

# Untersuchung

## elektromagnetischer Felder und thermischer Effekte im menschlichen Körper bei der Exposition mit cm/mm-Wellen

### 1. Einleitung

Die hier vorgestellte Studie dient der Vorbereitung biologischer Experimente im cm-mm-Wellenlängenbereich und widmet sich den folgenden zwei Fragestellungen:

1. Sie klärt den Zusammenhang zwischen der auf den menschlichen Körper auftreffenden Leistungsflussdichte und der in der menschlichen Haut und im menschlichen Auge erzeugten Verteilung der spezifischen Absorptionsrate (SAR). Die Kenntnis dieses Zusammenhanges ermöglicht es überhaupt erst, eine Aussage zu Dosis-Wirkungsbeziehungen in biologischen Experimenten zu treffen, falls in diesen Experimenten Effekte gefunden werden sollten.

2. Die Studie zeigt den Zusammenhang zwischen der auf den menschlichen Körper auftreffenden Leistungsflussdichte und der Wärmewirkung dieser Felder auf. Mit Hilfe dieser Kenntnis kann sicher zwischen Expositionsszenarien mit signifikanter Temperaturerhöhung im Gewebe und Expositionsszenarien ohne thermische Effekte unterschieden werden.

### 2. Grenzwerte zum Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern

Zum Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern existieren weltweit zahlreiche Regelungen. In Europa ist seit 1999 die Europäische Ratsempfehlung 1999/519/EC in Kraft, in der Expositionsgrenzwerte für die allgemeine Bevölkerung festgelegt sind [2]. Im interessierenden Frequenzbereich basieren die Grenz-

wertempfehlungen primär auf thermischen Überlegungen. Die dosimetrische Basisgröße im Hochfrequenzbereich für Frequenzen oberhalb von 10 GHz ist die Leistungsflussdichte mit einem Wert von  $S = 10 \text{ W/m}^2$ .

### 3. Messung dielektrischer Eigenschaften von biologischem Gewebe

Zur numerischen Bestimmung der elektromagnetischen Felder im biologischen Gewebe benötigt man zunächst die Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften der verschiedenen Gewebearten. Es finden sich in der Literatur zahlreiche Arbeiten, die sich mit der Messung oder der modellhaften Beschreibung dielektrischer Parameter von biologischem Gewebe befassen [3]. Für einige Gewebearten des menschlichen Auges liegen jedoch keine Informationen vor. Es werden daher eigene ergänzende Messungen im interessierenden Frequenzbereich durchgeführt.

### 4. Berechnung elektromagnetischer Felder in Haut und Auge

Zur Berechnung der spezifischen Absorptionsrate in der menschlichen Haut im Frequenzbereich von 3 - 100 GHz wird ein eindimensionales Schichtenmodell mit Epidermis, Dermis, Fettgewebe und Muskelgewebe generiert. Als Feldquelle wird eine senkrecht auf die Haut einfallende homogene, ebene elektromagnetische Welle (HEW) mit einer Leistungsflussdichte

von  $S = 10 \text{ W/m}^2$  gewählt. Die Anordnung ist in Bild 1 gezeigt. Die dielektrischen Eigenschaften der biologischen Gewebe sind der Literatur [3] entnommen.

Die elektromagnetische Feldverteilung in dem eindimensionalen Modell der menschlichen Haut wird mit einem einfachen analytischen Verfahren berechnet. Hierbei werden die Reflexions- und Transmissionsfaktoren zwischen den verschiedenen Schichten bestimmt und die vor- und rücklaufenden ebenen Wellen in geeigneter Weise überlagert. In den ersten Hautschichten (Epidermis und Dermis) ergibt sich mit steigender Frequenz auch ein Anstieg der maximalen lokalen SAR in diesen Schichten. In den darunter liegenden Schichten Fett und Muskel steigt die SAR nur bis zu einer Frequenz von ca. 5 GHz an, darüber fällt sie stetig ab. Oberhalb einer Frequenz von 10 - 20 GHz wird praktisch die gesamte Hochfrequenzleistung in den ersten beiden Hautschichten (Epidermis und Dermis) absorbiert.

