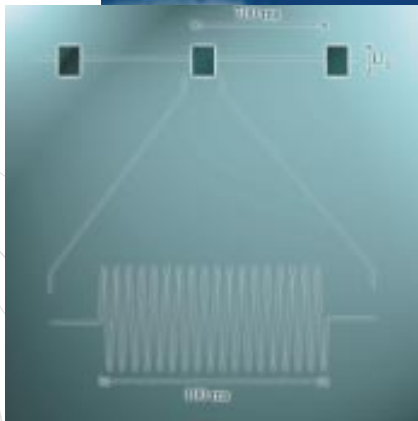


Newsletter

Edition Wissenschaft

Forschungsgemeinschaft Funk e.V. · G 14515 · Ausgabe Nr. 11 · September 1996



Leitfaden für Experimente

zur Untersuchung der Wirkung
hochfrequenter elektromagnetischer
Felder auf biologische Systeme

- Hochfrequenztechnische Aspekte -

Von V. Hansen



Forschungsgemeinschaft Funk

Edition
Wissenschaft

Editorial

Liebe Leserinnen und Leser,

die Forschungen zu den Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Mensch und Umwelt haben sich in den letzten Jahren intensiviert. Für die Durchführung und Auswertung der Studien werden unterschiedliche Kriterien angewandt. Auch aufgrund der Komplexität der zu untersuchenden Forschungsobjekte sind Vergleiche der Ergebnisse ähnlicher Experimente nur bedingt oder gar nicht möglich.

Um hier für künftige Forschungen bessere, d.h. einheitlichere Ausgangsbedingungen zu schaffen, haben sich Wissenschaftler auf Initiative der Forschungsgemeinschaft Funk die Aufgabe gestellt, einen „Leitfaden für Experimente zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme“ zu erstellen. Der Leitfaden behandelt zwar insbesondere die technischen Aspekte der Experimente, richtet sich aufgrund der Interdisziplinarität des Forschungsthemas aber auch an Fachbereiche wie Biologie, Physik, Chemie, Medizin und Elektrotechnik.

Die Federführung zur Erstellung des „Leitfadens“ liegt bei Prof. Dr.-Ing. Volkert Hansen von der Bergischen Universität-GHS Wuppertal.

Gerd Friedrich

Inhalt

Studie: Leitfaden für Experimente zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme	3
1 Einleitung	3
2 Ziel der Experimente	5
2.1 Aufdeckung von möglichen Wechselwirkungen	5
2.2 „Nachweis“ des Ausschlusses von Wechselwirkungen	5
2.3 Bestätigung oder Widerlegung von theoretischen Konzepten und von Hypothesen	5
2.4 Wiederholung von Experimenten zur Bestätigung oder Widerlegung von publizierten Ergebnissen	5
3 Allgemeine Forderungen an die Experimente	6
4 Kriterien zur Auswahl der HF-Meßanordnung	7
4.1 Feldverteilung vor Einbringen des Meßobjekts	7
4.2 Größe des Meßvolumens	7
4.3 Frequenz, Bandbreite	7
4.4 Bestimmbarkeit der Feldverteilung im Meßobjekt	7
4.5 Abschirmen von Fremdeinflüssen, insbesondere von externen Feldern	8
4.6 Besondere meßtechnische Forderungen	8
4.7 Biologische/physiologische Erfordernisse	8
5 Klassifizierung von elektromagnetischen Feldern	8
5.1 Vorbemerkungen	8
5.2 Strahlungsfelder	9
5.3 Wellen auf offenen Leitungen	10
5.4 Fortschreitende Wellen auf geschirmten homogenen Leitungen	10
5.5 Fortschreitende Wellen auf geschirmten inhomogenen Leitungen	12
5.6 Stehende Wellen auf geschirmten homogenen Leitungen	13
5.7 Leitungsresonatoren	13
6 Kriterien zur Auswahl der Signalform	14
6.1 Allgemeine Bemerkungen	14
6.2 Auswahl der Signalform anhand des Ziels des Experiments	14
7 Beispiele	16
7.1 Untersuchungen an Kulturen mit Bakterien und Viren	16
7.2 Untersuchung an einzelnen Zellen	18
7.3 Untersuchungen zu möglichen Beeinflussungen des EEG's von Versuchspersonen	21
8 Literatur	13
Anhang	
A Checkliste für die Planung und Durchführung von Messungen (Schriftenreihe Umwelt Nr. 164 des BUWAL, Schweiz, 1992)	24
B Numerische Verfahren zur Analyse von Feldproblemen	25
C Prüfsignal aus EN 50061/A1, Entwurf November 1995	30
Summary: Guidelines for experiments to investigate the effect of high frequency electromagnetic fields on biological systems	31

Leitfaden für Experimente

zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme

- Hochfrequenztechnische Aspekte -

Prof. Dr.-Ing. Volkert Hansen, Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik,
Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal

1 Einleitung

In der Öffentlichkeit hat das Interesse an der Frage nach „Wirkungen elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme“ in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Dieses Interesse spiegelt sich auch in einer ständig größer werdenden Anzahl von sehr unterschiedlichen Experimenten zu diesem Thema wider. Dennoch hat der steigende Aufwand nicht unbedingt zu einer besseren Information der Öffentlichkeit geführt. Auch für die Wissenschaftler, die sich intensiv mit dem Thema auseinandersetzen, ist der Aussagewert einer neuen Publikation meist nur mit großem Aufwand, oft aber auch gar nicht überprüfbar. Neben der Komplexität des Forschungsgegenstandes ist dafür ein Grund, daß die Planung,

Durchführung und Auswertung der Experimente meist nach sehr unterschiedlichen Kriterien erfolgte und damit z.B. auch der Vergleich der Aussagen von Experimenten mit zunächst sehr ähnlichen Fragestellungen nicht möglich ist.

Um die Ausgangssituation für zukünftige Experimente zu verbessern, hat sich auf Initiative der Forschungsgemeinschaft Funk ein Kreis von Wissenschaftlern aus der Bundesrepublik die Aufgabe gestellt, einen „Leitfaden für Experimente zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme“ zu erstellen; die Schriftführung liegt beim Autor des vorliegenden Berichtes. Experimente mit niederfrequenten elektrischen oder magnetischen Feldern sind nicht Gegenstand des Leitfadens,

wobei die untere Frequenzgrenze nicht scharf gesetzt werden soll. Zu hohen Frequenzen hin soll der Bereich der cm-Wellen noch eingeschlossen sein. Diese Begrenzung erfolgt nicht, weil für den noch höheren Frequenzbereich Wirkungen ausgeschlossen werden, sondern weil z.Zt. wegen des Schwerpunkts der Anwendung hochfrequenter Felder in Industrie, Medizin und Kommunikationstechnik im Bereich von einigen MHz bis zu einigen 10 GHz hier der größte Bedarf an neuen Erkenntnissen gesehen wird.

Experimente zur Wirkung elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme erfordern die Anwendung von Denkmodellen, Methoden und Verfahren aus sehr unterschiedlichen Disziplinen wie Biologie, Physik, Chemie, Medizin und Elektrotechnik,

d.h. besonders intensives interdisziplinäres Arbeiten. Dieser Leitfaden hat die hochfrequenten Aspekte der Experimente zum Schwerpunkt, er richtet sich jedoch an alle beteiligten Disziplinen. Damit ist auch gleich eine der Schwierigkeiten bei der Erstellung des Leitfadens offenkundig, denn eine allen angesprochenen Gruppen gemeinsame Sprache und ein gemeinsamer Kenntnisstand kann kaum vorausgesetzt werden. Vor allem kann der Leitfaden weder einschlägige Lehrbücher der HF-Technik (siehe z.B. [1], [2]) und der Feldtheorie (siehe z.B. [3], [4], [5], [6], [7]) ersetzen, noch eine umfangreiche Darstellung der jeweiligen hochfrequenten Aspekte geben. Er soll vielmehr Gesichtspunkte liefern, die nach Meinung des Autors bei Entwurf, Durchführung und Auswertung der Experimente beachtet werden sollten. Die Liste der aufgeführten Gesichtspunkte ist in keiner Weise als vollständig anzusehen. Ihre Auswahl gründet sich vor allem auf Erfahrungen, die bisher bei der Durchführung von Experimenten gemacht wurden. Die Liste soll auch nicht als abgeschlossen betrachtet, sondern durch neue Erkenntnisse erweitert werden.

Die Planung eines Experiments wird wesentlich von dem zu erreichenden Ziel bestimmt. In Abschnitt 2 werden deshalb mögliche Ziele dargestellt und kurz diskutiert. Die in Abschnitt 3 aufgeführten allgemeinen Forderungen an die Experimente sind im Prinzip jedem Experimentator bekannt. Ihre vollständige Einhaltung während der verschiedenen Phasen eines Experiments ist jedoch wegen des damit verbun-

denen hohen Aufwands nicht möglich, sondern es ist immer ein Kompromiß zwischen Vollständigkeit und ökonomisch noch vertretbarem Aufwand zu finden. Um dieses zu erleichtern, wurde die Auflistung der allgemeinen Forderungen für zweckmäßig gehalten. In Abschnitt 4 wird ein Katalog von Kriterien zur Auswahl der HF-Anordnung aufgeführt. Die Reihenfolge entspricht der, die sich bei dem Entwurf verschiedener Experimente als zweckmäßig erwiesen hat. Abschnitt 5 gibt eine Kurzcharakterisierung von Feldern, wie sie in der Feldtheorie typisch sind, um die Auswahl eines für den jeweiligen Zweck geeigneten Feldes zu ermöglichen. In Abschnitt 6 werden einige Gesichtspunkte zu den Signalformen diskutiert.

Dem Autor ist bewußt, daß viele wichtige Aspekte nicht angesprochen werden, zum einen, um den Umfang des Leitfadens in Grenzen zu halten, zum anderen, weil sie sich erst in der konkreten Situation herauschälen. Im Abschnitt 7 sind deshalb die Erfahrungen aus drei konkreten Experimenten, die in letzter Zeit auf Initiative der Forschungsgemeinschaft Funk durchgeführt wurden, zusammengestellt. Dabei werden nur grundsätzliche Gesichtspunkte angegeben. Zur ausführlichen Information wird auf die vollständigen, in der Reihe „Edition Wissenschaft“ von der Forschungsgemeinschaft Funk veröffentlichten Berichte (siehe Literaturverzeichnis) verwiesen. Es ist beabsichtigt, den Abschnitt 7 fortzuschreiben, wenn weitere Projekte mit prinzipieller Bedeutung hinsichtlich der hier interessierenden Pro-

blemstellung durchgeführt und ausgewertet worden sind. Eine ausführliche Beschreibung realisierter Expositionseinrichtungen findet sich in [8].

Im Anhang wird eine Checkliste für die Planung und Durchführung von Messungen, entnommen der Schriftenreihe „Umwelt“, Nr. 164 des BUWAL, Schweiz 1992 [9], aufgeführt, und es werden die wichtigsten numerischen Verfahren zur Analyse von Feldproblemen kurz beschrieben.

Einen breiten Raum in der öffentlichen Diskussion nehmen die Ergebnisse epidemiologischer Studien ein. Bei der Durchführung dieser Studien sind oft umfangreiche hochfrequententechnische experimentelle Arbeiten (z.B. Messen von Feldstärken) zu erledigen. Dabei geht es jedoch immer nur um die Registrierung eines vorgegebenen Sachverhalts, nicht um dessen aktive Gestaltung. Epidemiologische Studien werden deshalb nicht den hier interessierenden Experimenten zugeordnet.

Für die Durchführung von Experimenten sind oft Vorgaben zu beachten. Ausdrücklich wird auf DIN/VDE 0848 „Sicherheit bei elektrischen Feldern“ hingewiesen. Teil 1 enthält „Meß- und Berechnungsverfahren“ [10], Teil 2 Ausführungen zum „Schutz von Personen im Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 GHz“ [11]. Wichtig in diesem Zusammenhang sind auch die Schriften der Strahlenschutzkommission Band 16: „Nichtionisierende Strahlung“ [12] und Band 22: „Schutz vor elektromagnetischer Strahlung beim Mobilfunk“ [13].

2 Ziel der Experimente

2.1 Aufdeckung von möglichen Wechselwirkungen

Der weitaus größte Teil aller publizierten Arbeiten hat das Ziel, die Wirkungen elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme aufzudecken. Der Begriff „Wirkung“ wird dabei zunächst sehr weit gefaßt und meint einen kausalen Zusammenhang zwischen einem am Ort des biologischen Systems vorhandenen elektromagnetischen Feld und einer chemischen und/oder physikalischen Reaktion des Systems, wobei bei der Wirkung auf höhere Lebewesen auch z.B. Änderungen des Verhaltens eingeschlossen werden. Die Frage einer Bewertung von solchen Wirkungen (Unterscheidung zwischen thermischer und athermischer Wirkung, Unterscheidung zu Schädigungen, Folgerungen für die Gesundheit, therapeutische Wirkungen) kann hier zurückgestellt werden.

Gesicherte Hypothesen für mögliche Wirkungsmechanismen, die als Ausgangspunkt für den Entwurf von Experimenten allgemein anerkannt wären, liegen bis jetzt nicht vor. Das hat zur Folge, daß die experimentellen Details durchgeführter Versuche sowohl hinsichtlich der hochfrequenz-technischen wie auch der biologischen Aspekte extrem variieren. Ein Ziel des Leitfadens soll sein, für zukünftige Experimente diese extreme Vielfalt wenigstens in bezug auf die technischen Parameter einzuschränken und – wenn möglich – zu einem mehr standardisierten Vorgehen zu gelangen.

2.2 „Nachweis“ des Ausschlusses von Wechselwirkungen

In der öffentlichen Diskussion wird wiederholt die Forderung erhoben, durch entsprechende Experimente den Nachweis zu führen, daß Wechselwirkungen ausgeschlossen werden können. Dieser „Null-Beweis“ ist grundsätzlich nicht durchführbar. Es ist jedoch durchaus sinnvoll, den Nachweis zu erbringen, daß bei einer bestimmten Versuchskonfiguration mit den heute verfügbaren Meß- und Auswertemethoden keine Wechselwirkungen beobachtbar sind. Ausgangspunkt für solche Überlegungen sind meist konkrete technische Anwendungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern. Aus diesen ergeben sich dann auch Vorgaben für die Versuchsparameter. Dabei sind immer starke Eingrenzungen der bei den realen technischen Anwendungen auftretenden Parameterkombinationen notwendig, um mit vertretbarem Aufwand arbeiten zu können. Es muß jedoch betont werden, daß die durch das Experiment gewonnenen Erkenntnisse zunächst nur für den tatsächlichen, durch eine Vielzahl von technischen und biologischen Parametern beschriebenen Versuchsablauf Gültigkeit haben. Darüber hinausgehende Schlüsse und Verallgemeinerungen sind nur sehr begrenzt machbar.

Für Experimente zum Beweis des Ausschlusses möglicher Schädigungen biologischen Materials durch elektromagnetische Felder gelten im wesentlichen dieselben Gesichtspunkte, wobei dazu zunächst eine sorgfältige, nur mit Hilfe von Fachkollegen aus der Medizin und der Biologie durchführbare Ab-

grenzung des Begriffs „Schädigungen“ von dem übergeordneten Begriff „Wirkungen“ erfolgen muß.

2.3 Bestätigung oder Widerlegung von theoretischen Konzepten und von Hypothesen

Für die Erarbeitung von Hypothesen zu möglichen Wirkmechanismen sind bis jetzt nur erste Ansätze vorhanden. Vorgaben für Experimente, die diese Ansätze bestätigen oder widerlegen sollen, sind, da sie aus den jeweiligen Hypothesen zu entwickeln sind, zur Zeit nicht formulierbar. Dasselbe gilt für den Fall, daß einzelne Parameter eines theoretischen Modells experimentell bestimmt werden sollen.

2.4 Wiederholung von Experimenten zur Bestätigung oder Widerlegung von publizierten Ergebnissen

Experimentelle Befunde zu komplexen Sachverhalten können nur dann als gesichert gelten, wenn sie durch zumindest ein weiteres unabhängiges Experiment bestätigt worden sind. Da auf dem hier interessierenden Gebiet eine extreme Vielzahl von zum Teil sehr widersprüchlichen experimentell gewonnenen Aussagen publiziert worden ist, muß die Nachprüfung bzw. Verifizierung zumindest der wichtigen Aussagen erheblich forciert werden. Entsprechende Experimente müssen sich zunächst möglichst streng an den zu

wiederholenden Arbeiten orientieren. Erst in einem zweiten Schritt können Modifikationen des Versuchsablaufs oder der Auswertung vorgenommen werden, um die eigenen Stellungnahmen abzusichern (z.B. Bestätigen der Befunde, Nachweis von methodischen Fehlern des Erstexperiments).

