



---

**Zwischenbericht**  
**„Aufbau einer Expositionseinrichtung“**  
**im Rahmen des Forschungsvorhabens**  
**„Möglicher Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung des Mobilfunks auf das Auslösen und den Verlauf von Phantomgeräuschen (Tinnitus)“**  
**des Bundesamts für Strahlenschutz**

im Auftrag des  
**Universitätsklinikum Tübingen**  
**Hörforschungszentrum Tübingen, THRC**  
**Elfriede-Aulhornstr. 5**  
**72076 Tübingen**

**IMST GmbH**  
**Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2**  
**47475 Kamp-Lintfort**

Dipl.-Ing. Christian Adami  
Dr.-Ing. Achim Bahr  
Dipl.-Ing. Thomas Bolz

**22. Mai 2006**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND PROBLEMDARSTELLUNG</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>AUFBAU DER EXPOSITIONSEINRICHTUNG</b> .....	<b>3</b>
2.1	<i>VERSUCHSDESIGN</i> .....	3
2.2	<i>STAND DER TECHNIK</i> .....	3
2.3	<i>REALISIERUNG DER EXPOSITIONSEINRICHTUNG</i> .....	4
2.4	<i>TESTSIGNAL</i> .....	8
<b>3</b>	<b>METHODEN</b> .....	<b>9</b>
3.1	<i>DAS SOFTWARE-PAKET EMPIRE</i> .....	9
3.2	<i>DAS DOSIMETRISCHE MESSSYSTEM DASY</i> .....	10
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE</b> .....	<b>11</b>
4.1	<i>NUMERISCHE BERECHNUNGEN</i> .....	11
4.1.1	<i>NUMERISCHE MODELLE</i> .....	11
4.1.2	<i>AUSWERTUNG DER SAR</i> .....	11
4.1.3	<i>SIMULATIONSERGEBNISSE</i> .....	12
4.2	<i>MESSTECHNISCHE VERIFIKATION DER SIMULATIONSERGEBNISSE</i> .....	14
4.2.1	<i>VERGLEICH DER REFLEXIONSFAKTOREN</i> .....	14
4.2.2	<i>MESSTECHNISCHE VERIFIKATION IN EINEM ZYLINDERFÖRMIGEN PHANTOM</i> .....	16
<b>5</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>18</b>

## 1 Einleitung und Problemdarstellung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Möglicher Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung des Mobilfunks auf das Auslösen und den Verlauf von Phantomgeräuschen (Tinnitus)“ des Bundesamts für Strahlenschutz ist eine „in vivo“-Expositionseinrichtung zur Befeldung von Ratten für den Mobilfunkstandard GSM900 aufzubauen. Die Expositionseinrichtung ist in bezug auf verschiedene geblindete SAR-Intensitäten zu optimieren.

In diesem Forschungsvorhaben sollen potenzielle Effekte auf das Hörsystem anhand von verhaltensphysiologischen und molekularbiologischen Methoden untersucht werden. Hierzu wird ein Verhaltenstest für Ratten zum Auslösen von Phantomgeräuschen verwendet. Die numerische Charakterisierung der Expositionseinrichtung erfolgt mit dem Feldsimulationsprogramm EMPIRE der IMST GmbH [Empire 2005]. Das Programm basiert auf der Methode der finiten Differenzen im Zeitbereich (FDTD) und wird erfolgreich zur dosimetrischen Charakterisierung von Expositionsanlagen eingesetzt.

Die messtechnische Charakterisierung zur Validierung der Expositionseinrichtung wird mit dem dosimetrischen Messsystem [DASY4] durchgeführt.

## 2 Aufbau der Expositionseinrichtung

### 2.1 Versuchsdesign

Mit der Expositionseinrichtung sollen acht Tiere gleichzeitig befeldet werden, wobei zwei Gruppen von vier Tieren gebildet werden, die mit der gleichen SAR-Intensität exponiert werden. Die Exposition der Tiere erfolgt geblindet mit den in Tabelle 1 aufgeführten fünf SAR-Intensitäten.

SAR-Intensitäten [W/kg]				
20	2,0	0,2	0,02	0,0

Tabelle 1: SAR-Intensitäten zur Befeldung der Versuchstiere.

### 2.2 Stand der Technik

Die derzeit eingesetzten Expositionseinrichtungen beruhen auf zwei verschiedenen Prinzipien: Ganzkörperexposition von frei laufenden Tieren z. B. mit einem radialen Wellenleiter (Bild 1) [Streckert 1998, Bitz 2003] bzw. lokale Exposition von fixierten Tieren durch eine körpernahe Antenne (Bild 2) [Leveque 2004]. Für die Untersuchung von Phantomgeräuschen ist eine lokale Exposition im Bereich der Ohren der Versuchstiere sinnvoll. Außerdem ist es erforderlich, dass sich die Versuchstiere für die verhaltensphysiologischen Experimente frei im Käfig bewegen können. Aufgrund dieser

Anforderungen wurde eine neuartige Expositionseinrichtung entwickelt, die im folgenden vorgestellt wird.

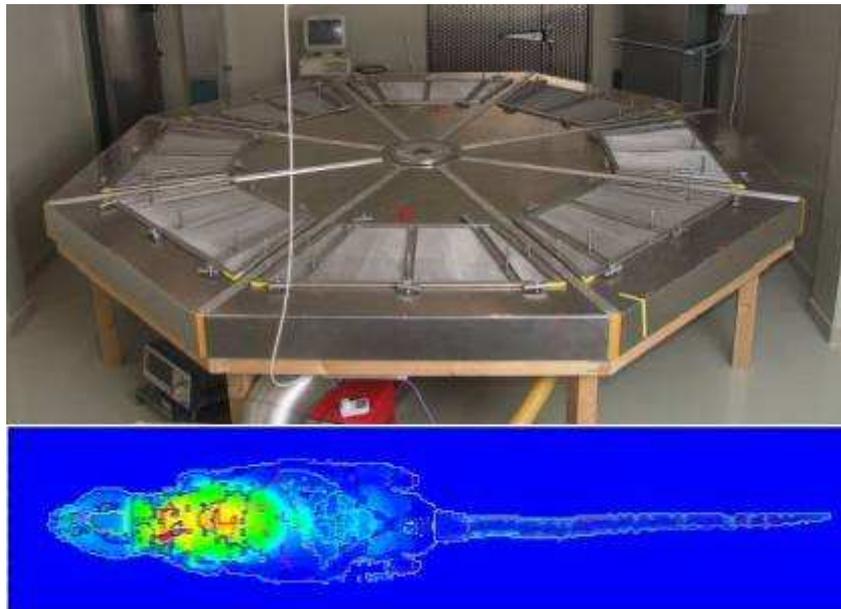


Bild 1: Geschlossene Exposition in Form eines Radialwellenleiters für 24 Ratten [Bitz 2003].



Bild 2: Lokale Exposition einer Ratte bei 900 MHz des französischen COMOBIO Forschungsprojekts [Leveque 2004].

