

# REPORT

## Strahlungsabsorption im menschlichen Kopf bei Exposition in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern

Nummer 19

Allgemeine Unfallversicherungsanstalt



# Forschungsbericht

1998

## Strahlungsabsorption im menschlichen Kopf bei Exposition in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern

### Nummer 19

AUVA: Hamid Molla-Djafari  
Norbert Winker  
ÖFZS: Gernot Schmid  
Georg Neubauer  
Harald Haider  
Heinrich Garn  
AKH: Francois Alesch  
Wolf Dieter Baumgartner  
Oswald Jahn  
Harald Standhardt  
Michael Zehetmayer  
AIUW: Manfred Tschabitscher

AUVA: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt  
ÖFZS: Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf Ges.m.b.H.  
AKH: Allgemeines Krankenhaus Wien  
AIUW: Anatomisches Institut der Universität Wien

Allgemeine Unfallversicherungsanstalt  
Verfasser:



Dipl.-Ing. Gernot Schmid  
Bereich Elektronik  
Elektromagnetische Verträglichkeit und Hochfrequenztechnik  
Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf  
A-2444 Seibersdorf

Dipl.-Ing. Georg Neubauer  
Bereich Elektronik  
Elektromagnetische Verträglichkeit und Hochfrequenztechnik  
Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf  
A-2444 Seibersdorf

Dipl.-Ing. Dr. Hamid Molla-Djafari  
Allgemeine Unfallversicherungsanstalt  
Adalbert Stifter Straße 65  
A-1201 Wien

Dipl.-Ing. Harald Haider  
Bereich Elektronik  
Elektromagnetische Verträglichkeit und Hochfrequenztechnik  
Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf  
A-2444 Seibersdorf

Dipl.-Ing. Dr. Heinrich Garn  
Leiter des Bereichs Elektronik  
Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf  
A-2444 Seibersdorf

Direktor ao. Univ. -Prof. Dipl.-Ing. Dr. Norbert Winker  
Allgemeine Unfallversicherungsanstalt  
Adalbert-Stifter-Straße 65  
A-1201 Wien

Dr. Francois Alesch  
AKH Wien, Universitätsklinik für Neurologie  
Währinger Gürtel 18-20  
A-1090 Wien

OA Dr. Wolf-Dieter Baumgartner  
AKH Wien, Universitätsklinik für HNO -Heilkunde  
Währinger Gürtel 18-20  
A-1090 Wien

Univ.-Prof. Dr. Oswald Jahn  
AKH Wien, Universitätsklinik für Innere Medizin IV  
Währinger Gürtel 18-20  
A-1090 Wien

Dr. Harald Standhardt  
AKH Wien, Universitätsklinik für Neurologie

Währinger Gürtel 18-20  
A-1090 Wien

Univ.-Prof. Dr. Manfred Tschabitscher  
Anatomisches Institut der Universität Wien  
Währinger Straße 13  
A-1090 Wien

Univ.-Ass. Dr. Martin Zehetmayer  
AKH Wien, Universitätsklinik für Augenheilkunde  
Währinger Gürtel 18-20  
A-1090 Wien