3 Allgemeine Forderungen an die Experimente

Die Aufnahme dieses Abschnitts in den „Leitfaden“ erfolgt nur vollständigshalber, da die aufzuführenden Gesichtspunkte für jedes naturwissenschaftliche Experiment gelten und damit jedem Wissenschaftler geläufig sind. Die Praxis jedoch zeigt, daß sie oft nicht in dem eigentlich gewünschten Maße beachtet werden.

Die Aussagen eines Experiments auf dem hier interessierenden, hochsensiblen Gebiet sollten solange als vorläufig gelten, wie das Experiment nicht durch mindestens ein weiteres, das von einer anderen Forschungsgruppe durchgeführt wurde, bestätigt worden ist. Wesentliche Voraussetzung dafür ist, daß die einzelnen Schritte des Experiments, von der Festlegung der Ausgangssituation über die Durchführung bis zur Erstellung der Ergebnisse, reproduziert werden können. Diese Aussage betrifft auch die biologischen Aspekte, wie die Auswahl der Methode, des Materials usw. Da sich dieser „Leitfaden“ nur mit den hochfrequenztechnischen Aspekten der Experimente befaßt, soll hierauf aber nicht weiter eingegangen werden.

Für den HF-Meßaufbau ergibt sich zunächst die Forderung, daß ein eindeutig definierter Feldtyp (siehe Kapitel 5) ausgewählt wird. Grundsätzlich sind auch Felder einsetzbar, die mit Hilfe einer Überlagerung definierter Feldtypen (Beispiel: Darstellung eines Feldes durch Superposition ebener Wellen) beschreibbar sind. Nachteilig ist dann jedoch, daß die Anzahl der zur Spezifizierung der Felder benötigten Parameter größer ist als bei der Verwendung nur eines Feldtyps. Die Expositionsrichtung muß so konstruiert sein, daß möglichst nur der gewünschte Feldtyp angeregt und/oder ausbreitungsfähig ist. Es sind deshalb z.B. Wellenleiter mit Mehrmodenbetrieb (z.B. Hohlleitungsmeßzellen, in denen nicht nur der Grundwellentyp ausbreitungsfähig ist) unbedingt zu vermeiden, da bei ihnen kleine Änderungen des Versuchsaufbaus zu starken Änderungen der Feldverteilung führen können. Die Eindeutigkeit des Feldtyps muß nach Einbringen des Meßobjekts erhalten bleiben und darf nicht durch die während des Versuchsablaufs notwendigen Parameteränderungen des Meßobjekts aufgehoben werden. Die Feldverteilung im Meßobjekt muß ebenfalls eindeutig und meßtechnisch oder rechnerisch bestimmbar sein. Es ist deshalb zu vermeiden, das Meßobjekt dort zu positionieren, wo das Feld vor Einbringen des Meßobjekts eine starke örtliche Variation über Bereiche aufweist, deren Abmessungen vergleichbar denjenigen des Meßobjekts sind. Hinsichtlich der Signalform (siehe Kapitel 6) ist zu beachten, daß komplex aufgebaute Signale (z.B. nach dem GSM-Standard [14]) oft nicht eindeutig definiert sind. Durch eine Fehleranalyse ist zu

bestätigen, daß die Meßgrößen eindeutig durch die gewünschten Parameter bestimmt sind. Um Aussagen über kausale Zusammenhänge zwischen den die Feldexposition beschreibenden Größen und einer beobachteten biologischen Wirkung machen zu können, sollten während einer experimentellen Durchführung nur möglichst wenige Parameter definiert geändert und alle anderen konstant gehalten werden.

Es ist offensichtlich, daß – je nach Auslegung des Experiments – die hochfrequenztechnischen Anforderungen durch entsprechende aus dem beteiligten Fachgebiet zu ergänzen sind. Es zeigt sich dabei, daß die Reproduzierbarkeit der Experimente meist nur mit sehr hohem Aufwand und auch dann nur eingeschränkt gewährleistet werden kann, da z.B. bereits die eindeutige Beschreibung des biologischen Ausgangsmaterials (Kulturen von Bakterien, Versuchstiere, Versuchspersonen usw.) mit Hilfe endlich vieler, eindeutig meßbarer Parameter meist nicht möglich ist. Die allgemeine Forderung, alle das Experiment bestimmenden physikalischen, chemischen, physiologischen, soziologischen Parameter sorgfältig festzulegen, zu kontrollieren und zu dokumentieren, ist deshalb immer nur sehr begrenzt erfüllbar.

Ein wesentlicher Teil des Experiments betrifft die Auswertung der unmittelbar gemessenen physikalischen Daten („Rohdaten“). Um die Auswirkung verschiedener Auswertungsmethoden untersuchen zu können, sind die Rohdaten vor jeder Verarbeitung sorgfältig abzuspeichern. Die Verarbeitungsmethoden müssen genau beschrieben werden.

4 Kriterien zur Auswahl der HF-Meßanordnung

4.1 Feldverteilung vor Einbringen des Meßobjekts

Die Auswahl der Feldverteilung, der das Meßobjekt ausgesetzt werden soll, muß vor allem anhand der Ziele des Experiments diskutiert werden:

4.1.1 Aufdeckung von möglichen Wechselwirkungen

In bisher veröffentlichten Untersuchungen werden verschiedene Feldtypen, z.B. fortschreitende oder stehende Welle, Nahfeld, Feldtypen mit in bestimmten Teilbereichen überwiegendem E- oder H-Feldanteil, eingesetzt. Dabei gibt es z.Zt. keine Erkenntnis, daß bei einem bestimmten Feldtyp Wirkungen wahrscheinlicher als bei anderen sind. 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.

4.1.2 „Nachweis“ des Ausschlusses von Wechselwirkungen

Experimente zum Nachweis des Ausschlusses von zur Zeit meßba-

ren Wechselwirkungen sind meist durch technische Anwendungen elektromagnetischer Felder motiviert. Die Wahl der Feldverteilungen muß sich deshalb zunächst an diesen Anwendungen orientieren. Da die Exposition bei den in der Öffentlichkeit besonders kritisch diskutierten Anwendungen durch Strahlungsfelder erfolgt, müssen solche auch für die Experimente verwendet werden, was meist (siehe Abschnitt 5.2) einen hohen Aufwand zur Folge hat. Es ist im Einzelfall sorgfältig zu überlegen, ob einfacher zu erzeugende Feldtypen verwendet werden können.

4.1.3 Bestätigung oder Widerlegung von theoretischen Konzepten und von Hypothesen

Die Auswahl des Feldtyps wird vor allem durch die der Hypothese zugrundeliegende Modellvorstellung bestimmt.

4.1.4 Wiederholung von Experimenten zur Bestätigung oder Widerlegung von publizierten Ergebnissen

Die Auswahl des Feldtyps ist zunächst durch die zu wiederholenden Experimente bestimmt. Modifikationen des Feldtyps sind sehr sorgfältig zu begründen, da sonst das Ziel des Experiments in Frage gestellt werden kann.

4.2 Größe des Meßvolumens

Die Größe des Meßobjekts einschließlich der Halterung be-

stimmt das erforderliche Meßvolumen. Solche Halterungen (z.B. Halterung für Zellmembranen oder Gefäße für Lösungen mit biologischen Substanzen) sind in nahezu allen Fällen notwendig, auch sind oft andere Objekte in unmittelbarer Nähe der biologischen Substanzen unverzichtbar. Die HF-Meßanordnung muß ein ausreichend großes Meßvolumen zulassen.

4.3 Frequenz, Bandbreite

Um in dem hier angesprochenen Frequenzbereich von einigen MHz bis zu einigen 10 GHz definierte Felder erzeugen zu können, sind sehr unterschiedliche Vorrichtungen notwendig. Die geforderte Bandbreite richtet sich nach den zu verwendenden Signalen (z.B. die durch die Mobilfunksysteme des C-, D- und E-Netzes vorgegebenen Signale).

4.4 Bestimmbarkeit der Feldverteilung im Meßobjekt

Um die Ergebnisse interpretieren zu können, muß je nach Aufgabenstellung die im oder am Meßobjekt vorhandene Feldverteilung bekannt sein. Diese bestimmt sich aus der Feldverteilung vor Einbringen des Meßobjekts und den Geometrie- und Materialparametern des Meßobjekts. Zusätzlich können die Halterungen oder sonstige in der Nähe des Meßobjekts unverzichtbare Objekte das Feld stark beeinflussen. Die Meßanordnung muß so beschaffen sein, daß sie

eine hinreichend genaue Bestimmung der Feldverteilung im Meßobjekt unter Berücksichtigung aller dieser Einflußgrößen gestattet. Die Feldanalyse muß auch klären, ob kleine Änderungen im Versuchsaufbau wesentliche Änderungen der Feldverteilung im Meßobjekt verursachen können, wodurch die Reproduzierbarkeit des Experiments nicht mehr gewährleistet wäre. Da für die biologischen Substanzen und die Halterung bzw. benachbarte Objekte meist $\epsilon_r' \gg 1$, $\epsilon_r'' \gg 1$ gilt, sind Abschätzungen für die Feldverteilung oft fragwürdig. Insbesondere ist zu beachten, daß – auch bei Verwendung von einfachen Feldtypen (siehe Abschnitt 5) – kein einfacher Zusammenhang zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld angebar ist. In DIN/VDE 0848 Teil 1 [10] wird im Abschnitt 3 und in den Anhängen A und B auf meßtechnische, in Abschnitt 4 und in den Anhängen D und E auf numerische Verfahren hingewiesen. Eine kurze Zusammenstellung und Diskussion von wichtigen numerischen Verfahren und eine grobe Abschätzung des Rechnerbedarfs enthält der Abschnitt B.

4.5 Abschirmen von Fremdeinflüssen, insbesondere von externen Feldern

Um zu gewährleisten, daß eine beobachtete Wirkung nur durch die beabsichtigte Exposition hervorgerufen wird, müssen sonstige Felder möglichst weitgehend abgeschirmt werden. Solche Störfelder werden durch Quellen

außerhalb des Versuchsraums, aber auch durch die eigene Meßvorrichtung erzeugt. Es sollten deshalb geschirmte HF-Meßanordnungen bevorzugt werden, wobei sich die Meßgeräte möglichst außerhalb der Meßanordnung befinden. Notwendige Kabelzuführungen sind ggf. mit Durchführungsfiltern zu versehen, Schläuche, z.B. für Nährflüssigkeit oder Sauerstoff, sind durch Dämpfungskamine zu führen, um die Schirmwirkung nicht aufzuheben. (Dämpfungskamine können als kurze Hohlleitungsstücke, die unterhalb der sog. Grenzfrequenz des Grundwellentyps betrieben werden, betrachtet werden. Für Formeln zur Dimensionierung siehe z.B. [2], S. K 23) Es ist zu beachten, daß die Abschirmung von niederfrequenten Feldern oft wegen der Höhe des dafür erforderlichen Aufwands nicht durchführbar ist. Diese Felder sind dann möglichst sorgfältig zu messen und zu protokollieren.

4.6 Besondere meßtechnische Forderungen

sind z.B. Anbringen von Ableitungen und Sensoren, Beobachtbarkeit des Meßobjekts während des Versuchs mit dem Mikroskop, ...

4.7 Biologische/physiologische Erfordernisse

Konstanthalten der Temperatur, Versorgung mit Sauerstoff oder Nährflüssigkeit, Aufbewahrung in Nährlösung, Bewegungsfreiheit von Versuchstieren, ...

5 Klassifizierung von elektromagnetischen Feldern

5.1 Vorbemerkungen

Hochfrequente elektromagnetische Felder werden durch die Größen \vec{E} , \vec{D} , \vec{H} , \vec{B} beschrieben. Deren räumlicher und zeitlicher Verlauf wird bestimmt durch die Form der Anregung und die Materialverteilung, gekennzeichnet durch die Materialparameter $\epsilon_0 \vec{\epsilon}_r(\vec{r})$, $\mu_0 \vec{\mu}_r(\vec{r})$ und $\vec{\kappa}(\vec{r})$ (\vec{r} Ortsvektor). In Verbindung mit biologischen Experimenten können, außer in Sonderfällen, die Materialparameter als skalare Größen betrachtet und $\mu_r = 1$ gesetzt werden.

In mathematischer Form werden Feldprobleme durch die Maxwell'schen Gleichungen

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5.1.1)$$

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5.1.2)$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (5.1.3)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (5.1.4)$$

und die jeweils gültigen Materialgleichungen makroskopisch vollständig und eindeutig beschrieben (siehe z.B. [3]). Methoden zur Lösung der Feldprobleme, d.h. der Maxwell'schen Gleichungen, stellt die Feldtheorie bereit. Mit analytischen Mitteln und nicht zu großem Aufwand lassen sich allerdings nur Feldprobleme geometrisch sehr einfacher Anordnung lösen. Durch den Einsatz leistungsfähiger Rechner können heute auch komplexe Geometrien

erfolgreich bearbeitet werden. Meßtechnisch lassen sich elektromagnetische Felder durch Abtasten mit Feldsonden erfassen. Auch in diesem Fall gilt, daß nur Felder, die in dem interessierenden Volumenbereich durch wenige Parameter eindeutig beschrieben werden können, einfach zu messen sind. Feldbereiche mit räumlich sich schnell ändernden Amplituden und Phasen der Feldkomponenten können wegen des begrenzten Auflösungsvermögens von Feldsonden nur bedingt analysiert werden.

Um die Eignung von elektromagnetischen Feldern für biologische Experimente diskutieren zu können, ist eine Klassifizierung der Felder zweckmäßig. Die im folgenden vorgenommene Klassifizierung orientiert sich an den technisch erforderlichen Vorrichtungen zur Erzeugung der Felder. Für jeden Feldtyp werden kurz die wichtigsten physikalischen Eigenschaften angegeben und dann die weiteren in Abschnitt 4 aufgeführten Kriterien diskutiert. Es ist offensichtlich, daß nur jeweils einige wichtige Gesichtspunkte aufgeführt werden können und ausdrücklich auf weiterführende Literatur [1] - [7] hingewiesen werden muß, insbesondere auch auf DIN/VDE 0848 Teil 1, Abschnitt 2 (Begriffe) [10].

5.2 Strahlungsfelder

5.2.1 Fernfeld einer Quellverteilung ([10], Abschnitt 2.5)

- **Feldtyp:**
 \vec{E} und \vec{H} stehen senkrecht aufeinander und senkrecht zur Aus-

breitungsrichtung und haben keine Phasendifferenz zueinander. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist gleich der Lichtgeschwindigkeit. Es gilt

$$|\vec{E}| = Z_0 |\vec{H}|, \quad (5.2.1.1)$$

$$|\vec{S}| = \frac{1}{2} \frac{|\vec{E}|^2}{Z_0} \quad (5.2.1.2)$$

Z_0 ist der Wellenwiderstand des freien Raumes, \vec{S} der Poyntingvektor.

Lokal ist das Feld gleich dem einer ebenen homogenen Welle. Die Polarisation wird durch die Anregung bestimmt.

Um Fernfelder erzeugen zu können, benötigt man sehr kostenintensive Freifeldmeßplätze oder reflexionsarme Räume. Unter normalen Laborbedingungen sind definierte Fernfelder nur sehr eingeschränkt erzeugbar. Um Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, sind deshalb ein extrem sorgfältiger Versuchsaufbau und dessen Protokollierung durch hochfrequenztechnisch erfahrenes Personal sowie Messungen der Feldverteilung zwingend notwendig.

- **Meßvolumen:**
Die maximale geometrische Abmessung des Meßobjekts d_{M0} bestimmt sich aus der Größe der Quelle (Antenne) d_A , dem Abstand r und der Wellenlänge λ :

$$r \geq \frac{(d_A + d_{M0})^2}{\lambda} \quad (\text{Fernfeldgrenze}). \quad (5.2.1.3)$$

Es ist zu beachten, daß die in leitenden Objekten in der Nähe der Antenne induzierten Ströme als Teil der Quellenregion betrachtet werden müssen.

- **Frequenz, Bandbreite:**
werden durch die verwendete

Signalquelle und Antenne bestimmt.