### 2.3 Realisierung der Expositionseinrichtung

Die Expositionseinrichtung ist in Bild 3 schematisch gezeigt. Sie besteht aus zwei Befeldungssystemen, die mit getrennten Intensitäten betrieben werden können. Ein Befeldungssystem besteht aus vier Käfigen.

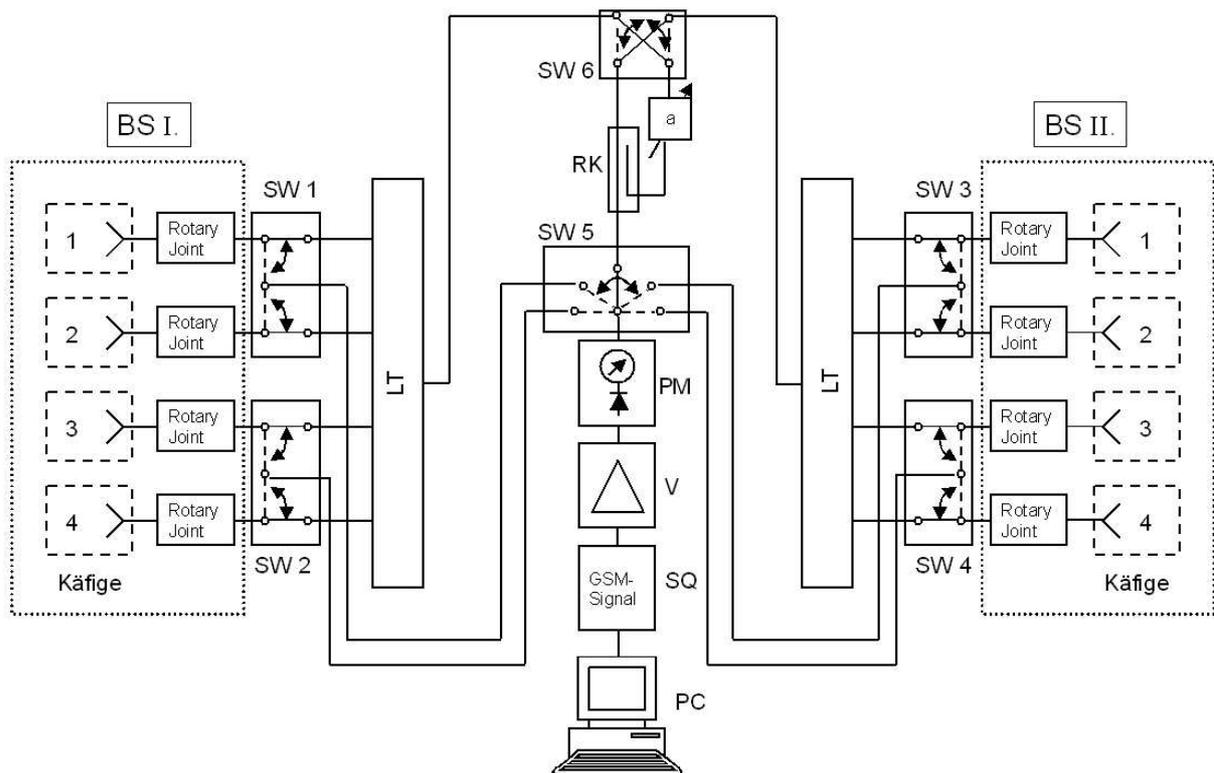


Bild 3: Prinzipieller Aufbau der Expositionseinrichtung.

Die Expositionseinrichtung nach Bild 3 besteht aus den folgenden Systemkomponenten:

- SW 1 - 4 : Switch, DP3T
- SW 5 : Switch, SP5T
- SW 6 : Switch, DPDT
- LT : Leistungsteiler
- BS I : Befeldungssystem 1
- BS II : Befeldungssystem 2
- PM : Powermeter
- RK : Richtkoppler
- V : Verstärker
- SQ : Signalquelle
- PC : Steuerrechner

Die Expositionseinrichtung ist vollständig automatisiert. Vor und nach jeder Exposition kann der Reflexionsfaktor jeder einzelnen Antenne durch den Einsatz von elektronischen Schaltern mittels eines Leistungsmessers (PM) kontrolliert werden. Während der Exposition wird die Leistung auf die acht Käfige gemäß des entwickelten Befeldungsschemas aufgeteilt. Richtkoppler, elektronisch steuerbares Dämpfungsglied und elektronische Schalter ermöglichen einen unabhängigen Betrieb der beiden Befel-

dungssysteme mit den vorgegebenen SAR-Intensitäten. Das Testsignal wird von einem Signalgenerator bereitgestellt und über einem Leistungsverstärker verstärkt.

