

Modellierung der Verteilung von SAR-Werten im gesamten Körper und detailliert im Bereich des Kopfes unter besonderer Berücksichtigung des Auges bei Expositionen durch in Deutschland verwendete TETRA-Endgeräte

Zwischenbericht

**Fachbereich
Strahlenschutz und Gesundheit**

C. Bodendorf

D. Geschwentner



Bundesamt für Strahlenschutz

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	3
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	4
EINLEITUNG	5
1 LITERATURÜBERSICHT	6
LITERATURVERZEICHNIS.....	12

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BDBOS	Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
DMF	Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm, http://www.emf-forschungsprogramm.de
EMF	Elektromagnetische Felder
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (engl.) → Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
FDTD	Finite-difference time-domain (engl.) → Finite Differenzen im Zeitbereich
FEM	Finite Elemente Methode
GSM	Global System for Mobile Communications (engl.) → Industriestandard für digitalen Mobilfunk
HF	Hochfrequenz
HPA	Health Protection Agency (engl.) → Britische Gesundheitsbehörde
MTHR	Mobile Telecommunications and Health Research Programme (engl.) → Britisches Forschungsprogramm zur Untersuchung möglicher gesundheitlicher Auswirkungen mobiler Telekommunikation
NRPB	National Radiological Protection Board (engl.) → Ehemalige britische Strahlenschutzbehörde, jetzt Teil der HPA
SAR	Spezifische Absorptionsrate
TDMA	Time division multiple access (engl.) → Zeitmultiplexverfahren
TETRA	Terrestrial trunked radio (engl.) → Industriestandard für einen digitalen terrestrischen Bündelfunk

EINLEITUNG

Die Einführung eines bundesweit einheitlichen digitalen Funksystems für die Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) wird für die Beschäftigten zu einer Veränderung ihrer beruflich bedingten Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern führen. In dem vorgesehenen Sendefrequenzbereich knapp unterhalb von 400 MHz stellt der mit Kontakt zum Körper oder in unmittelbarer Nähe zum Körper stattfindende Betrieb leistungsstarker Funksendegeräte eine neue und unter dem Aspekt des Strahlenschutzes noch vergleichsweise wenig untersuchte Expositionssituation dar. Im Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF) wurden vornehmlich Expositionen bei höheren Frequenzen untersucht, so dass Ergebnisse des DMF nur eingeschränkt auf die zu erwartenden Expositionssituationen der Beschäftigten von BOS übertragen werden können. Nur in wenigen Studien des DMF wurden auch Frequenzen um 400 MHz betrachtet. In einer Studie wurden dabei für die körpernahe Verwendung leistungsstarker Handfunkgeräte (2 W) unter ungünstigen Umständen Expositionen in Höhe des Grenzwertes für die allgemeine Bevölkerung gefunden, bei denen es zu einer lokalen Erwärmung des Auges um bis zu 1 °C kommen kann. Vorangegangene Untersuchungen des National Radiological Protection Boards (NRPB 2001) im Rahmen des britischen Mobile Telecommunications and Health Research Programme (MTHR) hatten ergeben, dass in Großbritannien eingesetzte Endgeräte nach dem TETRA-Standard unter ungünstigen Umständen lokale SAR-Werte (gemittelt über zusammenhängende Gewebevolumina mit einer Masse von 10 g) von 4 W kg⁻¹ pro Watt Sendeleistung und darüber hervorrufen könnten.

Um bestehende Kenntnislücken über die tatsächlich zu erwartenden Expositionen von Beschäftigten der BOS in Deutschland zu verringern, führt das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) in Zusammenarbeit mit der für die Einführung und den Aufbau des neuen Funksystems verantwortlichen Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BDBOS) ein Forschungsprojekt durch, über das im vorliegenden Zwischenbericht informiert wird. Ziel des Forschungsprojekts ist die Bestimmung von Expositionen von Personen durch Funksendegeräte, die im derzeit im Aufbau befindlichen digitalen BOS-Funknetz in Deutschland zum Einsatz kommen. Dabei sollen SAR-Werte für verschiedene praxisrelevante Gebrauchspositionen bestimmt und sowohl maximal mögliche wie auch durchschnittlich zu erwartende Werte ermittelt werden. Weiterhin sollen die resultierenden lokalen Temperaturerhöhungen in bestimmten, besonders empfindlichen Zielorganen (u.a. Augen) untersucht werden.

Neben den in diesem Bericht thematisierten dosimetrischen Untersuchungen wird in einem weiteren Forschungsprojekt ein möglicher Einfluss der im Funkstandard TETRA eingesetzten Signalcharakteristik auf kognitive Funktionen exponierter Personen untersucht. Informationen hierzu finden sich auf der Internetseite des BfS unter <http://www.bfs.de/de/elektro/hff/papiere.html/tetra.html> sowie in den jeweiligen Projektberichten.

Der hiermit vorliegende erste Zwischenbericht enthält eine Literaturübersicht zum Thema.