- **Bestimmung der Felder im Meßobjekt:**

Obwohl das Fernfeld lokal als homogene ebene Welle betrachtet werden kann, ist die numerische Lösung eines solchen offenen Feldproblems zur Bestimmung der Felder im Meßobjekt auch bei einfachem Aufbau nur mit großem Aufwand eingeschränkt möglich. Insbesondere können weitere, sich im Strahlungsfeld befindende Meßaufbauten (nicht nur die in unmittelbarer Nähe des Meßobjekts) zu großen, schwer berechenbaren Feldänderungen führen. Bei meßtechnischen Verfahren ist das Auflösungsvermögen für viele Anwendungen auch beim Einsatz sehr kleiner Feldsonden nicht ausreichend. Außerdem befinden sich die Zuleitungen zur Sonde notwendigerweise im Strahlungsfeld. Entsprechende Störungen lassen sich allerdings durch die Verwendung optischer Übertragungsleitungen verringern.

- **Abschirmung:**
In Freifeldmeßplätzen ist eine Abschirmung von Störfeldern naturgemäß nicht vorhanden. Reflexionsarme Räume sind meist abgeschirmt, wobei jedoch eine Schirmwirkung für niederfrequente Magnetfelder oft nur bedingt gegeben ist.

- **Sonstige Bemerkungen:**
Da das Meßobjekt frei zugänglich ist, können zusätzliche Meßeinrichtungen einfach angebracht werden. Das Meßobjekt kann einfach beobachtet werden, solange nicht zu hohe Feldstärken (siehe DIN/VDE 0848, Teil 2) das Betreten des Meßplatzes verbieten.

5.2.2 Nahfeld einer Quellverteilung ([10], Abschnitt 2.6)

Mit dem Nahfeld von Quellverteilungen wird der räumliche Bereich eines elektromagnetischen Feldes zwischen Strahlungsquelle und ihrem Fernfeld bezeichnet.

- **Feldtyp:**

Für ein allgemeines Nahfeld lassen sich keine allgemeinen Aussagen über das Verhältnis von \vec{E} - und \vec{H} -Feld zueinander hinsichtlich der Phase, des Betrages und der Polarisation machen. Typischerweise sind diese Größen sehr stark ortsabhängig. Nur in Sonderfällen, z.B. beim ungestörten Feld elektrischer oder magnetischer Elementarstrahler, können mit Hilfe analytischer Ausdrücke Bereiche mit speziellen Eigenschaften, wie

$$|\vec{E}| \ll Z_0 |\vec{H}| \text{ oder } |\vec{E}| \gg Z_0 |\vec{H}|, \quad (5.2.2.1)$$

$$\arg(E_{\max}) \approx \arg(H_{\max}) \pm \frac{\pi}{2} \quad (5.2.2.2)$$

mit E_{\max} , H_{\max} gleich den maximalen Feldkomponenten in einem Aufpunkt, definiert werden.

Meßobjekt und weitere im Nahfeld vorhandene Gegenstände führen meist zu sehr starken Feldänderungen. Auch kleine Änderungen des Meßaufbaus können deshalb wesentliche Änderungen des Feldverlaufs verursachen. Zusätzlich muß bei Objekten sehr nahe der Sendeanenne mit Rückwirkung auf deren Eigenschaften, insbesondere mit Änderungen der Eingangsimpedanz und damit Änderungen des das Feld erzeugenden Stromes gerechnet werden. Insgesamt erfordern Experimente mit Nahfeldern ganz besondere Sorgfalt und Fachkenntnis.

Die Polarisation wird durch die Antenne bestimmt. Sie ist jedoch typischerweise sehr stark von der Lage des Aufpunktes abhängig.

- **Meßvolumen:**

Der Einsatz von Nahfeldern ist nur bei speziellen Aufgabenstellungen angebracht. Die Größe des Meßvolumens läßt sich deshalb nicht allgemein diskutieren.

- **Frequenz, Bandbreite:**

werden durch die verwendete Signalquelle und Antenne bestimmt.

- **Bestimmung der Feldverteilung im Meßobjekt:**

Die Berechnung oder Messung des Nahfeldes nach dem Einbringen des Meßobjektes, der Halterung usw. ist auch bei einfachen Geometrien oft nur sehr eingeschränkt möglich, ebenso die Berechnung des Feldes im Meßobjekt.

Im übrigen gelten dieselben Anmerkungen wie beim Fernfeld.

5.3 Wellen auf offenen Leitungen

z.B. Paralleldrahtleitung, Mikrostripleitung, Bandleitung

Die Feldverteilung wird nicht nur von der Leitungsform und der Anregung, sondern auch von der Materialverteilung in der Umgebung bestimmt. Da es dadurch im Einzelfall oft extrem kompliziert ist, diese Feldverteilung zu bestimmen und im Verlauf des Experiments definiert zu ändern, sind Wellen auf offenen Leitungen nur in Sonderfällen einzusetzen.

5.4 Fortschreitende Wellen auf geschirmten homogenen Leitungen

5.4.1 TEM-Wellenleitung (geschirmte Zweidrahtleitungen, Koaxialleitungen und deren Modifikationen)

- **Feldtyp:**

\vec{E} und \vec{H} stehen senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und sind in Phase zueinander. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist gleich der Lichtgeschwindigkeit. Es gilt

$$|\vec{E}| = Z_0 |\vec{H}|, \quad (5.4.1.1)$$

$$|\vec{S}| = \frac{1}{2} \frac{|\vec{E}|^2}{Z_0} \quad (5.4.1.2)$$

Durch besondere Formgebung der Leitung ist es möglich, Bereiche zu schaffen, in denen die Ortsabhängigkeit von $|\vec{E}|$ und $|\vec{H}|$ gering ist, so daß das Feld in diesen Bereichen etwa gleich dem einer homogenen ebenen Welle ist (TEM-Meßzellen). TEM-Wellenleitungen sind in einem Bereich $0 < f < f_{c0}$ mit f_{c0} gleich der Grenzfrequenz des Hohlleitungswellentyps mit der niedrigsten Grenzfrequenz eindeutig betreibbar.

- **Meßvolumen:**

Die Querabmessungen einer TEM-Wellenleitung und damit das Meßvolumen richten sich nach der Bedingung $f < f_{c0}$. Dabei ist zu beachten, daß auch eine nur teilweise Füllung des Querschnitts die Grenzfrequenz herabsetzen kann. Oberhalb von f_{c0} sollte nicht gearbeitet werden, auch wenn gewährleistet ist, daß die Feldverteilung vor Einbringung des Meßobjektes nicht durch Hohlleitungswellentypen gestört wird.

Beispiel: Für luftgefüllte Koaxialkabel (Durchmesser des Innenleiters d , des Außenleiters D) gilt näherungsweise

$$f_{c0} = \frac{2c_0}{\pi(d + D)} \quad (5.4.1.3)$$

mit c_0 gleich der Lichtgeschwindigkeit in Luft. Es ist zu beachten, daß sich die Grenzfrequenz auch bei nur teilweiser Füllung des Querschnitts erniedrigen kann. Da für die Permittivität des biologischen Materials

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$$

mit $\epsilon'_r \gg 1$, $\epsilon''_r \gg 1$ (5.4.1.4)

gilt, ist ggfs. eine sorgfältige Analyse notwendig.

- **Frequenz, Bandbreite:**
Die Betriebsfrequenz und die Bandbreite sind durch $f < f_{c0}$ begrenzt. In diesem Bereich sind TEM-Wellenleitungen praktisch frei von Dispersion, so daß die Form des Signals nicht verändert wird.

- **Bestimmung der Feldverteilung im Meßobjekt:**
Da der Aufbau einer TEM-Wellenleitung geometrisch mäßig kompliziert ist, ist die Berechenbarkeit der Feldverteilung im Meßobjekt unter Einschränkungen gegeben.

- **Abschirmung:**
Die TEM-Wellenleitungen können hinsichtlich hochfrequenter Felder vollständig abgeschirmt ausgeführt werden. Eine Abschirmung für niederfrequente elektrische Felder ist nur begrenzt gegeben. Niederfrequente magnetische Felder können nur mit sehr hohem zusätzlichem Aufwand abgeschirmt werden.

- **Sonstige Anforderungen:**
Versorgungsleitungen usw. können bei sorgfältiger Ausführung

eingebraucht werden. Bei der Herstellung von Halterungen sind metallische Werkstoffe, wenn irgend möglich, zu vermeiden. Bei unverzichtbarem Einsatz von Metallen müssen die Auswirkungen sorgfältig durch Messungen oder Rechnungen untersucht werden. Das Meßobjekt ist nicht einfach beobachtbar.

5.4.2 Hohlleitungen

- **Feldtyp:**
Im allgemeinen sind Hohlleitungswellen Sechskomponentenfelder, nur spezielle Wellentypen besitzen einfache Feldverteilungen, z.B. die H_{10} -Welle in der Rechteckhohlleitung. Man unterscheidet zweckmäßigerweise zwischen E-Wellentypen (keine H-Feldkomponente in Ausbreitungsrichtung) und H-Wellentypen (keine E-Feldkomponente in Ausbreitungsrichtung). Die Phasengeschwindigkeit v_{ph} eines Wellentyps in einer leeren Hohlleitung liegt zwischen c_0 und unendlich (siehe Gl. 5.4.2.2), der Quotient der senkrecht aufeinander stehenden transversalen Feldkomponenten des E- und des H-Feldes ist reell

und keine Funktion des Aufpunktes:

$$(\vec{n} \times \vec{E}_{tr}) = \frac{\omega \mu_0}{k_n} H_{tr} \quad \text{H-Wellentyp}$$

$$(\vec{n} \times \vec{E}_{tr}) = \frac{k_n}{\omega \epsilon_0} H_{tr} \quad \text{E-Wellentyp} \quad (5.4.2.1)$$

\vec{n} ist ein Einheitsvektor, der in Ausbreitungsrichtung zeigt, und k_n ist gleich ω/v_{ph} . In einer Hohlleitung sind die Wellentypen nur oberhalb von durch die Geometrie festgelegten Grenzfrequenzen ausbreitungsfähig. Für Experimente sollte nur der Frequenzbereich verwendet werden, in dem nur ein Wellentyp, der Grundwellentyp, ausbreitungsfähig ist. Es ist zu beachten, daß die Grenzfrequenzen sich auch bei nur teilweiser Füllung des Querschnitts erniedrigen können.

Es sind Bereiche linearer, zirkularer und elliptischer Polarisation erzeugbar.

Hohlleitungswellen können auch in TEM-Wellenleitungen existieren (siehe Abschnitt 5.4.1).

- **Das Meßvolumen:**
wird bestimmt von den für den eindeutigen Betrieb erforderlichen Abmessungen. Als Beispiel

Bezeichnung		Innenmaße [mm × mm]	Frequenzbereich der H_{10} -Welle $1,25f_{c10} \dots 1,9f_{c10}$ [MHz]	
R	5	457,20 × 228,60	410...	620
R	6	381,00 × 190,50	490...	750
R	8	292,10 × 146,10	640...	980
R	9	247,65 × 123,80	760...	1150
R	12	195,58 × 97,79	960...	1460
R	14	165,10 × 82,55	1140...	1730
R	18	129,54 × 64,77	1450...	2200
R	22	109,22 × 54,61	1720...	2610
R	26	86,36 × 43,18	2170...	3300

Tabelle 1

werden die Querabmessungen von leeren Rechteckhohlleitungen für Frequenzen zwischen 450 MHz und 3 GHz angegeben ($f_{c_{mn}}$ ist gleich der Grenzfrequenz des m -ten Wellentyps) (siehe Tabelle 1).

- **Frequenz, Bandbreite:**
Die möglichen Betriebsfrequenzen sind durch die obigen Daten vorgegeben. Die Hohlleitungen sind dispersiv:

$$v_{ph} = \frac{c_0 \frac{f}{f_c}}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 - 1}} \quad (5.4.2.2)$$

$$v_{gr} = \frac{c_0^2}{v_{ph}} \quad (5.4.2.3)$$

Für sehr breitbandige Messungen ist die Hohlleitung nicht geeignet, jedoch ohne Einschränkung z.B. für die beim Mobilfunk verwendeten schmalbandigen Signalformen (siehe 6.2.2).

- **Bestimmbarkeit der Felder im Meßobjekt:**
Rechteckhohlleitung und Rundhohlleitung sind die einfachsten geometrischen Anordnungen zur Erzeugung von eindeutig definierten Feldern. Damit ist beim Einsatz von Hohlleitungen mit fortschreitenden Wellen eine gute numerische Analyse der Feldverteilung unter Einschluß von Halterungen, Zuführungen usw. möglich. Mit Hilfe von Streuparametermessungen an den Toren und Abtasten der Feldverteilung in der Hohlleitung können die auftretenden Pegel sehr genau ermittelt werden.
- **Abschirmung:**
siehe 5.4.1
- **Sonstige Anforderungen:**
siehe 5.4.1

5.5 Fortschreitende Wellen auf geschirmten inhomogenen Leitungen

5.5.1 TEM-Wellenleitungen (GTEM-Zellen)

- **Feldtyp:**
Eine GTEM-Zelle besteht im wesentlichen aus einem endlich langen Stück einer sphärischen Wellenleitung mit einem Innenleiter und einem Außenleiter. Die Speisung der Wellenleitung erfolgt an dem Ende mit den kleineren Querschnittsabmessungen, am anderen Ende befindet sich ein Absorber. Die Grundwelle einer solchen sphärischen Wellenleitung ist eine transversal elektromagnetische (TEM-) Kugelwelle. Für diese gilt, wie für TEM-Wellen auf homogenen Doppelleitungen, daß \vec{E} und \vec{H} senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen und daß ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Weiter gilt

$$|\vec{E}| = Z_0 |\vec{H}| \text{ und } |\vec{S}| = \frac{1}{2} \frac{|\vec{E}|^2}{Z_0} \quad (5.5.1.1)$$

Durch besondere Formgebung der Leitung ist es möglich, Bereiche zu schaffen, in denen die Ortsabhängigkeit von $|\vec{E}|$ und $|\vec{H}|$ gering ist, so daß das Feld in diesen Bereichen etwa gleich dem einer ebenen homogenen Welle ist (GTEM-Meßzelle).

In einer sphärischen Wellenleitung mit Innenleiter können neben der Grundwelle auch höhere Wellentypen auftreten. Für diese lassen sich nicht wie bei den homogenen Wellenleitungen Grenzfrequenzen angeben. Man kann jedoch Grenzradien r_c definieren, für die der entsprechende Wellen-

typ in Bereichen der Wellenleitung mit $r \geq r_c$ ausbreitungsfähig, für $r \leq r_c$ aperiodisch gedämpft ist. Dabei ist der Übergang zwischen Durchlaßbereich und Sperrbereich allmählich.

- **Meßvolumen:**
Das Meßvolumen einer GTEM-Zelle ist zunächst durch die maximalen Querabmessungen begrenzt. Es ist jedoch zu beachten, daß das Feld in unmittelbarer Nähe der Absorberflächen lokal stark inhomogen sein kann (z.B. durch Streueffekte von Pyramidenabsorbern). Dieser Bereich ist deshalb als Meßvolumen nicht geeignet.

GTEM-Meßzellen werden vor allem dann eingesetzt, wenn die Eigenschaften des Meßobjekts im Feld einer homogenen ebenen Welle gemessen werden sollen. Voraussetzung dafür ist, daß das Meßobjekt das ungestörte Feld nur lokal verändert. Um das zu gewährleisten, beschränken die Hersteller von GTEM-Zellen das ausnutzbare Meßvolumen auf den Bereich mit etwa 1/3 der maximalen Querschnittsabmessungen.

- **Frequenz, Bandbreite:**
Die sphärische TEM-Welle ist dispersionsfrei. Eine untere Frequenzgrenze für GTEM-Zellen ist zunächst prinzipiell nicht gegeben, für praktisch realisierte Meßzellen jedoch aufgrund technischer Bedingungen (Realisierung der Absorber usw.) vorhanden. Zu hohen Frequenzen hin sind die oberhalb des Grenzradius ausbreitungsfähigen höheren Wellentypen zu beachten. Diese können, wie ausbreitungsfähige höhere Wellentypen in homogenen Wellenleitungen, zu starken Störungen der Messung führen, auch wenn gewährleistet ist, daß

die Feldverteilung vor Einbringen des Meßobjekts durch diese Wellentypen nicht beeinflußt wird. Die exakte Berechnung des Grenzradius der niedrigsten sphärischen Hohlleitungswelle ist sehr aufwendig. Man kann sie näherungsweise über die Grenzabmessungen einer homogenen Hohlleitung mit derselben Querschnittsform und die Öffnungswinkel der sphärischen Wellenleitung bestimmen.