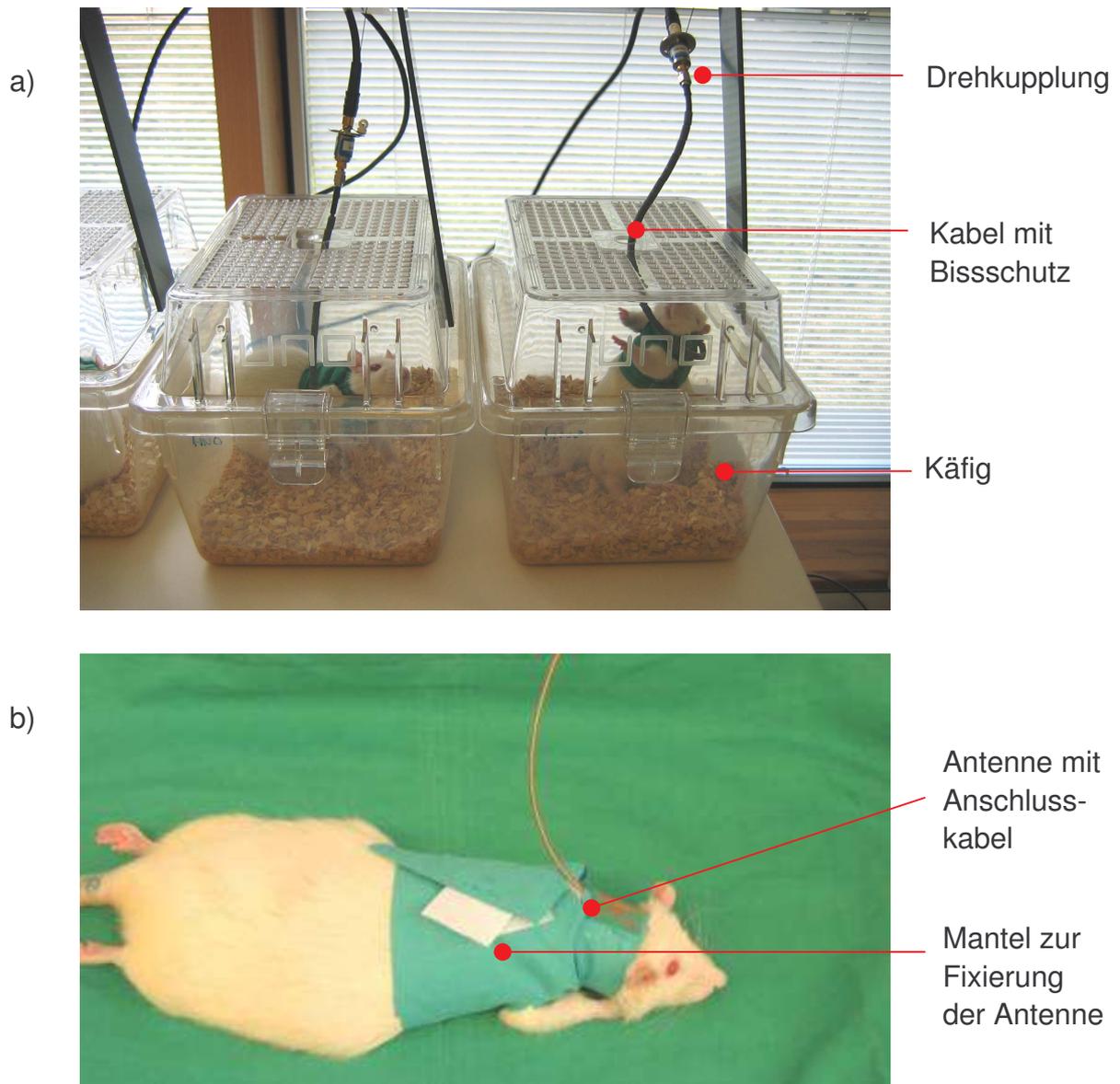


Bild 4: a) Ratte mit Loop-Antenne im Käfig während der Exposition; b) narkotisierte Ratte mit Mantel und Loop-Antenne.

Zur lokalen Exposition der Ratten werden Loop-Antennen verwendet, die um den Hals der Ratte gelegt und fixiert werden. In Bild 4a) ist eine Ratte im Käfig während der Exposition gezeigt, in Bild 4b) ist die Anbringung der Antenne am Versuchstier zu sehen. Die Loop-Antenne um den Hals der Ratte ist mittels eines Kabels mit einer Drehkupplung verbunden, um eine Verdrillung des Kabels zu verhindern.

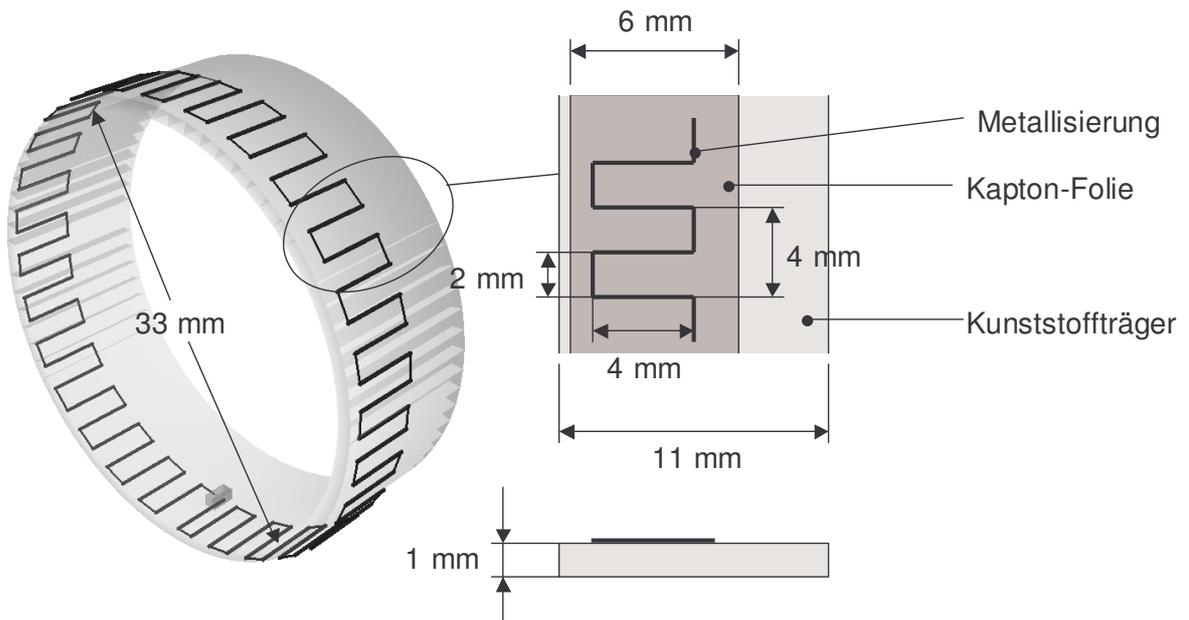


Bild 5: Loop-Antenne mit mäanderförmiger Metallisierung.

Der Aufbau einer Loop-Antenne ist in Bild 5 dargestellt. Sie besteht aus einer mäanderförmigen Leiterbahnstruktur auf Kaptonfolie, die auf einem Plastikring mit einem inneren Durchmesser von 33 mm aufgebracht ist. Die Länge der mäanderförmigen Leiterbahn ist so konzipiert, dass bei Betrieb am Versuchstier eine gute Anpassung bei 900 MHz erreicht wird.

In Bild 6 ist die aufgebaute Expositionseinrichtung vor Ort dargestellt. Links und rechts stehen jeweils vier Käfige, die je ein Befeldungssystem bilden.

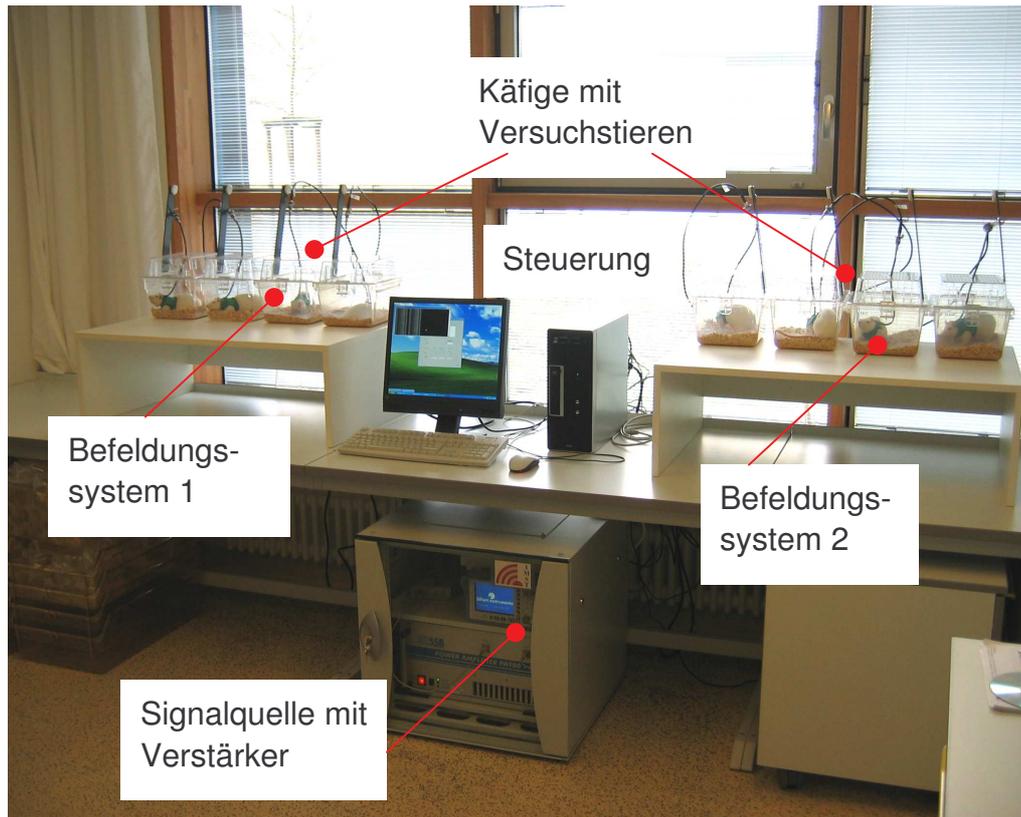


Bild 6: Aufbau der Expositionseinrichtung mit Versuchstieren.