Zur Berechnung der elektromagnetischen Feldverteilung im menschlichen Auge wird ein dreidimensionales rotationssymmetrisches Modell generiert bei dem neun verschiedene Gewebearten berücksichtigt werden: Hornhaut, vordere Augenkammer, Linse, Regenbogenhaut, Glaskörper, Netzhaut, Aderhaut, Lederhaut und Sehnerv. Das Augenmodell ist in Bild 2 wiedergegeben. Es wird eine Untersuchung bei einer Frequenz von 77 GHz durchgeführt. Die Berechnung der elektromagnetischen Felder im Augenmodell

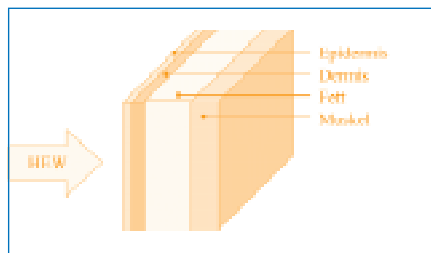


Bild 1: Eindimensionales Modell der menschlichen Haut

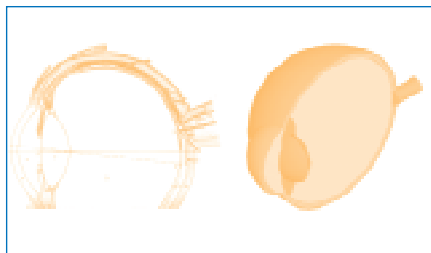


Bild 2: Sagittaler Schnitt durch das menschliche Auge nach [5] (links), Schnitt durch das Simulationsmodell des menschlichen Auges (rechts)

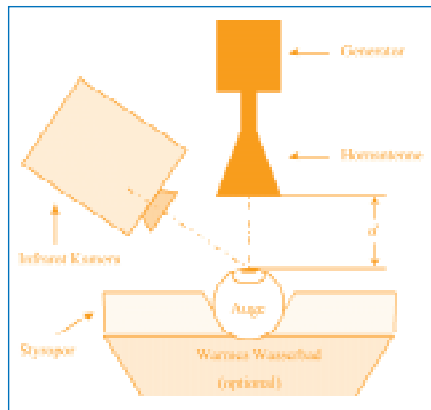


Bild 3: Messaufbau zur in-vitro Temperaturmessung am Schweineauge (rechts)

erfolgt mit der Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich (FDTD) [1]. Als Feldquelle wird eine homogene, ebene elektromagnetische Welle mit der Leistungsflussdichte  $S = 10 \text{ W/m}^2$  verwendet. Beim Auge ergibt sich ebenso wie bei der Haut ein rascher Abfall der spezifischen Absorptionsrate mit zunehmender Gewebetiefe. Hohe SAR-Werte tauchen in wesentlichen in der Hornhaut, in der Lederhaut und in der Haut, die das Auge umschließt, auf. Für alle anderen Gewebetypen ergeben sich deutlich reduzierte Werte der spezifischen Absorptionsrate.

## 5. Untersuchung thermischer Effekte

Bild 3 zeigt den Messaufbau zur *in vitro* Temperaturmessung am Auge. Zur Untersuchung werden frische Schweineaugen verwendet. Die Oberflächentemperaturen werden mit einer stickstoffgekühlten Infrarot-Kamera gemessen, deren Temperaturauflösung im Bereich von  $0.1^\circ\text{C}$  liegt. Zur Exposition wird eine Anordnung aus Generator und Hornantenne verwendet, die senkrecht zur Haut bzw. zum Auge orientiert ist. Der Generator hat bei einer Frequenz von 77 GHz eine Ausgangsleistung von 38 mW. Da die Leistung des Generators nicht verändert werden kann, wird zur Realisierung unterschiedlicher Leistungsflussdichten der Abstand  $d$  zwischen der Apertur der Hornantenne und dem exponierten Objekt variiert.