- Bestimmung der Feldverteilung im Meßobjekt:

Da der Aufbau einer GTEM-Welle geometrisch kompliziert ist, ist die Berechnung der Feldverteilung im Meßobjekt nur unter sehr großen Einschränkungen möglich.

- Abschirmung: siehe 5.4.1

- Sonstige Anforderungen: siehe 5.4.1

5.5.2 Hohlleitungen

z.B.

zylindrische Wellenleiter:

E-Sektor-Leitung, H-Sektor-Leitung

sphärische Wellenleiter:

Kegel-, Pyramidenleitung

In radialen Wellenleitungen ohne Innenleiter können Hohlleitungswellen angeregt werden, die im Bereich $r \lesssim r_c$ (r_c : Grenzradius) aperiodisch gedämpft, im Bereich $r \gtrsim r_c$ ausbreitungsfähig sind. Die Feldverteilungen der Wellentypen können mit einigem theoretischen Aufwand angegeben werden. Inhomogene Wellenleitungen für Hohlleitungswellen haben bisher

in Verbindung mit biologischen Experimenten keine besondere Bedeutung erlangt, sie werden deshalb hier nicht weiter diskutiert.

5.6 Stehende Wellen auf geschirmten homogenen Leitungen

- Feldtyp:

Schließt man eine homogene Leitung (TEM-Wellenleitung oder Hohlleitung) an ihrem einen Ende mit einem Kurzschluß oder Leerlauf ab, dann wird eine am anderen Ende eingespeiste Welle vollständig reflektiert und überlagert sich mit der hinlaufenden Welle zu einer stehenden Welle (der Sender sei an die Leitung angepaßt). Diese stehende Welle ist dadurch gekennzeichnet, daß bei Kurzschluß die transversalen elektrischen Feldkomponenten in Ebenen $n \cdot \lambda_g/2$ (λ_g : Leitungswellenlänge), die transversalen magnetischen Feldkomponenten in Ebenen $(2n - 1) \cdot \lambda_g/4$ vom Kurzschluß entfernt gleich Null sind. Für die leerlaufende Leitung erhält man das Ergebnis durch Vertauschen von E und H. Insbesondere ergibt sich für TEM-Wellen, daß so Ebenen mit $|\vec{E}| = 0$ und Ebenen mit $|\vec{H}| = 0$ erzeugbar sind. Stehende Wellen sind also geeignet, den Einfluß des E- oder des H-Feldes getrennt zu untersuchen. Die Querschnittsverteilung der stehenden Welle ist gleich der der fortschreitenden Welle.

- Meßvolumen:

Zunächst wird das Meßvolumen durch die Abmessungen der Leitung bestimmt. Da die Bedingung $|\vec{E}| = 0$ oder $|\vec{H}| = 0$ streng nur in einer Querschnittsebene gilt, richtet sich die Größe des Meßvolumens in longitudinaler Richtung danach,

welche Abweichung vom idealen Fall noch zugelassen werden soll.

Durch das Einbringen des Meßobjekts in die Wellenleitung wird die zunächst ungestörte stehende Welle gestört. Die Größe dieser Störung kann man durch Messung des Eingangsreflexionsfaktors einfach ermitteln und dadurch abschätzen, inwieweit die gewünschte Bedingung $|\vec{E}| = 0$ oder $|\vec{H}| = 0$ in den Knotenebenen noch erfüllt ist. Es ergibt sich, daß das Meßobjekt typischerweise klein zu den Querabmessungen der Leitung und zu der Wellenlänge sein muß.

- Frequenz, Bandbreite: Betriebsfrequenzen und Bandbreiten sind dieselben wie bei Wellenleitungen mit fortschreitenden Wellen.

- Berechnung der Feldverteilung im Meßobjekt:

Der Grad der Schwierigkeit unterscheidet sich nicht von dem bei entsprechenden fortschreitenden Wellen.

- Abschirmung: siehe 5.4.1

- Sonstige Anforderungen:

Die sonstigen Anforderungen unterscheiden sich nicht von denen für Wellenleitungen mit fortschreitenden Wellen.

5.7 Leitungsresonatoren

- Feldtypen:

Leitungsresonatoren werden durch Stücke einer homogenen Leitung (TEM-Wellenleitung oder Hohlleitung) der Länge $n \cdot \lambda_g/2$ (λ_g gleich der Leitungswellenlänge), die an beiden Enden kurzgeschlossen

sind, gebildet. Die Feldverteilung eines Resonanzfeldes ist damit identisch der einer stehenden Welle, d.h., es gibt Ebenen mit $|\vec{E}| = 0$ und mit $|\vec{H}| = 0$. Wie im Feld einer stehenden Welle, kann man also die Wirkung nur des E- oder des H-Feldes untersuchen. Die in der Praxis wichtigsten Resonatoren sind die Rechteckhohlraumresonatoren, betrieben in der H_{101} -Resonanz, und der zylindrische Hohlraumresonator, betrieben in der H_{011} - oder der E_{010} -Resonanz. Resonatoren werden durch ihre Güte Q gekennzeichnet, die sich aus

$$Q = \frac{\omega W}{P} \quad (5.7.1)$$

mit W gleich der im Resonator gespeicherten Energie und P gleich der zeitlich gemittelten Verlustleistung berechnet. Mit H_{101} -Hohlraumresonatoren lassen sich Güten bis 10^4 , mit H_{011} -Hohlraumresonatoren bis $5 \cdot 10^4$ erreichen.

- **Meßvolumen:**
Resonatoren für Meßzwecke zeichnen sich meist durch eine hohe Güte, d.h. durch geringe Verluste aus. Biologisches Material ist jedoch stark verlustbehaftet, d.h., belastet man den Resonator mit einem Meßobjekt auch nur kleinen Volumens, dann kann sich die Güte drastisch verringern. Ausschlaggebend ist deshalb nicht das Volumen des Meßobjekts, sondern die Frage, welche Änderung der Güte tolerierbar ist. Diese Änderung läßt sich meist einfach mit Hilfe der Störungsrechnung abschätzen.

- **Frequenz, Bandbreite:**
Die Resonanzfrequenz f_{res} eines Resonators bestimmt sich aus seiner Querschnittsform (siehe Abschnitt 5.4: homogene Wellenleitungen) und der Resonanzlänge $n \cdot \lambda_g/2$. Die 3 dB-Band-

breite B berechnet sich aus

$$B = \frac{f_{res}}{Q} \quad (5.7.2)$$

Resonatoren hoher Güte sind folglich sehr schmalbandig und damit z.B. für GSM-Signale nicht geeignet.

- **Bestimmung der Feldverteilung im Meßobjekt:**
Der Verlauf des E- und H-Feldes des leeren Resonators läßt sich mit Hilfe einfacher Formeln angeben. Änderungen der Güte durch das Einbringen des Meßobjekts können jedoch zu drastischen Änderungen der Feldamplituden führen, so daß die Berechnung der absoluten Amplitudenwerte aus meßbaren Eingangsgrößen stark fehlerhaft sein kann. Eine numerische Lösung des Feldproblems nach Einbringung des Meßobjekts ist wegen der einfachen Geometrie der üblichen Resonatoren nicht aufwendig, aber auch diese Lösung liefert bei nur schwach belasteten Resonatoren keine genauen Ergebnisse für die absoluten Feldwerte.

- **Abschirmung:**
siehe 5.4.1

- **Sonstige Anforderungen:**
siehe 5.4.1

6 Kriterien zur Auswahl der Signalform

6.1 Allgemeine Bemerkungen

Die technisch eingesetzten hochfrequenten Signale sind extrem

unterschiedlich, je nachdem ob es sich um Anwendungen in der Kommunikationstechnik, in der Medizintechnik oder bei industriellen Produktionsverfahren handelt. Auch innerhalb eines Anwendungsgebietes, z.B. des D-Netzes, festgelegt durch den GSM-Standard, sind die aktuell auftretenden Signale durch eine Vielzahl von Parametern bestimmt. Jedes Experiment kann jedoch nur mit einer sehr eingegrenzten Anzahl unterschiedlicher Signalformen durchgeführt werden. Auf der anderen Seite gibt es hinsichtlich der Signalform keine gesicherten Erkenntnisse über Wirkungsmechanismen, die eine eindeutige Auswahl für erste Experimente ermöglichen. Es existieren jedoch seit etwa 20 Jahren experimentelle Berichte über Wirkungen amplitudenmodulierter, hochfrequenter Felder mit Modulationsfrequenzen zwischen einigen Hz und etwa 100 Hz. Aber auch diese Berichte sind nicht so gut abgesichert, daß sie eine sichere Auswahl für Experimente zulassen. Um in dieser Situation dennoch zu Vorgaben zu kommen, wird im folgenden versucht, eine Festlegung der Signalform anhand des Katalogs von Abschnitt 2 durchzuführen.

6.2 Auswahl der Signalform anhand des Ziels des Experiments

6.2.1 Aufdecken von möglichen Wechselwirkungen

Die bisher vorliegenden Veröffentlichungen belegen – wie bereits erwähnt –, daß amplitudenmodulierte hochfrequente Signale biologische Effekte, meist Verän-

derungen der Zellmembran, verursachen können. Die Experimente lassen keine Schlüsse dahingehend zu, für welche modulierende Signalfunktion am ehesten eine meßbare Wirkung zu erwarten ist. Es wird deshalb vorgeschlagen, möglichst einfache Signale zu wählen, d.h. entweder eine harmonische Schwingung als niederfrequente modulierende Signalform oder eine Amplitudentastung. Die dann benötigte Bandbreite kann einfach bestimmt werden.

6.2.2 „Nachweis“ des Ausschlusses von Wechselwirkungen

Wie in Abschnitt 4.1.2 kann ausgeführt werden, daß Experimente zum Nachweis des Ausschlusses von z.Zt. meßbaren Wechselwirkungen meist durch technische Anwendungen elektromagnetischer Felder motiviert sind. Die Wahl der Signalformen muß sich deshalb zunächst an diesen Anwendungen orientieren. Dazu sollen folgende Fälle unterschieden werden:

6.2.2.1 Technische Anwendungen amplitudenmodulierter Signale

Für diese Klasse von Signalen werden in DIN/VDE 0750 Teil 9A1, Entwurf August 1992 (Sicherheit implantierbarer Herzschrittmacher, Schutz gegen elektromagnetische Strahlung), die die deutsche Fassung der europäischen Norm EN 50061: 1988/A1:1992 [15] enthält, ein Prüfsignal für Frequenzen unter 150 kHz und ein Prüfsignal für Frequenzen über 150 kHz (siehe Anhang C) speziell zur Überprüfung von Herzschrittmachern angegeben.

Durch die Wahl der Parameter dieser Signale ist die Wahrscheinlichkeit, daß der Herzschrittmacher ein solches Signal mit einem vom Herz erzeugten Signal verwechselt, besonders groß.

Es wird vorgeschlagen, für die hier vorliegenden Aufgaben Signale zu entwickeln, bei denen als bestimmende Größe anstelle der Herzfrequenz $\frac{10}{7}$ Hz die aus NF-Experimenten bekannten, physiologisch wirksamen Frequenzen von einigen Hz bis ca. 100 Hz gesetzt werden.

Die benötigten Bandbreiten können einfach bestimmt werden.

6.2.2.2 Mobilfunksysteme

Die in diesen Systemen verwendeten Signale sind sehr komplex aufgebaut. Eine Reduktion auf einfache Signalformen ist folglich immer sehr willkürlich. Es wird deshalb vorgeschlagen, zunächst mit handelsüblichen Geräten, die in einem Testmodus „Senden“ betreibbar sind, zu arbeiten. Es soll noch einmal betont werden, daß man damit kein eindeutig definiertes Signal erzeugt. Man kann jedoch davon ausgehen, daß so die charakteristischen und damit physikalisch und physiologisch bestimmenden Merkmale, z.B. eines Signals im GSM-Standard, im Experiment realisiert werden [14].

Es werden hier nur die Frequenzen und benötigten Bandbreiten für das C-, D- und E-Netz angegeben:

C-Netz:

- Verbindung Funk-Feststation → Mobilstation 461 MHz - 465,74 MHz
- Verbindung Mobil → FuFst 451 MHz - 455,74 MHz

- 287 Kanäle im Abstand von 20 kHz
- Sprachübertragung Phasenmodulation
- Datenübertragung FSK (Frequenzumtastung des HF-Trägers)

D-Netz:

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

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!

6.2.2.3 Andere technische Anwendungen

Wegen der bereits erwähnten Vielzahl der in Frage kommenden Signalformen lassen sich keine speziellen Angaben machen. Es wird, wie im vorherigen Abschnitt empfohlen, sich möglichst streng an dem im technischen Anwendungsfall tatsächlich auftretenden Signal zu orientieren oder wie im Abschnitt 6.2.2.2 aus diesem ein sehr einfach strukturiertes Signal abzuleiten.

6.2.3 Bestätigung oder Widerlegung von theoretischen Konzepten und Hypothesen

Die Auswahl der Signalform wird vor allem durch die der Hypothese zugrundeliegenden Modellvorstellungen bestimmt.

6.2.4 Wiederholung von Experimenten zur Bestätigung oder Widerlegung von publizierten Ergebnissen

Die Auswahl der Signalform ist zunächst durch das zu wiederholende Experiment bestimmt. Modifikationen der Signalform sind sehr sorgfältig zu begründen, da sonst das Ziel des Experiments in Frage gestellt werden kann.

7 Beispiele

An den folgenden Beispielen soll der Planungsablauf von drei Experimenten mit Hilfe des Leitfadens demonstriert werden.

7.1 Untersuchungen an Kulturen mit Bakterien und Viren [16], [17]

7.1.1 Einleitung

Eine Vielzahl von veröffentlichten Experimenten befaßt sich mit Untersuchungen an Kulturen mit Viren und Bakterien, da sie einfach zu handhaben sind und erwartet wird, daß an diesen einfachen biologischen Systemen am ehesten prinzipielle Wirkungsmechanismen nachweisbar sein müßten.

7.1.2 Ziel der Experimente

Es wird angenommen, daß das Ziel der Experimente durch die Ausführung in den Abschnitten 2.1 oder 2.2 formuliert ist, d.h., daß mögliche Wechselwirkungen entdeckt oder ausgeschlossen werden sollen.

7.1.3 Allgemeine Forderungen an die Experimente

Das Experiment ist so zu planen und durchzuführen, daß es jederzeit wiederholt werden kann und dann die physikalischen Bedingungen wie beim Erstexperiment einstellbar sind. Wesentliche Voraussetzungen dafür ist hier die Erzeugung einer definierten und möglichst präzise kontrollierbaren Feldverteilung, der die biologischen Materialien ausgesetzt werden (Abschnitt 7.1.4).

7.1.4 Auswahl der HF-Meßanordnung

7.1.4.1 Feldverteilung vor Einbringen des Meßobjekts

Bei den meisten z.Zt. durchgeführten oder geplanten Experimenten gibt es keine Hinweise, daß bei bestimmten Feldverteilungen die Wirkungen wahrscheinlicher sind als bei anderen.

7.1.4.2 Größe des Meßvolumens

Die Größe des benötigten Meßvolumens ist durch das Volumen der Lösung V_L mit den Bakterien oder Viren und die Gefäße (z.B. Reagenzgläser, Petrischalen) gegeben. Bei der Festlegung von V_L ist zu beachten, daß sowohl der ab-

solute Wert der Feldstärke als auch die relative Feldverteilung in V_L sehr stark von der Größe und der Form von V_L , aber auch von der Lage von V_L in bezug zur Ausbreitungsrichtung der Welle und zur Richtung der Feldvektoren abhängen. Das hat zur Folge, daß während des Versuchsablaufs notwendig erscheinende Änderungen der Gefäße, z.B. Ersetzen eines Reagenzglases durch eine Petrischale, aber auch Ersetzen eines schlanken Reagenzglases durch ein weniger schlankes, selbst bei einem unveränderten V_L zu einer sehr starken Änderung der Expositionsbedingungen führen können. Nur in sehr wenigen ausgesuchten Formen von V_L , z.B. bei sehr kleinen ($\leq 0,1 \text{ cm}^3$), sehr schlanken zylinderförmigen (z.B. sehr schlanken Reagenzgläsern) oder sehr flachen scheibenförmigen (z.B. nur wenig gefüllte Petrischalen) Volumina ist die Feldverteilung in etwa homogen. Eine inhomogene Feldverteilung führt jedoch dazu, daß die Feldexposition der in der Lösung frei beweglichen Viren und Bakterien je nach Aufenthaltsort unterschiedlich ist, was eine eindeutige Zuordnung einer beobachteten/auszuschließenden Wirkung zu einem SAR-Wert unmöglich macht. Um dennoch Aussagen machen zu können, muß man die Feldverteilung innerhalb der einzelnen Proben geeignet beschreiben, z.B. durch Angabe der maximalen, minimalen und durchschnittlichen SAR-Werte, und, wenn möglich, Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für die Bakterien/Viren angeben.

