetzt.

Bei einer Sendeleistung von  $2 \text{ Watt}$  ist die Feldstärke mit dem Faktor  $0,5$  und der SAR-Wert mit dem Faktor  $0,25$  zu multiplizieren.

Zur Berechnung des zeitlich gemittelten SAR-Wertes bei Gesprächsmodus ist anstelle der Leistung  $\bar{P}$  die gemittelte Sendeleistung  $P_{\text{mittel}}$  einzusetzen. Man erhält dort für die Proben mit  $0,1 \text{ cm}^3$  Volumen

$$\text{SAR} (8\text{W})_{\text{mittel}} = 5,93 \frac{\text{mW}}{\text{kg}}.$$

Die Feldverteilung in der Petrischale ( $25 \text{ cm}^3$  Komplettagar hat eine Höhe von  $5 \text{ mm}$ ) ist aus den

Höhe in Probe	0,5 mm	1,5 mm	2,5 mm	3,5 mm	4,5 mm
$ \vec{E} $ in V/m	4,40	6,67	8,23	9,80	11,04

Tabelle 3: Feldstärke [V/m] auf der Mittelachse der Petrischale (D-Netz, Volumen 25 cm<sup>3</sup>), Feldstärke der anregenden H<sub>10</sub>-Welle auf der Hohlleitungsachse 181,6 V/m.

Abbildungen 8.1 und 8.2 und der Tabelle 3 ersichtlich.

Dabei ist zu beachten, daß in Abbildung 8.2 der Wert  $|\vec{E}| = 0$  oberhalb der Darstellung liegt, damit bei der perspektivischen Darstellung der Feldstärkeverlauf in der Probe nicht durch den Verlauf außerhalb der Probe verdeckt wird. Die Feldstärke hat am Rand und am Boden der Petrischale ihre niedrigsten Werte. In der Probenmitte ist die numerisch ermittelte Feldstärke 8,23 V/m. Im Versuch ergibt sich damit eine Feldstärke von  $4,01 \cdot 8,23 \text{ V/m} = 33,00 \text{ V/m}$  ( $\bar{P} = 8 \text{ W}$ ) und eine spezifische Absorptionsrate ( $\kappa = 1,6 \text{ 1}/\Omega\text{m}$ )

$$\text{SAR (8W)} = 0,871 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

und

$$\text{SAR (8W)}_{\text{mittel}} = 109 \frac{\text{mW}}{\text{kg}}.$$

## 5.2 E-Netz

### 5.2.1 Feldstärke der ungestörten H<sub>10</sub>-Welle

Als Sender wird nun ein Mobiltelefon (E-Netz, 1,8 GHz) im Testbetrieb eingesetzt. Die Sendeleistung während eines Bursts beträgt

$$\bar{P} = 1 \text{ W}$$

Damit ergibt sich  $P_{\text{mittel}} = 0,125 \text{ W}$ . Die vom Leistungsmeßgerät angezeigte Leistung von 9,7 mW (mit 10 dB-Koppler) liegt damit

in der vom Hersteller angegebenen Toleranz. Aus Gleichung 1 ergibt sich mit den Abmessungen der E-Netz Meßzelle für  $f = 1800 \text{ MHz}$

$$|E_{y0}| = 484,5 \cdot \sqrt{\bar{P}[\text{W}]} \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

### 5.2.2 Feldstärke und spezifische Absorptionsrate (SAR) in den Proben

Die Abbildungen 9.1 und 9.2 zeigen die Beträge der elektrischen Feldstärke entlang der Mittelachse der Probe (1,5) bei der zweireihigen Anordnung für  $1,0 \text{ cm}^3$  und  $0,1 \text{ cm}^3$ . Auch bei 1,8 GHz erhält man eine Verringerung der Feldstärke im Probenvolumen bei dessen Reduzierung.