1 LITERATURÜBERSICHT

Für die Erstellung der Literaturübersicht wurden die im BfS vorgehaltene und gepflegte Literaturdatenbank sowie das öffentlich für Recherchen zur Verfügung stehende „EMF-Portal“ (<http://www.emf-portal.de>) des Forschungszentrums für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit am Universitätsklinikum der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen ausgewertet. Dabei wurden nur Publikationen herangezogen, die dosimetrische Messungen in Körperphantomen oder computergestützte numerische Simulationsrechnungen unter Verwendung entsprechender Modelle menschlicher Körper bzw. Körperteile thematisieren oder Informationen darüber beinhalten. Weiterhin wurden veröffentlichte Forschungsberichte z.B. des MTHR Programms und technische Informationen über den TETRA Standard, z.B. aus Standardisierungsdokumenten des Europäischen Instituts für Telekommunikationsnormen ETSI, herangezogen.

Laut Frequenznutzungsplan (Bundesnetzagentur 2008) sind in Deutschland die Frequenzbereiche 380 bis 385 und 390 bis 395 MHz für den digitalen Bündelfunk der BOS reserviert. Gemäß (ETSI 2007) und wie im Mobilfunk allgemein üblich ist das untere Frequenzband für den Uplink, also die per Funk abgewickelte Datenübertragung von den mobilen Endgeräten in Richtung des Telekommunikationsnetzes bzw. zu den Basisstationen vorgesehen. Die Literaturübersicht konzentriert sich daher auf diesen Frequenzbereich.

Das EMF-Portal listet sechs Publikationen, in denen elektromagnetische Felder mit Frequenzen im Bereich 380 bis 385 MHz thematisiert werden (Stichzeitpunkt Ende Januar 2010). Erweitert man den Frequenzbereich bis 400 MHz, so lassen sich zehn Veröffentlichungen finden. Mit dem Suchbegriff „TETRA“ in Verbindung mit Stichwörtern wie *head*, *SAR* oder *temperature* können einschließlich der über die Eingrenzung des Frequenzbereichs gefundenen Einträge insgesamt sieben Publikationen identifiziert werden, die vor dem Hintergrund der Zielsetzung des aktuellen Projekts näher zu analysieren sind. Hinzu kommen Fundstellen aus der Literaturdatenbank des BfS, die neben wissenschaftlichen Publikationen auch Forschungsberichte und Tagungsberichte referenziert. Nicht alle Fundstellen enthalten allerdings Informationen über dosimetrische Untersuchungen. So beschäftigt sich (Hietanen and Sibakov 2007) z.B. mit dem Störpotenzial der Funksignale von TETRA Geräten auf lebensunterstützende Medizingeräte.

Das britische „National Radiological Protection Board“ hat 2001 einen Bericht zu möglichen gesundheitlichen Einflüssen von TETRA verfasst und weitere Forschung u.a. auf dem Gebiet der Dosimetrie bzw. Expositionserfassung empfohlen (NRPB 2001). Hinsichtlich der Exposition von Nutzern durch hochfrequente elektromagnetische Felder der Endgeräte zitiert der Bericht Messergebnisse, die C. Gabriel im Vortrag „The metrology of TETRA“ auf einer Tagung im Jahr 2000 präsentiert hatte. Die von zwei kommerziell erhältlichen Handsprechfunkgeräten (maximale Sendeleistungen 1 W und 3 W, Hersteller und Typ nicht angegeben) in einem homogenen Phantomkopf hervorgerufenen maximalen, über Gewebevolumina mit einer Masse von 10 g gemittelten SAR-Werte wurden demnach zu 0,89 und 2,88 W kg⁻¹ bestimmt. Der letztgenannte Wert übersteigt den für die allgemeine Bevölkerung empfohlenen Basiswert von 2,0 W kg⁻¹ (ICNIRP 1998, Europäische Gemeinschaft 1999). Der höhere Basiswert für beruflich exponierte Personen von 10 W kg⁻¹ wird hingegen eingehalten. Für den Fall, dass TETRA Endgeräte zukünftig zur Übertragung von Daten oder Videos genutzt würden und zur Steigerung der Übertragungsbandbreite im Sendefall mehrere Zeitschlitzte zusammengefasst würden, könnten bis zu viermal höhere Werte auftreten. Bei Geräten mit 3 W Sendeleistung müssten für den Fall, dass diese mit der Sendeantenne in der Nähe des Körpers betrieben werden, dann besondere Anstrengungen bezüglich des Designs der Geräte unternommen werden, um die Anforderungen der Strahlenschutzrichtlinien einzuhalten, wobei offensichtlich der höhere Basiswert für beruflich exponierte Personen gemeint ist. Bezüglich solcher Geräte, die in Fahrzeuge eingebaut und mit 3 oder 10 W Sendeleistung betrieben werden, schätzt das NRPB für Personen außerhalb des Fahrzeug ab, dass der Basiswert für die allgemeine Bevölkerung im Abstand von wenigen Zentimetern zur Antenne überschritten werden kann. Für den Fall, dass mehrere Zeitschlitzte zusammengefasst würden, könnte unter ähnlichen Bedingungen auch der Basiswert für beruflich exponierte Personen überschritten werden. Der Bericht liefert einige Hinweise über die zu erwartende Größenordnung von maximalen SAR-Werten, die durch den Gebrauch von TETRA-Handfunkgeräten entstehen können, allerdings sind die Originaldaten von Gabriel nicht zugänglich und die Ergebnisse somit nur eingeschränkt belastbar.