Wenn die benötigten Volumina höchstens einige cm^3 betragen, dann sind alle im Abschnitt 5 aufgeführten Feldtypen prinzipiell geeignet. Ob zur Beschleunigung

nigung der Experimente mehrere Proben auf einmal in der Meßvorrichtung untersucht werden können, ist im Einzelfall zu klären. Es ist zu beachten, daß sich bei Änderung der Anzahl der Proben die Feldverteilung in der gesamten Expositionseinrichtung und damit auch in den verbleibenden Proben selbst ändern kann. Werden während des Experiments Proben entnommen, dann müssen diese deshalb in jedem Fall ersetzt werden.

7.1.4.3 Frequenz, Bandbreite

Da die dringendsten Forderungen nach gesicherten Erkenntnissen z.Zt. aus dem Bereich der Mobilfunktechnik vorliegen, ist mit den in Abschnitt 6.2.2.2 angegebenen Frequenzen und Signalformen zu arbeiten.

7.1.4.4 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 die Querschnittsabmessungen für die Mobilfunkfrequenzen aus den Angaben im Abschnitt 5.4.2 entnommen werden können. Die erforderlichen Längsabmessungen ergeben sich aus der Anzahl der Proben, die gleichzeitig dem Feld ausgesetzt werden sollen. Um das Feld in einem ersten Schritt qualitativ analysieren zu können, können die Wände der Gefäße zunächst vernachlässigt werden. Der

Rechenbedarf wird im folgenden am Beispiel der Finite Difference Time Domain (FDTD)-Methode abgeschätzt. Die Bereiche mit den Lösungen sind entsprechend der Forderung

$$\Delta V = (\Delta_i)^3, \quad i = x, y, z \quad (7.1.4.4.1)$$

$$\text{mit } \Delta_i \leq \frac{\lambda_{\text{Probe}}}{10} \quad (7.1.4.4.2)$$

zu diskretisieren. Zur Verdeutlichung sei folgendes Beispiel gegeben:

- D-Netz:
 $f = 900 \text{ MHz} \rightarrow \lambda_0 = 333 \text{ mm}$
- Volumen einer Probe:
 $4000 \text{ mm}^3 \quad \lambda_{\text{Probe}} \approx 40 \text{ mm}$
- Diskretisierung der Proben:
 $\Delta_i = 0,5 \text{ mm}$ (aufgrund der Geometrie)
- Hohlleitung:
 $R \ 9 \ 247,65 \times 123,80 \text{ mm}^2$
- Länge der Meßzelle: 800 mm
- Diskretisierung der Meßzelle:
 $\Delta_{\text{Meßzelle}} = 0,5 \text{ cm}$

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.

Diese erste qualitative Rechnung muß ergeben, daß die relative Feldverteilung in der Hohlleitung nach Einbringen der Proben nur lokal verändert wird und vor allem keine höheren ausbreitungsfähigen Wellentypen entstehen können.

Zu einer höheren Auflösung kommt man dadurch, daß man mit Hilfe des Huygens'schen Prin-

zips nur einen die Proben umschließenden begrenzten Volumenbereich analysiert. Dadurch läßt sich sehr genau die Feldverteilung in Gefäßwänden und in den Proben ermitteln.

Die numerische Analyse muß durch Messungen ergänzt und abgesichert werden. Mit Hilfe eines Leistungsmessers wird die vom Sender abgegebene Leistung gemessen. Die Eigenschaften des Übergangs Koaxialkabel - Rechteckhohlleitung können durch genaue Streuparametermessungen mit Hilfe von Netzwerkanalysatoren erfaßt werden. Ebenfalls mit dem Netzwerkanalysator werden die Streuparameter der leeren ($|S_{11}|$ und $|S_{22}|$ sollten deutlich besser als -20 dB sein) und der mit den Proben bestückten Hohlleitermeßzelle gemessen. Zur Kontrolle kann die Stehwelligkeit in der Hohlleitung durch einen mittig angebrachten Schlitz abgetastet werden. Eine ausreichend aussagefähige meßtechnische Erfassung der Feldverteilung in den Proben von maximal einigen cm^3 Volumen ist wegen der zu erwartenden Probleme (unzureichende örtliche Auflösung, starke Rückwirkung der Sondenzuleitung usw.) nicht durchführbar.

7.1.4.5 Schirmung

Die Hohlleitermeßzelle kann hinsichtlich hochfrequenter Felder vollständig abgeschirmt ausgeführt werden. Eine Abschirmung für niederfrequente elektrische Felder ist nur begrenzt gegeben. Niederfrequente magnetische Felder können nur mit sehr hohem zusätzlichem Aufwand abgeschirmt werden.

7.1.4.6 Besondere meßtechnische Anforderungen

Da die Hohlleitermeßzelle als Expositionsrichtung sehr einfach aufgebaut ist und da ein sehr genau definiertes Feld erzeugt wird, sind hinsichtlich der hochfrequententechnischen 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 (siehe Abschnitt 7.1.4.4).

7.1.4.7 Biologische/physiologische Erfordernisse

Biologische Prozesse sind in der Regel stark temperaturabhängig. Es muß deshalb dafür Sorge getragen werden, daß die Temperatur während der gesamten Versuchsdauer konstant gehalten wird. Dabei hängt die Höhe einer noch tolerierbaren Abweichung von den zu untersuchenden Prozessen ab, wobei als Obergrenze etwa $\pm 0,5$ °C anzusehen ist. Die Temperaturregelung muß so leistungsfähig sein, daß sie Schwankungen der Umgebungstemperatur ausgleicht und die durch das elektrische Feld in der Versuchsanlage erzeugte Wärme abführt. Zwei realisierte Lösungsmöglichkeiten sollen angegeben werden:

a) Im ersten Fall [16] stand für die Experimente ein Klimaraum der Größe $1,5 \times 2 \times 3 \text{ m}^3$ zur Verfügung. Durch vorab durchgeführte sorgfältige Temperaturmessungen nach unterschiedlichen Expositionszeiten konnte nachgewiesen

werden, daß die Temperaturstabilität bei den vorgesehenen SAR-Werten in den $0,1 \text{ cm}^3$ großen Proben deutlich unter der oben angegebenen Grenze lag.

b) Da im zweiten Fall [17] eine Klimakammer nicht zur Verfügung stand, wurden die Proben in ein Wärmebad, gefüllt mit verlustarmem Weißöl ($\epsilon_r = 2,2$, $\epsilon_r'' = 0,033$ bei $f = 1800$ MHz), gestellt und die gesamte Vorrichtung in der Hohlleitermeßzelle dem Feld ausgesetzt. Die Temperatur des Wärmebads wurde über einen geschlossenen Kreislauf von einem Thermostat außerhalb der Hohlleitung konstant gehalten. Bei sorgfältigem Aufbau mit Wärmeisolation der Zuleitungsschläuche kann die Abweichung von der Solltemperatur in den Proben deutlich unter $\pm 0,5$ °C gehalten werden. Es ist zu beachten, daß das Wärmebad mit Zuleitungsschläuchen die Geometrie der Vorrichtung und damit die numerische Analyse der Felder in den Proben deutlich verkompliziert.

7.1.4.8 Realisierte Meßaufbauten

Es wurden bereits mehrere Meßaufbauten mit Hohlleitungsmeß-

zellen für Untersuchungen im Frequenzbereich um 900 MHz (D-Netz) und 1800 MHz (E-Netz) erstellt. Dabei wurden im Fall kleiner Gesamtvolumina (z.B. 20 Proben von $0,1 \text{ cm}^3$ bei 1800 MHz) Standardhohlleitungsquerschnitte (siehe Abschnitt 5.4.2) verwendet. Bei größeren Probenvolumina wurde der Hohlleitungsquerschnitt gerade so groß gewählt, daß an der Obergrenze des zu untersuchenden Frequenzbereichs höhere Wellentypen auch in der Hohlleitung mit Proben nicht ausbreitungsfähig sind. Dadurch war die Stabilität der Feldexposition gewährleistet.

Die Abbildung 7.1.1 zeigt den gesamten Meßaufbau. Als Sender wurden sowohl handelsübliche Mobilfunktelefone als auch Labormessender mit Verstärker eingesetzt.

7.2 Untersuchung an einzelnen Zellen [18]

7.2.1 Einleitung

Auf zellulärer Ebene stattfindende elektrophysiologische Prozesse lassen sich durch niederfrequente elektromagnetische Felder beeinflussen, was vielfach medizinisch genutzt wird, z.B.

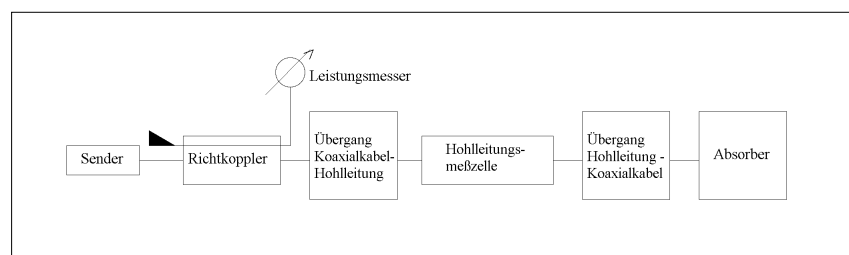


Abbildung 7.1.1: Versuchsaufbau

bei der Stimulation von Herzmuskelzellen durch Schrittmacher. Es ist deshalb naheliegend zu untersuchen, ob auch an Zellen in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern Wirkungen beobachtet werden können.

7.2.2 Ziel der Experimente

siehe 7.1.2

7.2.3 Allgemeine Forderungen an die Experimente

siehe 7.1.3

7.2.4 Auswahl der HF-Anordnung

7.2.4.1 Feldverteilung vor Einbringen des Meßobjekts

siehe 7.1.4.1

7.2.4.2 Größe des Meßvolumens

Zellen besitzen Gesamtabmessungen von einigen μm bis zu einigen mm, wobei typische Abmessungen z.B. für Herzmuskelzellen bei ca. 10 μm Höhe, 20-30 μm Breite und 100-200 μm Länge liegen. Damit sind die Abmessungen der Zellen bei den heute meist durchgeführten Experimenten bis zu etwa 3 GHz sehr viel kleiner als die Wellenlänge. Um die Funktion der Zellen während des Experiments aufrecht zu erhalten, befinden sie sich in einer Versuchskammer mit Elektrolytlösung, deren dielektrische Daten in derselben Größenordnung sind wie die von Gewebe. Das Volumen dieser Versuchskammer bestimmt sich

im wesentlichen aus weiteren meßtechnischen Erfordernissen (siehe Abschnitt 7.2.4.6), typischerweise ist sie jedoch kleiner als 1 ml.

7.2.4.3 Frequenz/Bandbreite

siehe 7.1.4.3

7.2.4.4 Bestimmbarkeit der Feldverteilung im Meßobjekt

Um die Eindeutigkeit der Feldexposition und damit die Reproduzierbarkeit des Versuchs zu gewährleisten, muß die Feldverteilung am Ort der Zelle mit einer Auflösung mindestens in der Größenordnung der Abmessung der Zelle bestimmt werden. Wie im Anhang B erläutert wird, hängt bei den hier vor allem in Frage kommenden lokalen numerischen Rechenverfahren die Berechenbarkeit von dem Verhältnis der größten Abmessung des Meßvolumens zur Wellenlänge, aber auch von der kleinsten aufzulösenden Dimension ab. Die Abmessungen von Expositionseinrichtungen orientieren sich immer an den Wellenlängen der verwendeten Signale. Sie liegen deshalb für Frequenzen bis etwa 3 GHz mindestens in der Größenordnung von einigen cm bis zu einigen Dezimetern. Damit ist offensichtlich, daß eine numerische Analyse mit der geforderten Auflösung von einigen μm mit den üblichen verfügbaren Verfahren nicht durchgeführt werden kann. Es ist deshalb besonders geboten, in erster Linie Eindeutigkeit und Stabilität der Feldexposition durch die Auswahl des Feldtyps zu gewährleisten und dabei das zu

analysierende Meßvolumen möglichst klein zu wählen. Es bietet sich damit an, wie in Abschnitt 7.1 eine Rechteckhohlleitung mit einer fortschreitenden H_{10} -Welle zu wählen. Nachteilig ist, daß die Breite der Hohlleitung gegenüber den in Abschnitt 5.4.2 angegebenen Werten nicht verringert werden kann, damit die H_{10} -Welle ausbreitungsfähig ist. Die Höhe der Hohlleitung kann jedoch deutlich reduziert werden (siehe Abschnitt 7.2.4.8).

7.2.4.5 Schirmung

Die Frage der Schirmung wird – in Verbindung mit besonderen meßtechnischen Anforderungen – im folgenden Abschnitt 7.2.4.6 diskutiert.

7.2.4.6 Besondere meßtechnische Anforderungen

Um die Wirkung des elektromagnetischen Feldes auf eine einzelne Zelle beurteilen zu können, muß man geeignete Zustandsparameter der Zelle vor und nach, aber möglichst auch während der Exposition messen können. Als Beispiel sei die Beobachtung der intrazellulären Calciumkonzentration und des Calciumstroms über die Zellmembran mit Hilfe der Fluoreszenzmikroskopie und des Patch-Clamp-Verfahrens genannt [19]. Bei beiden Meßmethoden muß die Zelle in der Hohlleitung mit einem Mikroskop von außen beobachtbar sein. Dazu kann man die Hohlleitungswand in einem kleinen Bereich der Breitseite (Durchmesser 10 mm) durch ein sehr engmaschiges metallisches Gitternetz ersetzen, wobei auf

eine sehr sorgfältige leitende Verbindung der Gitterstäbe mit der Hohlleitungswand zu achten ist. Durch das Gitternetz werden die ursprünglich parallel verlaufenden, senkrecht auf der Hohlleitungswand endenden elektrischen Feldlinien in unmittelbarer Nähe der Gitterstäbe verzerrt. Die Zelle darf deshalb dort nicht positioniert werden. Da ein zu großer Abstand der Zelle von dem Gitternetz die Beobachtbarkeit durch das Mikroskop von außen beeinträchtigt, ist durch sorgfältige Modellrechnung eine optimale Positionierung der Zelle in Abhängigkeit von Gitterstabdurchmesser, Maschenabstand und Brennpunkt des Mikroskopobjektivs zu bestimmen. Mit Hilfe dieser Rechnung kann auch kontrolliert werden, ob die Schirmwirkung des Gitternetzes ausreichend ist.