Nach Gleichung 2 erhält man für die Feldstärke auf der Mittelachse während eines Bursts bei  $\bar{P} = 1 \text{ W}$

$$|E_{y0}| = 484,5 \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

Die numerischen Untersuchungen wurden für  $|E_{y0}| = 363,7 \text{ V/m}$  durchgeführt, so daß sich ein Umrechnungsfaktor von

$$F_D = 1,33$$

ergibt. In der Mitte der Probe (1,5) mit  $0,1 \text{ cm}^3$  Volumen tritt folglich bei  $\bar{P} = 1 \text{ W}$  während eines Bursts eine Feldstärke von  $14,68 \text{ V/m}$  auf. Für SAR erhält man mit  $\kappa = 0,81 \text{ 1}/\Omega\text{m}$

$$\text{SAR (1W)} = 0,087 \frac{\text{W}}{\text{kg}}.$$

Der zeitlich gemittelte SAR-Wert bei Gesprächsmodus ist damit

$$\text{SAR (1W)}_{\text{mittel}} = 10,91 \frac{\text{mW}}{\text{kg}}.$$

## 6. Photometrische Untersuchungen

### 6.1 Meßaufbau

Die photometrische Untersuchung der Absorption von Licht bei bestimmten Wellenlängen ist eine sehr effektive Untersuchungsmethode im Rahmen der Molekularbiologie. Hierbei handelt es sich um ein sehr empfindliches Meßverfahren, das insbesondere gegenüber unerwünschtem Lichteinfall geschützt sein muß. Die Durchführung solcher Untersuchungen erfolgt üblicherweise mit kommerziellen Meßgeräten. Bei Experimenten zur Beeinflussung von biologischen Proben durch hochfrequente elektromagnetische Wellenfelder muß die Probe während des Experiments einem definierten Feld ausgesetzt werden, wobei die besondere Problematik darin besteht, daß das vorwiegend metallische Photometer nicht insgesamt dem Feld ausgesetzt werden kann und auch der eigentliche metallische Probenhalter die Probe fast komplett umschließt. Aus diesem Grund wurde eine Feldexpositionseinrichtung entworfen, die die biologische Probe in einer quaderförmigen Kunststoff- oder Quarzglasküvette direkt umschließt und zusammen mit der Küvette in den Probenhalter eingeführt wird. Die Expositionseinrichtung auf der Grundlage einer Bandleitung wurde so dimensioniert und optimiert, daß bei ge-

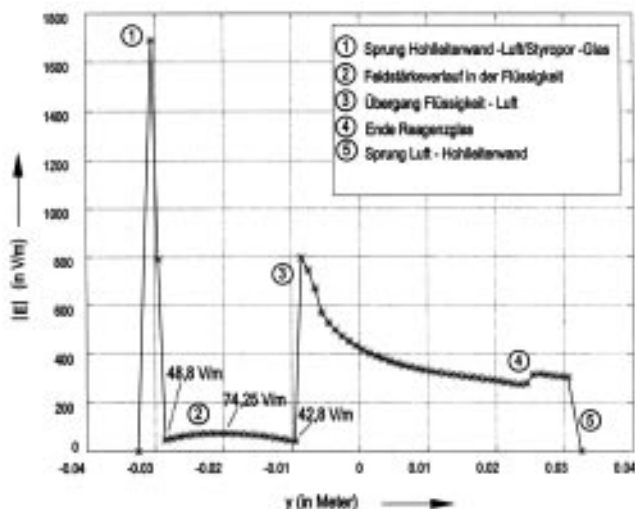


Abbildung 9.1: Betrag der elektrischen Feldstärke in der Hohlleitung auf einer Linie, die senkrecht durch die Probe (1,5) führt (E-Netz, 20 Proben, Probenvolumen 1 cm<sup>3</sup>)

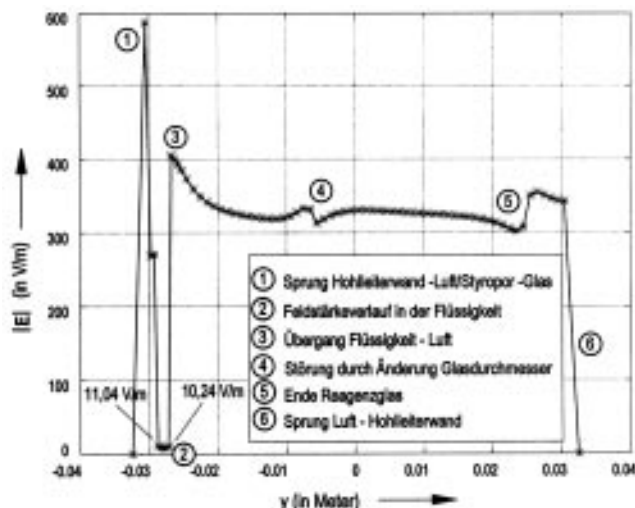


Abbildung 9.2: Betrag der elektrischen Feldstärke in der Hohlleitung auf einer Linie, die senkrecht durch die Probe (1,5) führt (E-Netz, 20 Proben, Probenvolumen 0,1 cm<sup>3</sup>)