# INHALT

<b>1.</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG .....</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>PHYSIKALISCHE UND BIOPHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>8</b>
2.1.	Elektromagnetische Felder .....	8
2.2.	Quellen (hochfrequenter) elektromagnetischer Felder .....	9
2.3.	Fernfeld und Nahfeld einer Strahlungsquelle .....	10
2.4.	Biologische Wirkung elektromagnetischer Felder .....	11
2.4.1.	Thermische Wirkung .....	11
2.4.2.	Nichtthermische Wirkungen .....	12
2.5.	Spezifische Absorptionsrate (SAR) .....	12
2.6.	Elektrische Eigenschaften biologischer Gewebe .....	13
<b>3.</b>	<b>SAR-MESSUNGEN IN KÖPFEN VERSTORBENER MENSCHEN ...</b>	<b>18</b>
3.1.	Allgemeines .....	18
3.2.	Ablauf der Messungen .....	19
3.2.1.	Meßmethode .....	19
3.2.2.	Implantation der Meßsonden .....	22
3.3.	Meßergebnisse .....	23
3.3.1.	Meßreihe1 (Kopf 1) .....	24
3.3.2.	Meßreihe2 (Kopf 2) .....	27
3.3.3.	Meßreihe3 (Kopf 3) .....	31
3.3.4.	Meßreihe4 (Kopf 4) .....	37
3.3.5.	Meßreihe5 (Kopf 5) .....	44
3.4.	Zusammenfassung der Meßergebnisse .....	54
<b>4.</b>	<b>ENTWICKLUNG EINES DOSIMETRIE-MESS-SYSTEMS ZUR BESTIMMUNG DER SAR IM MENSCHLICHEN KOPF .....</b>	<b>57</b>
4.1.	Allgemeines .....	57
4.2.	Entwicklung von Kopfphantomen .....	58
4.2.1.	Relevante Materialparameter und ihre Bestimmung .....	59
4.2.1.1.	Elektrische Materialparameter .....	59
4.2.1.2.	Thermische Materialparameter .....	61
4.2.2.	Materialparameter realer biologischer Gewebe .....	69
4.2.3.	Möglichkeiten zur Nachbildung biologischer Gewebe .....	75
4.2.4.	Ausgewählte Phantommaterialien .....	75
4.2.4.1.	Phantommaterialien zur Nachbildung von Hirngewebe .....	75
4.2.4.2.	Phantommaterialien zur nachbildung der Augen und des Innenohres .....	80
4.2.4.3.	Phantommaterialien zur Nachbildung von Muskelgewebe .....	83
4.2.5.	Phantomherstellung .....	85
4.2.5.1.	Definition der Meßpositionen .....	85
4.2.5.2.	Arbeitsschritte der Phantomherstellung .....	85

<b>4.3.</b>	<b>Entwicklung implantierbarer Miniaturfeldsonden .....</b>	<b>96</b>
4.3.1.	Prinzip der Feldstärkemessung .....	96
4.3.2.	Miniaturfeldsonden in Dickschichttechnik .....	97
4.3.3.	Sondenverstärker .....	104
4.3.4.	Technische Daten des Systems Sonde-Verstärker .....	109
4.3.4.1.	Dynamisches Verhalten .....	109
4.3.4.2.	Isotropie der Miniaturfeldsonden .....	110
4.3.4.3.	Räumliche Auflösung .....	113
4.3.4.4.	Empfindlichkeit und Dynamik .....	113
4.3.4.5.	Temperaturverhalten des Systems .....	114
4.3.5.	Kalibrierung der Miniaturfeldsonden .....	117
4.3.5.1.	Messung der elektrischen Feldstärke in biologischen Medien .....	117
4.3.5.2.	Theorie des Kalibrierverfahrens .....	119
4.3.5.3.	Durchführung der Kalibrierung der entwickelten Miniaturfeldsonden .....	122
4.3.5.4.	Kalibrierkurven .....	128
4.3.5.5.	Abschätzung der Kalibrierunsicherheit .....	129
<b>4.4.</b>	<b>Bedienung des Dosimetrie-Meßsystems .....</b>	<b>130</b>
4.4.1.	Positionierung der Phantome während einer Messung .....	130
4.4.2.	Einführung der Miniaturfeldsonden zu den Meßpunkten .....	130
4.4.3.	Einführung der Temperaturmeßsonden .....	132
4.4.4.	Meßwertbestimmung .....	132
4.4.5.	Wartung und Lagerung des Dosimetrie-Meßsystems .....	133
<b>4.5.</b>	<b>Messungen mit dem Dosimetrie-Meßsystem .....</b>	<b>135</b>
4.5.1.	Referenzmessungen .....	135
4.5.2.	Nachstellung der Meßreihe 5 (Kopf 5) der Messungen in Köpfen Verstorbener .....	138
4.5.3.	Vergleich von Messungen in den Kopfphantomen mit Messungen in Köpfen Verstorbener .....	139
<b>5.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>140</b>
<b>6.</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>141</b>
	<b>ANHANG A: Meßkurven der SAR-Messungen in Köpfen verstorbener Menschen .....</b>	<b>A 1</b>
	<b>ANHANG B: Kalibrierdaten der Miniaturfeldsonden .....</b>	<b>B 1</b>
	<b>ANHANG C: Meßkurven der SAR-Messungen mit dem Dosimetrie-Meßsystem .....</b>	<b>C 1</b>
	<b>ANHANG D: Liste der verwendeten Meßgeräte .....</b>	<b>D 1</b>
	<b>ANHANG E: Forschungsergebnisse über den Absorptionsmech- anismus in biologischen Geweben bei Nahfeld- exposition im Frequenzbereich über 300 MHz .....</b>	<b>E 1</b>