Zusätzlich werden *in vivo* Untersuchungen der Oberflächentemperatur an der menschlichen Haut an Probanden durchgeführt. Bei diesen Messungen wird vor der Exposition eine Beruhigungsphase von 15 Minuten durchlaufen, um einen thermischen Gleichgewichtszustand im Probanden abzuwarten. Danach wird die Exposition so lange fortgeführt, bis sich ein neues thermisches Gleichgewicht einstellt.

Für eine Leistungsflussdichte von  $10 \text{ W/m}^2$  wird ein maximaler Temperaturanstieg von  $\Delta T \leq 0.1^\circ\text{C}$  in der menschlichen Haut und im Schweineauge gemessen. Bei einem zehnfachen Überschreiten des Grenzwertes werden maximale Temperaturerhöhungen von  $\Delta T \approx 0.7^\circ\text{C}$  festgestellt. Bei der Durchführung der Messung gemäß Bild 3 ergibt sich kein signifikanter Einfluss des Wasserbades auf die Temperaturänderung.

Zur Überprüfung der Plausibilität der Messergebnisse wird abschließend noch eine numerische Abschätzung der zu erwartenden Temperaturerhöhung in der Haut bei einer Frequenz von 77 GHz durchgeführt. Die Wärmetransportvorgänge in der menschlichen Haut werden dabei durch die sog. Bio-Wärme-Transfer-Gleichung beschrieben. Neben der metabolischen Wär-

meerzeugungsrates wird hierbei die Verteilung der spezifischen Absorptionsrate aus der zuvor durchgeführten elektromagnetischen Analyse berücksichtigt und eine Lösung mittels eines Finite-Elemente Simulationsprogrammes aus [4] bestimmt. Die Ergebnisse der numerischen Analyse bestätigen die gemessenen Temperaturwerte für die menschliche Haut.

## 6. Zusammenfassung

Die numerischen Berechnungen der spezifischen Absorptionsrate in der menschlichen Haut und dem menschlichen Auge verdeutlichen das Eindringverhalten der Felder in das biologische Gewebe. Bei einer Frequenz von 77 GHz findet die Wechselwirkung von elektromagnetischem Feld und Körper praktisch nur in den ersten beiden Hautschichten (Epidermis und Dermis) statt. Im menschlichen Auge erfolgt die Absorption der elektromagnetischen Felder ebenfalls stark oberflächlich, die höchsten Werte treten dabei in der Hornhaut auf. Die thermischen Messungen bei einer Frequenz von 77 GHz zeigen, dass für Leistungsflussdichten unterhalb des europäischen Grenzwertes die Temperaturerhöhungen kleiner als  $0.1^\circ\text{C}$  sind.

## Literatur

- [1] A. Bahr, Zeitbereichsverfahren zur elektromagnetischen Analyse von Systemen der modernen Kommunikationstechnik, Dissertation, Universität Duisburg, Germany, 1997.
- [2] Europäische Ratsempfehlung 1999/519/EC, Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), Official Journal L 199 pp. 0059-0070, 1999.
- [3] S. Gabriel, R.W. Lau, C. Gabriel, The dielectric properties of biological tissue: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues, Phys. Med. Biol., Vol. 41, pp. 2271-2293, 1996.
- [4] F. Gustrau, Ein Beitrag zur numerischen Berechnung der thermischen Belastung von Patienten durch hochfrequente elektromagnetische Felder während Magnet-Resonanz-Tomographie-Untersuchungen, Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Ruhr-Universität Bochum, Shaker Verlag, Aachen, 1997.
- [5] H. Lippert, Lehrbuch Anatomie, Urban+Schwarzenberg, München, pp. 85-541, 1990.

Dr.-Ing. Frank Gustrau und Dr.-Ing. Achim Bahr arbeiten beim Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH in Kamp-Lintfort