Wände des Probenhalters zu erreichen, wurde die Feldexpositionseinrichtung auf der Grundlage einer Bandleitung entworfen. Um möglichst geringe Reflexionen des HF-Signals, das mit einer 50-Ω-Koaxialleitung zugeführt wird, zu erhalten, muß die Bandleitung so dimensioniert werden, daß ihr Wellenwiderstand bei Füllung mit einer wäßrigen Flüssigkeit und Vorhandensein des metallischen Probenhalters 50 Ω beträgt. Bei Annahme eines verlustfreien Dielektrikums ergibt sich der Leitungswellenwiderstand einer idealen Bandleitung (ohne Streufelder) zu

$$Z_L = Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{a}{b}$$

wobei  $Z_0$  der Feldwellenwiderstand des freien Raums ist (Def. von a,b siehe Abb. 10.1). Aufgrund der hohen Dielektrizitätskonstante einer wäßrigen Probe ist die Annahme, daß das Feld sehr stark zwischen den beiden Leitern konzentriert ist, sehr gut erfüllt. a ist durch die Abmessungen der Küvetten zu  $a = 13$  mm vorgegeben. Mit einem  $\epsilon_r = 80$  ergibt sich  $b = 11$  mm. Die metallische Umhüllung durch den Probenhalter führt zu einer Verringerung des Feldwellenwiderstands, weshalb eine Breite  $b = 7$  mm gewählt wurde. Die Metallisierungen der Bandleitung wurden auf

gebener zugeführter Leistung mit einer wasserähnlichen Probe ein möglichst geringer Anteil der Leistung reflektiert wird.

strahl eingeführt. Um eine möglichst homogene Feldverteilung in der Probenflüssigkeit und eine möglichst geringe Beeinflussung des Feldes durch die metallischen

## 6.2 Aufbau des Meßplatzes

In Abbildung 10.1 ist der Probenhalter des verwendeten Photometers zu sehen. Die Kunststoff- oder Quarzglas-Küvetten werden jeweils in einen rechteckigen metallischen Hohlraum mit einem Durchsichtfenster für den Licht-

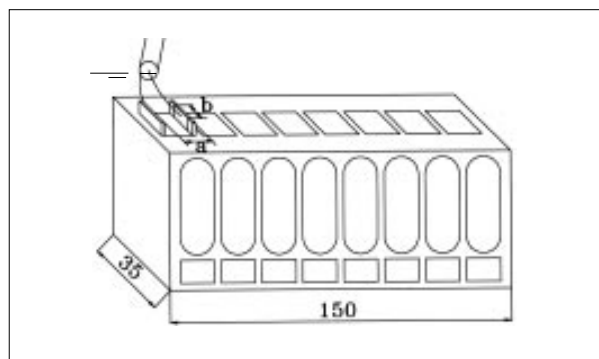


Abbildung 10.1: Probenhalter mit Bandleitungsmeßzelle

einem Epoxidharzträgermaterial mit einer Dicke von ca. 1,5 mm geätzt (siehe Abb. 10.2). In dem Bereich, wo die Bandleitung die metallische Umhüllung des Probenhalters verläßt, vergrößert sich die Breite der Metallisierungen auf  $b = 10$  mm. Das Ende der Bandleitung ist mit zwei parallel geschalteten 100- $\Omega$ -Widerständen (entsprechend 50  $\Omega$ ) abgeschlossen. Ein Blockschaltbild des gesamten Versuchsaufbaus ist in Abbildung 10.3 zu sehen. Neben der Bandleitungsmeßzelle wurden als Sender, Verstärker, Richtkopppler und Leistungsmesser die gleichen Komponenten verwendet, wie sie in Abschnitt 3 aufgeführt sind.