Vom Beratungsunternehmen MCL Technology Ltd im Auftrag des britischen Innenministeriums durchgeführte SAR Labormessungen an Handsprechfunkgeräten sind in einem Bericht aus dem Jahr 2003 dokumentiert (Chadwick 2003). Anzahl, Hersteller- und Typenbezeichnung der untersuchten Geräte sind dem Bericht nicht zu entnehmen. Untersucht wurde die Belastung während der Nutzung in unterschiedlichen Gebrauchs- bzw. Tragesituationen. Für solche Fälle, in denen die Handsprechfunkgeräte wie Mobiltelefone verwendet werden (Betrieb seitlich am Kopf bzw. Ohr) konnte ein standardisiertes Messprotokoll verwendet werden, das auch zur Überprüfung der Konformität von Mobiltelefonen mit Expositionsrichtlinien verwendet wird. Für die ebenfalls durchgeführten Untersuchungen, in denen zum einen der Betrieb eines Endgeräts frontal vor dem Gesicht, ähnlich einem Walkie-Talkie, und zum anderen die Verwendung von Zubehör (Freisprecheinrichtung) sowie die Befestigung und der Betrieb eines Endgeräts im Bereich des Oberkörpers (Schulter) bewertet wird, standen zum damaligen Zeitpunkt keine standardisierten Messprotokolle zur Verfügung. Die gemessenen SAR-Werte werden als vergleichbar zu denen von Mobiltelefonen beschrieben. Konkrete Zahlenwerte der über äquivalente zusammenhängende Gewebemasse mit einer Masse von 10 g gemittelten Werte werden im Bericht nicht genannt, finden sich aber in Chadwicks Vortragsfolien und in Simon Manns Rapporteur-Bericht zum „COST 281 Workshop on Biological Aspects of EMF Exposure to TETRA Systems“, der im Oktober 2005 in Norwegen stattfand¹. Demnach wurden 5 oder 6 Gerätemodelle untersucht und für Geräte mit einer maximalen Spitzsendeleistung von 1 W maximale über 10 g gemittelte Werte von 0,2 bis 0,7 W kg⁻¹ gemessen. Für Geräte mit 3 W Spitzsendeleistung betragen die Werte zwischen 2 und 3 W kg⁻¹, lagen also über der Grenzwertempfehlung für Personen der allgemeinen Bevölkerung. Geräte für eine verdeckte Trageweise direkt am Körper verursachten Werte bis 1,5 W kg⁻¹, wobei allerdings keine Angaben zu deren Sendeleistung gemacht werden. Zwischenzeitlich haben sich Messungen an homogenen Phantomen in anderen Untersuchungen (Christ et al. 2006, Christ et al. 2006, Christ et al. 2007) als nicht konservativ erwiesen, wenn ein Endgerät nahe am Oberkörper bzw. nahe an einem entsprechenden Phantom betrieben wird. Bei der Analyse der Exposition des Oberkörpers durch kabelgebundene Freisprecheinrichtungen wurden ähnlich wie in Untersuchungen an Mobiltelefonen im Auftrag des BfS (Kühn et al. 2009) Resonanzeffekte gefunden, die entlang des Kabels zu vergleichbar hohen SAR-Werten im Körper führen können wie der Betrieb des Endgeräts direkt am Körper.

Ebenfalls im Jahr 2003 hat das NRPB einen Bericht (NRPB 2003) über die auf Basis numerischer Simulationsrechnungen durchgeführten Abschätzungen der im Kopf durch die Nutzung von TETRA Endgeräten hervorgerufenen SAR-Werte veröffentlicht. Die Ergebnisse finden sich auch in einer Publikation der Arbeitsgruppe (Dimbylow et al. 2003). Für die Untersuchungen wurde ein numerisches Modell eines Motorola MTP700 Handsprechfunkgeräts mit Monopol- bzw. Helixantenne entwickelt und messtechnisch validiert. Für den menschlichen Kopf wurde ein anatomisches Modell mit einer Auflösung von 2 mm und neun unterschiedlichen Gewebetypen verwendet. Im Vergleich zur Monopolantenne führte die kompaktere Helixantenne zu 50 bis 100% höheren über 10 g Gewebemasse gemittelten SAR-Werten. Insgesamt wurde bei der Vielzahl der in der Praxis möglichen Positionen beim Betrieb am Kopf ein maximaler SAR-Wert von 3,9 W kg⁻¹ bezogen auf ein Watt Sendeleistung gefunden. Für die tatsächlichen Maximalwerte müssen die wirkliche Sendeleistung und das Puls-Pausen-Verhältnis des TDMA Schemas berücksichtigt werden. Mit einer angegebenen Sendeleistung des MTP700 von 1 W und einem Puls-Pausenverhältnis von 1:3 ergibt sich ein Maximalwert von etwa 1 W kg⁻¹. Die Autoren kommen zum Schluss, dass bei einer Sendeleistung von 1 W die empfohlenen Grenzwerte für beruflich Exponierte und für die allgemeine Bevölkerung eingehalten werden, bei 3 W der Grenzwert für die allgemeine Bevölkerung allerdings um 50% überschritten werden könnte, wenn eine Helixantenne verwendet wird. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen stützen die berichteten (s.o.) Messdaten (NRPB 2001). Ein ebenfalls beachtenswertes Ergebnis der Studie ist, dass in zwar eher untypischen und für die Praxis daher voraussichtlich weniger relevanten aber letztlich nicht vollkommen auszuschließenden Gebrauchssituationen Werte bis 6,87 W kg⁻¹ pro Watt zeitlich gemittelter Sendeleistung gefunden wurden. Keine Informationen finden sich über die Verteilung der SAR-Werte in den unterschiedlichen Organen oder Gewebetypen, wie z.B. das Auge oder verschiedene Hirnregionen.