## KURZFASSUNG

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wurden die Absorptionsverhältnisse im menschlichen Kopf bei Exposition im Nahfeld hochfrequenter elektromagnetischer Strahlungsquellen bei den Frequenzen 433 MHz, 900 MHz, 1300 MHz, 1800 MHz und 2450 MHz untersucht. Da die meisten bekannten wissenschaftliche Untersuchungen dieses Themenkreises bisher nur auf Basis von Computersimulationen bzw. auf Basis von Messungen in Nachbildungen des menschlichen Kopfes (Phantomen) beruhen, wurden im Zuge dieser Arbeit die Verhältnisse in realem biologischen Gewebe untersucht. Zu diesem Zweck wurden 5 Meßreihen in 5 Köpfen frischverstorbenen Menschen durchgeführt. Die Frage der Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Messungen in totem Gewebe auf die Verhältnisse im lebenden Gewebe wurde durch Bestimmung der relevanten Materialparameter von menschlichen Gewebeproben aus Leichen und Vergleich dieser Meßergebnisse mit den in der Literatur zu findenden Angaben für Lebendgewebe geklärt. Es zeigte sich, daß die relevanten Materialparameter (Permittivität  $\epsilon'$  und Leitfähigkeit  $\sigma$ ) von totem Gewebe im betrachteten Frequenzbereich durchwegs im Streubereich (ca. 20 %) von jenen in der Literatur für Lebendgewebe zu findenden Werten liegen. Die in den Leichen gemessenen Werte der spezifischen Absorptionsrate (SAR) können daher als repräsentativ für die Verhältnisse im lebenden Organismus angesehen werden.

Im Zuge der 5 Meßreihen wurden zwei typische Expositionssituationen, wie sie in der Praxis bei Benützung von Mobiltelefonen (Antennenfußpunkt der Strahlungsquelle im Bereich des rechten Ohres) bzw. von Handfunkgeräten (Antennenfußpunkt der Strahlungsquelle im Bereich vor dem rechtem Auge) auftreten können bei den genannten Frequenzen und bei verschiedenen Sendeleistungen untersucht. Die auftretende SAR wurde in Meßpunkten im Gehirn in den Augen und im Innenohr der Köpfe bestimmt.

Je nach Sendeleistung und Frequenz ergaben sich dabei teilweise SAR-Werte, welche über dem derzeitigen Basisgrenzwert für Teilkörperbelastung (4 W/kg gemittelt über 1 Gramm Gewebemasse) der ÖNORM S1120 lagen. Für mittlere Sendeleistungen  $\leq 1$  W konnten in den im Zuge der 5 Meßreihen untersuchten Expositionssituationen keine Grenzwertüberschreitungen nach der genannten Norm mehr gefunden werden.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde ein Dosimetrie-Meßsystem entwickelt, das eine Bestimmung der im menschlichen Kopf zufolge HF-Exposition auftretenden SAR im Zuge von Routinemessungen ermöglicht. Das Meßsystem besteht aus 2 Kopfphantomen (KP1/1 für 433 MHz, KP2/1 für 900 MHz bis 2450 MHz) und speziellen Miniaturfeldsonden, welche in die Kopfphantome zu vordefinierten Meßpunkten eingeführt werden können. Vordefinierte Meßpunkte wurden im Gehirn (im Bereich des rechten Ohres und im Stirnbereich), in den Augen und im Innenohr vorgesehen.

Eine Überprüfung der Übereinstimmung von Meßergebnissen aus Messungen in Leichenköpfen und Meßergebnissen aus Messungen mittels des Dosimetrie-Meßsystems zeigt maximale Abweichungen von  $\pm 30$  %.