## 2.4 Testsignal

Die Kommunikation zwischen Basisstation und Endgerät erfolgt bei GSM in einem Zeitschlitz (Burst) innerhalb eines TDMA-Rahmens (TDMA, Time Division Multiple Access). Ein TDMA-Rahmen gemäß Bild 7 mit einer Dauer von 4,615 ms setzt sich aus 8 Zeitschlitzen der Dauer 577  $\mu$ s zusammen. Unter Berücksichtigung der im GSM-Standard vorgesehenen Schutzzeitintervalle wird im Rahmen dieser Untersuchung die Sendedauer eines Zeitschlitzes auf 553  $\mu$ s festgelegt.

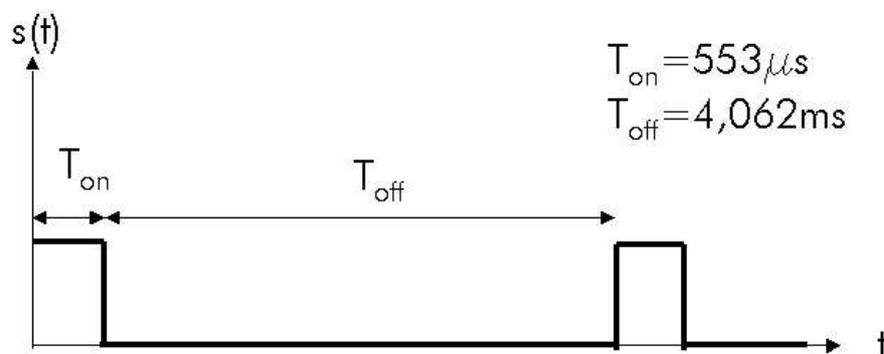


Bild 7: Signalstruktur des GSM-Signals.

### 3 Methoden

#### 3.1 Das Software-Paket EMPIRE

Das Feldberechnungsprogramm EMPIRE [Empire 2005] ist ein Softwareprodukt der IMST GmbH, das auf der Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich (FDTD) basiert. Anwendung findet das FDTD-Verfahren in Bereichen wie der Analyse planarer und gehäuseter Strukturen, Dosimetrie, Antennen und EMV-Problemen.

Im Jahr 1966 führte Yee [Yee 1966] das FDTD-Verfahren ein, das aufgrund seines einfachen und stabilen Algorithmus zu einem der meist verwendeten numerischen Methoden gehört. Das FDTD-Verfahren ist eine numerische Methode, die die Maxwell'schen Gleichungen im Raum- und Zeitbereich unter Verwendung von zentralen Differenzen direkt diskretisiert. Der durch diese Näherung entstehende Fehler ist von der Ordnung 2. Entsprechend der in Bild 8 dargestellten Einheitszelle werden die elektrischen Feldkomponenten  $E$  in der Mitte der Würfelkanten und die magnetischen Feldkomponenten  $H$  in der Mitte der Würfelflächen ausgewertet. Die Bestimmung der elektromagnetischen Feldkomponenten mit fortschreitendem Zeitschritt erfolgt nach dem sog. Leapfrog-Algorithmus. Das magnetische Feld  $H$  zum Zeitpunkt  $(n+1/2)\Delta t$  bestimmt sich aus dem elektrischen Feld  $E$  zum Zeitpunkt  $n\Delta t$ . Anschließend wird das elektrische Feld  $E$  zum Zeitpunkt  $(n+1)\Delta t$  aus dem magnetischen Feld  $H$  zum Zeitpunkt  $(n+1/2)\Delta t$  bestimmt.

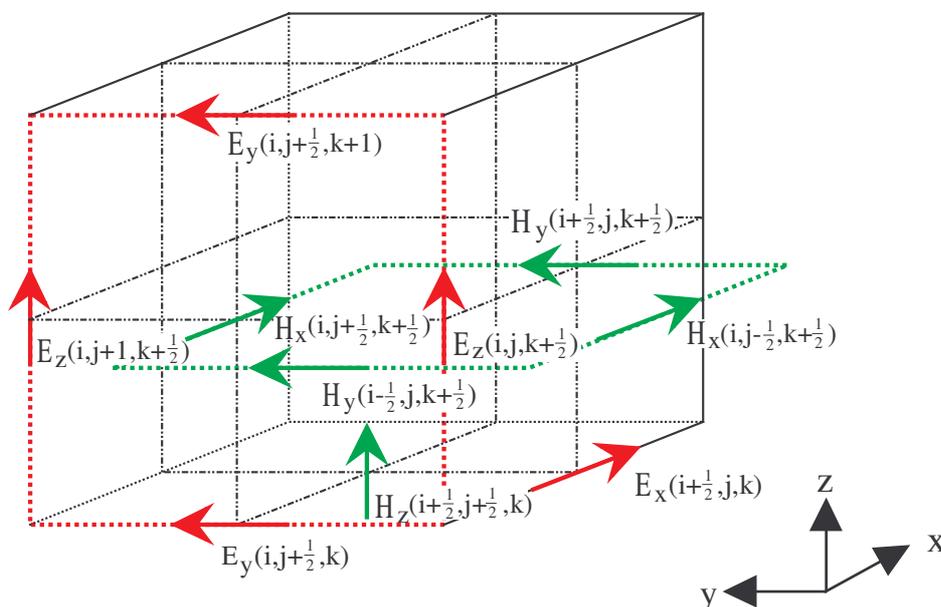


Bild 8: Anordnung der Feldkomponenten innerhalb der Einheitszelle im Yee-Schema.

Ein wichtiger Aspekt bei der Verwendung des FDTD-Verfahrens, besonders bei der Lösung von Strahlungsproblemen, ist die Verfügbarkeit geeigneter absorbierender Randbedingungen (absorbing boundary condition, ABC). Im Gegensatz zu anderen numerischen Verfahren, wie z.B. der Momenten-Methode, ist der Simulationsraum beim FDTD-Verfahren begrenzt. Zur Simulation des freien Raumes wurden spezielle Algorithmen für die äußeren Ebenen des FDTD-Gitters entwickelt. Im Jahr 1994 stellte

Berenger [Berenger 1994] die PML-Randbedingung (perfectly matched layer, PML) vor, die anderen absorbierenden Randbedingungen deutlich überlegen ist. Insbesondere kann die PML-Randbedingung auch im Nahfeld der zu untersuchenden Struktur platziert werden. Somit stellt die PML-Randbedingung ein hinreichend genaues und speichereffizientes Instrument zur Modellierung des freien Raumes dar. Mehr Informationen über das FDTD-Verfahren sind in [Kunz 1993] und [Taflove 1995] zu finden.