(Green et al. 2006) untersuchten *in vitro*, ob elektromagnetische Felder nach dem TETRA-Standard bei 380,8875 MHz die intrazelluläre Calcium-Signalgebung erregbarer Zellen beeinflussen könnten. Um realistische SAR-Werte für die Zellversuche einstellen zu können, wurde zunächst messtechnisch die Verteilung

¹ <http://www.cost281.org/documents.php?node=101>

der SAR-Werte bestimmt, die ein reales Endgerät (Motorola MTP300) in einem homogenen Kopfphantom hervorruft. Mit einer abgeschätzten Unsicherheit von 28% wird ein maximaler über 10 g gemittelter SAR-Wert von $0,4 \text{ W kg}^{-1}$ angegeben. Dieser Wert liegt deutlich unterhalb der empfohlenen Grenzwerte (ICNIRP 1998, Europäische Gemeinschaft 1999) für beruflich exponierte Personen (10 W kg^{-1}) und Personen der allgemeinen Bevölkerung (2 W kg^{-1}). Die höchsten SAR-Spitzenwerte wurden an oberflächennahen Stellen des Kopfphantom gemessen, was als Hinweis dafür gewertet wird, dass die Hirnrinde bei der Nutzung des Geräts am Kopf bzw. Ohr höheren SAR-Werten ausgesetzt ist als andere Hirnregionen. Beachtenswert ist auch, dass der vergleichsweise niedrige Wert von $0,4 \text{ W kg}^{-1}$ bei einer von den Autoren gemessenen Spitzensendeleistung des Geräts von $1,5 \text{ W}$ erreicht wird. Ein Datenblatt der Firma Motorola gibt für das MTP300 eine abgestrahlte Leistung von nur 1 W an. Auch ist im Datenblatt des Herstellers zu erkennen, dass beim MTP300 eine kompakte Antennenstruktur, wahrscheinlich eine Helixantenne, zum Einsatz kommt, die in einer anderen Untersuchung (Dimbylow et al. 2003, NRPB 2003) im Vergleich zu Monopolannten tendenziell eher höhere SAR-Werte hervorrief (s.o.). Die Arbeitsgruppe um Green (Green et al. 2006) bezieht sich in Ihrer Publikation höchstwahrscheinlich auf die gleichen Messdaten wie die Arbeitsgruppe um Smith (Smith et al. 2005). Im Abschlussbericht ihrer für das britische Innenministerium durchgeführten Probandenstudie zur Kognition, die noch nicht peer-reviewed publiziert ist, berichten Smith und Kollegen ebenfalls über Messergebnisse an einem Motorola MTP300. Die Messungen wurden vom Beratungsunternehmen MCL Technology Ltd als Subauftragnehmer nach einem standardisierten Messprotokoll durchgeführt, das auch zur Überprüfung der Konformität von Mobiltelefonen mit Expositionsrichtlinien beim Betrieb am Kopf bzw. Ohr verwendet wird. Der Maximalwert von etwa $0,4 \text{ W kg}^{-1}$ und die Angaben zur gemessenen Spitzensendeleistung von $1,5 \text{ W}$ finden sich auch bei Smith. Darüber hinaus sind bei Smith etwas detailliertere Angaben zur Verteilung der SAR-Werte zu finden. So wird z.B. der maximale über 10 g Gewebe gemittelte SAR-Wert im tiefer im Gehirn liegenden Hippokampus mit $0,075 \text{ W kg}^{-1}$ angegeben.