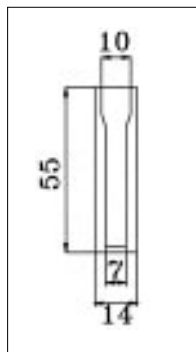


Abbildung 10.2: Struktur eines Leiterbandes

durch die Bandleitung transportierte Leistung ist damit

$$P_{BL} = 0,75 \cdot P_0 .$$

Demzufolge ist die Amplitude der Spannung der Bandleitungswelle

$$|U| = \sqrt{P_0 \cdot 0,75 \cdot 2 \cdot 50\Omega}$$

und die elektrische Feldstärke in der Probe

$$|E| = \frac{\sqrt{P_0 \cdot 75\Omega}}{a} .$$

Somit ergibt sich für  $P_0 = 1$  W und  $a = 13$  mm eine elektrische Feldstärke von etwa  $|E| = 666$  V/m.

## 7. Resümee

Es wurde eine Meßanordnung zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Wellenfelder auf biologische Systeme unter besonderer Berücksichtigung der hochfrequenztechnischen Aspekte konzipiert und realisiert, die als Hauptkompo-

nente eine Hohlleitungsmeßzelle enthält.

Die durchgeführten Testrechnungen und -messungen belegen, daß bei Verwendung der in D- und E-Netz-Mobilfunksystemen üblichen Frequenzen und Sendeleistungen eindeutige und reproduzierbare und in gewissen Grenzen sogar gleichmäßige Feldexpositionen der Proben erzielbar sind, solange entsprechende Untersuchungsbedingungen (z.B. bis zu 30 Ampullen mit max. 0,1 cm<sup>3</sup> Probenvolumen bei D-Netz-Frequenzen) eingehalten werden. Für verschiedene Probenanordnungen wurden die zu erwartenden Feldstärke- und SAR-Werte angegeben.

Es muß jedoch betont werden, daß sowohl durch Variation der Probenanordnungen bzw. -füllmengen als auch durch Verwendung anderer Gefäßformen (hier sei auf die Untersuchungen mit der Petrischale verwiesen) mit deutlichen Veränderungen der Feldverteilungen und Strahlungsbelastungen gerechnet werden muß.

Der für die Durchführung von photometrischen Untersuchungen mit einheitlichen quaderförmigen Kunststoff- oder Quarzglas- küvetten vorgestellte Meßaufbau auf der Grundlage einer Bandleitungsmeßzelle erlaubt eine direkte und definierte Einprägung des Feldes in die Probe. Dies war aufgrund des metallischen Probenhalters unabdingbare Voraussetzung für die Durchführung der Versuche bei gleichzeitiger photometrischer Probenüberwachung. Allerdings ist eine solche Vorgehensweise nur schwer auf veränderte Versuchsbedingungen (z.B. andere Probenhalter) anpaßbar.

## 6.3 Abschätzung der Expositionsfeldstärke

Bei der Berechnung der elektrischen Feldstärke in der Probe wird davon ausgegangen, daß die Feldstärkeverteilung zwischen den beiden Metallisierungsbandern homogen ist (ideale Bandleitung, Vernachlässigung des Küvettengehäuses). Der Leitungswellenwiderstand wird zu 50  $\Omega$  angenommen. Eine Messung des Reflexionsfaktors der Bandleitungsmeßzelle ergab bis zu Frequenzen von ca. 2 GHz Werte von etwa  $r = -6$  dB, was bedeutet, daß 25 % der zugeführten Leistung  $P_0$  reflektiert werden. Die