Beim Patch-Clamp-Verfahren wird der Strom durch die Zellmembran unmittelbar gemessen. Die eine Elektrode besteht aus einer feinen Glaskapillare (Pipette), gefüllt mit Elektrolyt. Das Lumen der Elektrode steht mit dem Zytoplasma der Zelle durch ein Loch in der Zellmembran in Kontakt (vgl. Abb. 7.2.1). Die Spitze der Elektrode muß daher in das Innere der Hohlleitung eingebracht werden, wozu ein entsprechendes Loch in die dem Gitternetz gegenüberliegende Hohlleiterwand gebohrt werden muß. Um die Einkopplung von Störfeldern durch dieses Loch bei sehr dünnen Hohlleitungswänden gering zu halten, kann man einen Dämpfungskamin aufsetzen. Außerhalb der Hohlleitung wird die Elektrode durch einen metallischen Draht fortgesetzt. Gegenelektrode ist der Elektrolyt

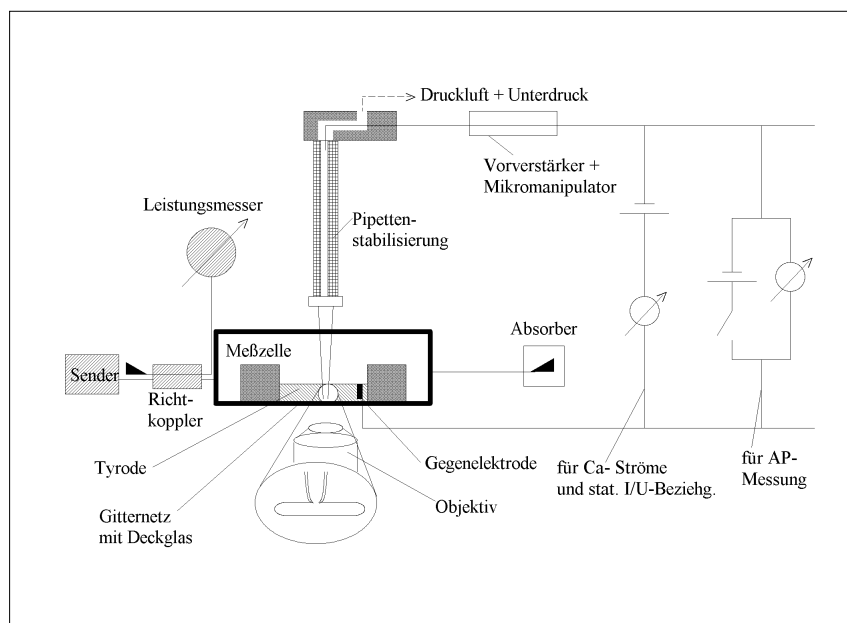


Abbildung 7.2.1

in der Versuchskammer, in dem die Zelle aufbewahrt wird. Zum Schließen des Stromkreises muß noch eine leitende Verbindung dieses Elektrolyts mit dem Meßgerät hergestellt werden. Um die Störung des elektromagnetischen Feldes in der Nähe der Zelle möglichst gering zu halten, wird dazu ein isolierter metallischer Draht zunächst unmittelbar auf dem Hohlleitungsboden von der Versuchskammer weg und dann nach außen geführt.

7.2.4.7 Biologische/physiologische Erfordernisse

Die Temperatur des Elektrolyten mit der Zelle muß konstant gehalten werden. Dazu wird die Versuchskammer mit der Zelle mit einer weiteren, mit Wasser gefüllten Kammer umgeben. Die Temperatur dieses Wassers wird in einem geschlossenen Kreislauf von einem Thermostaten außer-

halb der Hohlleitung konstant gehalten. Die Zu- und Ableitungsschläuche werden parallel zu dem Draht der Gegenelektrode zunächst am Boden der Hohlleitung von der Versuchskammer weg und dann nach außen geführt.

Es ist offensichtlich, daß die Materialverteilung in der Umgebung der zu untersuchenden Zelle durch die in diesem Abschnitt und in Abschnitt 7.2.4.6 beschriebenen Vorrichtungen komplex ist. Es ist deshalb mit den verfügbaren numerischen Verfahren nicht unmittelbar möglich, eine Analyse der gesamten Meßanordnung mit der geforderten Auflösung von einigen μm durchzuführen. Man kann jedoch durch die Untersuchung sorgfältig ausgewählter Teilprobleme sicherstellen, daß die Eindeutigkeit und Reproduzierbarkeit des Experiments gewährleistet ist.

7.2.4.8 Realisierte Meßeinrichtung

Der hochfrequente Teil des Meßaufbaus entspricht dem von Abbildung 7.1.1. Für die in den Abschnitten 7.2.4.6 und 7.2.4.7 angeführten konstruktiven Maßnahmen erwies sich eine Höhe der Hohlleitung von 30 mm als ausreichend. Dadurch wurde das Meßvolumen gegenüber den in Abschnitt 7.1 beschriebenen Experimenten deutlich verkleinert, was die numerische Analyse erheblich erleichterte. Ein weiterer Vorteil ist, daß die Länge der von oben durch das Loch in der Hohlleitungswand in die Zelle einzuführende Glaskapillare entsprechend kurz gewählt werden konnte, was die Handhabbarkeit deutlich verbesserte.

7.3 Untersuchungen zu möglichen Beeinflussungen des EEG's von Versuchspersonen [20]

7.3.1 Einleitung

Das Elektroenzephalogramm (EEG) ist ein Kurvenbild des zeitlichen Verlaufs der die Gehirntätigkeit begleitenden langsamen elektrischen Erscheinungen. Aufgezeichnet werden die zeitlichen Änderungen der mit Hilfe von auf der Kopfhaut angebrachten Elektroden gemessenen Potentiale gegenüber einem Referenzpunkt.

7.3.2 Ziel der Experimente

Es ist das Ziel der Experimente, zu untersuchen, ob bei bestimm-

mungsmäßiger Nutzung von Mobilfunkgeräten des D-Netzes Wirkungen entdeckt werden können.

7.3.3 Allgemeine Forderungen an die Experimente

siehe 7.1.3

7.3.4 Auswahl der HF-Meßanordnung

7.3.4.1 Feldverteilung vor Einbringen des Meßobjekts

Wie bei den in den Abschnitten 7.1 und 7.2 vorgestellten Experimenten gibt es keinen Hinweis, daß bei bestimmten Feldverteilungen Wirkungen wahrscheinlicher sind als bei anderen. Da hier jedoch die technische Anwendung des Mobilfunks im Vordergrund steht, ist es naheliegend, eine der Praxis entsprechende Feldexposition zu verwenden, falls wesentliche weitere Gesichtspunkte dem nicht entgegenstehen.

Bei der Benutzung eines Mobilfunkgerätes befindet sich der Kopf des Nutzers im Nahfeld der Antenne. Wie in Abschnitt 5.2.2 ausgeführt wurde, hängt die Feldverteilung im Nahfeld sehr stark von der Materialverteilung in der unmittelbaren Umgebung der Antenne ab. Bei Nutzung eines Handgerätes, das während des Gesprächs sehr dicht am Kopf gehalten wird, würden sich kleine, unvermeidliche Veränderungen der Position des Kopfes zum Handgerät in deutlichen Änderungen der Exposition auswirken. Es ist deshalb sinnvoller,

ein sog. „Portable“ mit einem entsprechend größeren Abstand zum Kopf einzusetzen, da sich dann kleine Positionsänderungen kaum auswirken.

Bei Betrieb des Senders in einem normal ausgestatteten Raum überlagert sich das von der Antenne abgestrahlte Feld mit den von den im Raum befindlichen Gegenständen und von Wänden sowie Fußboden und Decke reflektierten Feldanteilen. Damit ist die Feldverteilung im Raum stark ortsabhängig und kann sich auch bei geringfügigen Positionsänderungen der Gegenstände im Raum stark ändern, woraus folgt, daß die Feldexposition nicht mehr eindeutig reproduzierbar ist. Es müssen deshalb Wände, Decke und möglichst weite Bereiche des Fußbodens mit absorbierendem Material verkleidet werden, wobei der Reflexionsfaktor des Materials, insbesondere bei sehr kleinen Räumen, hinreichend klein sein muß. Die Qualität des Raumes ist durch Messungen oder Rechnungen zu überprüfen. Weiter müssen metallische Gegenstände im Raum sorgfältig vermieden werden (Tisch, Stühle aus Holz usw.).

7.3.4.2 Größe des Meßvolumens

Für EEG-Experimente muß ein hinreichend großer Raum zur Verfügung gestellt werden, damit die Versuchsperson den Aufenthalt in dem Raum nicht als unangenehm empfindet.

7.3.4.3 Frequenz/Bandbreite

siehe 7.1.4.3

7.3.4.4 Bestimmbarkeit der Feldverteilung im Meßobjekt

Die Berechnung der Feldverteilung im Meßobjekt – der Versuchsperson – ist bei Frequenzen des Mobilfunkbereiches unter Einbeziehung des Versuchsraumes und der Anordnung der Antenne nur unter Verwendung eines sehr groben Rasters möglich. Damit läßt sich zwar überprüfen, ob die Feldverteilung in der Umgebung der Versuchsperson hinreichend reproduzierbar ist, man erhält jedoch keine detaillierten Informationen über die Feldverteilung z.B. im Kopfbereich. Bei garantierter Reproduzierbarkeit kann man diese jedoch durch geeignete Ausschnittsrechnungen ermitteln.

7.3.4.5 Schirmung

Eine nachträgliche Schirmung von Räumen, z.B. in einem Klinikbereich, ist mit vertretbarem Aufwand meist nicht möglich. Man muß deshalb mit erheblichen Störfeldern mit Frequenzen im gesamten technisch genutzten Bereich von einigen Hz bis zu einigen GHz rechnen. Es sollte deshalb durch Rücksprache mit der zuständigen Hausverwaltung sichergestellt werden, daß sich der Versuchsraum nicht in unmittelbarer Nähe von Versorgungsschächten, Großgeräten (z.B. Kernspintomographen) und Hausrufanlagen befindet. Zu einer sicheren Beurteilung der Störfelder kommt man nur durch eine – allerdings sehr aufwendige – Ausmessung des gesamten Frequenzbereichs von einigen Hz bis zu einigen GHz. Diese Messungen sollten auch bestätigen, daß die Auskleidung des Raumes mit

Absorbieren zu einer deutlichen Absenkung der Schwelligkeit des Expositionsfeldes führte.

7.3.4.6 Besondere meßtechnische Anforderungen

Die zu messenden Potentialdifferenzen liegen in der Größenordnung bis zu einigen 10 μV . Da die Verbindungen der an der Kopfhaut befestigten Elektroden mit dem Verstärkereingang notwendigerweise mit Hilfe offener, metallischer Leitungen erfolgen, kann eine Einkopplung des Expositionsfeldes in den Meßwertaufnehmer nicht verhindert werden. Es muß deshalb untersucht werden, wie hoch die dadurch zu erwartenden Störungen sind. Dazu bietet sich ein Vergleich der Ergebnisse folgender Messungen an:

1. Messung mit Kunstkopf bei ausgeschaltetem Mobilfunktelefon, durch die die im Meßraum vorhandenen Störungen erfaßt werden.
2. Messung mit einem Kunstkopf bei eingeschaltetem Mobilfunktelefon.
3. Messung mit Versuchsperson mit ausgeschaltetem Mobilfunktelefon.
4. Messung mit Versuchsperson mit eingeschaltetem Mobilfunktelefon.

Es sollte gewährleistet sein, daß die Störpegel durch das Mobilfunktelefon (Messung 2) im Frequenzbereich bis etwa 30 Hz nur in derselben Größenordnung sind wie die durch die sonst im Raum befindlichen Störfelder (Messung 1) und daß beide deutlich unter

dem Pegel der auszuwertenden Signale (Messung 4) liegen.

7.3.4.7 Biologisch/physiologische Erfordernisse

Es muß gewährleistet sein, daß die Versuchsperson während des Aufenthalts im Raum nicht weiteren Einflußgrößen ausgesetzt ist.

7.3.4.8 Realisierter Meßaufbau [20]

In einem durchgeführten Experiment stand ein Raum der Größe $2 \times 5 \times 2,6 \text{ m}^3$ innerhalb einer Klinik zur Verfügung. Dieser wurde mit Flachabsorbieren (Reflexionsfaktor $< -20 \text{ dB}$) ausgekleidet. Durch numerische Feldanalyse wurde bestätigt, daß dadurch in dem Raum reproduzierbare Nahfeldexpositionsmessungen durchgeführt werden konnten. Als Sender wurde ein handelsübliches „Portable“ im Testbetrieb mit der Ausgangsleistung 8 Watt eingesetzt. Die Sendeanenne wurde oberhalb der Versuchsperson angebracht. Der Abstand wurde so eingestellt, daß der in DIN VDE 0848, Teil 2 für den Expositionsbereich 2 angegebene Grenzwert nicht überschritten wurde. Zur Kontrolle, daß der Sender einwandfrei arbeitet, wurde das Feld mit Hilfe eines $\frac{\lambda}{4}$ -Dipols und eines HF-Detektors gemessen und auf einem freien Kanal des EEG-Auswertegerätes aufgezeichnet.

Der Autor dankt den Herren Kollegen Prof. Detlefsen, München, Priv.-Doz. Meyer, Bonn, Prof. Peier, Dortmund und Prof. Uhlmann für die kritische Durchsicht des „Leitfadens“ sowie viele wertvolle Hinweise und Anregungen.

8 Literatur

- [1] Zinke/Brunswig: Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1986.
- [2] Meinke/Gundlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Band 1: Grundlagen, fünfte Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1992.
- [3] Blume, Siegfried: Theorie elektromagnetischer Felder, vierte Auflage, Hüthig Buch Verlag Heidelberg 1994.
- [4] Schwab, Adolf J.: Begriffswelt der Feldtheorie, vierte Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- [5] Lehner, G.: Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker, zweite Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1994.
- [6] Piefke, Gerhard: Feldtheorie 1, Bibliographisches Institut Mannheim/Wien/Zürich, Band 771, B.I.-Wissenschaftsverlag 1977.
- [7] Piefke, Gerhard: Feldtheorie 2, Bibliographisches Institut Mannheim/Wien/Zürich, Band 773, B.I.-Wissenschaftsverlag 1973.
- [8] Neibig, U.: Expositionseinrichtungen, Edition Wissenschaft, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Ausgabe Nr. 3, Januar 1996.
- [9] Messung nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung, 1. Teil: Frequenzbereich 100 kHz bis 300 GHz, Bericht der Arbeitsgruppe „Messung nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung in der Umwelt“, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, Mai 1992.
- [10] Sicherheit in elektromagnetischen Feldern, Meß- und Berechnungsverfahren, DIN VDE 0848, Teil 1, Februar 1993.
- [11] Sicherheit in elektromagnetischen Feldern, Schutz von Personen im Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 GHz, DIN VDE 0848, Teil 2, Oktober 1991.
- [12] Nichtionisierende Strahlung, Klausurtagung der Strahlenschutzkommission 7.-9. Dezember 1988, Band 16, Herausgegeben vom Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Gustav Fischer Verlag Stuttgart, New York 1990.
- [13] Schutz vor elektromagnetischer Strahlung beim Mobilfunk, Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission, Band 22, Herausgegeben vom Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Gustav Fischer Verlag Stuttgart, Jena, New York 1992.
- [14] Eberhard, R., Franz, W.: Mobilfunknetze, Technik, Systeme, Anwendungen, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden 1993.
- [15] Sicherheit implantierbarer Herzschrittmacher, DIN VDE 0750 Teil 9/A1 vom 28.11.1995.
- [16] Rüger, G., Hansen, V.: Abschlußbericht zum Forschungsprojekt: Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme, Umweltaгентur GmbH Bochum, 1996.
- [17] Hansen, V., Kammerer, H.: Statusbericht zum Forschungsprojekt: Einfluß von EMF auf humane periphere Lymphozyten – Konzeption der Hochfrequenz-Expositionseinrichtung, Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, 8. August 1995.
- [18] Meyer, R., Gollnick, F., Wolke, S.: Der Einfluß hochfrequenter EM-Felder auf die Calcium-Homöostase von Herzmuskelzellen und Lymphozyten, Edition Wissenschaft, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Ausgabe Nr. 2, Dezember 1995.

- [19] Wolke, S.: Untersuchung des Einflusses von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf die elektrischen Eigenschaften von Herzmuskelzellen, Dissertation, Bonn 1995.
- [20] Hansen, V.: Abschlußbericht zum Forschungsprojekt: HF-Design eines Meßplatzes zur Untersuchung biologisch-cerebraler Effekte in niederfrequent gepulsten Hochfrequenzfeldern, Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, 30. Januar 1996.
- [21] Hansen, V., Eibert, T.: Numerische Verfahren zur Berechnung der von elektromagnetischen Quellen im menschlichen Körper erzeugten Felder, VDE-Fachbericht 45: Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder, Seite 99.
- [22] Hafner, C.: Numerische Berechnung elektromagnetischer Felder, Springer Verlag, Berlin 1987.
- [23] Kunz, Karl S., Luebbers, R.J.: The finite difference time domain method for electromagnetics, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida 1993.
- [24] Weiland, Th.: Eine Methode zur Lösung der Maxwell'schen Gleichungen für sechskomponentige Felder auf diskreter Basis, AEÜ, Band 31, Heft 3, 1977.
- [25] Schwarz, H.R.: Methode der Finiten Elemente, Teubner Studienbücher, Stuttgart 1991.
- [26] Hafner, C., Kuster, N.: Computations of electromagnetic fields by the multiple multipole method (general multipole technique), Radio Science, Vol. 26, No. 1, 1991.
- [27] Miller, E., Medgyesi-Mitschang, L., Newman, E.H.: Computational Electromagnetics Frequency-Domain Method of Moments, IEEE Press, New York, 1991.
- [28] Harrington, R.F.: Field Computation by Moment Methods, IEEE Press, New York 1993.
- [29] Singer, H., Brüns, H.-D., Mader, T.: Analyse elektromagnetischer Felder mit Oberflächenstromsimulation, Kleinheubacher Berichte, Band 35, Deutsche Telekom, Forschungsinstitut, Kleinheubach 1991.
- [30] Eibert, T., Hansen, V.: Calculation of unbounded field problems in free space by a 3D FEM/BEM-hybrid approach, Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 10, No. 1, 61-78, 1996.
- [31] Handbuch zum Programmpaket MAFIA, CST GmbH, Darmstadt.