Ebenfalls aus dem Jahr 2006 stammt ein weiterer Bericht (Chadwick 2006) des Beratungsunternehmens MCL Technology Ltd über im Auftrag des britischen Innenministeriums durchgeführte Untersuchungen. Während in einem älteren Bericht (Chadwick 2003) Labormessungen beschrieben sind (s.o.), befasst sich der neuere Bericht schwerpunktmäßig mit Simulationsrechnungen und Messungen in Expositionsszenarien, bei denen TETRA Endgeräte in Fahrzeugen betrieben werden. Dabei werden sowohl Festeinbauten wie auch der Fall, dass der Fahrzeugführer oder Passagiere mobile Geräte in einem Fahrzeug betreiben, betrachtet. Für die Messungen wurden eigens neuartige Körperphantome entwickelt, die in einem Pkw oder auf einem Motorrad positioniert werden können. Als Gesamtunsicherheit des *in situ* SAR-Messsystems wird ein Wert von nur 27% angegeben. Für die numerischen Simulationsrechnungen wurde eine Software auf Basis eines Integralgleichungsverfahren (Momentenmethode) eingesetzt, die mit der Finiten Elementen Methode (FEM) erweitert wurde. Für die Bestimmung von SAR-Werten in Körpermodellen mit inhomogener Gewebeverteilung ist diese Hybridmethode im Vergleich z.B. zur FDTD-Methode weniger weit verbreitet, bietet aber Vorteile, wenn bezogen auf die Wellenlänge große und elektrisch gut leitende Strukturen wie in diesem Fall eine Fahrzeugkarosserie in die Analyse miteinbezogen werden sollen. Für Fahrer und Passagiere wurden in den Simulationsrechnungen homogene Körpermodelle verwendet, die aus den CAD-Daten der für die *in situ* Messungen verwendeten Messphantome entwickelt wurden. Das Simulationsmodell für die mobilen Handgeräte der Fahrzeuginsassen wurde vom NRPB zur Verfügung gestellt und entsprach einem Motorola MTP700 mit Helixantenne (s.o.). Es wurde eine Spitzensendeleistung von 1 W und ein duty-cycle von 0,28 angenommen. Bei den *in situ* Messungen mit vom Grundgerät abgesetzten Sendeantennen wurde ein Motorola MTM800 im Direct Mode und mit einer gemessenen Spitzensendeleistung von $3,3 \text{ W}$ verwendet. Als abgesetzte Antenne wurde ein $\lambda/4$ -Monopol, also eine Stabantenne mit der Länge einer Viertel Wellenlänge, eingesetzt. Sehr geringe über 10 g äquivalenter Gewebemasse gemittelte lokale SAR-Werte ($\leq 0,026 \text{ W kg}^{-1}$) wurden in den modellierten Fahrzeuginsassen eines Nissan Primera und Ford Mondeo Modells gefunden, wenn der Betrieb der abgesetzten, auf dem Dach der Fahrzeuge befindlichen Antenne alleine simuliert wurde. Die mit Körperkontakt betriebenen mobilen Endgeräte führten bei den Fahrzeuginsassen zu SAR-Werten von etwa $0,5 \text{ W kg}^{-1}$. Hierbei wurde nicht der Betrieb am Kopf sondern am Gürtel simuliert, so dass die höchsten SAR-Werte in diesem Bereich der Körpermodelle auftraten. Die zusätzliche Berücksichtigung des Einflusses einer von Polizisten getragenen Stichschutzweste reduzierte die lokalen SAR-Werte auf weniger als etwa $0,15 \text{ W kg}^{-1}$. Hierbei ist aber wie bereits oben erwähnt zu beachten, dass sich homogene Körpermodelle zwischenzeitlich als nicht konservativ herausgestellt haben, wenn Funksender nahe am Körper betrieben werden (Christ et al. 2006). Dieser Umstand könnte auch dazu beitragen,

dass die gefundenen Werte tendenziell etwas niedriger sind als die vom NRPB für das gleiche Gerätemodell ermittelten Werte für den Betrieb am Kopf (s.o.), da der für die Unterschätzung verantwortliche Effekt aufgrund der besonderen Gewebeschichtung am Oberkörper, nicht aber am Kopf auftritt. Der Betrieb der Geräte am Revers anstatt am Gürtel führte zu maximalen SAR-Werten um $0,23 \text{ W kg}^{-1}$. Ein zusätzlich abschirmender Effekt der Stichschutzweste konnte hier nicht beobachtet werden, da die Antenne bei dieser Positionierung des Geräts über den oberen Rand der Weste hinausragt. Die lokalen SAR-Werte in den Körpermodellen waren in allen Fällen durch den Betrieb des jeweiligen Funkgeräts der modellierten Person selbst dominiert. Die Emissionen der Geräte der anderen modellierten Personen im Fahrzeug waren vernachlässigbar. Dies deckt sich mit Ergebnissen des DMF aus ähnlichen Untersuchungen bei höheren Frequenzen (Georg 2006). Maximale lokal über 10 g gemittelte SAR-Werte in einem Motorradfahrer werden mit $0,39 \text{ W kg}^{-1}$ ohne und $0,22 \text{ W kg}^{-1}$ mit Stichschutzweste angegeben. Auch diese Werte liegen somit deutlich unter den empfohlenen Grenzwerten (ICNIRP 1998, Europäische Gemeinschaft 1999) für beruflich exponierte Personen (10 W kg^{-1}) sowie unter den empfohlenen Grenzwerten für Personen der allgemeinen Bevölkerung (2 W kg^{-1}). Für diese Simulationen wurde das Modell einer BMW R1200RT entwickelt und der Betrieb einer hinter dem Fahrer angebrachten, abgesetzten Antenne sowie der Betrieb mobiler Geräte am Körper des Fahrers analysiert. Die *in situ* Messungen mit den neu entwickelten Körperphantomen in realen Fahrzeugen (Nissan Primera und Ford Mondeo) und auf einem Motorrad konnten die Ergebnisse der Computersimulationen weitgehend bestätigen, allerdings war der Abschirmeffekt der Stichschutzweste etwas weniger ausgeprägt als von den Computersimulationen vorhergesagt. Als ein möglicher Grund wird die in den Simulationsrechnungen vernachlässigte Knopfleiste der Weste angeführt, durch die in der Praxis etwas HF-Energie eindringen könnte.

Eine aktuelle Publikation (Wallace et al. 2010) thematisiert mögliche gesundheitliche Auswirkungen der elektromagnetischen Felder von TETRA Basisstationen auf Personen, die sich selbst als elektrosensibel beschreiben. Für die Versuche mit Probanden wurden bei 420 MHz Leistungsflussdichten von 10 mW m^{-2} eingestellt, die zu Ganzkörperexpositionen mit abgeschätzten SAR-Werten von $271 \mu\text{W kg}^{-1}$ führten. Informationen über mögliche Teilkörperexpositionen durch Endgeräte können dem Bericht nicht entnommen werden. Die verwendete Frequenz liegt zudem etwa 10% über dem für den Betrieb von TETRA Endgeräten in Deutschland vorgesehenen Frequenzbereich.