### 3.2 Das dosimetrische Messsystem DASY

Das in Bild 9 gezeigte dosimetrische Messsystem DASY4 (Dosimetric Assessment System) [DASY4] eignet sich zur normenkonformen Messung von SAR-Werten (z.B. gemäß [EN50361]) und zur Bestimmung von elektromagnetischen Freiraumfeldern. Zu dem Gesamtsystem gehört ein Roboter zur genauen Positionierung von Feldsonden, ein Phantom zur Nachbildung des menschlichen Kopfes und eine Software, die eine Auswertung der Messwerte im Sinne verschiedener Normen erlaubt. Das Messsystem befindet sich derzeit vornehmlich in der Geräteindustrie im Einsatz. Zur messtechnischen Charakterisierung von Expositionseinrichtungen bietet das Messsystem zusätzlich die Möglichkeit zur Messung elektrischer und magnetischer Freiraumfelder.

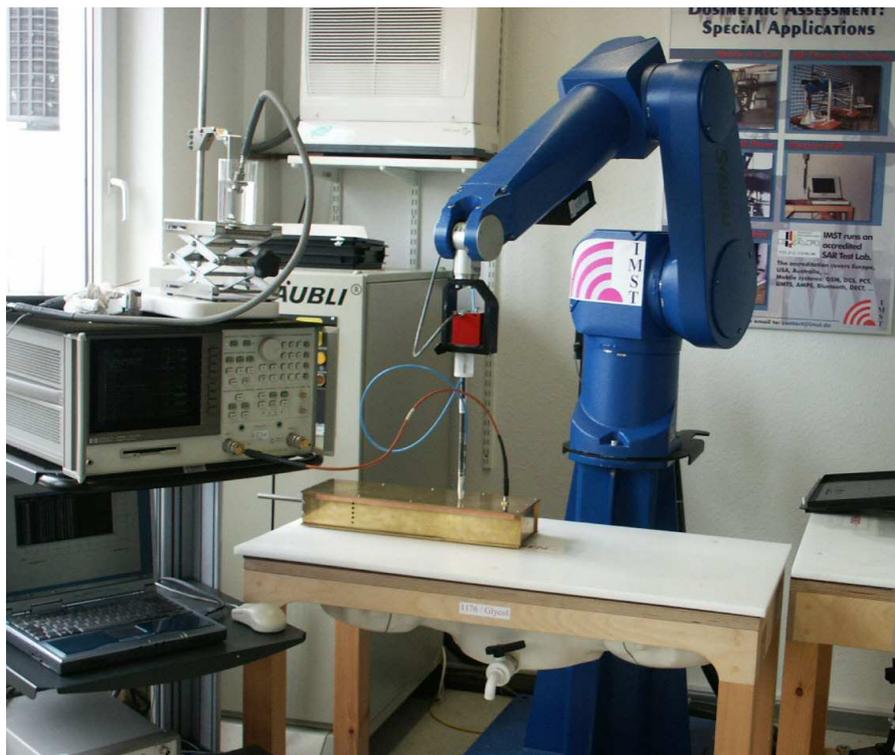


Bild 9: Vermessung des magnetischen Nahfelds im Resonator mit dem dosimetrischen Messsystem DASY4.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Numerische Berechnungen

#### 4.1.1 Numerische Modelle

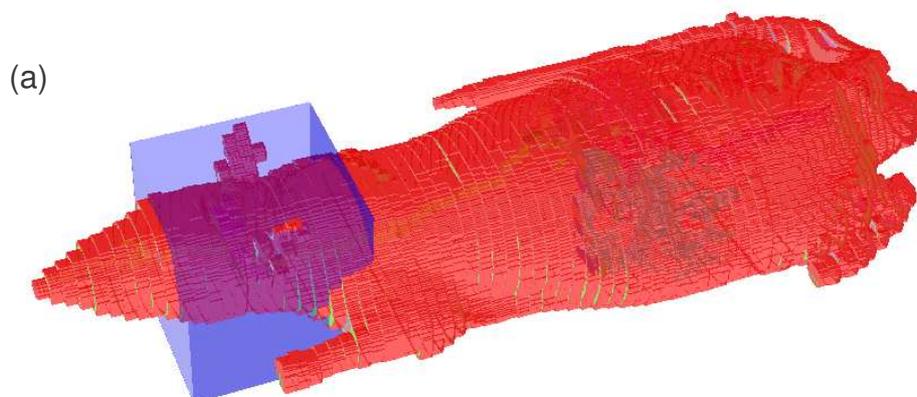
In Bild 10 ist das verwendete numerische Rattenmodell [AFRL] dargestellt. Das hier verwendete Modell hat ein Gewicht von 330 g. Die Auflösung des Modells beträgt in der x- und y-Richtung 0,39 mm und in der z-Richtung 1 mm. Um den Hals der Ratte befindet sich die Loop-Antenne mit der mäanderförmigen Metallisierung und dem Plastikträger gemäß Bild 5.



Bild 10: AFRL-Rattenmodell mit Loop-Antenne.

#### 4.1.2 Auswertung der SAR

Neben einer Auswertung der Ganzkörper-SAR erfolgt eine SAR-Auswertung im Kopfbereich des Versuchstiers in dem blau markierten Quader gemäß Bild 11a, der eine Masse von 43,1 g beinhaltet. Außerdem wird eine separate SAR-Auswertung im Bereich der Ohren vorgenommen (Bild 11b). Der Ohrenbereich links enthält eine Masse von 6,35 g und der Bereich rechts eine Masse von 10,57 g.



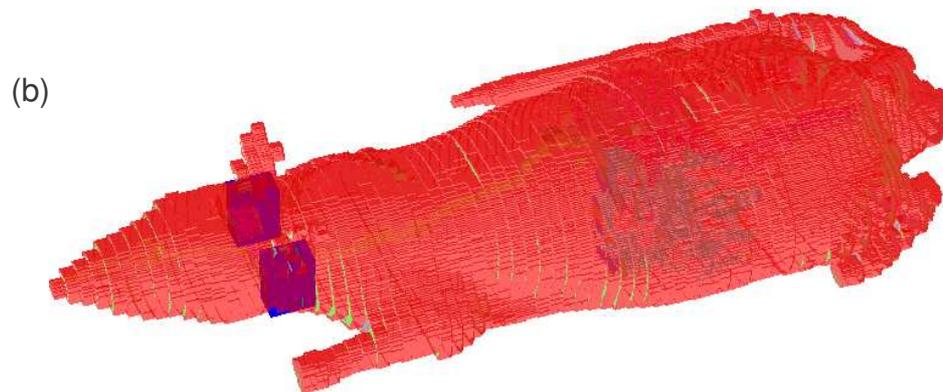


Bild 11: (a) Auswertebereich (blaue Box) umfasst den Kopf der Ratte im Bereich der Loop-Antenne; (b) Auswertung im Ohrbereich (blaue Boxen).