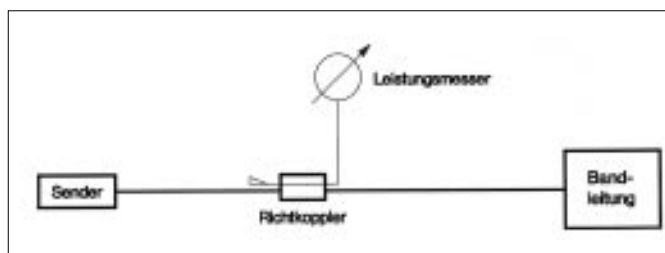


Abbildung 10.3: Meßplatz-aufbau

## LITERATUR

- [1] Belyaev et al.: The Effect of Weak Static and Alternating Magnetic Fields on the Genome Conformational State of E. Coli Cells; Bioelectromagnetics Society, 16th Annual Meeting, Copenhagen, 1994
- [2] Belyaev et al.: Evidence for Dependence of Resonant Frequency of Millimeter Wave Interaction with E. Coli K12 Cells on Haploid Genome Length; *Electro Magnetobiol.* 12 (1), 1993
- [3] Davydov: Excitons and Solitons in Molecular Systems; *Int. Rev. Cytol.* 106 (1), 1987
- [4] Polozow: Nonlinear Waves in DNA and Regulation of Transcription; *J. Theor. Biol.* 130 (4), 1988
- [5] Polunin et al.: Dependence of Frequency of Resonance Interaction Between Living Cells and Low Intensity Millimeter waves on Genome Length; Bioelectromagnetics Society, 16th Annual Meeting, Copenhagen, 1994
- [6] Elder & Cahill: Biological Effects of Radiofrequency Radiation; EPA-600/8-83-026F, 1984
- [7] Blackman et al.: Empirical Test of an Ion Parametric Resonance Model ...; *Annual Review of Research on Biological Effects of Electric and Magnetic Fields from Generation, Delivery and Use of Electricity*, Savannah, 1993
- [8] McLeod et al.: Parallel AC and DC Magnetic Fields alter the SOS Response of E. Coli; Bioelectromagnetics Society, 16th Annual Meeting, Copenhagen, 1994
- [9] Davies et al.: An EMF-Effect Using the Diatom-System; *Annual Review of Research on Biological Effects of Electric and Magnetic Fields from Generation, Delivery and Use of Electricity*, Savannah, 1993
- [10] Polk: Ion Precessional Magnetic Resonance; Bioelectrical Repair and growth Society, 7th Annual Meeting, Toronto, 1987
- [11] Jacobson: BCEC Gravitational Circuits and Jacobson Resonance; International Assoc. for Biolog. Closed Electric Circuits, Stockholm, 1993
- [12] Chiabrera et al.: Interaction Mechanisms in Bioelectromagnetics: From the Langevin-Lorentz Model to the Zeemann-Stark Model; Bioelectrical Repair and Growth Society, 11th Annual Meeting, Scottsdale, 1991
- [13] Adey: Whispering between Cells; *Front Perspect* 3 (2), 1993
- [14] Scaiano: in Health Effects of Electromagnetic Fields Remains Unresolved; *C&EN*, Nov. 8, 1993
- [15] Grundler: Resonant Microwave Effect on Locally Yeast Microcolonies; *Zeitschrift für Naturforschung* 44c, 1989
- [16] Harkins et al.: Magnetic Field Effects on B12 Ethanolamine Ammonia Lyase: Evidence for a Radical Mechanism; *SCIENCE*, Vol. 263, 1994
- [17] Lednev: Interference of the Vibrational Energy Sublevels of the Ion Bound in the Calcium Binding Proteins...; Bioelectromagnetic Society, 16th Annual Meeting, Copenhagen, 1994
- [18] Adey: Whispering between Cells; *Front Perspect* 3 (2), 1993
- [19] Blackman: in Schutz vor elektromagnetischer Strahlung beim Mobilfunk; *BMU-Veröffentlichungen der SSK*, Band 22, 1992
- [20] Bawin: in Schutz vor elektromagnetischer Strahlung beim Mobilfunk; *BMU-Veröffentlichungen der SSK*, Band 22, 1992

- [21] Sheppard: in Schutz vor elektromagnetischer Strahlung beim Mobilfunk; BMU-Veröffentlichungen der SSK, Band 22, 1992
- [22] Shaslow: Acousto-Electrical Vibrational Modes of Biological Membranes; European Bioelectromag. Assoc., 2nd Congress, Slovenia, 1993
- [23] Golant: Resonant Effect of Coherent Millimeter Band Electromagnetic Waves on Living Organisms; Biofizika 34 (6), 1989
- [24] Eichwald & Kaiser: Model for Receptor Controlled Cytosolic Calcium Oscillations...; Biophysical Journal, Vol. 65, 1993
- [25] Grundler et al.: Mechanisms of Electromagnetic Interaction with Cell Systems; Naturwissenschaften, 79, 1992
- [26] Kirschvink: in Polk: Physical Mechanisms for Biological Effects of Low Field Intensity ELF Magnetic Fields; Internat. Symp. on Biological Effects of Magnetic and Electromagnetic Fields, Fukuoka, Japan, 1993
- [27] van Zandt: DNA Plasmon; Physical Review Letters, Vol 61, 1988