Wainwright weist in (Wainwright P R 2007) darauf hin, dass die Rechtfertigung der SAR-Grenzwerte primär im physikalischen Effekt der Erwärmung des Körpers liegt. Diese soll im Bereich des Kopfes beispielsweise auf höchstens 38°C begrenzt werden. Daher legt Wainwright einen besonderen Fokus auf die Modellierung der mit der Exposition durch TETRA Endgeräte verbundenen Temperaturerhöhung im Gewebe, und speziell im Auge, das wegen geringer Durchblutung und schlechter Wärmeleitung eine besonders starke Erwärmung aufweisen kann.

Für die numerische Bestimmung der SAR-Werte wird die Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich (FDTD) eingesetzt. Die Modellierung der Körpererwärmung basiert auf der ‚standard Pennes bioheat equation‘, die mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) auf einem unregelmäßigen tetraedrischen Simulationsgitter gelöst wird.

Das verwendete Körpermodell basiert auf einer Magnetresonanztomographie-Aufnahme eines erwachsenen Mannes mit einer Auflösung von 1 mm . Dieses Modell wird zur Verbesserung der Auflösung teilweise manuell nachbearbeitet; insbesondere werden die Augen durch ein kugelförmiges Modell mit anatomischen Details wie Linse, Lederhaut, Aderhaut, Netzhaut und Hornhaut ersetzt. Dadurch wird es möglich, die signifikante Bedeutung der Wärmeabführung im Auge über die stark durchblutete Aderhaut auf das Simulationsergebnis im Detail zu untersuchen. Das im ursprünglichen Modell teilweise geschlossene Augenlid wird im geöffneten Zustand modelliert, was jedoch nur geringen Einfluss auf die Temperatur im Auge hat.

Entsprechend der technischen Realisierung von Motorola werden zwei verschiedene Antennenformen des Hand-Funkgerätes vom Typ MTP700 modelliert, nämlich eine Monopol- und eine Helixantenne. Als worst-case scenario wird von einem Abstand von $2,4 \text{ cm}$ zwischen Antennen-Einspeisepunkt und Augen-Hornhaut ausgegangen. Ein kleinerer Abstand kann wegen der Dimensionierung des Gehäuses nicht auftreten. Der maximal vorkommende SAR-Wert bei einer Sendeleistung von 1 W hängt nun noch deutlich von der Art der Mittelwertbildung ab: Bei Mittelung über ein beliebig geformtes zusammenhängendes Volumenelement mit

einer Masse von 10 g (entsprechend der Definition von ICNIRP) kommt es zu Werten bis zu $3,97 \text{ W kg}^{-1}$, während bei Mittelwertbildung über ein würfelförmiges 10 g Volumen maximal $2,27 \text{ W kg}^{-1}$ auftreten. Gemittelt über das gesamte Auge (9,4 g) ergeben sich $2,35 \text{ W kg}^{-1}$. Diese Werte gelten für die Helixantenne; die Monopolantenne führt durchgehend zu einer geringeren Belastung. Bei einer Vergrößerung des Abstandes zwischen Sender und Auge auf 8,4 cm reduziert sich der größte vorkommende SAR Wert (Mittelwert über beliebig geformtes Volumen und Verwendung einer Helixantenne) auf ca. 1 W kg^{-1} .

Bei minimalem Abstand zum Sender (2,4 cm) wird mit der Helixantenne eine maximale Erwärmung im Auge von 0,44 K berechnet, und zwar ca. 6 mm hinter der Augen-Hornhaut im Bereich der Linse. Für die Monopolantenne beträgt die größte Erwärmung noch 0,33 K. Erhöht man den Abstand zum Sender, so fällt die Temperaturerhöhung wesentlich langsamer ab, als bei den höheren Mobilfunkfrequenzen. Bemerkenswert ist, dass der Quotient von Temperaturerhöhung und SAR-Wert gemittelt über das Auge für beide Antennenformen, unterschiedliche Quellenpositionen und Frequenzen nahezu konstant bei $0,19 \text{ K kg W}^{-1}$ liegt, sodass sich (kleine) Temperaturerhöhungen im Bereich der Linse alleine durch den SAR-Wert im Auge gut abschätzen lassen. Auf diese Weise wird abgeschätzt, dass der ICNIRP Grenzwert für beruflich exponierte Personen von 10 W kg^{-1} im Körper bezogen auf das Auge nicht die Einhaltung des empfohlenen Temperatur-Grenzwertes von 38°C gewährleistet.

Ein ausführlicher Bericht im Rahmen des *Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms* (Schmid et al. 2006), in verkürzter Form auch nachzulesen in (Schmid et al. 2007), gibt zunächst eine Zusammenfassung der Mechanismen zur biologischen Thermoregulation des menschlichen Körpers, die primär durch Rezeptoren tief im Körperinneren bestimmt wird. Diese Regulation wirkt auch bei einer Ganzkörperbestrahlung mit elektromagnetischen Feldern, sodass die Kerntemperatur im Rumpf selbst bei einem Vielfachen der SAR-Grenzwerte nahezu konstant gehalten wird. Weiter weisen die Autoren darauf hin, dass die verfügbaren dielektrischen Gewebeeigenschaften auf Messungen an tierischem, oder an totem menschlichem Gewebe basieren, und folglich einige Unsicherheit in der Übertragbarkeit auf den realen Fall von lebenden Menschen besteht. Auch eine mögliche Abhängigkeit dielektrischer Eigenschaften vom Lebensalter ist noch nicht hinreichend geklärt. Insgesamt liegen Parametermodelle zur Berechnung der dielektrischen Eigenschaften von 51 unterschiedlichen Gewebesorten vor, die für praktisch alle aktuellen dosimetrischen Untersuchungen verwendet werden.