#### 4.1.3 Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Simulation für 900 MHz zusammengefasst. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse für die Auswertebereiche gemäß Bild 11a und 11b aufgeführt.

Die Einstellung der Leistung für die beiden Befeldungssysteme erfolgt so, dass die SAR im Ohrbereich nach Tabelle 2 der gewünschten SAR-Intensität gemäß Tabelle 1 entspricht.

Auswertebereich	Mittlere SAR [W/kg]	Lokal/Ganzkörper
Kopfbereich (a)	16,18	7,0
Ohrbereich (b)	50,12	21,8
Ganzkörper	2,30	1

Tabelle 2: Gemittelte lokale SAR für 1 W Wirkleistung.

In Tabelle 3 ist die mittlere gewebespezifische SAR für ausgewählte Gewebe im Kopfbereich dargestellt. Die jeweilige gewebespezifische Mittelungsmasse entspricht der Gesamtmasse des Gewebes in der farblich markierten Box gemäß Bild 11a. Tabelle 4 zeigt für dieselben Gewebe die maximale über 5 mg und 50 mg Mittelungsmasse gemittelte SAR. Diese Mittelungsmassen entsprechen gemäß [Fröhlich 2003] der 10 g und 1 g –Mittelungsmasse beim Menschen. Alle Werte beziehen sich auf 1 W Wirkleistung, die in der Antenne umgesetzt werden.

Gewebe	Gewebespezifische SAR [W/kg/W]			
	Mittelwert	Standard- abweichung	Minimal	Maximal
Gehirn (Kortex)	6,89	4,52	0,48	32,0
Blut	7,35	3,46	3,58	13,4
Blutgefäße	7,45	4,96	2,34	24,9
Nerven	15,5	5,97	5,92	27,5
CSF	27,0	14,3	1,82	46,7

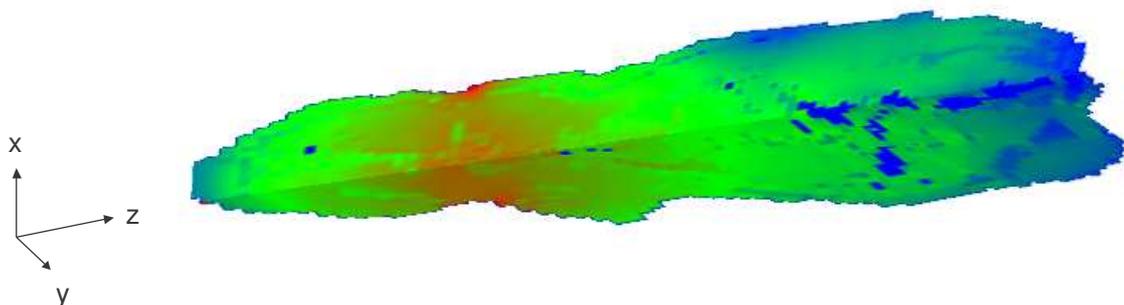
Tabelle 3: Mittlere gewebespezifische SAR für 1 W Wirkleistung.

Gewebe	SAR [W/kg/W]	
	50 mg-Mittelungsmasse	5 mg-Mittelungsmasse
Gehirn (Kortex)	15,1	19,5
Blut	0,26	0,96
Blutgefäße	0,35	1,86
Nerven	9,07	17,8
CSF	0,65	4,44

Tabelle 4: Maximale gewebespezifische SAR für die Mittelungsmassen 50 mg und 5 mg für ausgewählte Gewebe im Kopf für 1 W Wirkleistung.

Die Simulationsergebnisse zeigen eine ausgeprägte lokale Exposition des Kopfes, insbesondere im Bereich der Ohren. Aufgrund von Unterschieden zwischen der linken und der rechten Seite im Ohrenbereich wird die SAR über beide Bereiche zusammen gemittelt (Tabelle 2). Die Unterschiede sind auf unterschiedliche Mittelungsmassen der einzelnen Gewebe aufgrund der Unsymmetrie des Rattenmodells in diesen Bereichen zurückzuführen. Bild 12 und 13 zeigen die lokale SAR-Verteilung innerhalb der Ratte.

a)



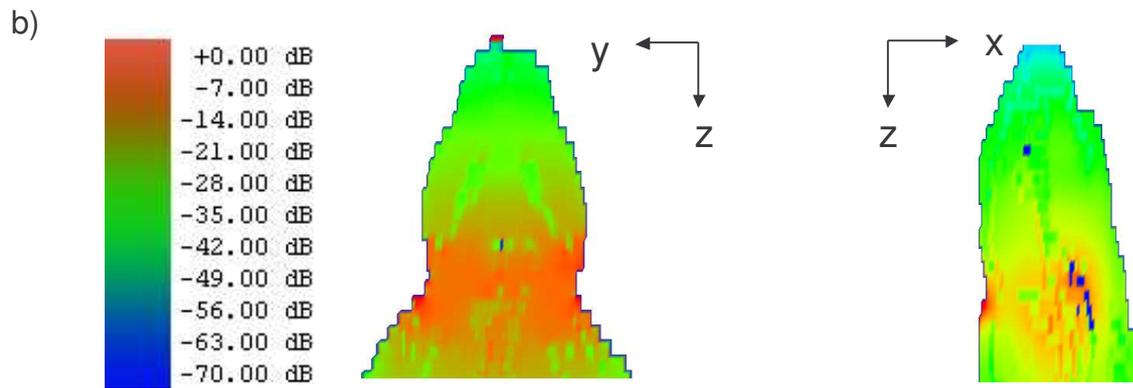


Bild 12: SAR Verteilung innerhalb der Ratte in den Hauptlängsschnitten: a) Ganzkörperdarstellung, b) Detaildarstellung im Kopfbereich.

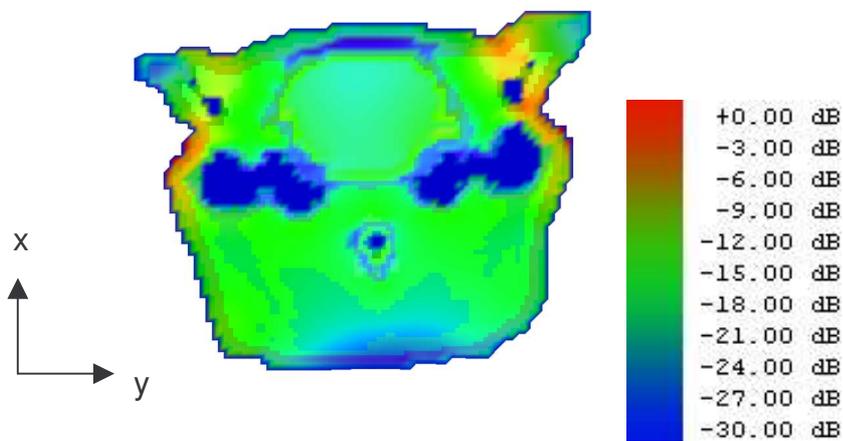


Bild 13: SAR-Verteilung in der xy-Ebene im Ohrbereich.