### Summary:

# DNA and Protein Exposed to Modulated RF Fields

Prof. Dr. W. Rüger, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Biologie, AG Molekulare Genetik (Part One)

Prof. Dr.-Ing. V. Hansen, Universität-GHS-Wuppertal, Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik (Part Two)

## PART ONE

There is increasing discussion on biological damage in organisms that had been exposed to electromagnetic radiation. Exposures of men to electromagnetic fields are connected with modern life and practically these exposures, as e.g. caused by TV, radio and mobile telephones, cannot be avoided. However, there are fears that these exposures might cause mutations and induce cancer.

For many reasons, procaryotic organisms are useful in tracing biological damage inflicted by physical or chemical agents. Therefore, we designed simple experiments that should allow to test the effects of electromagnetic fields on biological material.

Since damages as mentioned above, often occur at that level of DNA or of proteins binding to DNA, we designed simple experiments with the aim to test whether DNA or proteins may be damaged if exposed to an electromagnetic field. All samples were exposed in a waveguide as described above in volumes of 0,1 ml, with the exception of the agar plates applied in the mutagenicity experiments.

Thus, we tested the survival of bacteriophages over a total exposure time of three months and we did not find any reduction of the survival as compared to control phages which had not been exposed but remained under otherwise unchanged conditions.

The conclusions drawn from these results are, that neither the DNA nor the sensitive proteins of this virus were damaged in the electromagnetic field.

Likewise, we have exposed closed circular DNA. The introduction of single or double strand breaks would become visible after electrophoresis on polyacrylamide gels by changing the migration velocity. No differences were observed among samples exposed to the electromagnetic field as compared to controls outside the field.

Further we tested mutagenicity of four bacterial strains, lacking different DNA repair mechanisms. No increased mutagenicity was observed during a one week exposure to the electromagnetic field.

Following the ideas that electromagnetic radiation might damage or change hydration of macromolecules we tested as to whether DNA exposed to an electromagnetic field was partially denatured. But also in these experiments no shifts in the optical densities could be observed with the samples exposed in a waveguide and unexposed controls. Also, the kinetics of the enzyme  $\beta$ -galactosidase remained identical in samples exposed to the field and unexposed controls.

Since no detectable damage could be detected in the experiments described above, we conclude that the electromagnetic fields over the time applied in our experiments, do not induce damage to DNA or proteins in general.

## PART TWO

The main components of the test assemblies for exposing the biological material to modulated radio frequency radiation are two rectangular hollow waveguides. They were designed for fundamental mode operation ( $TE_{01}$ -mode) with low standing wave ratios at frequencies around 900 MHz (cut-off frequency  $f_c = 606$  MHz) and 1750 MHz ( $f_c = 1158$  MHz), respectively. Detailed technical data of the waveguides and the measured reflection and transmission coefficients are given.

Up to 30 test tubes containing  $0.1 \text{ cm}^3 - 1 \text{ cm}^3$  of the culture medium were placed into the waveguides. They were exposed to RF power of levels typically used in mobile communication systems. In order to verify the achievement of well-defined, reproducible and substantially uniform exposures of the culture medium extensive numerical calculations were also performed. The electrical properties of the biological material were determined by measurements.

The distributions of the electromagnetic field strengths and values of the specific absorption rates are given for different arrangements of the test tubes inside the waveguides.

It must be emphasized, however, that every change of the arrangement or volume of the culture medium as well as the use of other containers may cause drastical changes of the electromagnetic field distributions and the radiation exposures.

To fulfill the specific requirements of the photometric measurements a parallel-plate waveguide was built up which provides a pure propagating TEM-wave and a homogeneous exposure of the material under test. The design criteria are discussed in detail.



## 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**