Anhang

A Checkliste für die Planung und Durchführung von Messungen

(Schriftenreihe Umwelt Nr. 164 des BUWAL, Schweiz, 1992) [9]

Die beiden folgenden Checklisten sind als Gedächtnishilfe zu verstehen, damit bei der Planung und Durchführung von Messungen nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung die wichtigen Informationen frühzeitig beschafft und vollständig festgehalten werden.

A.1 Checkliste 1: Vorbereitung

Die folgenden Abklärungen sollten im Rahmen der Meßplanung durchgeführt werden. Unter Umständen ist hierzu bereits eine orientierende Messung im Untersuchungsgebiet notwendig.

1. Quelle

- Frequenzbereich
- Einzelne oder mehrere Frequenzen
- Oberwellen, Nebenwellen
- Modulation: keine, gepulst, AM, FM, SSB usw.
- Polarisierung: horizontal, vertikal, zirkular
- Abstrahlcharakteristik
- Ausgangsleistung: nominal, real; zeitliche Variationen
- Betriebsparameter (z.B. Sendezeiten, Senderichtung)
- Meßresultate von vergleichbaren Quellen
- Andere Quellen in der Nähe, welche die Messung beeinflussen könnten

- Starke statische elektrische oder magnetische Felder (Speiseeinrichtungen)
- Zustand der Anlage: vor-schriftsgemäßes Funktionieren; Schäden; undichte Stellen

2. Untersuchungsgebiet

- Zutrittsberechtigung
- Zugänglichkeit für die Bevölkerung
- Nutzungsarten
- Typische Aufenthaltsdauer von Personen
- Abschätzung der Feldstärken
- Inhomogene Felder: Reflexionen, Resonanzen, Mehrwegausbreitung
- Nahfeld / Fernfeld
- Relevante Grenzwerte und Beurteilungsgrößen
- Störende Objekte im Untersuchungsgebiet (Sekundärstrahler, Absorber)
- Stabile oder wechselnde Verhältnisse im Untersuchungsgebiet
- Festlegung der Meßorte und -zeiten
- Festlegen der Meßhöhe
- Arbeitssicherheit der Meßpersonen

3. Meßausrüstung

- Sonde / Antenne: Breitband oder Schmalband; isotrop oder gerichtet; $E^{(1)}$ - oder $H^{(1)}$ -empfindlich; zirkular oder linear polarisiert
- Verbindungsleitung zwischen Sonde und Meßgerät
- Meßgerät: Spektrum-Analysator, Meßempfänger, Anzeigergerät für Feldstärken usw.
- Befestigung der Sonde / Antenne
- Mittelwertbildung
- Geeignete Substitutionsquelle für Funktionstest
- Funktionstest, eventuell orientierende Messung; Eignung

der Meßeinrichtung für die vorgesehene Messung

- Kalibrierung
- Meßunsicherheit

A.2 Checkliste 2: Meßprotokoll

Die folgenden Informationen sollten, soweit möglich, während der Messung protokolliert werden.

- Beschreibung der Meßeinrichtung
- Zustand und Betriebsparameter der Quelle
- Skizze und Beschreibung von Meßstandort, näherer Umgebung und Anordnung der Meßeinrichtung
- Zeitpunkt und Dauer der Messung
- Höhe der Sonde / Antenne über Boden
- Abstand der Sonde / Antenne von unmittelbar benachbarten leitenden Objekten
- Polarisation und Ausrichtung der Sonde / Antenne
- Einstellungen der Meßinstrumente
- Mittelungsverfahren und -zeit
- Meßwerte
- Beobachtungen zu zeitlichen Schwankungen der Meßwerte
- Wetterbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit)
- Bodenbeschaffenheit und -bedeckung

B Numerische Verfahren zur Analyse von Feldproblemen

B.1 Einleitung

Die im Rahmen von Experimenten zu lösenden Feldprobleme

sind sehr unterschiedlich, je nachdem, ob z.B. das interessierende biologische Material eine Zellmembran mit einer Dicke von ca. 10 nm oder eine Versuchsperson ist. Allgemeine Empfehlungen und Aussagen zu Lösungsverfahren können deshalb nur mit größter Vorsicht gegeben werden, da sich die Vor- und Nachteile von Fall zu Fall sehr unterschiedlich auswirken können. Generell läßt sich jedoch feststellen, daß sich analytische Lösungsverfahren wegen der Komplexität der Materialverteilungen unmittelbar nur in wenigen Sonderfällen anwenden lassen. Sie können sehr hilfreich sein, wenn idealisierte Modelle zur Klärung von grundsätzlichen Verfahren diskutiert oder wenn Näherungen oder Abschätzungen erarbeitet sowie numerische Verfahren überprüft werden sollen (z.B. Untersuchung einer Zelle anhand eines Kugelschalenmodells). Für die in Abschnitt 4.4 diskutierte „Bestimmbarkeit der Feldverteilung im Meßobjekt“ sind, falls eine theoretische Lösung angestrebt wird, ausschließlich numerische Verfahren einsetzbar. Auch für die numerischen Verfahren gilt, daß nur wenige allgemeine Kriterien für eine optimale Vorgehensweise zur Lösung eines vorliegenden Randwertproblems formuliert werden können. Ein wesentlicher Grund dafür ist, daß zwar eine Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten zu jeder wichtigen Methode veröffentlicht wurden, vergleichende Untersuchungen mit ausreichend umfangreichen Tests an sorgfältig definierten Standardfällen jedoch weitgehend fehlen. Um dennoch insbesondere für die Planungsphase eines Experiments eine erste

Hilfestellung zu geben, werden im folgenden Abschnitt B.2 die wichtigsten numerischen Verfahren kurz skizziert und Gruppen zugeordnet. Anschließend wird in Abschnitt B.3 für eine der Gruppen exemplarisch der Rechenspeicherbedarf abgeschätzt. Ausführliche Informationen zu den Verfahren findet man in der Literatur, hier soll zunächst nur auf einige zusammenfassende Darstellungen hingewiesen werden, z.B. [4], [21], [22].

B.2 Charakterisierung von numerischen Verfahren zur Lösung von Randwertproblemen

Bei den zu lösenden Feldproblemen kann zwischen offenen und geschlossenen Randwertproblemen unterschieden werden. Erste treten dann auf, wenn zur Exposition Nah- oder Fernfelder (Abschnitte 5.2.1 und 5.2.2) oder Wellen auf offenen Leitungen (Abschnitt 5.3) verwendet werden. Die in den Abschnitten 5.4 - 5.7 aufgeführten Feldtypen führen auf geschlossene Randwertprobleme.

Ausgangspunkt für die Entwicklung eines numerischen Lösungsverfahrens ist eine geeignete analytische Formulierung des Feldproblems, die sich allgemein als lineare Operatorgleichung

$$L\{\vec{F}\} = \vec{G} \quad (\text{B.2.1})$$

schreiben läßt, wobei \vec{F} die gesuchte Feldgröße (elektrisches oder/und magnetisches Feld, Stromdichte) und \vec{G} die Anregungsfunktion (Antenne, Koppelstift eines Koaxialkabel-Hohlleitungsübergangs) sind. Der Opera-

tor L steht dabei z.B. für das System der Maxwell'schen Gleichungen (5.1.1) - (5.1.4) oder für eine äquivalente, daraus abgeleitete Darstellung. Bei einem eindeutig formulierten Problem kann die Lösung formal zu

$$\vec{F} = L^{-1}\{\vec{G}\} \quad (\text{B.2.2})$$

geschrieben werden. Die Lösung des Feldproblems ist gleichbedeutend damit, den inversen Operator L^{-1} zu finden, was bei den numerischen Verfahren mit Hilfe von Approximationen gelingt. Zwei Vorgehensweisen bieten sich an: Einerseits kann man von einer Approximation des Operators ausgehen und diese auf eine exakte Darstellung der Feldgröße anwenden, andererseits ist es auch möglich, die Feldgröße durch Ansatzfunktionen zu approximieren und darauf den exakten Operator anzuwenden. Außerdem sind Kombinationen beider Vorgehensweisen entwickelbar. Die wichtigsten Beispiele für eine Approximation des Operators sind die Methoden der **Finiten Differenzen (FD)** [23] und der **Finiten Integrationstechnik (FIT)** [24]. Bei der ersten wird entweder von den Maxwell'schen Gleichungen in Differentialform oder von einer daraus abgeleiteten Differentialgleichung, z.B. von der Wellengleichung, ausgegangen, und es werden die Differentialquotienten durch Differenzenquotienten ersetzt. Für die praktische Durchführung wird der Lösungsraum mit einem im Normalfall gleichmäßigen Gitternetz diskretisiert. Zur Berechnung der Differenzenquotienten werden die Feldwerte an den Gitterknotenpunkten herangezogen. Durch die Approximation des Operators in jedem einzelnen

Gitterpunkt erhält man ein Gleichungssystem in den Gitterpunkt-Feldwerten. Die recht starre Bindung an gleichmäßige Gitternetze erfordert auch in homogenen Bereichen des Lösungsraumes eine feine Diskretisierung, was sich negativ auf den numerischen Aufwand, der wesentlich von der Anzahl der Gitterpunkte abhängt, auswirken kann. Ungleichmäßige Gitternetze sind in einem gewissen Maße möglich (siehe Abschnitt B.3). Der Rechen- und Speicherplatzbedarf wächst vor allem bei 3D-Problemen sehr stark mit der Größe des Lösungsvolumens und dem Grad der Auflösung. Die vollständige Diskretisierung des gesamten Lösungsraums führt zu einer sehr guten Eignung für stark inhomogene Gebiete.

Bei der Finiten Integrationstechnik werden analog, ausgehend von den Maxwell'schen Gleichungen in Integralform, die Integrale approximiert. Wendet man die FIT-Methode auf ein rechtwinkliges Gitternetz an, dann erhält man eine ähnliche Darstellung wie bei der FD-Methode. Da bei beiden Methoden jede algebraische Gleichung des linearen Gleichungssystems Feldgrößen in der unmittelbaren Umgebung eines Aufpunktes miteinander verknüpft, zählt man sie zu den *lokalen* Verfahren.

Ebenfalls ein lokales Verfahren ist die Methode der **Finiten Elemente (FE)** [25], bei der das Lösungsgebiet in endlich große Teilgebiete (finite Elemente) zerlegt wird und in diesen einfache Approximationsfunktionen für die gesuchte Feldgröße angesetzt werden, die außerhalb dieser Bereiche gleich Null gesetzt

werden. Als finite Elemente finden bei dreidimensionalen Verfahren hauptsächlich Polyeder (Tetraeder, Hexaeder ...) Anwendung. Das Verfahren hat eine sehr hohe Flexibilität, da man bei der Zerlegung des Lösungsraumes große Freiheiten hat und mit geeigneten Elementen auch komplizierte Geometrien und Inhomogenitäten gut modellieren kann. Als Ansatzfunktionen kommen oft Polynomansätze unterschiedlichster Ordnung zur Anwendung, wobei in letzter Zeit auch neue Ansatzfunktionen diskutiert und erprobt werden, insbesondere sind hier tangentielle Vektorelemente (edge-elements) zu nennen. Diese Ansatzfunktionen sind besonders geeignet für die Modellierung der elektrischen bzw. der magnetischen Feldstärke, da bereits durch den Ansatz die aus den Maxwell'schen Gleichungen zufordernden Stetigkeitsbedingungen für die Feldstärken erfüllt werden. Für die Überführung des FE-Ansatzes in ein lineares Gleichungssystem werden üblicherweise die Stationaritätseigenschaften von Funktionalen ausgenutzt. Das Feldproblem ist damit als Variationsaufgabe formuliert, deren Lösung äquivalent zur Lösung der dem Funktional zugeordneten Differentialgleichung ist, da das Funktional stationär ist, wenn das Feld eine Lösung der Wellengleichung ist. Geeignete Funktionale für die elektrische Feldstärke \vec{E} oder für die magnetische Feldstärke \vec{H} findet man in der Literatur. Da die Methode der Finiten Elemente die Feldgröße – wie bei der FD und der FIT – im gesamten Lösungsraum modelliert, besitzt sie eine gute Eignung für stark inhomogene Gebiete mit kompli-

zierten Geometrien. Der numerische Aufwand hängt ab von der Größe des Lösungsraumes und der Feinheit des FE-Netzes und kann vor allem bei 3D-Problemen beträchtliche Ausmaße annehmen. Ein Vorteil gegenüber der FIT und der FD besteht in der relativ großen Freiheit bei der Form und Größe der finiten Elemente, wodurch das Modell gut auf die Geometrie und auf die enthaltenen Inhomogenitäten angepaßt werden kann.

Bei der verallgemeinerten **Multipoltechnik** [26], die auch unter dem Namen „multiple Multipoltechnik (MMP)“ bekannt ist, werden Partikulärlösungen der Wellengleichung für homogene Bereiche (Multipole) als Ansatzfunktionen für die Feldgrößen herangezogen. Die Methode ist deshalb den globalen Verfahren zuzuordnen. Komplizierte Geometrien oder inhomogene Bereiche werden dabei in homogene Teilgebiete zerlegt. In jedem dieser Teilbereiche sowie auch im Außenraum wird ein lokales Koordinatensystem eingeführt, in dem die Multipole bestimmt werden. Weil die Multipole Lösungen der Maxwell'schen Gleichungen für homogene Gebiete sind, wird das Feldproblem durch diese Vorgehensweise um eine Dimension erniedrigt, das bedeutet z.B., 3D-Probleme werden zu 2D-Problemen, da nur noch dafür gesorgt werden muß, daß die aus den Maxwell'schen Gleichungen folgenden Grenzbedingungen an den Übergängen der einzelnen Teilbereiche erfüllt werden. Dies wird im allgemeinen im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate oder auch des „Pointmatching“ für diskrete Punkte an den Grenzflächen

durchgeführt. Dieser Vorgang ist ein sehr kritischer Punkt des Verfahrens und muß deshalb mit größter Sorgfalt durchgeführt werden. Die Methode ist durch den Feldansatz im Außenraum um den eigentlichen Lösungsraum gut geeignet für offene Randwertprobleme. Hinsichtlich der Behandlung von Inhomogenitäten und komplizierten Geometrien liegen die Stärken bei einfachen Anordnungen, da der numerische Aufwand stark mit der Anzahl der notwendigen Teilbereiche und damit entstehenden Grenzflächen anwächst.

Mit einigem analytischem Aufwand können aus den Maxwell'schen Gleichungen durch Anwendung von Integralsätzen und vektoranalytischen Umformungen **Integralgleichungsdarstellungen** [27] des elektromagnetischen Feldes abgeleitet werden. Als Beispiel sei die sog. elektrische Feldintegralgleichung (EFIE) genannt. Bei ihr wird das Feld in einem Lösungsgebiet dargestellt als das Integral über die Quellen in dem Lösungsgebiet und ein geschlossenes Oberflächenintegral über die Berandungsfläche des Lösungsgebietes. Mit Hilfe des Konzepts der äquivalenten Huygensquellen läßt sich letzteres auch als ein Integral über Quellen formulieren. Numerische Verfahren, die von einer solchen Formulierung ausgehen, müssen also nur eine Approximation der Quellen des Feldes durchführen. Dies bedeutet eine sehr gute Eignung für offene Randwertprobleme, da sich die Quellen eines Feldes üblicherweise im Endlichen befinden und damit nur endlich große Bereiche modelliert werden müssen. Dagegen können solche Integralgleichungen nur für bestimmte Geometrien bzw.