## 4.2 Messtechnische Verifikation der Simulationsergebnisse

### 4.2.1 Vergleich der Reflexionsfaktoren

In den Bildern 14 und 15 sind zunächst Vergleiche des Reflexionsfaktors der Loop-Antenne für den Feiraumfall und für den Betrieb am Versuchstier dargestellt.

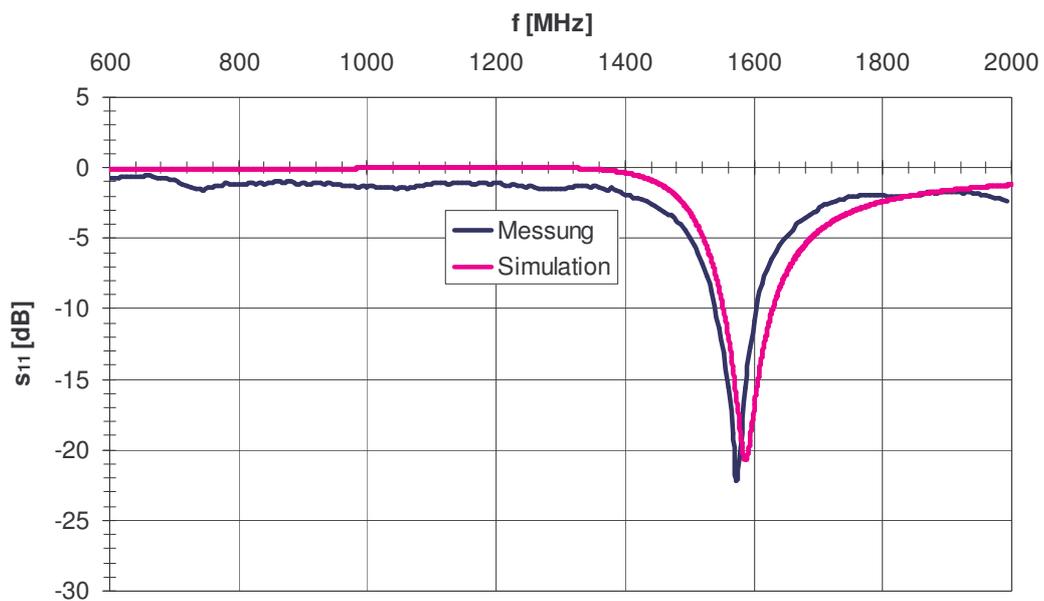


Bild 14: Vergleich von Messung und Simulation des Reflexionsfaktors der Loop-Antenne im Freiraum.

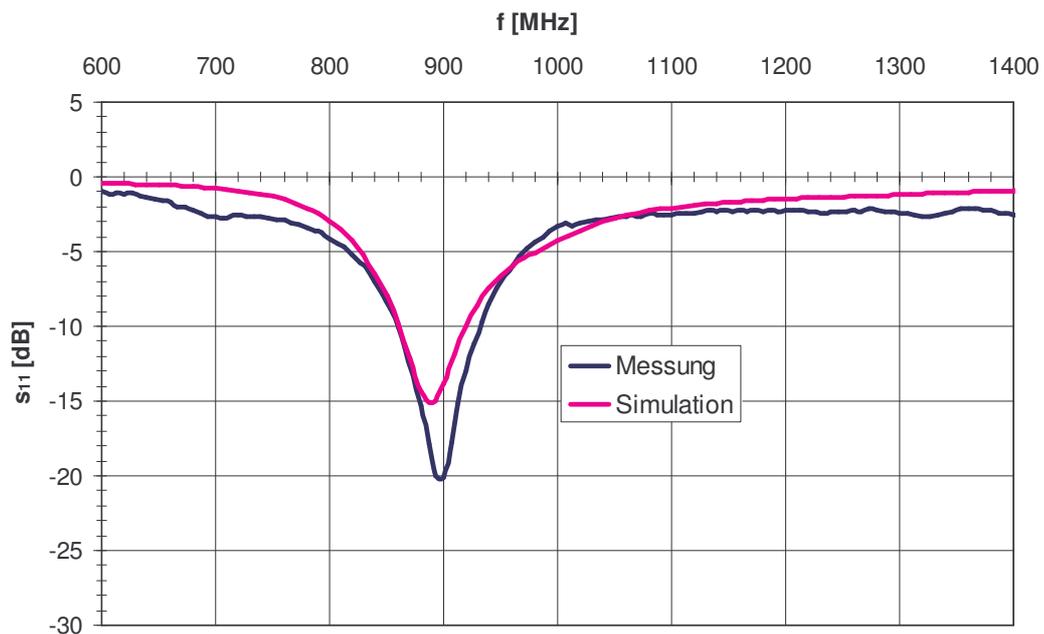


Bild 15: Vergleich von Messung und Simulation des Reflexionsfaktors der Loop-Antenne um den Hals der Ratte.

Die Vergleiche in den Bildern 14 und 15 zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Eine gute Anpassung bei der Zielfrequenz von 900 MHz wird bei Betrieb der Loop-Antenne am Versuchstier erreicht.

#### 4.2.2 Messtechnische Verifikation in einem zylinderförmigen Phantom

Die simulierten SAR-Ergebnisse werden in diesem Abschnitt mit einem geeigneten zylinderförmigen Phantom messtechnisch verifiziert. Die Maße des Zylinders sind in Bild 16 aufgeführt. Der Zylinder ist mit gewebesimulierender Flüssigkeit für 900 MHz gefüllt. Die entsprechenden Parameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Zur Messung befindet sich die Antenne gemäß Bild 17 im unteren Bereich des Zylinders.

Gewebesimulierende Flüssigkeit	$\epsilon_r$	$\sigma$ [S/m]
Head 900 MHz	42,5	0,95

Tabelle 5: Dielektrische Parameter der gewebesimulierenden Flüssigkeit für den Kopf.

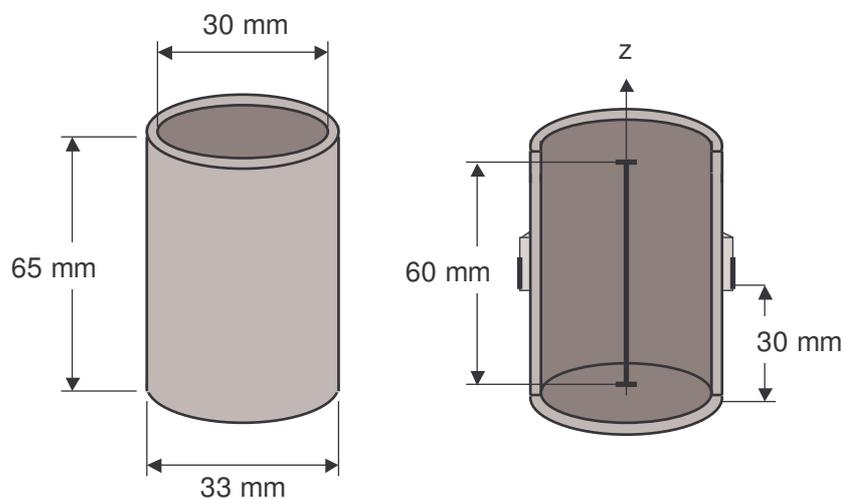


Bild 16: Zylinderförmiges Phantom zur Validierung der Simulationsergebnisse.