Bei den thermischen Gewebeparametern wird zu bedenken gegeben, dass die Blutflussrate und die metabolische Wärmeproduktion sowohl intra- als auch interindividuellen Schwankungen unterliegen, und von Regelmechanismen gesteuert werden.

Einen besonderen Fokus legen Schmid und Kollegen auf räumlich hoch aufgelöste Simulationen von potentiell als gefährdet eingestuft kleinen Strukturen innerhalb des Kopfes. Dazu werden mit Hilfe von Gefrierschnitten menschlicher Gewebepreparate anatomisch korrekte Modelle der Augen, der Pinealdrüse und der Organe des Mittel- und Innenohres mit einer Auflösung von $0,001 \text{ mm}^3$, sowie ein generisches Hautmodell angefertigt. Anschließend werden dielektrische und thermische Gewebeparameter dieser Organe, die in der gegenwärtigen Literatur fehlen, durch eigene Messungen an menschlichem Gewebe ermittelt. Die so gewonnenen hoch aufgelösten Teilmodelle werden schließlich in ein kommerzielles, auf dem ‚Visible Human Project‘ basierendes Kopfmodell eingebettet, das 47 Gewebesorten unterscheidet.

Als Strahlungsquelle bei der TETRA-Frequenz von 400 MHz dient das Modell eines generischen Handfunkgerätes mit Helix-Monopolantenne. Die Körper-Exposition wird bei zwei unterschiedlichen Haltungen des Gerätes untersucht: bei seitlicher Haltung am Ohr („Tilt“-Position) und bei Haltung vor dem Gesicht mit dem Antennenfußpunkt als worst case scenario dicht vor dem Auge.

Die numerische Berechnung der SAR-Werte und der Körpererwärmung auf Basis der standard Pennes bio-heat equation erfolgt mit Hilfe der kommerziellen FDTD Software „SEMCAD X“ der Firma SPEAG (Zürich) auf einem Diskretisierungs-Gitter mit variabler Ortsauflösung („Graded-Mesh“).

Bei seitlicher Haltung des Handfunkgeräts am Ohr und einer Sendeleistung von 1 W wird von einem maximalen über ein würfelförmiges Volumen mit 10 g Masse gemittelten SAR-Wert im Kopfmodell von 4 W kg^{-1} berichtet. Das entspricht bereits dem doppelten für Kopf und Rumpf empfohlenen Grenzwert nach ICNIRP

für die Allgemeinbevölkerung, und führt zu einer Erwärmung der Haut im Bereich der Ohrmuschel von ca. 1,8 K. Wegen der mit der Frequenz steigenden Leitfähigkeit wird bei der höheren Mobilfunkfrequenz von 1,85 GHz sogar eine spezifische Absorptionsrate von bis zu 20 W kg^{-1} beobachtet, wobei aber die resultierende Erwärmung der Ohrmuschel nur unwesentlich höher ist. Die Temperaturerhöhung von Organen die etwas weiter im Inneren liegen, wie Mittel- und Innenohr, beträgt weniger als 0,1 K, jene im Zentrum des Schädels in der Pinealdrüse sogar nur noch ca. 0,01 K. Dennoch ist die Erwärmung im Körperinneren insgesamt etwas stärker, als bei den höheren Mobilfunkfrequenzen, was auf die größere Eindringtiefe im TETRA-Frequenzbereich zurückzuführen ist.

Bei Haltung des Handfunkgeräts vor dem Gesicht mit dem Antennenfußpunkt dicht vor dem Auge und 1 W Sendeleistung stellt sich die stärkste Erwärmung von 0,3 K in der Linse und im Glaskörper ein. Dabei liegt der höchste SAR-Wert bei 1 W kg^{-1} . Im Sehnerv steigt die Temperatur um weniger als 0,1 K. Insgesamt ist die Erwärmung im Auge etwas geringer, als bei der höheren Mobilfunkfrequenz von 1,85 GHz.

Bei Ausschöpfung des lokalen Grenzwertes von 2 W kg^{-1} zeigt sich bei 400 MHz für alle Expositionsszenarien und Gewebesorten eine etwas stärkere Erwärmung, als bei den höheren Mobilfunkfrequenzen, insbesondere bei den im Inneren des Kopfes liegenden Organen. Das wird auf die homogenere Durchstrahlung im TETRA Frequenzbereich zurückgeführt. Im Auge wird in diesem Fall eine Erwärmung um 0,6 K vorhergesagt. Auch der Einfluss von unterschiedlichen Durchblutungsraten und Umgebungstemperaturen, sowie an/aus Zyklen wird betrachtet, wobei sich die Temperatur im Auge im ungünstigsten Fall um knapp 1 K erhöht.