Inhomogenitäten angegeben werden, was ihre Anwendbarkeit relativ stark einschränkt. Neben homogenen Bereichen sind hier vor allem unendlich ausgedehnte, ebene, geschichtete Strukturen zu nennen, für die es gelingt, geschlossene Integralgleichungsdarstellungen anzugeben. Die Integralgleichungen werden nach einer Approximation der Quellen mit geeigneten Ansatzfunktionen üblicherweise mit Hilfe der **Momentenmethode** [28] unter Ausnutzung der Rand- und Stetigkeitsbedingungen der elektromagnetischen Felder in ein lineares Gleichungssystem in den Amplituden der Ansatzfunktionen übergeführt. Bei den hauptsächlich benutzten **Oberflächenintegralgleichungsverfahren** [29] werden inhomogene Bereiche in homogene Teilbereiche zerlegt, so daß die Grenzflächen der Inhomogenitäten Teile der Hüllflächen der einzelnen Teilbereiche sind. Dies bewirkt bei stark inhomogenen Gebilden einen enormen Anstieg des Rechneraufwandes, insbesondere auch deswegen, weil die entstehenden Gleichungssysteme sehr stark besetzt sind.

Es ist naheliegend zu versuchen, die Vorteile eines lokalen Verfahrens mit denen eines globalen Verfahrens so miteinander zu verbinden, daß sich die einzelnen Schwachstellen kompensieren und die Stärken erhalten bleiben. Ein solches „**Hybridverfahren**“ [30] wurde auf der Basis der Methode der Finiten Elemente und einer Oberflächenintegralgleichungsformulierung entwickelt, mit dem zum einen eine gute Beherrschung von Inhomogenitäten und zum anderen die exakte Einbindung des inhomogenen Bereiches in den homogenen Raum erreicht

wird. Dabei werden inhomogene Feldbereiche mit Hilfe der finiten Elemente modelliert, das Feld im homogenen Bereich wird durch eine Oberflächenintegralgleichung beschrieben, wobei als Quellen äquivalente Huygensquellen auf der geschlossenen Hüllfläche um den inhomogenen Bereich auftreten. Wie bei den reinen Integralgleichungsverfahren wird die Oberflächenintegralgleichungsdarstellung nach einer Approximation der Quellen durch geeignete Ansatzfunktionen mit der Momentenmethode in ein lineares Gleichungssystem transformiert. Die Verknüpfung der beiden Feldprobleme in dem inhomogenen Raum und dem Außenraum erfolgt durch Einprägen der Stetigkeitsbedingung für die Feldstärken. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, daß nur die inhomogenen Bereiche mit dem lokalen Verfahren erfaßt werden müssen. Ein Nachteil des Hybridverfahrens ist, daß die schwache Besetzung der Finite Elemente Gleichungssysteme durch die Verknüpfung mit den Integralgleichungsdarstellungen teilweise verlorengeht.

B.3 Abschätzung des Rechnerbedarfs für lokale Verfahren (FD, FIT, FE)

Für die Abschätzung wird davon ausgegangen, daß ein geschlossenes Randwertproblem vorliegt oder ein offenes Randwertproblem bereits durch geeignete „offene Randbedingungen“ auf einen endlich großen Lösungsraum reduziert wurde. Der numerische Aufwand für die Formulierung der offenen Randwertbedingungen hängt stark von der verwendeten Vorgehensweise ab. Er wird

hier deshalb nicht weiter diskutiert. Um die folgenden Überlegungen leicht nachvollziehbar zu gestalten, werden sie anhand des Beispiels einer Hohlleitermeßzelle mit Proben aus biologischem Material durchgeführt. Das Problem ist deshalb dadurch gekennzeichnet, daß relativ kleine Bereiche (die biologischen Proben selbst) hoch aufgelöst werden müssen, jedoch für den verbleibenden Luftraum bis zu den Hohlleiterwänden eine deutlich geringere Auflösung ausreichend ist. Die erforderliche Auflösung ergibt sich einerseits durch die zu modellierende Geometrie, andererseits sollte eine Auflösung von zehn Unterteilungen pro Wellenlänge im zu betrachtenden Material in keinem Fall unterschritten werden. Die zu betrachtende Hohlleitermeßzelle hat die Abmessungen 25,0 cm x 12,0 cm x 50,0 cm und es sollen sich darin 30 Proben in 3 Längsreihen mit einem Volumen von je 1 cm³ befinden, wobei angenommen wird, daß die Proben würfelförmig sind. Die Frequenz beträgt 900 MHz. Die biologischen Proben sollen mit einer Längenauflösung von 1 mm modelliert werden. Da für biologisches Material bei 900 MHz

$$\epsilon'_{\text{rbio}} \approx 75 \quad (\text{B.3.1})$$

gilt, ist die Wellenlänge im Material

$$\lambda_{\text{bio}} \approx \frac{33,3 \text{ cm}}{\sqrt{75}} = 3,8 \text{ cm} \quad (\text{B.3.2})$$

und damit eine Auflösung von 1 mm ausreichend. Im Luftraum soll die Längenauflösung nicht geringer als 1 cm werden, da üblicherweise empfohlen wird, bei lokalen numerischen Verfahren ein Verhältnis von 10:1 von minimaler zu maximaler Auflösung

nicht zu überschreiten. Die einfachste Modellierung kann mit einem kartesischen Gitternetz erfolgen. Nehmen wir an, daß wir ein Rechenverfahren zur Verfügung haben, das in der Lage ist, nur die biologischen Proben hochaufgelöst zu betrachten, so ergibt sich die minimale Anzahl von Elementarzellen zu

$$n_e = 30 * 1000 + 14970 = 44970. \quad (B.3.3)$$

Verfügbare Feldlöser haben jedoch in der Regel die Einschränkung, daß die Längenauflösung, die in einem Teilbereich des Querschnitts (z.B. in x-Richtung) gewählt wurde, für die jeweilige Transversalrichtung (z.B. y-Richtung) beibehalten werden muß. Dies führt auf eine notwendige Elementarzellenanzahl von

$$n_e = (22 + 30) * (11 + 10) * (40 + 100) = 152880. \quad (B.3.4)$$

Es empfiehlt sich, allmähliche Übergänge zwischen den unterschiedlichen Auflösungs-niveaus vorzusehen, wobei als Faustregel gilt, daß sich benachbarte Gitterweiten maximal um den Faktor 2 unterscheiden sollen. Damit erhöht sich die Anzahl der Elementarzellen beträchtlich. Die Berechnung des Modells mit einem Finite Differenzen-Verfahren im Zeitbereich (FDTD) erfordert pro Elementarzelle die Speicherung von 6 reellen Unbekannten sowie der schwach besetzten System- und Materialparametermatrizen. Der sich daraus ergebende Rechen-speicherbedarf hängt sehr stark von der konkreten Umsetzung des FDTD-Verfahrens in ein Rechenprogramm ab, so daß allgemeine Aussagen nicht möglich sind. Es soll deshalb nur exemplarisch der Speicherbedarf für das Programm-

paket MAFIA [31] angegeben werden. Für einfache Genauigkeit ergibt sich ein Speicherbedarf von

$$b = (48 * n_e) \text{ Byte} + 5 \text{ MByte für verlustlose Medien} \quad (B.3.5)$$

$$\text{sowie von } b = (60 * n_e) \text{ Byte} + 5 \text{ MByte für verlustbehaftete Medien.} \quad (B.3.6)$$

Das führt für $n_e = 152880$ im verlustbehafteten Fall auf einen Speicherbedarf von etwa 14,2 MByte. Bei einem Finite Differenzen-Verfahren im Frequenzbereich werden pro Elementarzelle nur 3 Unbekannte benötigt, die jedoch komplex sind. Der Speicherbedarf wird im wesentlichen bestimmt von der spärlich besetzten, im allgemeinen (verlustbehafteten) Fall komplexen Systemmatrix. Bei doppelter Genauigkeit (im Frequenzbereich oft zu empfehlen) werden bei MAFIA pro Elementarzelle etwa 400 Byte Speicher benötigt. Für $n_e = 152880$ ergibt sich somit ein Speicherbedarf von etwa 60 MByte, was jedoch nur dann gilt, wenn iterative Gleichungslöser verwendet werden, bei denen während des Lösungsvorgangs der Speicherbedarf nicht anwächst. Bei konkreten Experimenten führen Abweichungen der Probenform von der Würfel-form und die Modellierung weiterer Details, wie z.B. des Glases einer Petrischale, meist zu einer erheblichen Erhöhung der Anzahl

der Elementarzellen. Als Beispiele sollen die Anzahlen der Elementarzellen und des Speicherbedarfs aufgeführt werden, die im Rahmen der in Abschnitt 7.1 - 7.3 durchgeführten Untersuchungen mit Hilfe des Programmpakets MAFIA verwendet wurden (siehe Tabelle 2).

Finite Elemente-Verfahren können sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich genauso auf kartesische Gitternetze angewendet werden wie FD-Verfahren. Die finiten Elemente sind dann Hexaeder. In diesen Fällen ergeben sich auch ähnliche Werte für den Speicherbedarf. Typischerweise werden Finite Elemente-Verfahren jedoch auf Grundlage der weitaus flexibleren Tetraedermodelle eingesetzt. Bei einem typischen Tetraedergitternetz auf der Grundlage von Edge Elements kann man davon ausgehen, daß pro kartesischer Elementarzelle etwa doppelt so viele Unbekannte benötigt werden wie für ein kartesisches Gitternetz, was jedoch unter Umständen genauso wie der Besetzungsgrad der Systemmatrizen stark vom jeweiligen Gitternetz abhängig sein kann. Als Faustformel kann man bei Finite Elemente-Verfahren auf der Grundlage von Tetraedern mit Edge Elements als Ansatzfunktionen davon ausgehen, daß der

Abschnitt	Frequenz	Elementarzellen	RAM	CPU-Zeit
7.1	1800 MHz	$1,6 \cdot 10^6$	120 MB	12,6 Stunden
	900 MHz	$2,3 \cdot 10^6$	165 MB	12,0 Stunden
7.2	1800 MHz	$3,7 \cdot 10^6$	250 MB	38,5 Stunden
	900 MHz	$2,6 \cdot 10^6$	180 MB	56,4 Stunden
7.3	900 MHz	$1,3 \cdot 10^6$	100 MB	1,0 Stunde

Tabelle 2

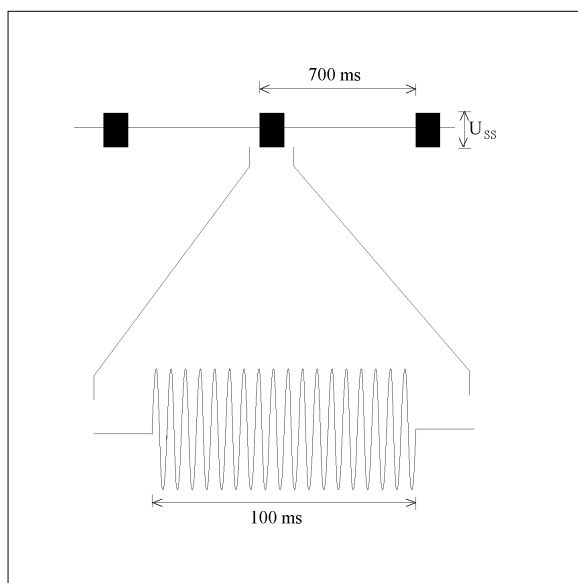


Abbildung C1: Prüf-signal für Frequenzen unter 150 kHz

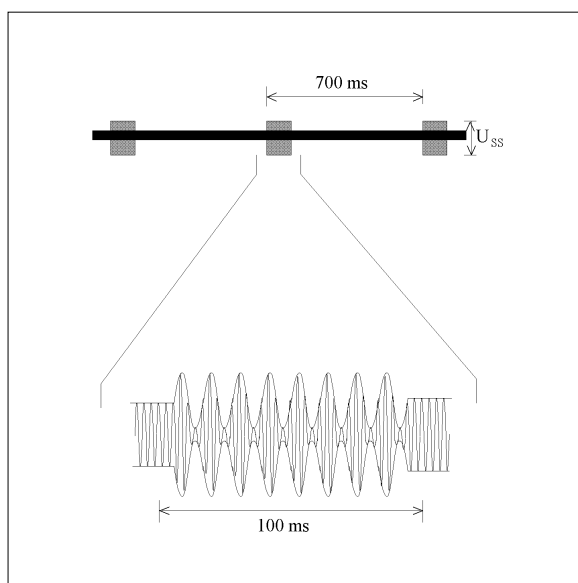


Abbildung C2: Prüf-signal für Frequenzen über 150 kHz

Speicherbedarf sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich mindestens doppelt so groß ist wie bei einem entsprechenden kartesischen Gitternetz. Dabei ist allerdings zu beachten, daß der Approximationsgrad des Feldverlaufes in dem Tetraedermodell gegenüber dem in dem Hexaedermodell von höherer Ordnung ist, obwohl sich die geometrische Diskretisierung im Grunde nicht ändert.

Die notwendigen Rechenzeiten für FD- und FE-Verfahren sind in der Regel bei Zeitbereichsrechnungen sowie auch bei Frequenzbereichsrechnungen mit dem entsprechenden Speicherbedarf korreliert. So wird beim FDTD-Verfahren die Rechenzeit wesentlich von dem Verhältnis der kleinsten Gitterweite zur Wellenlänge und damit von der Größe des Zeitschritts bestimmt. Sie hängt aber auch von der Ein-

schwingzeit der Lösung, also von ihren physikalischen Eigenschaften, ab. Bei den Frequenzbereichsanalysen ist die Wahl des Lösungsverfahrens (iterativ oder direkt) von entscheidender Bedeutung. In beiden Fällen sind deshalb konkrete Angaben nicht machbar. Um dennoch Anhaltspunkte für zu erwartende Rechenzeiten anzugeben, sind in der Tabelle 2 in der letzten Spalte die auf einer Workstation IBM RS 6000 / 58 H mit 101,1 MFlops (nach LINPACK-DP) Rechenleistung für die in den Abschnitten 7.1 - 7.3 beschriebenen Experimente benötigten Zeiten angegeben.

C Prüfsignal aus EN 50061/A1, Entwurf November 1995 [16]

C.1 Frequenzen unter 150 kHz

Abbildung C1: Prüfsignal für Frequenzen unter 150 kHz. Die Schwingungspakete starten und enden an den Nulldurchgängen des Trägers. Es dürfen nur ganze Trägerschwingungen verwendet werden.

C.2 Frequenzen über 150 kHz

Abbildung C2: Prüfsignal für Frequenzen über 150 kHz. Die Schwingungspakete der Modulation starten und enden an den Nulldurchgängen der Modulation. Deshalb startet und endet die Einhüllende bei 100 %. Das Schwingungspaket besteht aus 130 kompletten Schwingungen. Die Modulationstiefe beträgt 95 %.

Summary:

Guidelines for experiments

to investigate the effect of high-frequency electromagnetic fields on biological systems

- High-frequency aspects -

Prof. Dr.-Ing. Volkert Hansen, Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik,
Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal

In recent years public interest in the question of 'the effects of electromagnetic fields on biological systems' has markedly increased. This interest is also reflected in a continually growing number of very different experiments in this area. Nevertheless, the increasing effort expended so far has not necessarily led to the public being better informed. Also the scientists, who deal with this subject in depth, can often check the value of a new publication only with great effort or frequently not at all. The reason for this is that, apart from the complexity of the research subject, the planning, execution and evaluation of experiments is usually carried out according to very different criteria. Consequently comparing the results of experiments with initially very similar objectives is often impossible.

In order to improve the basis for future experiments, initiated by the Forschungsgemeinschaft

Funk e.V. in spring 1994, a group of scientists from the Federal Republic of Germany started the work of compiling 'Guidelines for experiments to investigate the effect of high-frequency electromagnetic fields on biological systems'; the editor is the author of this report, which summarises the considerations and discussions.

The guidelines are structured in seven sections. Following the introduction a catalogue of the aims of possible experiments is provided in section 2. The aim of such investigations can be to reveal interactions or to prove their impossibility or to confirm theoretical concepts, hypotheses or published experimental findings. Section 3 deals with general requirements for experiments. This section is included only for the sake of completeness, since the factors listed – particularly guaranteeing the clarity and thereby the repeatability of the experiments –

apply to any scientific experiment and hence are familiar to every scientist. Practice reveals, however, that they are often not respected to the degree that is desirable. Section 4 deals exhaustively with the criteria for selecting the HF-measurement device and Section 6 with the not yet concluded considerations regarding the form of the signal. The intervening Section 5, 'Classification of electromagnetic fields', is directed in particular to the scientists who are not experts in high-frequency technology. The list of the most important types of fields is supplemented in each case with an evaluation, on the basis of the criteria established in Section 4. Section 7 reports the experiences gathered from experiments performed so far. In the appendix a check-list for planning and performing experiments, some considerations on numerical methods for analysing field problems and two test signals of the standard EN 50061 are given.



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