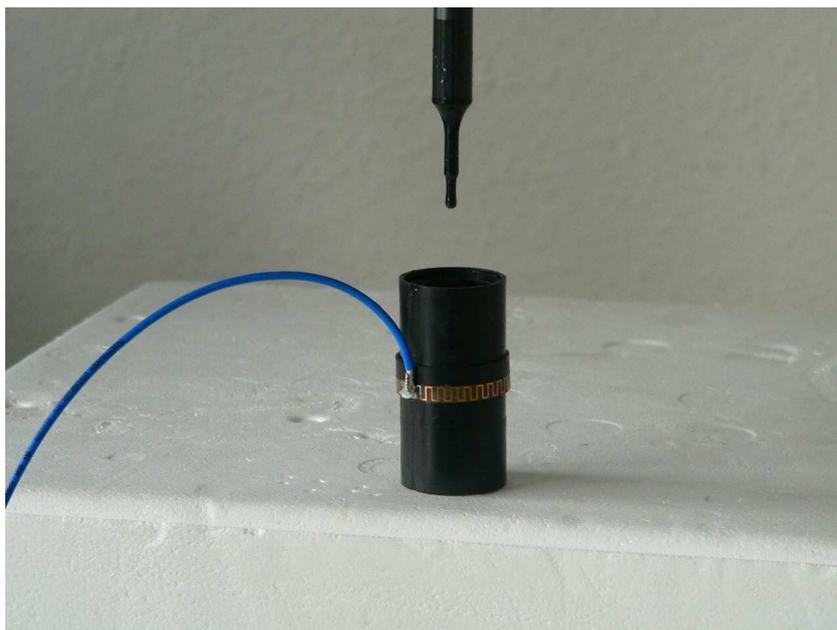


Bild 17: SAR-Messung im zylinderförmigen Phantom.

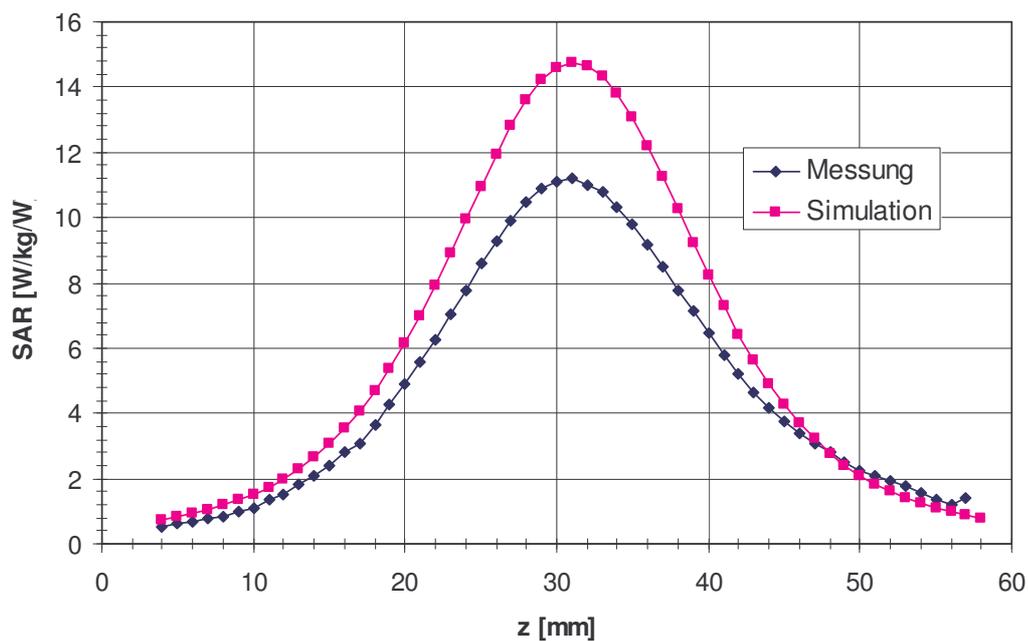


Bild 18: Lokale SAR-Verteilung im Zylinder entlang der z-Achse bei 900 MHz.

Zur SAR-Messung wird das Messsystem DASY 4 [DASY4] mit der isotropen E-Feld-Messsonde EX3DV4 verwendet. Aufgrund des geringen Innendurchmessers des Zylinders erfolgt die SAR-Messung in der Zylindermitte entlang der z-Achse. Die Auswertung entlang der z-Achse beginnt in der Mitte der Loop-Antenne im untern Bereich, 2 mm vom Boden des Phantoms entfernt. Bild 18 zeigt den Vergleich der simulierten und messtechnisch ermittelten lokalen SAR.

## 5 Literatur

- [AFRL] Bioeffect research dosimetry models. San Antonio (USA). Available from: <http://www.brooks.af.mil/AFRL/HED/hedr/hedr.html> [Last updated: 28 September 2004].
- [Berenger 1994] J.-P. Berenger: A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves. J. Comput. Phys., Vol. 114, 185-200, 1994.
- [Bitz 2003] A. Bitz: Numerische Feldberechnung im biologischen Gewebe: Exposition von Personen, Tieren und isolierten biologischen Systemen in elektromagnetischen Feldern. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2003.
- [DASY4] Schmid & Partner Engineering AG: DASY4 Manual. 2005.
- [Empire 2005] EMPIRE™. User and Reference Manual. IMST GmbH, 2005.
- [EN50361] European Standard EN 50361: Basic Standard for the Measurement of Specific Absorption Rate Related to Human Exposure to Electromagnetic Fields from Mobile Phones (300 MHz – 3 GHz), CENELEC, Brussels, 2001.
- [Fröhlich 2003] J. Fröhlich, V. Berdinas Torres, A. Klingelböck, N. Nikoloski, N. Kuster: Abschlussbericht zum Projekt „Untersuchung der SAR-Verteilung elektromagnetisch exponierter Versuchstiere“, BfS 2003.
- [Kunz 1993] K. S. Kunz, R. J. Luebbers: The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics. CRC Press, Boca Raton, 1993.
- [Leveque 2004] P. Leveque, C. Dale, B. Veyret, J. Wiart : Dosimetric Analysis of a 900-MHz Rat Head Exposure System, IEEE Trans. Microw. Theo. and Tech., vol. 52, 2076-2083, 2004.
- [Streckert 1998] J. Streckert: Anwendung feldtheoretischer Verfahren auf Untersuchungen zur Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Mensch und Umwelt. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 1998.
- [Taflove 1995] A. Taflove: Computational Electrodynamics – The Finite Difference Time Domain method. Artech House, Boston, 1995.
- [Yee 1966] K. S. Yee: Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-14, 302-307, 1966.

---

**IMST GmbH**

Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2  
D-47475 Kamp-Lintfort

Tel. 0 2842 / 981 - 370  
Fax 0 2842 / 981 - 299  
email: bahr@imst.de