Die häufig berichtete Wärmeempfindung bei direktem Hautkontakt mit dem Funkgerät wird nach Schmid und Kollegen nicht primär durch die Absorption der elektromagnetischen Energie verursacht, sondern hauptsächlich durch die Verhinderung der Konvektion an der Haut-Oberfläche und durch die Wärmeabgabe des sich im Betrieb erwärmenden Funkgerätes.

Weiter wird darauf hingewiesen, dass die stark inhomogenen elektrischen Gewebeeigenschaften zu „SAR hot spots“ führen, also zu kleinen Gebieten, in denen aufgrund hoher Leitfähigkeit große spezifische Absorptionsraten auftreten. Diese führen aber nicht zu Temperatur hot spots, da ein effizienter Temperatur-Ausgleich stattfindet. Insofern sind die gefundenen SAR hot spots nur unter der Hypothese von nicht-thermischen, sondern direkt Feldstärke-bedingten gesundheitlichen Auswirkungen relevant.

Schließlich wird die erhebliche Empfindlichkeit der Simulationsergebnisse auf unterschiedliche Kopfmodelle, und auf die Unsicherheiten in den dielektrischen und thermischen Gewebeeigenschaften diskutiert.

LITERATURVERZEICHNIS

- Bundesnetzagentur. Frequenznutzungsplan. 2008.
- Chadwick P. Assessment of Specific Absorption Rates from Second Generation Airwave Equipment: TETRA radios and accessories. MCL; 2003.
- Chadwick P. Specific Absorption Rate Measurements in Vehicles. MCL; 2006.
- Christ A, Klingenböck A, Samaras T, Goiceanu C, Kuster N. The Dependence of Electromagnetic Far-Field Absorption on Body Tissue Composition in the Frequency Range From 300 MHz to 6 GHz. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 54: 2188-2195; 2006.
- Christ A, Samaras T, Klingenböck A, Kuster N. Characterization of the electromagnetic near-field absorption in layered biological tissue in the frequency range from 30 MHz to 6000 MHz. Phys Med Biol. 51: 4951-4965; 2006.
- Christ A, Samaras T, Neufeld E, Klingenböck A, Kuster N. SAR DISTRIBUTION IN HUMAN BEINGS WHEN USING BODY-WORN RF TRANSMITTERS. Radiation Protection Dosimetry 124: 6-14; 2007.
- Dimbylow P, Khalid M, Mann S. Assessment of specific energy absorption rate (SAR) in the head from a TETRA handset. Physics in Medicine and Biology 48: 3911-3926; 2003.
- ETSI. EN 300 392-2 Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI). 2007.
- Europäische Gemeinschaft. Empfehlung des Rates vom 12.7.1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz-300 GHz). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften 519/EG: 59-70; 1999.
- Georg R. Bestimmung der realen Exposition bei Handynutzung in teilgeschirmten Räumen im Vergleich zur Exposition unter günstigen Bedingungen im Freien. Ingenieurbüro für Telekom-Consult; 2006.
- Green AC, Scott IR, Gwyther RJ, Peyman A, Chadwick P, Chen X, Alfadhl Y, Tattersall JEH. An investigation of the effects of TETRA RF fields on intracellular calcium in neurones and cardiac myocytes. International Journal of Radiation Biology 81: 869-885; 2006.
- Hietanen M, Sibakov V. Electromagnetic interference from GSM and TETRA phones with life-support medical devices. Ann Ist Super Sanita 43: 204-207; 2007.
- ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics: 494-522; 1998.
- Kühn S, Cabot E, Christ A, Capstick M, Kuster N. Assessment of the radio-frequency electromagnetic fields induced in the human body from mobile phones used with hands-free kits. Physics in Medicine and Biology 54: 5493-5508; 2009.
- NRPB. Possible Health Effects from Terrestrial Trunked Radio (TETRA). NRPB; 2001.
- NRPB. Assessment of Specific Energy Absorption Rate (SAR) in the Head from TETRA Handsets. NRPB; 2003.
- Schmid G, Überbacher R, Preiner P, Samaras T, Mazal P, Jappel A, Baumgartner W, Tschabitscher M. Bestimmung der Expositionsverteilung von HF Feldern im menschlichen Körper, unter Berücksichtigung kleiner Strukturen und thermophysiological relevanter Parameter. Abschlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; 2006.
- Schmid G, Überbacher R, Samaras T. Radio frequency-induced temperature elevations in the human head considering small anatomical structures. Radiation Protection Dosimetry 124: 15-20; 2007.
- Smith R, Tattersall J, Bowditch S, Holden S, Green A, Scott I, Harrison P, Low D, Smith S, Grose R, Mifsud N. An Investigation of the Effects of the Airwave TETRA Signal on Cellular Calcium and Brain Function. Biomedical Sciences Dstl Porton Down, Salisbury; 2005.
- Wainwright P R. Computational modelling of temperature rises in the eye in the near field of radiofrequency sources at 380, 900 and 1800 MHz. Physics in Medicine and Biology 52: 3335-3350; 2007.

Wallace D, Eltiti S, Ridgewell A, Garner K, Russo R, Sepulveda F, Walker S, Quinlan T, Dudley S, Maung S, Deeble R, Fox E. Do TETRA (Airwave) Base Station Signals Have a Short-Term Impact on Health and Well-Being? A Randomized Double-Blind Provocation Study. *Environ Health Perspect online*: 44; 2010.